

爆発的な膝伸展筋力発揮中の運動神経活動を 非侵襲的に評価する方法の考案

中京大学大学院 西川 太 智
(共同研究者) 中 京 大 学 竹 田 良 祐
中京大学大学院 唐 木 茉里乃
中 京 大 学 渡 邊 航 平

Development of a Non-Invasive Method for Evaluating Motoneuron Activity During Explosive Knee Extensor Contractions

by

Taichi Nishikawa
Chukyo University / Ritsumeikan University
Ryosuke Takeda, Marino Karaki,
Kohei Watanabe
Chukyo University

ABSTRACT

The rate of force development observed during explosive knee extensor contractions is a physiologically meaningful index closely associated with motor performance and physical function, particularly in athletic and aging populations. This rapid force generation is underpinned by distinct motor unit behavior, including high-frequency discharges not typically observed during sustained contractions. This study aimed to determine how anatomical characteristics under the electrode—specifically subcutaneous tissue thickness and fascicle orientation—influence the number of motor units identified from high-density surface electromyography (HD-sEMG) during explosive contractions of the vastus lateralis.

Twelve healthy young adults performed explosive isometric knee extensions while HD-sEMG signals were recorded from the proximal, middle, and distal regions of the vastus lateralis. At each site, subcutaneous tissue thickness and the angle between the skin surface and muscle fascicles were assessed via ultrasonography. Motor unit discharge patterns were extracted using the convolution kernel compensation algorithm. The number of motor units detected during explosive contractions was significantly greater at the proximal and distal regions than at the middle region ($p < 0.001$). The proximal and distal sites yielded more motor units on average compared to the middle site. Significant negative correlations were observed between motor unit count and both subcutaneous tissue thickness ($p = 0.003$, $r = -0.475$) and fascicle angle ($p = 0.002$, $r = -0.506$) across all regions.

In conclusion, the proximal and distal regions of the vastus lateralis provide more favorable recording conditions for HD-sEMG-based motor unit decomposition during explosive contractions. These findings suggest the importance of accounting for local anatomical characteristics in electrode placement when assessing motor unit behavior in explosive contractions tasks.

キーワード

高密度表面筋電図, 外側広筋, 運動単位, 力の立ち上がり率, 筋力

Keyword

high-density surface electromyography, vastus lateralis, motor unit, rate of force development, muscle strength

要 旨

本研究は、爆発的筋力の発揮において外側広筋を対象により多くの運動単位を検出することを目的とし、外側広筋における高密度表面筋電図法による運動単位検出数と電極下の解剖学的特徴との関連を検証した。若年成人12名を対象に、外側広筋の近位・中位・遠位部における皮下組織厚および皮膚表面と筋束の角度を評価し、各部位で高密度表面筋電図を記録した。その結果、爆発的筋力の発揮中における運動単位検出数は中位に比べて近位および遠位で有意に多く ($p < 0.001$)、検出数は皮下組織厚および皮膚表面と筋束の角度と有

意な負の相関を示した ($p < 0.01$)。これらの結果から、外側広筋皮膚表面の近位または遠位への電極貼付が爆発的な膝伸展筋力発揮中の運動単位活動を評価する上で有用であることが明らかになった。また運動単位活動を評価するにあたって、電極下における解剖学的特徴を考慮することの重要性が示唆された。

緒 言

身体運動は、骨格筋が収縮することで発揮される張力が骨に伝わり、関節が運動して遂行される。したがって、筋力発揮能力は、アスリートの競技力や人々の自律した生活に重要である。筋力

発揮能力として、広く認識されている指標の一つに特に時間的制約のない中で随意的に発揮される最も大きな筋力である最大随意筋力 (MVC) がある。一方で、安静から急速に発揮される大きな筋力 (以下、爆発的筋力) によって観察される、限られた時間で発揮される筋力の大きさである力の立ち上がり率 (rate of force development, RFD) は、運動機能と関連する指標である。特に膝伸展筋力発揮の RFD は MVC と比較して、アスリートのスプリントパフォーマンスやジャンプパフォーマンスとより強く関連していることや¹⁾、膝伸展筋力発揮の RFD は MVC とは独立して高齢者の歩行などの身体機能と関連していることが報告されている²⁾。したがって、爆発的な膝伸展筋力発揮能力である RFD の評価や、改善する方策には重要な意義がある。

RFD は MVC とは異なる特異的な生理学的メカニズムによって規定されている。発揮筋力の大きさを規定する生理学的要因として、筋量などの形態学的要因に加えて、脳や脊髄などの中枢から運動神経を介して筋に対する神経入力である神経学的要因がある³⁻⁵⁾。そして、RFD は MVC と比べて神経学的要因の貢献が大きいことが報告されている^{6,7)}。運動神経細胞、運動神経および運動神経が支配する筋線維は運動単位と呼ばれ、運動単位は発揮筋力の大きさを規定する神経学的要因における最終共通経路である⁸⁾。持続的な筋力発揮の際には運動単位の発火頻度は最大で 20pps (pulse per second) から 50pps 程度を記録するが、爆発的な筋力発揮の際には運動単位の発火頻度は 100pps を超える⁹⁾。こうした爆発的筋力の発揮中の特異的な運動単位活動を評価することは重要な意義がある。

近年、2次元平面上に複数の表面筋電図電極を配列し表面筋電図を記録する高密度表面筋電図法と特殊なアルゴリズムによる信号処理を組み合わせることで、個々の運動単位活動を評価すること

が可能になった^{10,11)}。筋の収縮は、脊髄内にある運動神経細胞の興奮に伴う活動電位が運動神経を介して、筋線維へ伝播することで生じる。高密度表面筋電図法は、皮膚表面に設置した複数の電極に対して、Convolution Kernel Compensation (以降 CKC と記す) 法などの解析アルゴリズムを用いて各運動単位の活動電位波形を抽出することで、電極下に位置する筋線維を伝播する活動電位を評価する手法である¹²⁾。この手法は、非侵襲的に、複数の運動単位の活動を評価できる点に特徴がある¹⁰⁾。爆発的な膝伸展筋力発揮中の運動単位活動を高密度表面筋電図法によって評価する際、検出される運動単位の個数は、爆発的筋力の発揮を支える生理学的メカニズムを検証するにあたって重要である。

高密度表面筋電図法を用いた運動単位活動の評価において、検出される運動単位の個数は電極下における皮下組織などの解剖学的特徴の影響を受ける¹³⁾。例えば、電極下における皮下組織厚が厚くなると、高密度筋電図法によって検出される運動単位の数が減少することが報告されている¹³⁾。また、先行研究では紡錘状筋は羽状筋と比較して、検出される運動単位活動電位の形状における多様性が低いことが報告されている¹⁴⁾。したがって、電極下における皮下組織厚や皮膚表面と筋束の角度は、爆発的な筋力発揮中における高密度表面筋電図法を用いた運動単位の数に影響を及ぼすことが考えられる。膝伸展筋群の一つである外側広筋は、筋の構造が近位と遠位では構造が異なり、羽状角や皮下組織厚が部位によって変化するため¹⁵⁻¹⁷⁾、電極貼付位置の違いによって検出される運動単位の数が異なる可能性がある。そこで本研究は、爆発的筋力の発揮中において外側広筋を対象により多くの運動単位を検出することを目的として、外側広筋の近位部、中位部、遠位部における 1) 皮下組織厚、皮膚表面と筋束の角度を評価し、2) 爆発的筋力の発揮中に高密度表

面筋電図法を用いた運動単位の検出数との関連を検証した。

1. 研究方法

1. 1 対象者

若年成人12名（男性：8名，女性4名，年齢：21 ± 2歳，身長：163.2 ± 11.0cm，体重：64.1 ± 8.9kg）が本研究に参加した。すべての参加者は，本実験の内容及び危険性等の説明を受け，書面による参加の同意を得た。本実験はヘルシンキ宣言の原則に従い，中京大学における人を対象とする研究に関する倫理審査委員会（承認番号：2019-003）の承認を得て行われた。

1. 2 実験概要

参加者は実験室を2度訪れ，1度目は順化試行，2度目は測定を実施した。参加者は，身長と体重を測定後，股関節および膝関節角度を内角90度に固定し，着座した。右脚を対象に大転子から膝蓋骨外側上顆を結ぶ直線を4分割する3点を，それぞれ外側広筋の近位，中位，遠位とした（図1）。参加者は，超音波画像診断装置を用いた形態の評価を行い，その後爆発的な等尺性膝伸展筋力発揮中の高密度表面筋電図法を用いた運動単位活動の評価を実施した。

1. 3 超音波画像診断法

10MHzのリニアアレイ超音波プローブを備えた超音波診断装置（LOGIQ e Premium, GE Healthcare）を用いて，右脚の外側広筋の近位，中位，遠位を対象に超音波画像を撮影した。プローブの圧力を最小限に抑え，大腿骨表面が最も明るくなるようにプローブの角度を調整しながら，各部位でそれぞれ2つの縦断画像を取得した。皮下組織厚は，皮膚表面と脂肪組織の境界から脂肪組織と外側広筋の境界までの距離を測定し，2つの画像の平均値を算出した。皮膚表面と筋束の角度

は，皮膚表面の角度を0度とし，皮膚表面と外側広筋の筋束のなす角度を測定し，2つの画像の平均値を算出した。

1. 4 爆発的な等尺性膝伸展筋力発揮課題

参加者は，膝伸展筋力測定器（竹井機器工業，新潟，日本）に着座し，股関節と膝関節の角度を内角90度，力センサー（共和電業，愛知，日本）を腓骨外果と水平になるように，ベルトを用いて固定された。測定された発揮筋力は，膝関節中心から力センサーまでの鉛直距離をモーメントアームとするトルクに換算された。

ウォーミングアップとして，最大努力の30%，50%，80%で等尺性膝伸展筋力発揮を実施した。その後，RFDの測定のために，MVCを測定した。MVCは2回測定を実施し，5%以上増加した場合は，再度測定を行い，最高値をMVCとした。MVCの測定から4分の休憩を取り，それぞれ6回の爆発的筋力の発揮を3セット，計18回実施した。各筋力発揮の間には20秒の休憩を取り，セット間は2分間の休憩を取った。参加者は，できるだけ速く，爆発的に膝伸展筋力発揮を実施するように指示された⁷⁾。発揮筋力は参加者の目の前に設置されたモニターを通じて視覚的にフィードバックされた。爆発的な筋力発揮中は，モニター上に発揮筋力の目標値として75%MVCが表示された。運動単位活動の解析のため，爆発的筋力を発揮し，到達した発揮筋力は3秒間維持された。参加者は，予備動作をしないこと，姿勢を変化させないことが指示された。

発揮筋力は，2000Hzで計測され，16ビットアナログ／デジタル変換器（Sessantaquattro, OT Bioelectronica, Torino, Italy）でデジタル形式に変換した^{1, 6)}。先行研究に則り，発揮筋力は400Hzで低域通過濾波を適用した。筋力の発揮タイミングは，先行研究に則り，視覚的に特定した^{6, 7, 18)}。その後，発揮筋力は20Hzで再度，低域通過

濾波を適用した。各セットで記録された6回の試行のうち、150ms時点で大きな発揮筋力を記録した3回の試行をその後の解析に用いた。

1. 5 高密度表面筋電図法

運動単位活動は、高密度表面筋電図法およびCKC法によって測定された。高密度表面筋電図として、直径1mm、電極間距離8mmの電極64個が設置されたマトリックス電極 (GR08MM1305, OT Bioelettronica, Turin, Italy) を用いた。電極は13列5行に配置され、左下の隅の電極が1つ欠けていた。電極は、近位、中位、遠位の3箇所貼付された。セットが終了した時点で、記録する部位を変更し、無作為な順番で各部位の高密度表面筋電図が記録された。リファレンス電極としてベルト型電極 (WS2, OT Bioelettronica, Turin, Italy) を脛骨近位部に設置した。筋電図信号は、2000Hzで計測し、256倍に増幅された。その後、計測された信号に対して10-500Hzの範囲で帯域通過濾波を適用し、16ビットアナログ/デジタル変換器 (Sessantaquattro, OT Bioelettronica, Torino, Italy) でデジタル形式に変換した。

得られた高密度表面筋電図から、DEMUSEソフトウェア¹⁹⁾のCKC法を用いて、各運動単位の発火タイミングが検出された。随意筋力発揮中、複数の運動単位の活動電位は、重なり合うことで形成された相互干渉波形に由来した表面筋電図として皮膚表面から計測される。取得された高密度表面筋電図は、ブラインド信号源分離と呼ばれる混合信号をもとに信号源に分離する信号処理技術を用いて、各運動単位の活動波形を推定し、各運動単位の発火タイミングを評価した¹⁹⁻²¹⁾。運動単位活動電位以外の信号成分の混入度合いを示すパルスノイズ比を運動単位の識別精度の指標として、パルスノイズ比が基準を満たす(>30dB)運動単位をさらなる解析に利用した²²⁾。解析ソフトウェアで同定された各運動単位の発火タイミン

グは、1名の経験豊富な研究者が視覚的に妥当性を確認し、各運動単位のパルスノイズ比を増加させる発火を採用し、低下させる発火を除外した⁶⁾。

1. 6 統計解析

結果は、平均値±標準偏差で報告する。統計分析はSPSS version 21.0 (日本アイ・ビー・エム, 東京, 日本) およびRstudio version 2024. 12. 1+563 (PBC, Boston, USA) を使用した。データの正規性はShapiro-Wilk検定で評価し、すべての変数において正規性が認められた。皮下組織厚、皮膚表面と筋束の角度、検出された運動単位の数は対応のある一元配置分散分析を用いて比較した。有意な主効果が認められた場合は、Bonferroni法によって事後検定を実施した。また、検出された運動単位の数と皮下組織厚または皮膚表面と筋束の角度の関係はPearson積率相関分析を用いて、部位ごとおよび3部位の合計を解析した。個人内の検出された運動単位の数と皮下組織厚または皮膚表面と筋束の角度の関係は、Rパッケージを用いて²³⁾、反復測定相関分析によって解析された。

2. 研究結果

皮下組織厚において、部位間で有意な主効果が認められた ($F(2,22) = 29.9, p < 0.001$) (図1A)。事後検定の結果、皮下組織厚は近位と比較して、中位および遠位は有意に小さく (いずれも $p < 0.001$)、中位と比較して遠位は有意に小さかった ($p = 0.016$) (図1A)。

皮膚表面と筋束の角度において、部位間で有意な主効果が認められた ($F(2,22) = 611.3, p < 0.001$) (図1B)。事後検定の結果、皮膚表面と筋束の角度は中位と比較して、近位および遠位は有意に小さく、遠位と比較して近位で有意に小さかった (いずれも $p < 0.001$) (図1B)。

爆発的な筋力発揮中に検出された運動単位の数において、部位間で有意な主効果が認められた (F

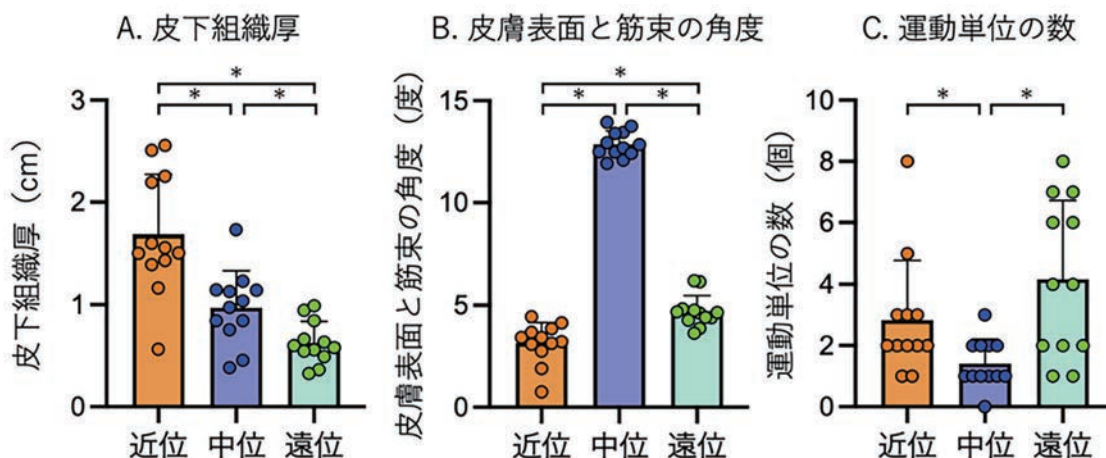


図1 皮下組織厚(A), 皮膚表面と筋束の角度(B), 検出された運動単位の数(C)
 円は対象者個人の値, 棒グラフは平均と標準偏差を表す. * $p < 0.05$

(2.22) = 12.1, $p < 0.001$) (図1C). 事後検定の結果, 検出された運動単位の数は, 中位と比較して近位 ($p = 0.022$) と遠位 ($p = 0.003$) で有意に多かったが, 近位と遠位では有意な差はなかった ($p = 0.163$) (図1C).

各部位および各部位の合計において, 検出された運動単位の数は, 皮下組織厚 (図2A) (近位: $p = 0.003$, 中位: $p < 0.001$, 遠位: $p = 0.014$, 合計: $p = 0.003$) および皮膚表面と筋束の角度は有意に負の相関 (近位: $p = 0.007$, 中位: $p = 0.040$, 遠位: $p = 0.015$, 合計: $p = 0.002$) を示した (図2B). また反復測定相関分析において, 検出された運動単位の数は, 皮膚表面と筋束の角度とは有意な負の個人内相関を示し ($p = 0.011$) (図2C), 皮下組織厚は負の個人内相関の傾向を示した ($p = 0.100$) (図2D).

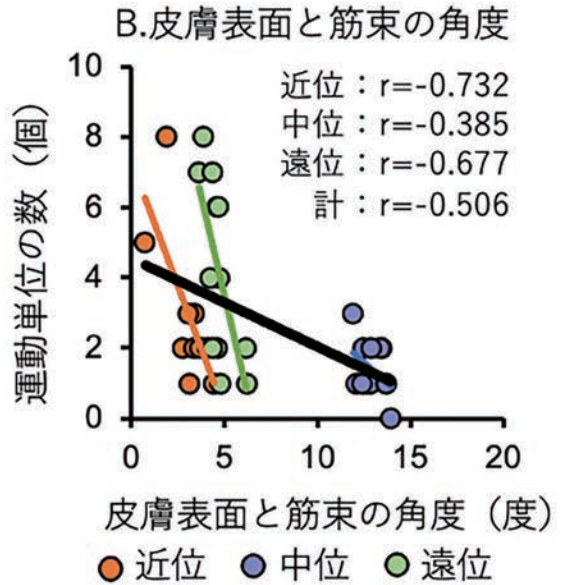
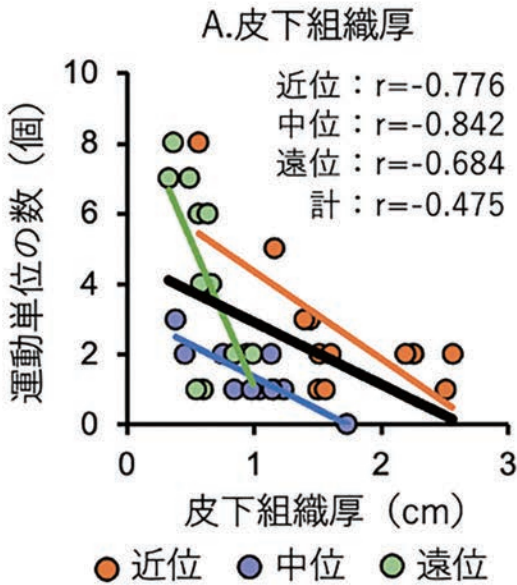
3. 考 察

本研究では, 爆発的筋力の発揮中において外側広筋を対象により多くの運動単位を検出することを目的として, 外側広筋の近位部, 中位部, 遠位部における解剖学的特徴と高密度表面筋電図法を用いた運動単位の検出数の関連を検証した. その結果, 外側広筋の遠位に高密度表面筋電図電極を

貼付することで, 外側広筋の中位や近位と比較して, 爆発的筋力の発揮における運動単位を多く検出できることが明らかになった (図1C). また, 爆発的筋力の発揮中に検出される運動単位の個数は, 皮下組織厚や皮膚表面と筋束の角度などの電極下の解剖学的特徴と関連することが示された (図2).

本研究では, 外側広筋を対象に筋電図電極を貼付する際に, 電極貼付位置における近位と比較して中位と遠位, 中位と比較して遠位で皮下組織厚は小さいことが示された (図1A). 複数の先行研究において, 外側広筋における筋エコー強度の部位差と皮下組織厚に基づく補正の影響を検討し, 補正前のエコー強度は近位と比較して中位および遠位で高く, 皮下組織厚に基づいて補正を行うことでこの部位差が顕著に縮小したことを報告している^{24, 25)}. このことは, 外側広筋において皮下組織厚が近位よりも中位, 中位よりも遠位で小さいことを示している. また, 本研究では外側広筋において, 中位と比較して近位と遠位, 遠位と比較して近位で皮膚表面と筋束の角度が小さかった (図1B). 外側広筋の近位, 中位, 遠位の羽状角を評価した先行研究では, 中位において, 最も羽状角が大きかったことを報告している¹⁵⁾. これ

部位別



個人別

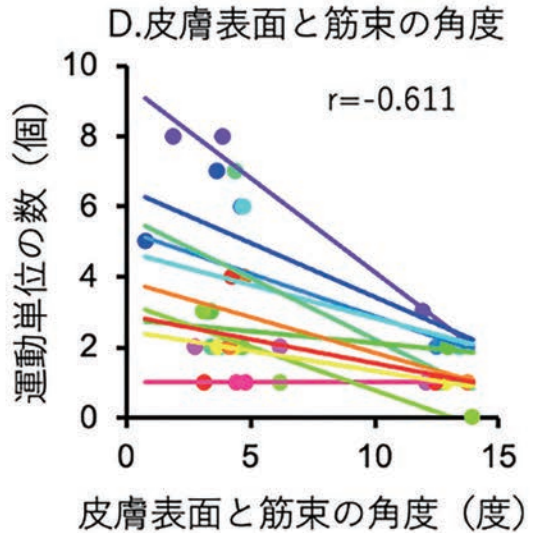
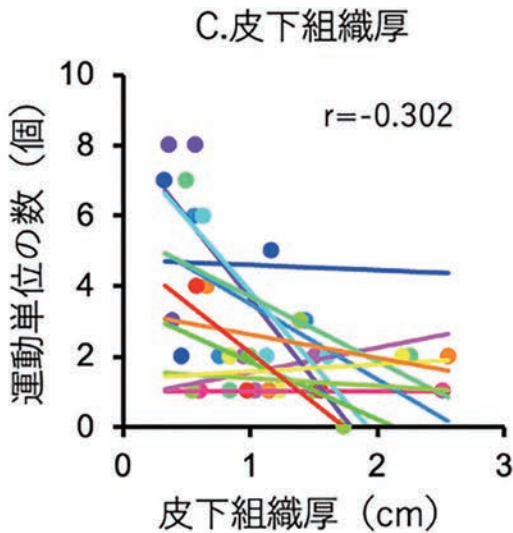


図2 検出された運動単位の数と皮下組織厚または皮膚表面と筋束の角度の関係

AとBは、測定部位別で表現した検出された運動単位の数と皮下組織厚(A)または皮膚表面と筋束の角度の関係(B)。円および線は対象者個人のデータ、回帰直線を示す。黒色の線は、すべての部位を合算した場合の回帰直線。CとDは、個人別で表現した検出された運動単位の数と皮下組織厚(C)または皮膚表面と筋束の角度の関係(D)。各対象者を異なる色で示す。

らの結果は、本研究で用いられた外側広筋を対象とした高密度表面筋電図電極の貼付において、貼付位置によって電極下における解剖学的特徴が異なることを示している。

本研究では、爆発的な筋力発揮中において、中位と比較して、近位および遠位でより多くの運動単位が高密度表面筋電図法によって取得された(図1C)。さらに、取得された運動単位の個数は、

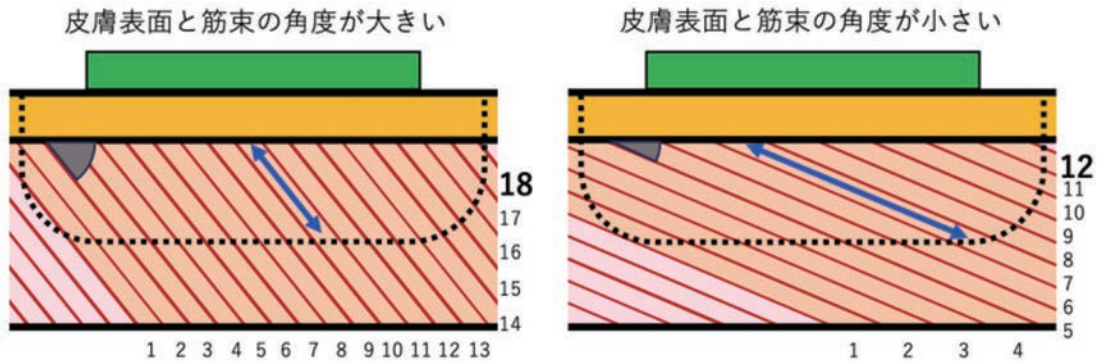


図3 皮膚表面と筋束の角度と検出領域に含まれる筋線維の数と長さの関係のモデル図

緑色の四角は高密度表面筋電図電極, 黒色の点線は電極の検出領域, 黄色は皮下組織, 桃色の領域は検出領域に含まれない筋線維, 橙色の領域は検出領域に含まれる筋線維, 数字は検出領域に含まれる筋線維の数, 青色の矢印は検出領域内に含まれる個々の筋線維の長さを示す。

電極下における解剖学的特徴と関連することが示された(図2)。持続的な筋力発揮中の外側広筋の運動単位を評価した先行研究の多くは, 中位や^{26, 27, 28)}, 遠位に電極を貼付することが多い²⁹⁾。本研究では, 取得された運動単位の数は, 電極下の皮下組織厚と有意な負の相関が示された。先行研究は, 皮下組織厚と高密度表面筋電図法によって取得される運動単位の数には, 有意な負の相関があることを報告している¹³⁾。皮下組織厚は, 運動単位から取得される電気信号の高い周波数の成分を減減する, いわゆる低域通過濾波としてはたらく³⁰⁾。このことは, 異なる活動電位が類似することになり, 高密度表面筋電図を用いた運動単位の活動電位の識別に必要な情報量の減少を招く¹⁰⁾。これらの先行研究の結果は, 本研究の結果と一致している。また, 本研究では, 取得された運動単位の数は, 皮膚表面と筋束の角度と負の相関を示した。高密度表面筋電図法を用いて持続的な筋力発揮中の運動単位を解析した先行研究では, 皮膚表面と筋束の角度が小さい紡錘状筋である上腕二頭筋は, 皮膚表面と筋束の角度が大きい羽状筋である前脛骨筋と比較して, 高密度表面筋電図法を用いて検出される運動単位の個数が少なかったことを明らかにしている¹⁴⁾。この結果は, 本研究の結果とは一致しない。先行研究では, 紡錘状筋は羽状筋と比較して, 運動単位活動電位

の形状の多様性が低いことが報告されている¹⁴⁾。皮膚表面と筋束の角度が大きい場合, 皮膚表面と筋束の角度が小さい場合と比較して, 電極の検出領域内に含まれる筋線維の数は多くなるが, 検出領域内に含まれる個々の筋線維の長さは短くなる(図3)。このことは, 持続的な筋力発揮を検証した先行研究と, 爆発的筋力の発揮を検証した本研究において結果が異なる要因である可能性がある。本研究の結果から, 爆発的な筋力発揮中の運動単位活動を評価するにあたって, 対象とする筋の電極下における解剖学的な特徴を考慮して, 電極貼付位置を決定することが, 検出される運動単位の数において重要であることが示唆された。

膝伸展筋力発揮のRFDはMVCと比較して, アスリートの運動パフォーマンスや¹⁾, 高齢者の身体機能と関連しており²⁾, こうした爆発的筋力の発揮中は特異的な運動単位活動によって実施されている。したがって, 本研究で示された高密度表面筋電図法を用いた爆発的筋力の発揮中における運動単位の検出数と解剖学的特徴の関連は, トレーニング科学や健康科学において重要な示唆を与える。本研究で用いられた高密度表面筋電図法は, 爆発的な筋力発揮中の運動単位活動の急性変化または慢性変化を非侵襲的に評価することができる。先行研究では, RFDが単回の運動前後において, MVCよりも大きく急性的に低下するこ

とから、神経筋系の疲労の指標として利用できる可能性を示している³¹⁾。また、中程度の強度で実施されることが多いアスリートを対象とした従来のリハビリテーションプログラムの実施において、MVCは回復する一方で、RFDが回復しないことが報告されている³²⁾。また、特定の筋力トレーニングはMVCを増加させた一方で、RFDおよび爆発的な筋力発揮中の運動単位活動は改善しないことを報告しており、RFDを改善するためには、特異的なトレーニングが必要である可能性が指摘されている³³⁾。また、加齢や神経疾患による神経活動の変性において、RFDはMVC以上に早期に変化を捉える指標となる可能性が示されている^{34, 35)}。本研究は、アスリートのコンディショニング、トレーニングやリハビリテーションのプログラム立案、加齢や神経疾患などに用いられるバイオマーカーとしてのRFDおよびそれを支える生理メカニズムである運動単位活動の評価方法に重要な示唆を与える。今後は、本研究で提供される方法論的知見をもとに、RFDおよびそれを支える生理メカニズムである運動単位活動の評価を通じて、アスリートのコンディショニング、トレーニングやリハビリテーションのプログラム立案、加齢や神経疾患の早期発見など、各種研究領域で詳細な検討が行われることが期待される。

結 論

本研究では、高密度表面筋電図法を用いた爆発的筋力の発揮中における外側広筋の運動単位活動の記録において、電極を外側広筋の皮膚表面における遠位または近位に貼付することによって、中に貼付する場合と比較して、より多くの運動単位が検出できることが明らかになった。また、こうした電極貼付位置の違いによる運動単位の検出数の違いには、電極下における皮下組織厚および皮膚表面と筋束の角度が関連していることが示された。

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。

文 献

- 1) Tillin N.A., Pain M.T., Folland J.: Explosive force production during isometric squats correlates with athletic performance in rugby union players, *J. Sports Sci.*, **31**: 66-76, 2013. doi: 10.1080/02640414.720704(2012)
- 2) Osawa Y., Studenski S.A., Ferrucci L.: Knee extension rate of torque development and peak torque: associations with lower extremity function, *J. Cachexia Sarcopenia Muscle*, **9**: 530-539, doi: 10.1002/jcsm.12285(2018)
- 3) Moritani T.: Neuromuscular adaptations during the acquisition of muscle strength, power and motor tasks, *J. Biomech.*, **26** Suppl 1: 95-107, doi: 10.1016/0021-9290(93)90082-p(1993)
- 4) Moritani T., deVries H.A.: Potential for gross muscle hypertrophy in older men, *J. Gerontol.*, **35**: 672-682, doi: 10.1093/geronj/35.5.672(1980)
- 5) Balshaw T.G., Massey G.J., Maden-Wilkinson T.M., Morales-Artacho A.J., McKeown A., Appleby C. L., Folland J. P.: Changes in agonist neural drive, hypertrophy and pre-training strength all contribute to the individual strength gains after resistance training, *Eur. J. Appl. Physiol.*, **117**: 631-640, doi: 10.1007/s00421-017-3560-x(2017)
- 6) Del Vecchio A., Negro F., Holobar A., Casolo A., Folland J.P., Felici F., Farina D.: You are as fast as your motor neurons: speed of recruitment and maximal discharge of motor neurons determine the maximal rate of force development in humans, *J. Physiol.*, **597**: 2445-2456, doi: 10.1113/JP277396(2019)
- 7) Maffiuletti N.A., Aagaard P., Blazevich A.J., Folland J., Tillin N., Duchateau J.: Rate of force development: physiological and methodological considerations, *Eur. J. Appl. Physiol.*, **116**: 1091-1116, doi: 10.1007/s00421-016-3346-6(2016)
- 8) Hunter S.K., Pereira H.M., Keenan K.G.: The aging neuromuscular system and motor performance, *J.*

- Appl. Physiol. (1985)*, **121**: 982-995, doi: 10.1152/jappphysiol.00475.2016(2016)
- 9) Duchateau J., Baudry S.: Maximal discharge rate of motor units determines the maximal rate of force development during ballistic contractions in human, *Front. Hum. Neurosci.*, **8**: 234, doi: 10.3389/fnhum.2014.00234(2014)
 - 10) Del Vecchio A., Holobar A., Falla D., Felici F., Enoka R.M., Farina D.: Tutorial: Analysis of motor unit discharge characteristics from high-density surface EMG signals, *J. Electromyogr. Kinesiol.*, **53**: 102426, 2020. doi: 10.1016/j.jelekin.102426(2020)
 - 11) Martinez-Valdes E., Enoka R.M., Holobar A., McGill K., Farina D., Besomi M., Hug F., Falla D., Carson R.G., Clancy E.A., Disselhorst-Klug C., van Dieen J.H., Tucker K., Gandevia S., Lowery M., Sogaard K., Besier T., Merletti R., Kiernan M.C., Rothwell J.C., Perreault E., Hodges P.W.: Consensus for experimental design in electromyography (CEDE) project: Single motor unit matrix, *J. Electromyogr. Kinesiol.*, **68**: 102726, doi: 10.1016/j.jelekin.2022.102726(2023)
 - 12) Holobar A., Farina D., Gazzoni M., Merletti R., Zazula D.: Estimating motor unit discharge patterns from high-density surface electromyogram, *Clin. Neurophysiol.*, **120**: 551-562, doi: 10.1016/j.clinph.2008.10.160(2009)
 - 13) Oliveira D.S., Casolo A., Balshaw T.G., Maeo S., Lanza M.B., Martin N.R.W., Maffulli N., Kinfe T.M., Eskofier B.M., Folland J.P., Farina D., Del Vecchio A.: Neural decoding from surface high-density EMG signals: influence of anatomy and synchronization on the number of identified motor units, *J. Neural. Eng.*, **19**, doi: 10.1088/1741-2552/ac823d(2022)
 - 14) Francic A., Holobar A.: On the Reuse of Motor Unit Filters in High Density Surface Electromyograms Recorded at Different Contraction Levels, *Ieee Access*, **9**: 115227-115236, doi: 10.1109/Access.2021.3104762(2021)
 - 15) Blazeovich A.J., Gill N.D., Zhou S.: Intra- and intermuscular variation in human quadriceps femoris architecture assessed in vivo, *J. Anat.*, **209**: 289-310, doi: 10.1111/j.1469-7580.2006.00619.x(2006)
 - 16) Martin-Rodriguez S., Gonzalez-Henriquez J.J., Diaz-Conde J.C., Calbet J.A.L., Sanchis-Moysi J.: The relationship between muscle thickness and pennation angle is mediated by fascicle length in the muscles of the lower extremities, *Sci. Rep.*, **14**: 14847, doi: 10.1038/s41598-024-65100-6(2024)
 - 17) Lanza M.B., Baghi R., Frakes N., Lateef S., Martins L.T.C., Zhang L.Q., Gray V.L.: Differences in muscle morphology assessed by ultrasound at various muscle regions and their impact on voluntary and involuntary force production, *Sci. Rep.*, **15**: 9247, doi: 10.1038/s41598-025-94158-z(2025)
 - 18) Tillin N.A., Jimenez-Reyes P., Pain M.T., Folland J.P.: Neuromuscular performance of explosive power athletes versus untrained individuals, *Med. Sci. Sports Exerc.*, **42**: 781-790, doi: 10.1249/MSS.0b013e3181be9c7e(2010)
 - 19) Holobar A., Zazula D.: Multichannel blind source separation using convolution kernel compensation, *Ieee Transactions on Signal Processing*, **55**: 4487-4496, doi: 10.1109/Tsp.2007.896108(2007)
 - 20) Holobar A., Minetto M.A., Farina D.: Accurate identification of motor unit discharge patterns from high-density surface EMG and validation with a novel signal-based performance metric, *J. Neural. Eng.*, **11**: 016008, doi: 10.1088/1741-2560/11/1/016008(2014)
 - 21) Holobar A., Zazula D.: Correlation-based decomposition of surface electromyograms at low contraction forces, *Med. Biol. Eng. Comput.*, **42**: 487-495, doi: 10.1007/BF02350989(2004)
 - 22) Del Vecchio A., Casolo A., Negro F., Scorcelletti M., Bazzucchi I., Enoka R., Felici F., Farina D.: The increase in muscle force after 4 weeks of strength training is mediated by adaptations in motor unit recruitment and rate coding, *J. Physiol.*, **597**: 1873-1887, doi: 10.1113/JP277250(2019)
 - 23) Bakdash J. Z., Marusich L.R.: Repeated Measures Correlation, *Front. Psychol.*, **8**: 456, doi: 10.3389/fpsyg.2017.00456(2017)
 - 24) Stock M.S., Oranchuk D.J., Burton A.M., Phan D.C.: Age-, sex-, and region-specific differences in skeletal muscle size and quality, *Appl. Physiol. Nutr. Metab.*, **45**: 1253-1260, doi: 10.1139/apnm-2020-0114(2020)
 - 25) Oranchuk D.J., Stock M.S., Nelson A.R., Storey A.G., Cronin J.B.: Variability of regional quadriceps echo intensity in active young men with and without subcutaneous fat correction, *Appl. Physiol. Nutr.*

- Metab.*, **45**: 745-752, doi: 10.1139/apnm-2019-0601 (2020)
- 26) Nishikawa T., Takeda R., Ueda S., Igawa K., Hirono T., Okudaira M., Mita Y., Ohya T., Watanabe K.: Quercetin ingestion alters motor unit behavior and enhances improvement in muscle strength following resistance training in older adults: a randomized, double-blind, controlled trial, *Eur. J. Nutr.*, **64**: 117, doi: 10.1007/s00394-025-03634-9 (2025)
- 27) Watanabe K., Holobar A., Kouzaki M., Ogawa M., Akima H., Moritani T.: Age-related changes in motor unit firing pattern of vastus lateralis muscle during low-moderate contraction, *Age. (Dordr.)*, **38**: 48, doi: 10.1007/s11357-016-9915-0 (2016)
- 28) Hirono T., Igawa K., Okudaira M., Takeda R., Nishikawa T., Watanabe K.: Time-of-day effects on motor unit firing and muscle contractile properties in humans, *J. Neurophysiol.*, **131**: 472-479, doi: 10.1152/jn.00368.2023 (2024)
- 29) Martinez-Valdes E., Negro F., Falla D., De Nunzio A.M., Farina D.: Surface electromyographic amplitude does not identify differences in neural drive to synergistic muscles, *J. Appl. Physiol. (1985)*, **124**: 1071-1079, doi: 10.1152/jappphysiol.01115.2017 (2018)
- 30) Farina D., Negro F., Gazzoni M., Enoka R.M.: Detecting the unique representation of motor-unit action potentials in the surface electromyogram, *J. Neurophysiol.*, **100**: 1223-1233, doi: 10.1152/jn.90219.2008 (2008)
- 31) D'Emanuele S., Maffioletti N.A., Tarperi C., Rainoldi A., Schena F., Boccia G.: Rate of Force Development as an Indicator of Neuromuscular Fatigue: A Scoping Review, *Front. Hum. Neurosci.*, **15**: 701916, doi: 10.3389/fnhum.2021.701916 (2021)
- 32) Buckthorpe M., Roi G.S.: The time has come to incorporate a greater focus on rate of force development training in the sports injury rehabilitation process, *Muscles Ligaments Tendons J.*, **7**: 435-441, doi: 10.11138/mltj/2017.7.3.435 (2017)
- 33) Del Vecchio A., Casolo A., Dideriksen J.L., Aagaard P., Felici F., Falla D., Farina D.: Lack of increased rate of force development after strength training is explained by specific neural, not muscular, motor unit adaptations, *J. Appl. Physiol. (1985)*, **132**: 84-94, doi: 10.1152/jappphysiol.00218.2021 (2022)
- 34) Lomborg S.D., Dalgas U., Hvid L.G.: The importance of neuromuscular rate of force development for physical function in aging and common neurodegenerative disorders - a systematic review, *J. Musculoskelet. Neuronal Interact.*, **22**: 562-586 (2022)
- 35) Kamo T., Asahi R., Azami M., Ogihara H., Ikeda T., Suzuki K., Nishida Y.: Rate of torque development and the risk of falls among community dwelling older adults in Japan, *Gait. Posture.*, **72**: 28-33, doi: 10.1016/j.gaitpost.2019.05.019 (2019)