

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 13 日現在

機関番号：35308
研究種目：基盤研究(B) (一般)
研究期間：2013～2015
課題番号：25282180
研究課題名(和文) 荷重立位揺動運動における電気刺激応答筋電検出器を用いた筋肉の質評価システムの開発

研究課題名(英文) Development of the evaluation system of muscle quality using a electromyography signal acquiring device during weight-bearing standing-shaking-board exercise in combination with electrical stimulation

研究代表者
河村 顕治 (KAWAMURA, KENJI)
吉備国際大学・保健医療福祉学部・教授

研究者番号：40278974
交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,600,000円

研究成果の概要(和文)：周期的身体揺動刺激と筋電気刺激を同期して加えると運動負荷レベルが低くても遅筋と速筋の両方が活動し、下肢筋群全体に筋収縮を引き出すことが出来る。電気刺激がパルス波で刺激を行うことを利用して刺激の合間をぬって筋電図を拾う電気刺激応答筋電検出器を製作した。周期的身体揺動刺激と筋電気刺激の併用によって下肢全体の筋群を収縮させて筋電図を計測し、下肢筋の筋肉の質を評価できる非侵襲システムを開発した。計測した筋電波形の積分値は筋量を反映し、wavelet周波数解析による高周波成分は速筋の活動、低周波成分は遅筋の活動を反映する。このシステムを用いれば、筋の質の評価が行えるためサルコペニアの予防に有効である。

研究成果の概要(英文)：The study aimed to develop a evaluation system of muscle quality using a electromyography signal acquiring device that can acquire signal during weight-bearing standing-shaking-board exercise in combination with electrical muscle stimulation. Based on the fact that voluntary movement usually begins with the contraction of slow-twitch muscle fibers whereas contraction induced by an electric stimulus begins with fast-twitch muscle fibers, we developed a novel training method of active CKC exercise on a shaking board while an electric stimulus is applied to the muscles. Since electrical stimulation output can affect EMG signal acquisition, EMG signal were recorded during the schedule of an interval of the electrical stimulation. Biphasic 20Hz pulses were employed in order to induce contractions of the lower extremity muscle at a maximally tolerated current level. Using integration analysis and wavelet frequency analysis, a evaluation system of muscle quality was developed.

研究分野：リハビリテーション科学

キーワード：サルコペニア 筋肉の質 周期的身体揺動刺激 電気刺激 電気刺激筋電応答 筋電図

1. 研究開始当初の背景

本格的な超高齢社会を迎える本邦において加齢性筋肉減弱症(サルコペニア)の改善および予防は喫緊の課題である¹⁾。サルコペニアでは加齢や不活動により筋線維の再生能力が低下し筋量が減少するだけでなく、速筋線維が選択的に萎縮して筋肉の質そのものが変化する。その予防のためには筋量だけでなく筋肉の質(muscle quality)の評価が強く求められている。我々は周期的身体揺動刺激とそれに同期した電気刺激を同時に加えることにより、低レベルの刺激でありながら下肢筋群全体の遅筋と速筋の両方を活性化する方策を研究してきた^{2,3)}。

従来技術では筋肉の質を調べるためにはバイオプシーを行って直接筋組織を取り出し顕微鏡で検査するしかない。これは地質調査に例えるとボーリング調査で地盤を直接掘り出すことに等しい。地質調査ではボーリング調査以外に物理探査の技術があり「大地が発する物理現象や、大地に対して人為的に発生させた物理現象の反応を測定し、これを解析することによって、地下の状況を探査する」ことが可能である。例えば地震探査では人工的に地震を発生させ、その伝播を測定し、これを解析することにより、地盤の地震波速度構造・音響インピーダンス構造を把握することができる。これにヒントを得て、これまで存在しなかった非侵襲的な筋肉の質評価を、地震探査による地質調査のように、周期的身体揺動運動時に下肢筋群を電気刺激することにより発生する筋電図を計測することで可能にできるのではないかと考えた。

2. 研究の目的

本研究の目的は、荷重立位揺動運動時の電気刺激筋電応答を計測することにより筋肉の質評価を行うことのできる安全な非侵襲システムを開発することである。

本研究の独創的な点はこれまで存在しなかった非侵襲的な筋肉の質評価を、地震探査による地質調査のように、周期的身体揺動運動時に下肢筋群を電気刺激することにより発生する筋電図を計測することで可能にするというものである。電気刺激の合間をぬって筋電図を拾う電気刺激応答筋電検出器を新たに製作することで、下肢筋群の筋肉の質の解析が可能になる。周期的身体揺動刺激と筋電気刺激を同期して加えると下肢筋全体が反応するため、計測した筋電波形の積分値は筋量を反映し、周波数解析による高周波成分は速筋の活動、低周波成分は遅筋の活動を反映すると考えられる。

3. 研究の方法

(1) 荷重立位周期的水平揺動刺激の負荷方法

水平揺動刺激装置はモーターによる円盤の回転を床板に伝える仕組みで、サイン波での周期的に立位の被験者の足部を前後に揺

らす刺激を加える。水平揺動刺激装置は振幅を 40 mm (揺動ストローク 80mm) 振動速度を 1 秒間に 0.3 から 3 回転(0.3 ~ 3 rps) の速さまで上げる事ができる。

安全のために緊急停止スイッチと転倒防止懸架装置を設けた。さらに、床反力計と 3 次元動作解析装置基幹ソフトウェア Cortex を導入して、荷重立位揺動運動時の身体の運動と床反力を計測するシステムが確立できた(図 1)。

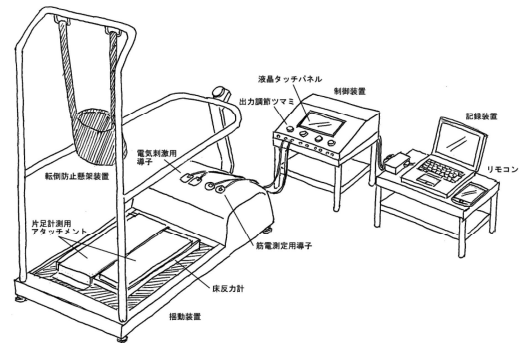


図 1 : 電気刺激併用型水平揺動運動装置

(2) 筋電気刺激の負荷方法

電気刺激チャンネル数は 4 ch で表面電極を用いて低周波電気刺激を行う。刺激強度は 0~35mA、通電時間は 0.5~30 秒とし、それぞれ出力調整でチャンネル毎に調整できるようにした。水平揺動刺激装置からモーターによる円盤の回転のタイミング信号を取り出し、揺動板前端のタイミングと後端のタイミングのどちらかを選択して電気刺激を行う。揺動板前端および後端のタイミングから電気刺激出力までの遅れ時間(Ts)もチャンネル毎に設定できるようにした。刺激周波数は 20 Hz より低い周波数では個々の刺激パルスによる単収縮が完全に融合せず、50 Hz より高い周波数では筋収縮は安定し強くなるが筋疲労が早期に生じてしまうため 20 Hz 固定とした(図 2)。

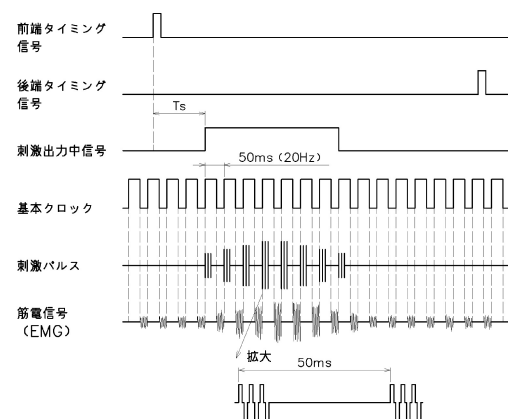


図 2 : 信号出力波形の概念図

先行研究によると刺激周波数 20 Hz の条件で大腿四頭筋を 1 秒刺激、1 秒休止サイクルの刺激パラメーターで刺激したところ酸素

摂取量が刺激前の2倍まで上昇したという。例えば、正弦波による水平動揺刺激を0.5Hzで行い、それに同期して電気刺激を加えることができれば、上記の条件でリズムカルに電気刺激が行える。このように、電気刺激を正弦波の水平動揺刺激と同期させることによって自然な電気刺激が可能となる。

(3) 電気刺激応答筋電検出器の製作

揺動運動において電気刺激を併用した時の筋活動を計測するために『電気刺激応答筋電検出器』を製作した。たとえば大腿直筋を電気刺激した時にハムストリングがどのように活動するかを通常の筋電図で計測しようとしても刺激波を拾うばかりで全く無益である。製作したシステムは電気刺激がパルス波で刺激を行うことを利用して、刺激の合間をぬって筋電図を拾うものである。20Hzの電気刺激に合わせて電気刺激出力と筋電信号測定のタイミングをすべてのチャンネルで同期させるための信号である基本クロックを20Hzに設定した。基本クロックに合わせて刺激パルスのないタイミングで筋電信号を計測するシステムを製作した。

筋電検出はより多くの筋活動を捉えるために4チャンネルとした。本研究のEMG計測は、積分解析および周波数解析を行った。

4. 研究成果

完成した電気刺激応答筋電検出器で得られた筋電波形の積分値は十分実用性があり、電気刺激時の筋収縮の強さを評価できることが確認できた。

筋肉の質を解析するには刺激に反応した筋電図の周波数解析が必要である。電気刺激がパルス波で刺激を行うことを利用して刺激の合間をぬって筋電図を拾う電気刺激応答筋電検出器を製作したが、20Hzの電気刺激に合わせて電気刺激出力と筋電信号測定のタイミングをすべてのチャンネルで同期させるための信号である基本クロックを20Hzに設定したところ、FFT周波数解析の結果、筋電信号に20Hzの倍数のノイズが発生することが判明した。そこで20Hzの周波数を遮断するフィルターを追加したが、ノイズを完全に除去することはできなかった。

ノイズを排除して正確な周波数解析を行うために、信号をBNCケーブルで引き出し、TRIASシステム(DKH)においてUSB接続AD変換ユニットを用いてAD変換を行い、1000Hzのサンプリング周波数で筋電計測を行いノートPCにデータを記録保存した。保存されたデータをCSVファイルフォーマットでエクスポートし、解析を行った。得られた筋電信号は20Hzの基本クロックによって切り出されたものであり20Hzの定間隔で隙間を持つため、まず筋電信号部分のみを切り出して連結し、通常の連続した筋電図の形に変換した。その筋電データをwavelet周波数解析の手法を用いてノイズの影響を極力排除して周波数解析を行った。使用したのはリアルタイム

wavelet周波数解析&積分解析ソフトKm-Mercury(メディエリアサポート企業組合)であり、0.125秒の単位時間で解析を行った。その結果、ノイズの影響を受けない周波数解析が行え、電気刺激前と電気刺激後と比較して、中間周波数が増加する現象が確認できた。21歳の健常成人男性に膝屈曲60°のスクワット姿勢をとらせて、右大腿直筋の筋腹やや遠位に筋電図表面電極を貼付した状態で表面電極を間にして近位と遠位に刺激電極を貼付した。電気刺激を行わない状態での右大腿直筋随意収縮筋電図のwavelet周波数解析結果を図3に示す。さらに、同じ膝屈曲60°のスクワット姿勢で電気刺激を行った状態での右大腿直筋随意収縮筋電図のwavelet周波数解析結果を図4に示す。図4では図3に比べてどの周波数帯でもパワーが高値を示しているが、特に高周波成分が高い値を示している。大腿直筋は二関節筋であり膝屈曲60°のスクワット姿勢では速筋はほとんど収縮しない。電気刺激を加えると速筋が刺激され収縮する。その結果高周波成分が高まり、その変化をこのシステムは捉えることができた。

筋電信号部分のみを切り出して連続した筋電図の形に変換しwavelet周波数解析を行うことで、目的である筋肉の質解析ができるシステムが完成した。

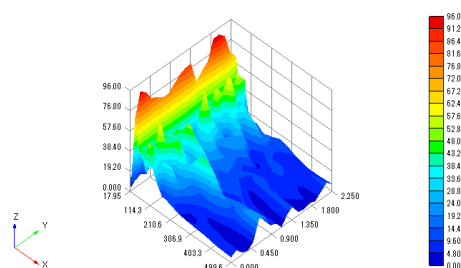


図3：電気刺激を行わない状態での右大腿直筋随意収縮筋電図のwavelet周波数解析結果(X軸：周波数、Z軸：パワー、Y軸：時間)

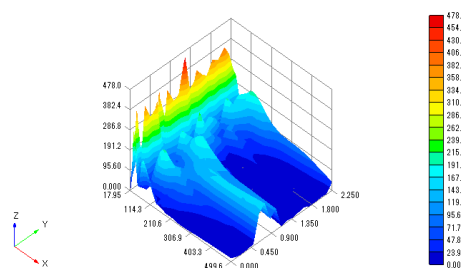


図4：電気刺激を行った状態での右大腿直筋随意収縮筋電図のwavelet周波数解析結果(X軸：周波数、Z軸：パワー、Y軸：時間)

周期的身体揺動刺激と筋電気刺激を同期して加えると下肢筋全体が反応するため、計

測した筋電波形の積分値は筋量を反映し、周波数解析による高周波成分は速筋の活動、低周波成分は遅筋の活動を反映するという仮説に基づき電気刺激応答筋電検出器を用いた筋肉の質評価システムを開発した。

リハビリテーションで利用される機能的電気刺激 (Functional electrical stimulation; FES) については未だに制御面で困難な問題が多い。さらに Dimitrijevic は、「FES は多チャンネル電気刺激を用いて麻痺筋を制御し機能再建を目指す電気生理学的装具という従来の姿から、脳の可塑性を促進するニューロリハビリテーションの modality に変貌してきている」と述べている。この様に、生体に対する電気刺激は近年脳の可塑性を促進するニューロリハビリテーションの手法という側面を持つようになってきている。したがって、筋電気刺激時の筋電応答を分析できるシステムの開発は非常に重要な意義を持つものと考えている。

また、糖尿病における血糖値抑制のために電気刺激による不随意収縮と随意収縮を組み合わせた方法 (Electrical Stimulation Voluntary Contraction; ESVC) の効果が注目されている。ESVC は筋力強化に対して電気刺激単独よりも効果的であり、糖代謝に関して効果が立証されている随意的筋収縮と電気刺激による筋収縮を併用した手法であることからその糖代謝への相乗効果が期待できる。既に健常者を対象とした骨格筋への低周波刺激の糖・エネルギー代謝活性化への影響や、電気刺激による糖取り込み率などの報告がある。こうした筋電気刺激の血糖抑制効果の研究においても、電気刺激応答筋電検出器は新たな成果をもたらすと考える。

電気刺激応答筋電検出器では電気刺激の電位と筋肉が発生する筋電を分離する必要がある。我々は基本クロックに合わせて刺激パルスのないタイミングで筋電信号を計測するシステムを製作した。

開発した電気刺激応答筋電検出器で得られた筋電波形の積分値は本来の筋活動と筋電気刺激によって引き起こされた筋活動の総計であり、筋出力の状態を推定できる。したがって、筋量の評価が可能だと考える。

電気刺激応答筋電検出器で得られた信号の筋電信号部分のみを切り出して連結し連続した筋電図の形に変換し、その筋電データの周波数解析を行うことによって筋の質の評価が行える。永田と Komi らは、周波数パワースペクトルは運動単位の活動状態を定量化したものであり、遅筋線維を支配する運動単位の活動は主に低周波成分に現れ、速筋線維を支配する運動単位の活動は高周波成分に現れると述べている。しかし、通常の FFT 解析ではノイズの混入の問題が生じるため、ノイズの影響をできるだけ排除するために wavelet 周波数解析を利用する必要があった。サルコペニアでは筋量が減少するだけでなく、速筋線維が選択的に萎縮して筋肉の質そ

のものが変化するため、wavelet 周波数解析することによって低周波成分が優位になる。

このシステムを用いれば、筋の質の評価が行えるためサルコペニアの早期スクリーニングが行える。

引用文献

- 1) Rosenberg IR (1989) Summary comments. Am. J. Clin. Nutr. 50: 1231-1233 ISI
- 2) 梅居洋史、河村顕治 (2012) 高齢者に対する筋電気刺激併用周期的水平揺動刺激によるトレーニングの運動効果. 運動療法と物理療法 23(1) :34-40
- 3) Kingo T, Masamichi H, Toshihiro F et al. (2012) Early Rehabilitation with Weightbearing Standing-shaking-board Exercise in Combination with Electrical Muscle Stimulation after Anterior Cruciate Ligament Reconstruction. Acta Med Okayama 66(3):231-237

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計7件)

河村 顕治、膝関節痛に対する運動療法 Closed Kinetic Chain Exercise、Locomotive Pain Frontier、査読無、Vol.5 No.1、2016、24-28

河村 顕治、【ロコモの視点を交えた変形性膝関節症】リハビリテーション、Loco Cure、査読無、1 巻 2 号、2015、138-143

井上 茂樹、平上 二九三、元田 弘敏、河村 顕治、加納 良男、培養細胞における電磁波刺激および温熱刺激によるシグナル伝達系の働きについて、吉備国際大学保健福祉研究所研究紀要、査読無、16 号、2015、27-31

岡田 裕、田中 繁治、森下 元賀、河村 顕治、森本 正治、富山 弘基、杉山 廣和、椿原 彰夫、脳血管障害片麻痺歩行の麻痺側立脚期における短下肢装具背屈制動の効果 シングルケースデザインによる検討、日本義肢装具学会誌、査読有、31 巻 1 号、2015、52-58

加納 良男、平上 二九三、元田 弘敏、小池 好久、井上 茂樹、河村 顕治、外部刺激受容体の細胞内シグナル伝達変異細胞を用いた解析、吉備国際大学保健福祉研究所研究紀要、査読無、15 号、2014、33-37

加納 良男、平上 二九三、元田 弘敏、小池 好久、四宮 美佐枝、井上 茂樹、河村 顕治、Akt 酵素の活性に変異をもつ

新しいPC12細胞の出現、吉備国際大学保健福祉研究所研究紀要、査読無、2013、14号、2013、45-48

河村 顕治, 加納 良男、変形性膝関節症の疼痛に対する温熱と電気刺激併用による物理療法の効果、吉備国際大学保健福祉研究所研究紀要、査読無、2013、14号、2013、33-36

[学会発表](計9件)

Kawamura K, Kano Y、Surface electromyographic evaluation of quadriceps setting and seating-belt press exercise、ISPO World Congress 2015、June 22-25, 2015、Lyon, France

Fujita R, Matsui Y, Ota S, Kawamura K, Motoda H, Saito K, Harada A.、Alignment characteristics in patients with knee osteoarthritis-Comparison with healthy older adults.、2015 OARSI World Congress、4.30-5.3, 2015、Seattle, WA, USA

林 正典, 今谷潤也, 川上幸雄, 森谷史朗, 前田和茂, 桐田由季子, 鈴木美穂, 高橋欣吾, 宇川 諒, 河村顕治、膝前十字靭帯再建術の早期リハビリテーションの工夫、第40回日本整形外科スポーツ医学会学術集会、2014年9月12日~14日、東京都 虎ノ門ヒルズ

Kawamura K, Kano Y、EFFECT OF WEIGHT-BEARING STANDING-SHAKING-BOARD EXERCISE IN COMBINATION WITH ELECTRICAL MUSCLE STIMULATION ON MUSCLE STRENGTH, GAIT AND BALANCE IN ELDERLY SUBJECTS、The XX Congress of the International Society of Electrophysiology and Kinesiology、15 - 18 July 2014, Rome - ITALY

河村 顕治、荷重立位周期的揺動運動における姿勢制御の解析、第51回日本リハビリテーション医学会学術集会 2014年6月6日、名古屋国際会議場

山下智徳, 河村顕治, 額田勝久、周期的水平揺動刺激がFunctional Reach Testでの下肢運動戦略に与える効果、第49回日本理学療法学会学術大会 2014年5月30日~6月1日、パシフィコ横浜

Kenji Kawamura, Yoshio Kano、Electrical Stimulation Control Nerve Regeneration via the p38 Mitogen-activated Protein Kinase and

CREB、The ORS 2014 Annual Meeting, March 15-18, 2015、New Orleans, Louisiana, USA

河村 顕治, 加納 良男、高齢者に対する筋電気刺激併用周期的水平揺動刺激によるトレーニング、第18回岡山リサーチパーク研究・展示発表会、2014年3月4日、テクノサポート岡山

加納 良男, 河村 顕治、健康寿命を延伸させる新たな遺伝子の発見、第18回岡山リサーチパーク研究・展示発表会、2014年3月4日、テクノサポート岡山

[その他]

ホームページ等

河村顕治研究室

<http://kawamura-md.jimdo.com>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

河村 顕治 (KAWAMURA KENJI)

吉備国際大学・保健医療福祉学部・教授

研究者番号：40278974

(2) 研究分担者

加納 良男 (KANO YOSHIO)

吉備国際大学・保健福祉研究所・教授

研究者番号：70116200