

筋電計を用いて測定する下肢の筋活動から見た 健康増進のための効果的な運動法の検討

国立長寿医療研究センター 松井 康 素
(共同研究者) 名古屋大学 杉浦 英 志
日本福祉大学 鈴木 康 雄

An Investigation About the Effective Exercise Methods for Health Promotion Through the Measurement of Lower Limb Muscle Activities with EMG (Electromyography)

by

Yasumoto Matsui

Department of Advanced Medicine

National Center for Geriatrics and Gerontology

Hideshi Sugiura

Department of Physical Therapy, School of Health Sciences,

Nagoya University

Yasuo Suzuki

Department of Welfare Engineering, Faculty of Health Science,

Nihon Fukushi University

ABSTRACT

Walking is widely conducted among people as an exercise for health promotion. In this study, in order to investigate more effective way of exercise compared to normal walking, muscle activities of the lower limb were measured utilizing electromyography so as to study the quantitative and qualitative analyses about muscle activities during exercises. Measurements of muscle activities during SLR exercise and during the

examinations of the knee extension and flexion maximum strength in sitting position by electromyography showed that quantitative and qualitative evaluation of the muscle activities were possible. It also revealed that the amount or quality of muscle activities varies depending on the muscle difference. In particular, quality of muscle activities change by aging or it alters (frequencies decline) during continuous muscle contraction. In addition, we indicated the difference of the way or amount of muscle activities about several muscles in the lower extremities, depending on the normal walking, fast walking with wider stride or fast walking with increased pitch. And the amount of muscle activities was found to be increased during fast walking, both ways, and slow jogging compared to those during normal walking, and the muscles on which statistically significant increases were observed to be different depending on the way of fast walking or slow jogging. From these not merely conducting normal walking, but adopting different way of fast walking or slow jogging will lead to the training of various type of muscles and attain more effective exercise.

要 旨

健康増進のための運動として、ウォーキングが広く行われているが、より効果的な方法を検討するために筋電図による下肢筋活動の測定を行い、量的、質的な評価や運動時に活動する下肢筋肉の違いを調べた。SLR 運動ならびに座位での膝伸展屈曲筋力測定時の下肢の筋活動を筋電計測により、量的また質的に評価をすることが可能であることが示され、筋肉の種類により活動量ならびに活動の量や質が異なり、特に筋活動の質について、加齢による変化や筋活動を継続することによる変化を示すことができると考えられた。また通常歩行と2種類の速歩（歩幅増、ピッチ増）による各種筋肉の活動の様子の違いや活動量の違いを示した。さらには、通常歩行と比べ、2種類の速歩、スロージョギングでは筋活動が増えるが、有意の差を持って活動量が増える筋はそれぞれ異なっており、通常のウォーキングのみでなく、様々な歩き方やスロージョギングを間に取り入れることで、異なった種々の筋肉を鍛えることに繋がり、

より有効な運動となることが示された。

諸 言

中壮年期における健康増進、生活習慣病予防のための運動として、最も広く行われているのはウォーキングである¹⁾。しかし、通常のウォーキングは、短時間では消費されるエネルギー量は少なく、例として体重 50kg の人が時速 4 km で 20 分歩いた場合の消費カロリーは 53kcal 程度である。消費エネルギーを増やすには多くの歩数が必要となる。また、効果を上げるためにウォーキングの間に速足を取り入れたり、あるいはスロージョギングを勧める報告もある²⁾。一方、高齢者が急速に増えつつある現在、高齢期の健康維持やロコモ予防の重要度も増している。高齢期には主に下肢の筋力が低下する³⁾ため、脚力を鍛える運動が大切で、こうした目的でもウォーキングが推奨される場合も多い。しかし通常のウォーキングによる筋力増強効果はやはり顕著ではない。膝痛や下肢痛などで長く歩くことが難しい場合もある。これまで、健康増進のための運動効果を論じる際

は、ターゲットが生活習慣病の予防であったこともあり、肥満解消、すなわち体内の脂肪量を減らすためのエネルギー消費、が注目されることが多かった。しかし、脂肪を減ずること以上に本質的で重要な点は運動により良質な筋肉を増すことである。この意味からも、運動時に下肢の筋肉の活動量を増やすという観点がとても重要となる。しかしながら、運動時の下肢の筋肉活動量に着目して運動効果が議論されることは少なく、そしてまた働く筋肉の違いや、筋肉の質（速筋、遅筋といった区別）の違いを論じた上で、どんな運動を行うことがより効果的であるかの検討もあまりなされてきていない。こうした視点は、高齢者の筋力増強目的の運動を考える上ではいっそう重要であり、また、筋力以上に急速に低下するバランス力の回復に必要な筋力を考えるためにはさらに重要となる。本研究は、こうした背景をもとに、健康増進のため身近に行いやすい幾つかの運動について、どういった運動がより効果があるかを明らかにするため、運動時の下肢の各種筋肉の活動を筋電計と筋力計で測定し⁴⁾ 解析を行った。

1. 研究方法

下肢の大腿および下腿における筋活動について、筋電計測を行うことにより、以下の3つの観点から検討を行った。

- (1) 筋活動量についての検討
- (2) 筋活動の質についての検討
- (3) 筋電計測による歩行等の動作時における筋活動の変化（パターン）についての検討

計測に用いた表面筋電計は多チャンネルテレメータシステム WEB7000（日本光電製）で、サンプリング周波数は1kHzとし、大腿・下腿部の筋活動の状態を測定した。

1.1 筋活動量について

評価筋として、膝関節伸展に関わる筋（大腿直

筋、内側広筋、外側広筋）および、膝関節屈曲に関わる筋（半腱様筋、大腿二頭筋、腓腹筋（外側頭））。被験者は、20~30代の若年女性7名と高齢女性24名（平均年齢76.0歳、膝伸展・屈曲筋力測定時）。

A) 筋力と筋電波形積分値の相関

最大膝伸展筋力 vs 膝伸筋群の筋電波形積分値の和、および最大膝屈曲力 vs 膝屈筋群同積分値の和との相関を Pearson の相関係数で、若年者と高齢者を併せ、検討。

B) 大腿直筋の収縮に対する比を内側広筋と外側広筋で若年者と高齢者を別に t 検定にて検討。

測定肢位は、座位で下垂した下腿の足関節直上にストラップをかけ3秒間の等尺性最大伸展力発揮時に若年者、高齢者別で両者を比較。

1.2 筋活動の質について

C) SLR 運動時および膝 90 度屈曲位での等尺性最大膝伸展、屈曲運動時の筋電図信号を上記の6つの筋および前脛骨筋について FFT 高速（フーリエ変換 - Fast Fourier Transform）にて周波数の中央値を求め⁵⁾、筋肉毎の周波数の中央値の比較を若年者（16名）の平均値で検討（計測3秒中、後半2秒採用、筋力発揮時の筋電図信号の RMS（Root mean square）が筋力発揮前の RMS の3倍以下である筋電図は不採用）

D) C) と同じく筋電図の FFT による周波数の中央値を若年者と高齢女性とで t 検定にて比較。（高齢女性 82 名（平均年齢 75.3 歳）と若年女性 20 名）

E) SLR 運動は座位にて膝を伸展、足関節を背屈させ、その姿勢を10秒以上保持させた際の周波数中央値の時間変化率の平均を筋肉毎に求め、筋肉間で比較をした。（若年女性 16 名）

1.3 歩行等の動作時における筋活動について

通常歩行、速歩（歩幅増、ピッチ増の2種）、

スクワット（膝関節 60 度屈曲）、階段昇り動作、における下肢筋の筋活動を上記の 7 つの筋に大臀筋とヒラメ筋も加え筋肉毎に調べ、動作により使われる筋肉の筋活動を筋電 RMS にて検討する。

F) 時間的な推移を例示（21 歳、男性例）

G) 通常歩行に対し、歩幅増、ピッチ増の 2 種の速歩、およびスロージョギングにおいて、歩行 1 周期の間の最大の筋活動を RMS にて検討し、平均値を筋肉毎に比較し、通常歩行に比べどういう筋が、どの程度多く活動する必要があるかについて検討。（若年者、男女合計 10 名）

2. 研究結果

2.1 筋活動量

A) 筋力と筋電波形積分値の相関

膝伸筋群の筋電図波形積分値の和（大腿直筋 + 内側広筋 + 外側広筋）は膝伸展筋力と相関 ($r=0.669$) しており、屈筋群での同積分値の和（大腿二頭筋 + 半腱様筋 + 腓腹筋）は、膝屈曲筋力と相関 ($r=0.562$) していた（表 1）。

表1 膝関節伸展・屈曲筋力と筋電図波形積分値との関連

	3伸筋群の筋電図波形 積分値の和 (n=29)		3屈筋群の筋電図波形 積分値の和 (n=22)	
	相関係数	p	相関係数	p
膝関節 伸展筋力	0.669	<0.001**		
膝関節 屈曲筋力			0.562	<0.006**

B) 若年者においては、内側広筋と外側広筋の間で収縮量の差は認められなかったが、

一方高齢者では内側広筋の収縮の割合が外側広筋と比べ有意に低かった（表 2）。

表2 膝関節伸展時の内外側広筋の収縮の割合

		平均 ± 標準偏差 (%)	p
膝OA患者 (n=22)	内側広筋／大腿直筋	119.4 ± 46.2	<0.001**
	外側広筋／大腿直筋	219.8 ± 72.6	
若年健常者 (n=7)	内側広筋／大腿直筋	153.1 ± 63.8	<0.123
	外側広筋／大腿直筋	210.9 ± 115.3	

2.2 筋活動の質について

C) SLR 運動時の筋電図周波数の中央値の筋肉毎の比較

多重比較（Bonferroni）による検定では、内側広筋と外側広筋 ($p<0.01$)、内側広筋と大腿直筋 ($p<0.01$)、内側広筋と前脛骨筋 ($p<0.001$)、外側広筋と前脛骨筋 ($p<0.05$)、大腿直筋と前脛骨筋 ($p<0.05$) の間に有意な差があり（表 3）、また座位での膝 90 度屈曲位における等膝尺性最大膝伸展、屈曲運動時の周波数の中央値の筋肉毎の比較の結果、（Bonferroni による検定では、内側広筋と大腿直筋 ($p<0.05$)、内側広筋と大腿二頭筋 ($p<0.05$)、外側広筋と大腿直筋 ($p<0.05$)、外側広筋と大腿二頭筋 ($p<0.01$)、大腿直筋と大腿二頭筋 ($p<0.001$)、大腿直筋と半腱様筋 ($p<0.05$) との間で有意な差があった（表 4）。

表3 SLR運動時における各筋の筋電図周波数中央値

筋名	周波数中央値の平均 (Hz)	標準偏差
内側広筋	78.4	8.9
外側広筋	98.1	19.0
大腿直筋	95.4	15.1
前脛骨筋	119.5	25.3

表4 膝屈曲位における等尺性膝伸展・屈曲運動時における各筋の筋電図周波数中央値

筋名	周波数中央値の平均 (Hz)	標準偏差
内側広筋	70.4	14.0
外側広筋	70.3	9.8
大腿直筋	62.1	8.2
大腿二頭筋	90.5	19.8
半腱様筋	74.7	16.6

D) 筋電図信号の FFT による周波数の中央値を若年者と高齢女性とで t 検定にて比較。

筋電図周波数の中央値は、若年者に比べ高齢者では、内側広筋 ($p<0.001$)、外側広筋 ($p<0.05$)、

大腿直筋 ($p<0.01$) で有意に低く、腓腹筋 ($p<0.01$) で有意に高かった (図 1)。また大腿二頭筋、半腱様筋では有意差が見られなかった (図 2)。

E) SLR 運動は座位にて膝を伸展、足関節を背屈させ、その姿勢を 10 秒以上保持させた際の周波数中央値の時間変化率の平均を筋肉毎に求めた。

1 秒毎に平均した中央値より求めた回帰直線は図 3 の如くなった。

さらに、各筋の筋電図周波数中央値の時間変化率は表 5 のようであったが、Bonferroni による検定では、有意水準 5% による各筋間の筋電図周波数中央値の時間変化率に有意な差はなかった。

表5 SLR運動時における各筋の筋電図周波数中央値の時間変化率

筋名	周波数中央値の時間変化率の平均(Hz/s)	標準偏差
内側広筋	-0.43	0.65
外側広筋	-0.37	0.48
大腿直筋	-0.42	0.42
前脛骨筋	-0.60	0.59

2.3 歩行等の動作時における筋活動について

F) 通常歩行、速歩 (歩幅増、ピッチ増の 2 種)、階段昇り動作、スクワット (膝関節 60 度屈曲) における下肢筋の筋活動を筋肉毎に調べ、動作により使われる筋肉の筋活動を時間的な推移を筋電図の波形とともに RMS の値で外側広筋、半腱様筋、前脛骨筋、腓腹筋外側等について、通常歩行 (図

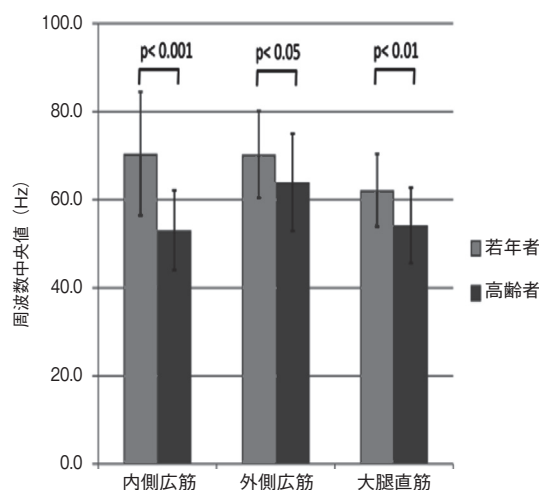


図1 膝伸展時のEMG周波数中央値若年者と高齢者(膝OA患者)の比較

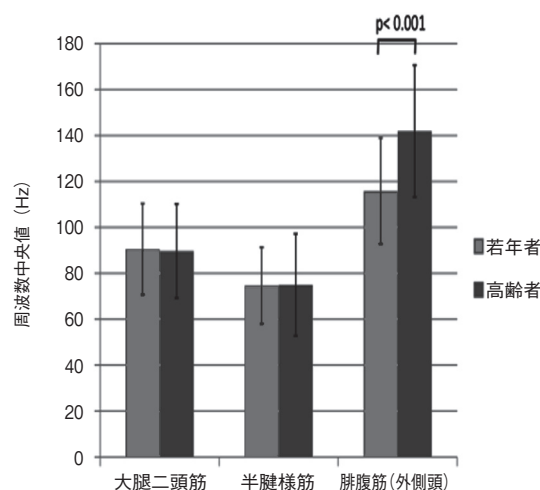


図2 膝屈曲時のEMG周波数中央値若年者と高齢者(膝OA患者)の比較

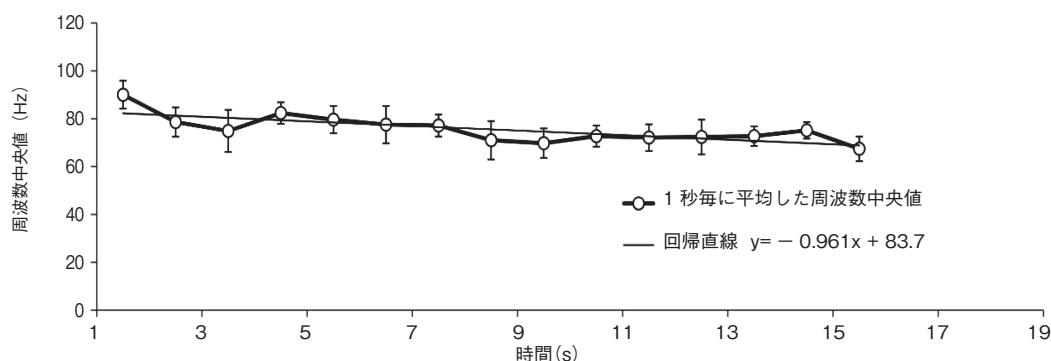


図3 各時刻における周波数の中央値

4A a~d, B a~d), ピッチ増による速歩 (図 5A a~d, B a~d), 歩幅増による速歩 (図 6A a~d, B a~d), スクワット動作 (図 7A a~d, B a~d) において例示し, また, 階段昇り動作については, 大腿直筋, 内側広筋, 外側広筋, 半腱様筋, 前脛骨筋, 腓腹筋外側頭について RMS で各筋肉の活動の推移を例示した (図 8 a~h)

G) 通常歩行と, 歩幅増, ピッチ増の 2 種の速歩, およびスロージョギングについて, 歩行 1 周期の間の最大の筋活動 (RMS で算出) を大腿直筋, 内側広筋, 外側広筋, 半腱様筋, 前脛骨筋, 腓腹筋外側頭, ヒラメ筋について筋肉毎に比較した.

まず, 通常歩行と歩幅増による速歩との比較を図 9 に示す. 全体的に筋活動は全ての筋で増加しており平均値でみると大腿四頭筋が 300% の増で表されたが, 統計的には, 通常歩行と歩幅増の速歩行間で半腱様筋とヒラメ筋においてのみ有意差が認められた. また, 通常歩行に対するピッチ増での速歩時の比較を図 10 に示す. やはり全体的に筋活動は全ての筋で増加していたが, 平均値の増加は歩幅増の場合より少ないようであるが, 通常歩行との間で, 大腿直筋と前脛骨筋の間で有意差が認められた.

さらに, 通常歩行とスロージョギングでの比較を図 11 に示す. やはり全体的に筋活動は全ての筋で増加していたが, 最大 RMS での平均値の増加は大きくないように見えるが, 通常歩行との間において大腿直筋と外側広筋とヒラメ筋で有意の差を認めた.

3. 考 察

健康増進あるいはロコモ予防のために, 国民の間で最も多く行われている運動はウォーキングである. しかし, 通常のウォーキングは, 短時間では消費されるエネルギー量は少なく, 消費エネルギーを増やすには多くの歩数や時間が必要となる. 効果を上げるためにウォーキングの間に速足

を取り入れたり, あるいはスロージョギングを勧める報告もあるが, それらがより有効であることの説明はあまりされていない. 本研究は, 運動によるエネルギー消費の多くは下肢筋肉の収縮活動によることに着目し, 筋電計を用いてその測定を行い, 筋活動を表示し, 運動効果に最も影響を与えると考えられる筋活動の見える化を試みた. 初めに, 筋電にて計測される筋電波形を積分することにより得られる値が発揮される筋力と相関することを, 膝関節最大伸展力, 屈曲力との相関があること (表 1) で確認をし, さらに, 膝関節の最大伸展筋力発揮時において, 内側広筋と外側広筋の筋活動が若年者と高齢者で異なることを示し (表 2), 筋肉別に筋電を測定する意義を筋活動量の検討において確認することができた. さらにまた, 筋電波形の周波数解析を行うことで筋収縮の質の検討を試みた. 膝伸展位での SLR 運動時と膝 90 度屈曲位での最大伸展, 屈曲筋力発揮時において FFT による筋毎の比較を行うことで, 周波数の平均値に差を認め (表 3, 4), 何らかの質的な変化を捉えることができた. これが遅筋と速筋の働く割合をそのまま表している⁶⁾ かどうかは, 本研究のみでは明らかではなく, 今後何らかの手段による検証が必要であるが, 興味ある所見として, 膝関節伸展位と屈曲位の違いか, または発揮している筋力の程度の違いによるものか是不明であるが, 特に大腿直筋の周波数が SLR 運動時には高く, 膝屈曲位での最大伸展測定時には低くなっていたことから, 運動の仕方により, 同一筋肉の中でも, 筋の収縮の仕方 (導入される筋線維の種類) に差があることが示唆された. さらに, 一般に加齢に伴い, 筋肉の量のみでなく, 質の劣化が知られている^{7,8)} が, 若年者と高齢者の比較では, 大腿四頭筋で周波数の低下を認め, このことは, 加齢にともない大腿四頭筋において速筋成分の割合が減少する⁹⁾ という過去の報告を筋電波形解析にて裏付ける結果である可能性があ

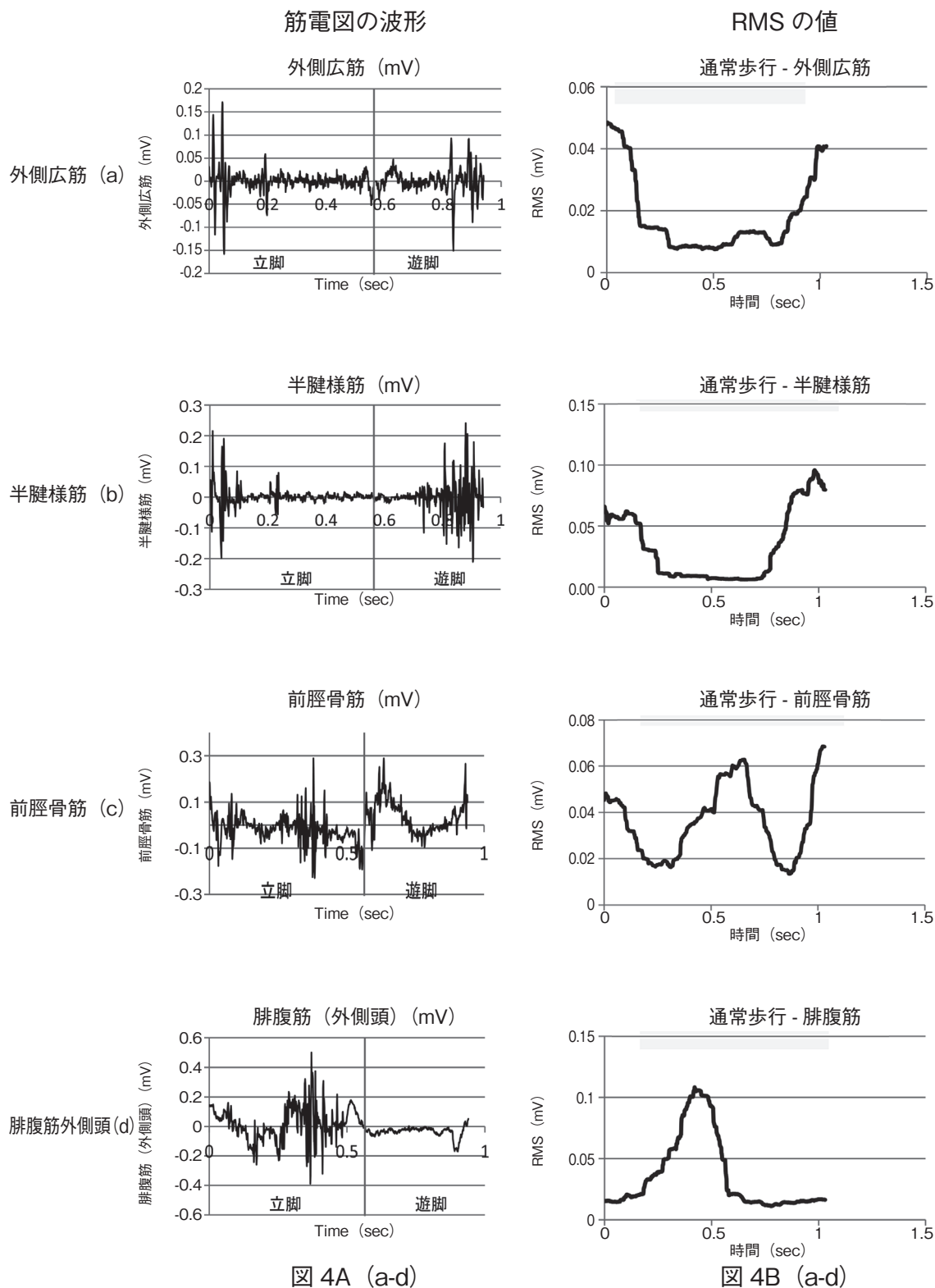


図 4A, B 通常歩行 1 サイクルにおける筋電の推移

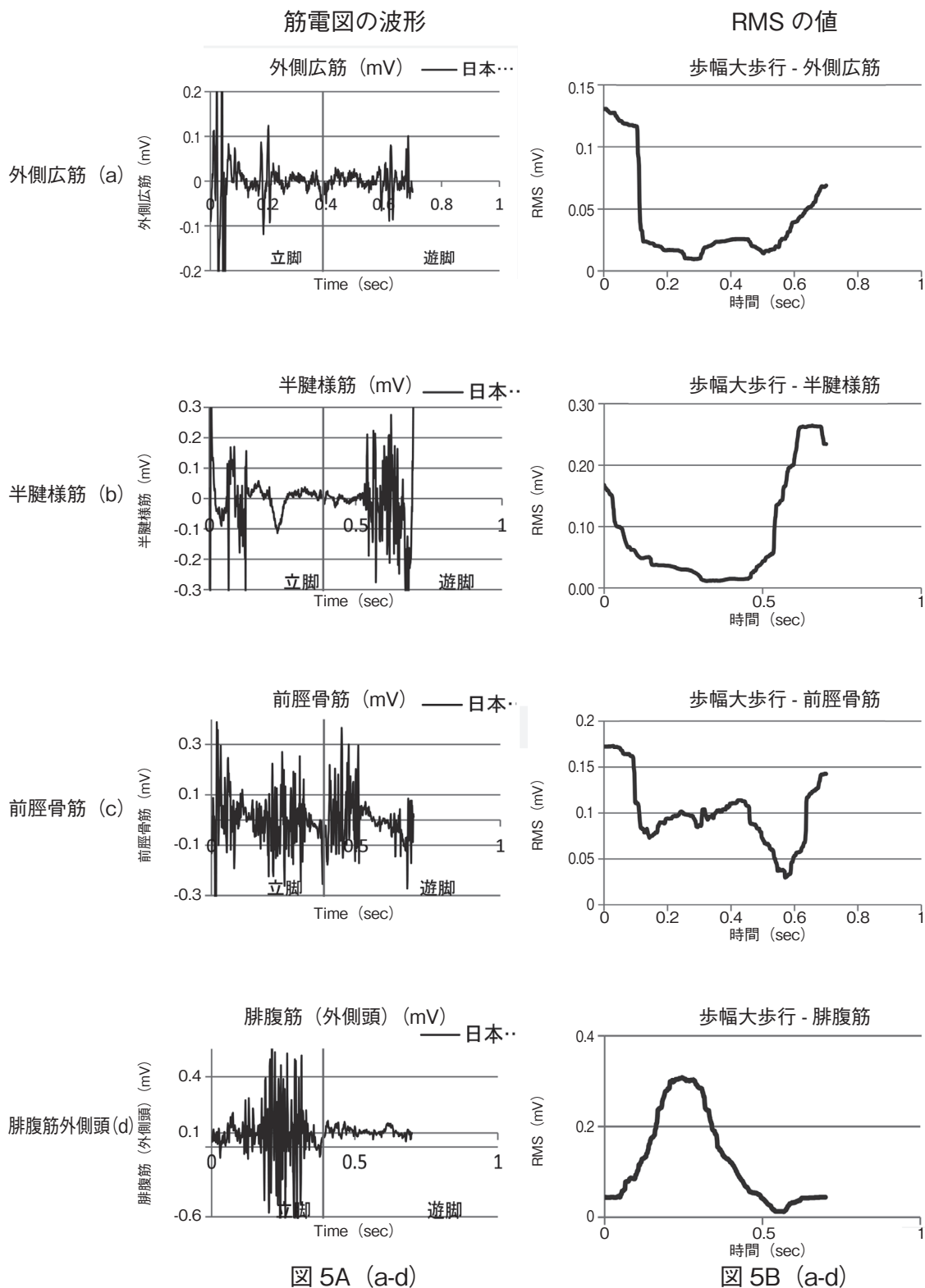


図 5A, B ピッチ増による速歩 1 サイクルにおける筋電の推移

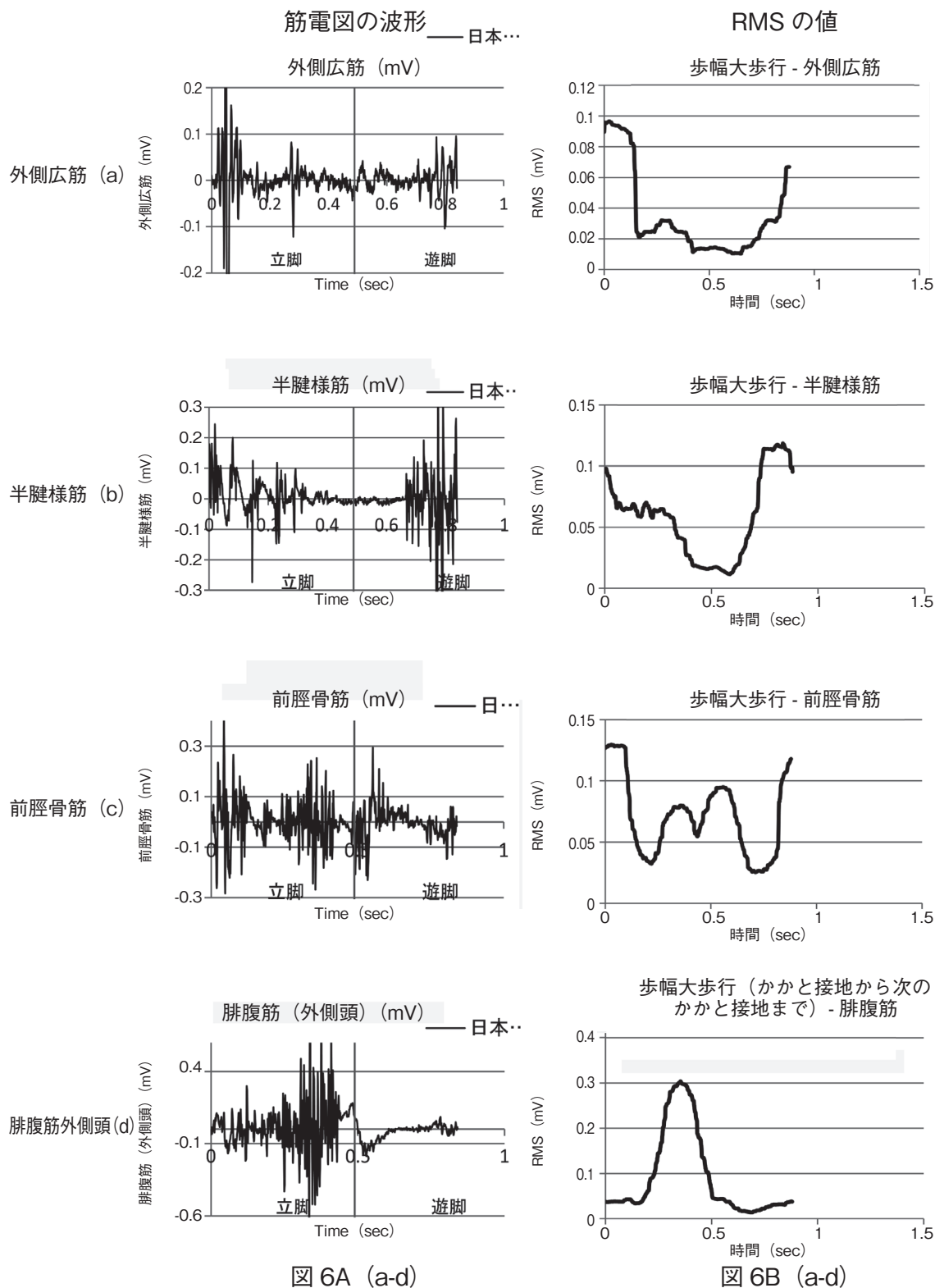


図 6A, B 歩幅増による速歩 1 サイクルにおける筋電の推移

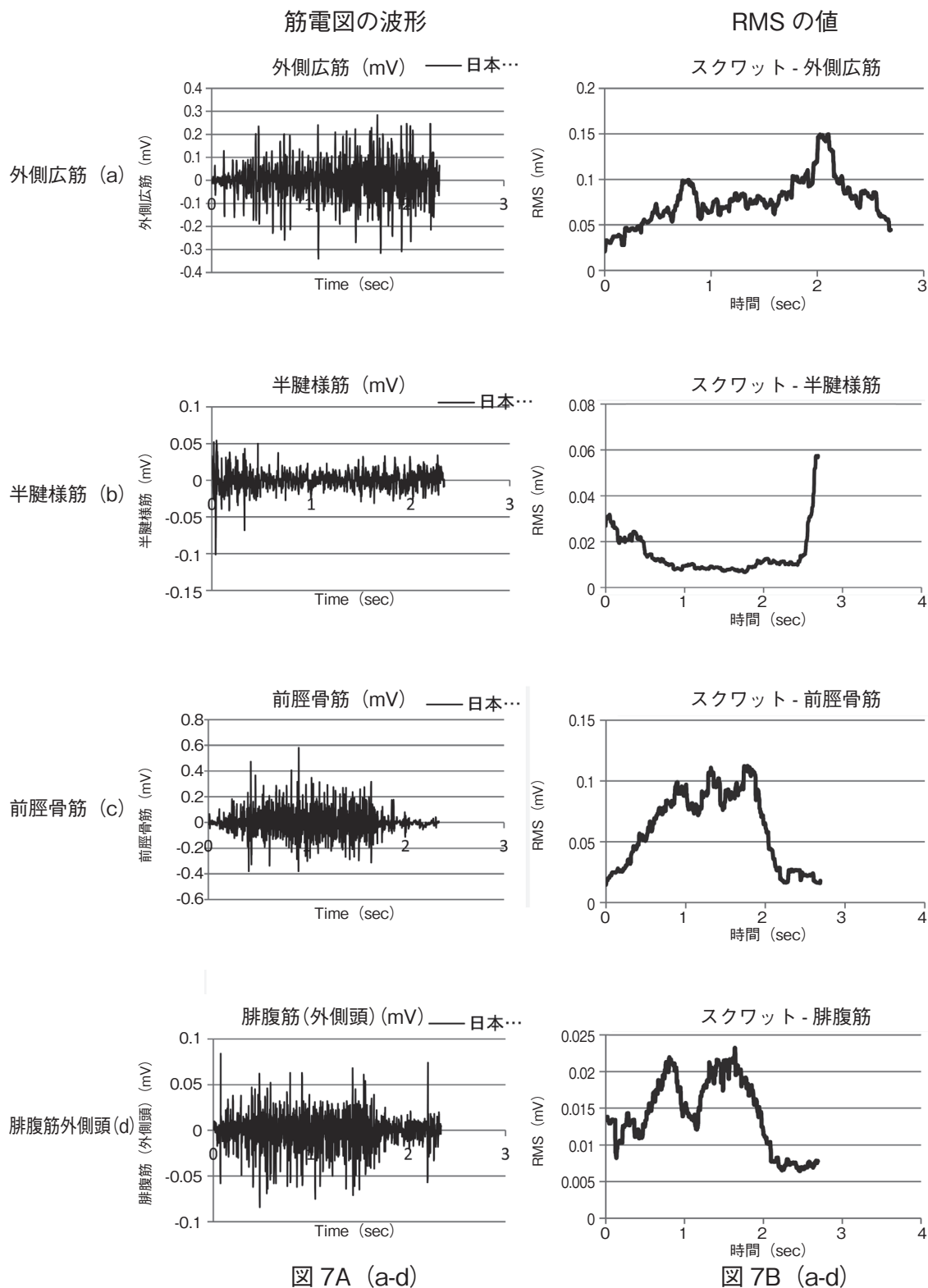
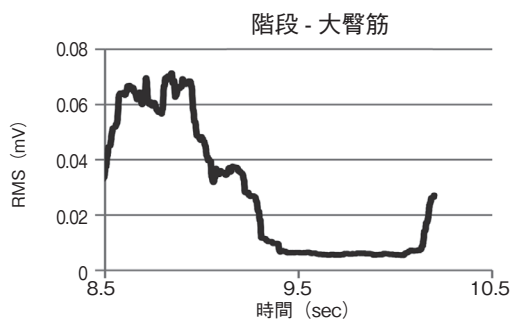
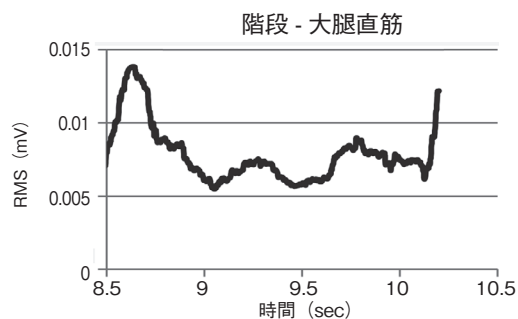


図 7A, B スクワット 1 サイクルにおける筋電の推移

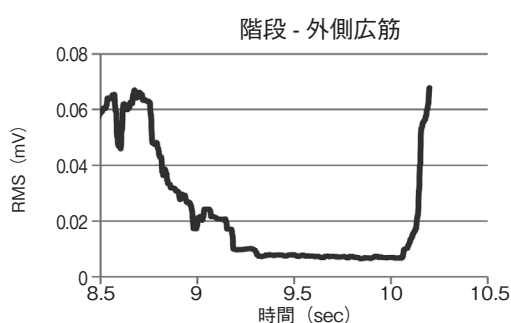
大臀筋 (a)



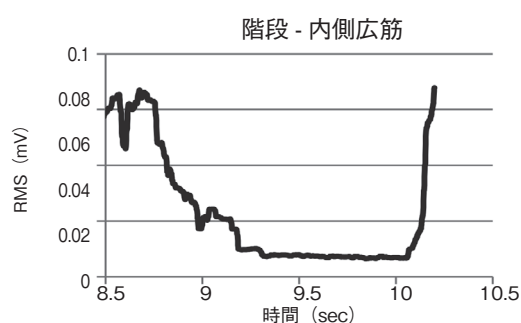
大腿直筋 (b)



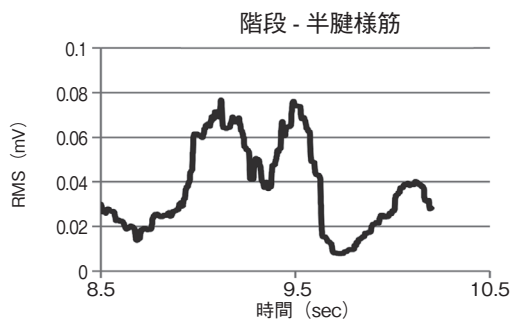
外側広筋 (c)



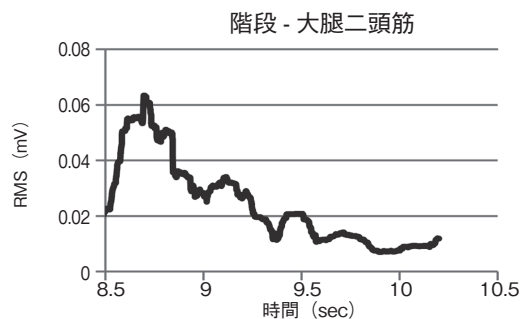
内側広筋 (d)



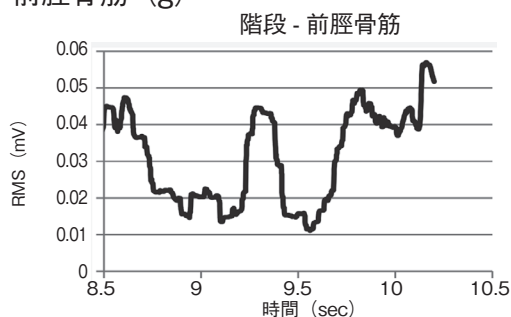
半腱様筋 (e)



大腿二頭筋 (f)



前脛骨筋 (g)



腓腹筋外側 (h)

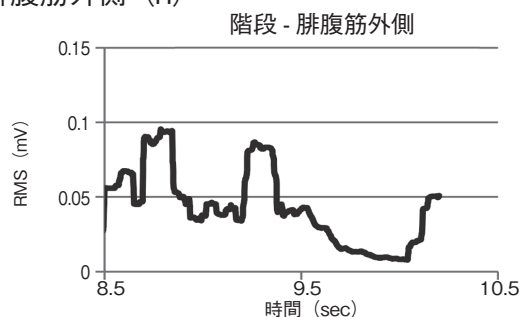


図8 (a-h) 階段昇り動作 1サイクルにおける筋電の推移

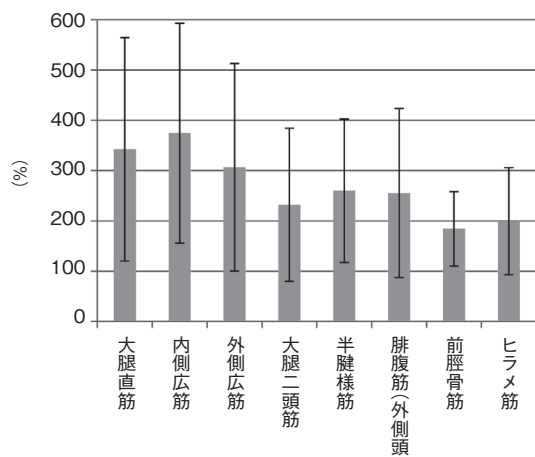


図9 通常歩行に対する歩幅増での速歩時の最大筋電RMSの増加割合

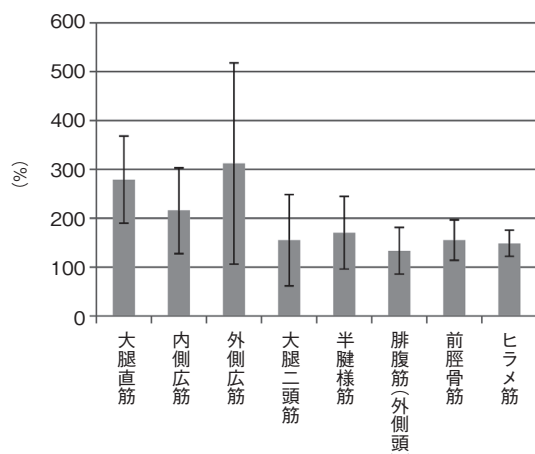


図10 通常歩行に対するピッチ増での速歩時の最大筋電RMSの増加割合

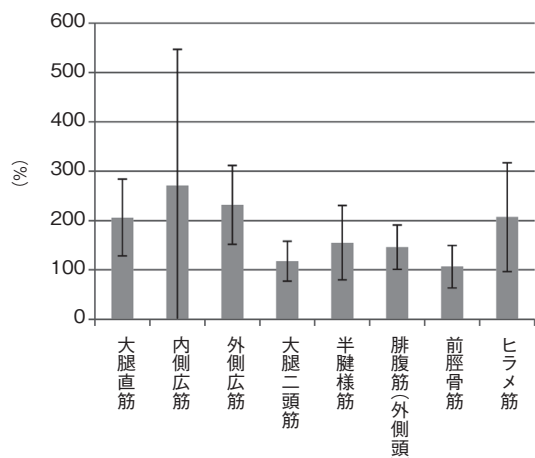


図11 通常歩行に対するスロージョギングの最大筋電RMSの増加割合

る。さらに筋活動を続けた際の周波数の変化についても SLR 運動において測定した結果、時間が経つほど周波数が低下する傾向で、この結果から動作を継続することで、時間と共に動員される筋肉の種類に変化がおきている（より遅筋が働く割合が増える）ことが示唆された。

これらより、筋電計測によって筋活動の量的、質的評価が可能であると考えられ、そうした所見を基に、本研究の主目的である、通常ウォーキングと速歩とでの動員される筋肉の種類の違いや個別の筋肉の活動の様子を測定した。これまでに若年者の測定を終え、男性8名、女性18名についての測定を終えているものの、解析には多くの時間と労力が必要であるため、本報告においては、まず、通常歩行と歩幅増による速歩とピッチ増による速歩において1サイクル中に働く筋肉の違い、さらに速歩に比べさらに負荷の多いスクワットの1サイクルの中での大腿及び下腿の筋活動の例を筋電波形ならびに、定量的な指標として、RMS 解析による値の推移について筋電波形とともに若年男性例についての例示を行った。筋活動（収縮）量を定量するために、歩行の違いにより最大のRMSの値による比較解析を手始めとして、通常の歩行を100とした場合の増加率として表した。大腿及び下腿の各測定筋について比較を行った結果、筋活動量の増加が多くの筋について認められたものの、有意差の検定においては、通常歩行とピッチ増の速歩間では大腿直筋と前脛骨筋において、また通常歩行と歩幅増の速歩間では半腱様筋とヒラメ筋において、通常歩行とスロージョギング間では大腿直筋と外側広筋とヒラメ筋において有意な増加が確認された。見た目の平均値の違いから予想されるほどには、有意差を認めた筋が少なかったのは、症例数が少ないことに加え、被験者によるばらつきが大きかったことによると考えられる。今後の方向性として、さらに人数を増やした解析を行う、またRMS値のみでなく1

サイクル中の積分値による比較解析を行っていき
たい。本解析においても、歩行の仕方（歩幅を増
やしたりピッチを増やすことにより速く歩く）ま
た、スロージョギングにより、活動量が増加する
筋が異なることが示され、通常歩行によるウオー
キングを行う間に、歩幅を増やすような大股での
歩行、小股でピッチを増やす仕方での速歩、また
スロージョギングをしたりと、いろいろな形の運
動を交ぜてとり入れることにより、異なる筋肉を
使うこととなることからより多くの種類の筋肉
を鍛えることに繋がり、より効果的な運動となる
ことを示すことができた。

4. 結 語

運動時の下肢の筋活動を筋電計測により、量的
また質的に評価をすることが可能であることが示
され、また筋肉の種類により活動量ならびに活動
の質が異なり、特に筋活動の質の加齢による変化
や筋活動を持続することによる変化を示すことが
出来ると考えられた。さらに通常歩行と速歩、さ
らにはスロージョギングでは筋活動の量や活動の
仕方が異なり、通常のウオーキングのみでなく、
様々な歩き方やスロージョギングを間に取り入れ
ることで、異なった種々の筋肉を鍛えることに繋
がり、より有効な運動となることが示された。

謝 辞

本研究の遂行に当たり、公益財団法人 デサン
トスポーツ科学振興財団からの支援を受けたこと
に深謝いたします。

文 献

- 1) 総務省統計局ホームページ: <http://www.stat.go.jp/data/topics/topi31.htm>
- 2) 田中暁: 誌上ディベート 歩く? 走る? スロージョギング アンチエイジング医学, 11, 6, p860-866 (2015)
- 3) 体力・運動機能測定 国立長寿医療研究センター・老化に関する長期縦断疫学研究, <http://www.ncgg.go.jp/cgss/departement/ep/monograph7thj/index.html>
- 4) J. Perry : Gait analysis: normal and pathological function. Thorofare, NJ: SLACK Inc., (1992)
- 5) E.J. Kupa, S.H. Roy, S.C. Kandarian, C.J. De Luca : Effects of muscle fiber type and size on EMG median frequency and conduction velocity. *J. Appl. Physiol.*, 79(1), pp.23-32 (1995)
- 6) B. Gerdle M.K. Wretling K. Henriksson-Larsen : Do the fibre-type proportion and the angular velocity influence the mean power frequency of the electromyogram? *Acta. Physiol. Scand.*, 134(3), pp.341-346 (1988)
- 7) Goodpaster B.H., Park S.W., Harris T.B., Kritchevsky S.B., Nevitt M., Schwartz A.V., Simonsick E.M., Tyllavsky F.A., Visser M., Newman A.B., The loss of skeletal muscle strength, mass and quality in older adults: the health, aging and body composition study. *J. Gerontol. A. Biol. Sci. Med. Sci.*, Oct;61 (10) :1059-64 (2006)
- 8) Visser M., Goodpaster B.H., Kritchevsky S.B., Newman A.B., Nevitt M., Rubin S.M., Simonsick E.M., Harris T.B., Muscle mass, muscle strength, and muscle fat infiltration as predictors of incident mobility limitations in well-functioning older persons. *J. Gerontol. A. Biol. Sci. Med. Sci.*, Mar; 60 (3) :324-33 (2005)
- 9) M.T. Korhonen, A. Cristea, M. Alen, et al. Aging, muscle fiber type, and contractile function in sprint-trained athletes. *J. Appl. Physiol.*, 101 (3), pp.906-917 (2006)