

筋音図と筋電図の同時計測による 関節運動に寄与する筋群の質的評価

川崎医療福祉大学 福 原 真 一
(共同研究者) 岡 山 大 学 岡 久 雄
川崎医療福祉大学 小 野 紗 佑 里
川崎リハビリテーション学院 河 島 隆 貴

Evaluation of Quadriceps Femoris by Simultaneous Measurement of Mechanomyography and Electromyography

by

Shinichi Fukuhara, Sayuri Ono
Kawasaki University of Medical Welfare
Hisao Oka
Okayama University
Takaki Kawashima
Kawasaki Junior College of Rehabilitation

ABSTRACT

Athletic capability in sports and rehabilitation scenarios is generally evaluated based on parameters such as maximum muscle strength, number of repetitions, and maximum time. However, the performance of individual target muscles is not evaluated directly in many cases. It is difficult to express muscle quality quantitatively. The purpose of this study was to simultaneously perform electromyography (EMG) and mechanomyography (MMG) using an MMG/EMG hybrid transducer developed by us, and to evaluate muscle performance during pedaling exercise based on the electrical/mechanical transformations during muscle contraction. Nine healthy adult men

participated in the experiment. The pedaling exercise was performed using a recumbent bicycle that can be seated and exercised. The target muscles were the vastus medialis (VM) and vastus lateralis (VL) of the quadriceps femoris, and EMG and displacement MMG (dMMG) were performed during pedaling. The cadence was constant at 30 rpm, and the pedaling work rate was varied from 30 W to 150 W in five steps of 30 W each. The measurement was performed for 30 s with a sampling frequency of 1 kHz. The study demonstrated the following: (1) The VL contributes more to pedaling than VM. This is based on the mechanical aspect of muscle contraction. (2) The correlation between EMG and dMMG indicates that the MMG / EMG ratio of VL is higher than that of VM. In conclusion, it is indicated that the combined evaluation of EMG and MMG may yield an index that reflects the muscle performance during exercise.

要 旨

本研究では、大腿四頭筋群に対して開発した筋音 (Mechanomyography: MMG) / 筋電 (Electromyography: EMG) ハイブリッドセンサシステムから得られる EMG と MMG を同時計測し、筋収縮時の電氣的／機械的側面からペダリング運動における筋パフォーマンスを評価することを目的とした。健康な成人男性9名が実験に参加した。ペダリング運動は着座してペダリング可能なりカンベントバイクを用いて実施した。対象とする筋は大腿四頭筋のうち内側広筋 (Vastus medialis: VM) と外側広筋 (Vastus lateralis: VL) とし、ペダリング中の EMG と変位 MMG (displacement MMG: dMMG) をそれぞれ計測した。ケイデンスは 30rpm 一定とし、ペダリング負荷を 30W から 150W まで 30W ずつ増加させた。計測は 30 秒間、サンプリング周波数 1kHz とした。VL は VM よりもペダリングに対する寄与率が大きかった。また、EMG と dMMG の相関関係から、VL の筋音筋電比は VM より大きいことが確認された。これらの結果により、EMG と MMG の複合的評価は運動時に発揮される筋パフォーマンスを反映する指標となる可能性が示唆された。

緒 言

スポーツ庁が毎年実施している「スポーツの実施状況等に関する世論調査」によると、我が国におけるスポーツ実施率は各年代層で年々増加していると報告されている。すなわち、国民のスポーツや運動への関心が高まっており、さらなるスポーツの参画人口の増加やその市場の拡大が見込まれている。また、高齢者医療は我が国における重要な課題となっており、健康寿命の延伸を図る取り組みを医療・福祉・スポーツの各分野で推進していく必要があると考えられる。通常、スポーツやリハビリテーションの場面における運動能力は最大筋力や繰返し回数、最高タイム等の量的項目で評価され、直接的には個別の筋機能 (パフォーマンス) を評価していないことが多い。日々の運動や治療の効果を確認し、運動継続のモチベーション維持のためにも、手軽に運動機能を測定、評価できる手法が求められている。一般的に、筋力を評価する手法として徒手筋力評価法¹⁾や筋電図 (Electromyography : EMG)²⁾ が用いられている。前者は定性的な評価法であり、検査者によってその結果が異なる場合がある。後者は基礎研究や臨床医学だけでなく、スポーツやリハビ

リテーション, さらにはバーチャルリアリティへと応用範囲を広げてきているが^{3, 4)}, EMGは筋を収縮させる主因であって, 筋収縮の結果を表したのではないということに注意が必要である。一方, 筋音図 (Mechanomyography : MMG) は骨格筋収縮に起因する微細な振動や変位を皮膚表面に置いた各種センサによって捉えられたものであり, 機械的活動を反映することが知られている⁵⁾。筋機能の詳細な評価のためには, EMGとMMGを同時計測することが重要であると考えられる。このような背景から, 我々は以前よりEMGとMMGを同時測定可能なMMG/EMGハイブリッドセンサシステムを開発し, 本センサによって得られたEMGとMMGから動的運動中の筋収縮力を評価可能であることを明らかにした⁶⁾。EMGは筋収縮時の入力信号, MMGはその出力信号と解釈され, 両者を用いることによって運動中の筋パフォーマンス指標 (MMG/EMG : 出力/入力) を算出することができる^{7, 8)}。また, これらは長時間の運動中においても簡便に解析可能であり, 局所的な筋機能をリアルタイムに捉えることが可能となった⁹⁾。

これまでMMGやEMGを用いた筋機能評価に関して, さまざまな運動を対象に数多くの報告がなされている^{10, 11)}。しかし, MMGとEMGの両面から筋機能の評価した報告は少なく, とりわけ動的運動における報告は見当たらない。また, 両信号を用いた筋機能評価法をアプリケーションに落とし込んだ事例も見られない。つまり, MMGとEMGを用いた運動中の筋機能評価は, 我々のグループが数名の被験者で行った報告のみである⁶⁾。

EMGを用いたペダリング運動の筋機能評価の報告では, ケイデンス, 負荷, 疲労, 運動姿勢等, 体系的な研究がなされているのに対して¹²⁻¹⁵⁾, MMGによるペダリング運動に関する研究報告はEMGに比べて極めて少なく, 筋の機械的活動に

着目した科学的根拠に乏しいのが現状である。

そこで本研究は, ペダリングの関節運動に寄与する大腿四頭筋群を対象にEMGとMMGを同時計測し, 相互に複数の筋がどのようにパフォーマンスを発揮しているのかを筋収縮の電氣的/機械的側面から総合的に評価することを目的とし, 動的運動における筋機能評価のエビデンス構築に貢献することを目指した。

1. 方 法

1. 1 MMG/EMGハイブリッドセンサシステム

図1にMMG/EMGハイブリッドセンサシステムを示す。本システムはEMGとMMGを計測するセンサ部とそれらの計測を制御するためのソフトウェア部で構成されている。センサの大きさは $47 \times 34 \times 24\text{mm}$, 34gである。MMGを計測するためにフォトリフレクタを使用しており, それを皮膚表面より3mm上に設置し, 筋収縮にともなう皮膚表面の変化を距離という物理量で計測することによって, 筋収縮時の筋の微細な変動を捉えており, これを変位MMG (displacement-MMG : dMMG) として記録している。一方, EMGはセンサ底部にディスプレイザブル式電極 (Ag/AgCl電極) を2個取り付けることによって計測される。EMG信号は5.3-500Hzでフィルタリングされ, 約160倍に増幅される。各種増幅・信号処理回路, 通信インタフェース, バッテリー等はすべて内蔵されており, dMMGおよびEMGデータはSDカードに保存されると同時に, Bluetoothを経由してパソコンやタブレットでリアルタイムに波形がモニターされる⁶⁾。

1. 2 実験参加者

実験には健康かつこれまでに運動器疾患を患ったことのない成人男性9名 (年齢 : 21.9 ± 3.1 歳, 身長 : $170.0 \pm 0.1\text{cm}$, 体重 : $59.3 \pm 9.7\text{kg}$: 平均値 $\pm$ 標準偏差) が参加した。実験に先立ち, 参加者に

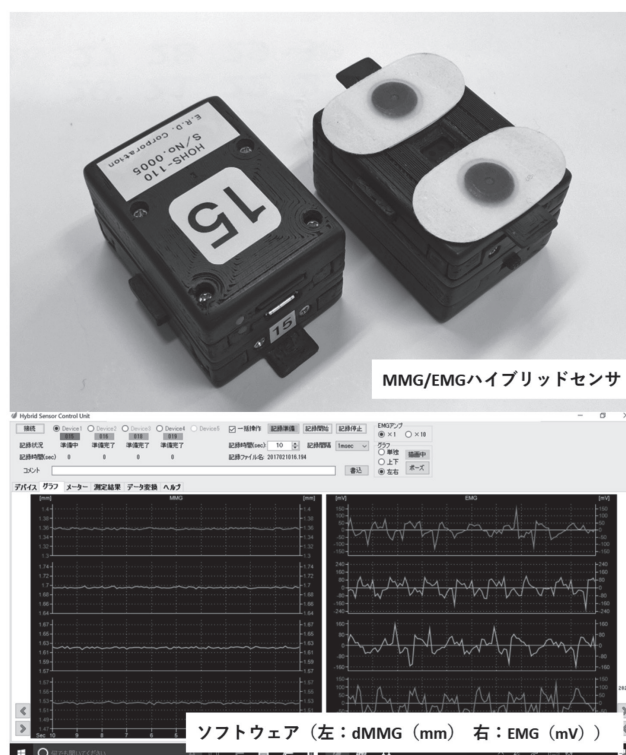


図1 MMG/EMGハイブリッドセンサシステム

実験の目的、内容、危険性について十分説明を実施し、インフォームド・コンセントを得た。また、本研究は、川崎医療福祉大学の倫理委員会の承認を得て実施した（承認番号：19-013）。

1. 3 実験準備と運動プロトコル

実験参加者は図2に示すように、座位でペダリング可能なリカンベントバイク（V67i, SENOH Corp.）に着座し、足部をベルトでペダルに固定した。MMG/EMGハイブリッドセンサは右内側広筋（Vastus medialis：VM）と右外側広筋（Vastus lateralis：VL）のそれぞれ筋腹上に貼付して専用ベルトで固定した。センサ固定の前に皮膚の接触インピーダンスを低下させるため、皮膚前処理剤にてエージングを行った。実験開始前に、参加者にペダリング中はハンドグリップを握り、深く腰を掛け、上半身を動かさない（股関節を安定させる）よう教示した。

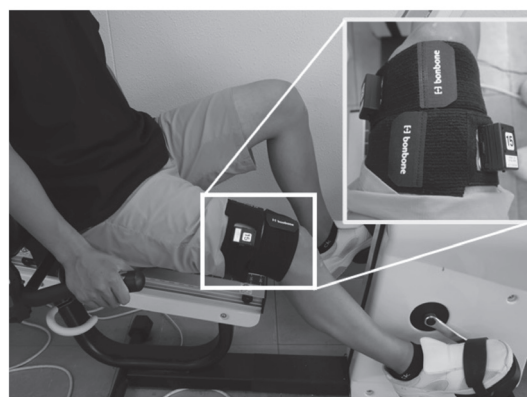


図2 実験セットアップ

ケイデンスは30rpmに固定し、ペダリング負荷を30から150Wまで30Wずつ増加させた。参加者はメトロノームを使用して一定のケイデンスになるようペダリングした。ペダリングが安定した後、各負荷におけるペダリング時のdMMGとEMGをサンプリング周波数1kHzで30秒間計測した。これに加えて、参加者には下肢の力を発

揮しないよう教示し、実験者2人がペダルを手動で回転させたとき（受動的関節運動）のEMGとdMMGも同様の条件で計測した。各実験は3回行い、実験の間には十分な休息を設けた。

1. 4 解 析

本研究で計測されたEMGとdMMGは従来から用いられている実効値や周波数解析を採用せずに時間領域で処理された⁹⁾。まず、1kHzでサンプリングしたすべてのデータを自乗し、それらを2秒毎に合計することによって15個の解析データを得た。それらを平均することによってペダリング中のそれぞれのエネルギー値（EMG_{TD}、dMMG_{TD}）を算出した。さらに、EMG_{TD}は全負荷中の最大値で、dMMG_{TD}は受動的関節運動時の値で規格化された。

1. 5 統 計

結果はすべて平均値±標準偏差にて示した。EMG_{TD}とdMMG_{TD}の関係性の検討にはピアソンの積率相関係数を用いた。有意水準は5%未満とした。統計処理にはSPSSソフトウェア（Version 26, IBM Corp.）を用いた。

2. 結 果

2. 1 ペダリング負荷の影響

図3にVMとVLにおける規格化EMG_{TD}とペダリング負荷の関係を示す。両者とも負荷の増加とともに漸増し、同様の傾向が確認された。次に、VMとVLにおける規格化dMMG_{TD}とペダリング負荷の関係を図4に示す。負荷の増加に対する規格化dMMG_{TD}の増加率は規格化EMG_{TD}と比較して小さかった。また、VMは負荷に対して規格化

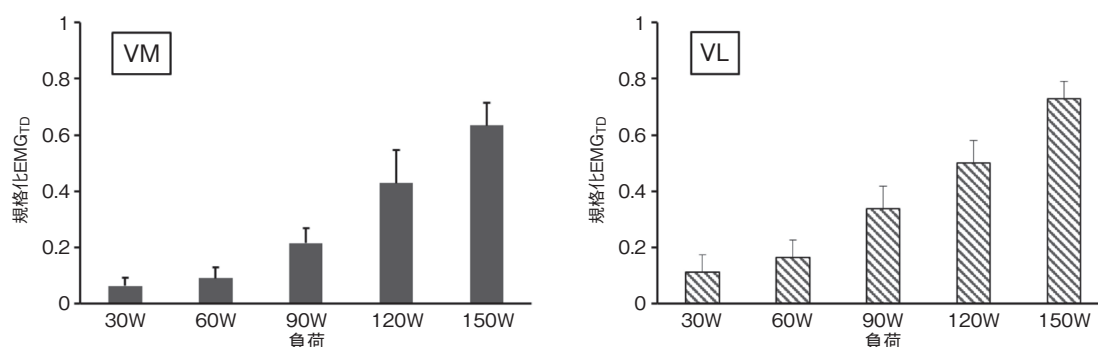


図3 ペダリング負荷と規格化EMG_{TD}

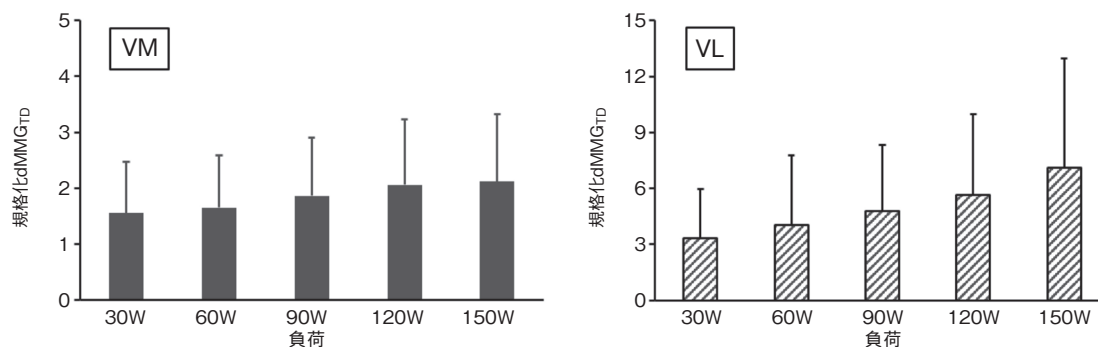


図4 ペダリング負荷と規格化dMMG_{TD}

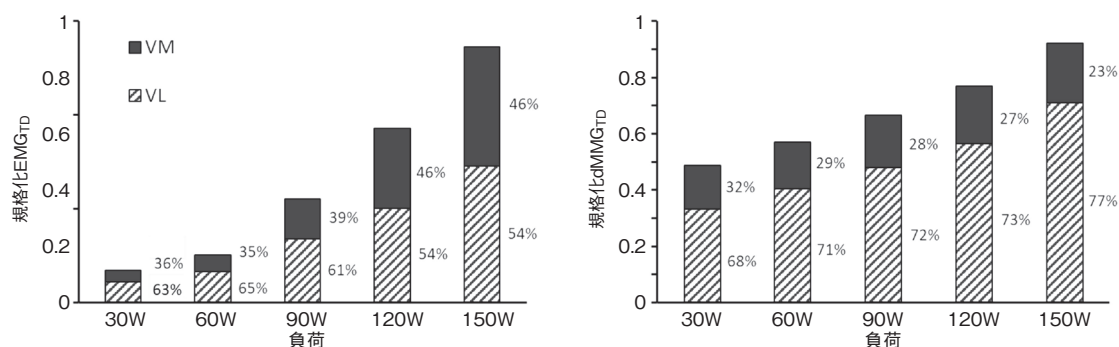


図5 ペダリング負荷とVMとVLの寄与率

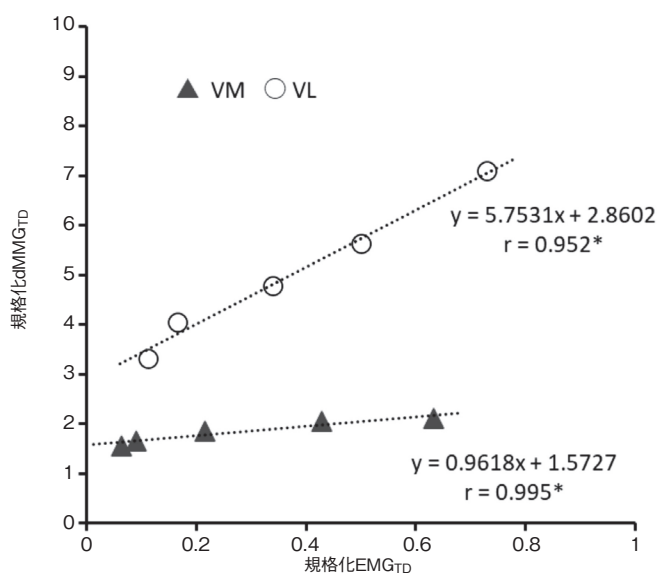


図6 規格化EMG_{TD}と規格化dMMG_{TD}の相関

dMMG_{TD}の増加が高負荷域でプラトーになっているのに対して、VLは一定の増加を維持しているようであった。また、VLの規格化dMMG_{TD}はVMと比較して2～3倍大きかった。

2. 2 VMとVLの寄与率

図5にペダリング負荷毎に規格化EMG_{TD}と規格化dMMG_{TD}におけるVMとVLの合算値と比率を示す。規格化EMG_{TD}は低負荷でVL優位であったが、高負荷に移行するとその寄与率は僅差になった。一方、規格化dMMG_{TD}は全負荷に渡っ

てVLが優位であったが、高負荷に移行するにともない、さらにその寄与率が増加していることが確認された。

2. 3 規格化EMG_{TD}と規格化dMMG_{TD}の関係

VMとVLの規格化EMG_{TD}と規格化dMMG_{TD}の相関関係を図6に示す。両者とも非常に強い相関関係を示した。また、VLの回帰直線の傾きはVMよりも大きかった。

3. 考 察

これまでペダリング中のパフォーマンスは最高速度、単位時間あたりの回転数や踏力等の指標によって評価されており¹⁶⁾、直接的に筋の本質的な能力を示した報告は見られない。EMGやMMGは各種運動中の筋機能を直接的に評価できる生体信号である。実際、EMGやMMGを用いたペダリング運動の筋機能評価に関し、これまでにいくつか報告されている^{2, 17-20)}。等尺性収縮における健康人のEMGは筋力と強い相関関係を示すことから、スポーツやリハビリテーション分野での運動機能評価の一部として応用されてきた。本研究においても、ペダリング負荷とともにEMGが増加していることから、負荷に応じた筋力が適切に発揮されていると推察され、これまでの知見と比較して矛盾のない結果が得られている。しかし、ペダリング運動のような動的な運動では筋は絶えず伸縮を繰り返しており、等尺性収縮とは異なる収縮様式であることに注意が必要である。また、動的運動では微妙な関節角度の違いによって運動パフォーマンスに影響すると考えられることから運動における最大筋力を規定することができず、ある条件下の運動がどのくらいの筋力を発揮しているかをEMGを用いて解析することは困難である。図3からも明らかなように、本研究におけるEMGを用いた解析ではVMとVLの筋機能の差を明確に評価できていないことが分かる。一方、MMGは力発揮時の筋の変位や振動を捉えていることから、筋収縮の最終的な証拠として取り扱うことができる。EMGはVM、VL両筋とも同様の傾向が見られるのに対して、dMMGは両者の振る舞いに違いが見られる(図4)。VMは負荷の増加とともに漸増しているが、120Wから150Wにかけて変化は見られない。対して、VLは30Wから150Wまで一定の増加が認められた。MMG/EMGハイブリッドセンサで計測されるdMMGは主に

筋収縮時の運動単位の動員の様子を捕捉している⁶⁾。VMは負荷の増加とともに運動単位の動員に限界が生じているが、VLは高負荷であってもその動員の途中であることを示している。つまり、dMMGは動的運動中における筋固有の予備能力を表現していると考えられる。このように、EMGだけでは筋収縮の特性を理解することが困難であることから、動的運動中にMMGを計測する意義は非常に大きいと考えられる。

本実験におけるVMとVLの寄与率について定量的に調べた結果が図5である。VLはVMと比較して各負荷で大きな寄与率を示している。このことは、一定の負荷と回転速度を維持しているペダリング運動に対し、VLが大きく貢献していることを意味している。特に、dMMGにおいてその傾向は顕著に表れている。実際、ペダリングにおける下肢筋群の役割について報告されており、ペダリングに寄与する膝関節伸展群の中でVLの貢献度は大きいと考えられている²¹⁾。また、VLの生理学的筋断面積は大腿四頭筋群の中でもっとも大きいことが分かっている²²⁾。このことから、本研究で得られたdMMGはペダリング運動におけるVLの優位性を顕著に反映しており、運動中の筋パフォーマンスを反映する指標として有用であると推察された。

一方で我々のグループは運動中に得られたEMGとMMGを個別に評価するのではなく、それらを用いた複合的な評価を目指してきた^{6, 9)}。Barry et al.は小児の筋ジストロフィ患者の筋電筋音比は健康人と比較して低下していたと報告している⁸⁾。EMGを筋収縮のための入力信号とするとMMGはその出力信号と捉えることができる。これは制御工学でいう伝達関数と同様の取り扱いが可能で、筋電筋音比は筋収縮における入出力特性として解釈することができる。本研究ではVLはVMの傾きよりも大きく、ペダリング運動に対して優れたパフォーマンスを発揮していると推察

された(図6). 筋電筋音比は個人あるいは筋個別の収縮効率, 運動能力を反映し, 「筋肉の質」を表現するための指標の一つになりうると考える. 以上のことから, EMGとMMGの複合的評価はVLのペダリングに対する貢献度を明確に表現していることが明らかになった.

4. 結 論

MMG/EMG ハイブリッドセンサシステムを用いてペダリング運動中のEMGとMMGを同時計測することによって, 個別の筋のパフォーマンスを推定できる可能性が示された. 本研究によって, スポーツやリハビリテーション等での運動器に関する分野において本質的な筋の機能評価に役立つことが期待される.

謝 辞

本研究に対して助成を賜りました公益財団法人石本記念デサントスポーツ科学振興財団に厚く御礼申し上げます.

また, 本研究の遂行にあたり, 多大なご助力をいただきました本研究室の学生諸氏に感謝いたします.

文 献

- 1) Bohannon R.W., Manual muscle testing: does it meet the standards of an adequate screening test?, *Clin. Rehabil.*, **19**: 662-667 (2005)
- 2) Hug F., Dorel S., Electromyographic analysis of pedaling: a review, *J. Electromyogr. Kinesiol.*, **19**: 182-198 (2009)
- 3) Giggins O.M., Persson U.M., Caulfield B., Biofeedback in rehabilitation, *J. Neuroeng. Rehabil.*, **10**: 60 (2013)
- 4) Ghassemi M., Triandafilou K., Barry A., Stoykov M.E., Roth E., Mussa-Ivaldi F.A., Kamper D.G., Ranganathan R., Development of an EMG-controlled serious game for rehabilitation, *IEEE Trans. Neural Syst. Rehabil. Eng.*, **27**: 283-292 (2019)
- 5) Orizio C., Muscle sound: bases for the introduction

of a mechanomyographic signal in muscle studies, *Crit. Rev. Biomed. Eng.*, **21**: 201-243 (1993)

- 6) Fukuhara S., Watanabe S., Oka H., Novel mechanomyogram/electromyogram hybrid transducer measurements reflect muscle strength during dynamic exercise—pedaling of recumbent bicycle—, *Adv. Biomed. Eng.*, **7**: 47-54 (2018)
- 7) Orizio C., Esposito F., Sansone V., Parrinello G., Meola G., Veicsteinas A., Muscle surface mechanical and electrical activities in myotonic dystrophy, *Electromyogr. Clin. Neurophysiol.*, **37**: 231-239 (1997)
- 8) Barry D.T., Gordon K.E., Hinton G.G., Acoustic and surface EMG diagnosis of pediatric muscle disease, *Muscle. Nerve.*, **13**: 286-290 (1990)
- 9) Fukuhara S., Oka H., A simplified analysis of real-time monitoring of muscle contraction during dynamic exercise using an MMG/EMG hybrid transducer system, *Adv. Biomed. Eng.*, **8**: 185-192 (2019)
- 10) Seki K., Sato M., Handa Y., Increase of muscle activities in hemiplegic lower extremity during driving a cycling wheelchair, *Tohoku J. Exp. Med.*, **219**: 129-138 (2009)
- 11) Stout J.R., Housh T.J., Johnson G.O., Evetovich T.K., Smith D.B., Mechanomyography and oxygen consumption during incremental cycle ergometry, *Eur. J. Appl. Physiol. Occup. Physiol.*, **76**: 363-367 (1997)
- 12) Ryan M.M., Gregor R.J., EMG profiles of lower extremity muscles during cycling at constant workload and cadence, *J. Electromyogr. Kinesiol.*, **2**: 69-80 (1992)
- 13) Lopes A.D., Alouche S.R., Hakansson N., Cohen M., Electromyography during pedaling on upright and recumbent ergometer, *Int. J. Sports. Phys. Ther.*, **9**: 76-81 (2014)
- 14) Cannon D., Kolkhorst F., Cipriani D., Effect of pedaling technique on muscle activity and cycling efficiency, *Eur. J. Appl. Physiol.*, **99**: 659-664 (2007)
- 15) Dorel S., Couturier A., Hug F., Influence of different racing positions on mechanical and electromyographic patterns during pedalling, *Scand. J. Med. Sci. Sports.*, **19**: 44-54 (2009)
- 16) Dorel S., Hautier C.A., Rambaud O., Rouffet D., Van Praagh E., Lacour J.R., Bourdin M., Torque and power-velocity relationships in cycling: relevance to

- track sprint performance in world-class cyclists, *Int. J. Sports. Med.*, **26**: 739-746 (2005)
- 17) Hautier C.A., Arsac L.M., Deghdegh K., Souquet J., Belli A., Lacour J.R., Influence of fatigue on EMG/force ratio and cocontraction in cycling, *Med. Sci. Sports. Exerc.*, **32**: 839-843 (2000)
 - 18) Housh T.J., Perry S.R., Bull A.J., Johnson G.O., Ebersole K.T., Housh D.J., deVries H.A., Mechanomyographic and electromyographic responses during submaximal cycle ergometry, *Eur. J. Appl. Physiol.*, **83**: 381-387 (2000)
 - 19) Perry S.R., Housh T.J., Johnson G.O., Ebersole K.T., Bull A.J., Evetovich T.K., Smith D.B., Mechanomyography, electromyography, heart rate, and ratings of perceived exertion during incremental cycle ergometry, *J. Sports. Med. Phys. Fitness.*, **41**: 183-188 (2001)
 - 20) Shinohara M., Kouzaki M., Yoshihisa T., Fukunaga T., Mechanomyography of the human quadriceps muscle during incremental cycle ergometry, *Eur. J. Appl. Physiol. Occup. Physiol.*, **76**: 314-319 (1997)
 - 21) Bishop D., Jenkins D.G., McEniery M., Carey M.F., Relationship between plasma lactate parameters and muscle characteristics in female cyclists, *Med. Sci. Sports. Exerc.*, **32**: 1088-1093 (2000)
 - 22) 秋間広, 久野譜也, 福永哲夫, 勝田茂, MRIによるヒトの膝伸筋・膝屈筋における形態的特性および生理学的断面積当りの筋張力. 体力科学, **44**: 267-278 (1995)