

求心性および遠心性収縮運動による  
運動単位動員特性の変化  
～高密度表面筋電図を用いた解析～

中京大学 廣野 哲也  
(共同研究者) 愛知工業大学 功刀 峻  
早稲田大学 吉村 茜

**Acute Changes in Motor Unit Discharge Property After Concentric Versus  
Eccentric Contraction Exercise in Knee Extensor**

by

Tetsuya Hirono

*Laboratory of Neuromuscular Biomechanics,  
School of Health and Sport Science, Chukyo University*

Shun Kunugi

*Center for General Education, Aichi Institute of Technology*

Akane Yoshimura

*Faculty of Education and Integrated Arts and Sciences,  
Waseda University*

ABSTRACT

The aim of this study is to compare motor unit discharge properties after exercise between concentric and eccentric contraction. Eighteen young healthy men performed repetitive concentric or eccentric isokinetic knee extension until they exerted less than 80% of the baseline strength. High-density surface electromyography was recorded during ramp-up isometric contraction to 50% of baseline strength and individual motor units were identified before and after the exercise. Motor units were tracked before and

after the exercise. Muscle cross-sectional area evaluated by ultrasound and electrically evoked torque were measured. Sixty-four and fifty-three motor units were analyzed in concentric and eccentric conditions, respectively. Motor units recruited with moderate to high recruitments thresholds significantly decreased recruitment thresholds under both conditions. Motor unit discharge rate significantly increased after concentric contraction compared to eccentric contraction. A significant greater increase in muscle cross sectional area was noted under concentric condition. The evoked torque was significantly decreased under both conditions, but no difference between the conditions. These findings suggested that concentric contraction to failure contributes to greater neural input to muscle and metabolic responses than eccentric contraction.

#### キーワード

高密度表面筋電図, 運動単位, 求心性収縮, 遠心性収縮, 疲労運動

#### Keyword

high-density surface EMG, motor unit, concentric contraction, eccentric contraction, fatiguing exercise

#### 要 旨

本研究の目的は、求心性および遠心性収縮運動直後の運動単位動員特性を調べることである。最大等速性膝伸展運動を求心性条件、遠心性条件を開始前筋力の80%以下に疲労するまで反復して行った。疲労運動の前後に最大筋力の50%の漸増的筋力発揮を行い、高密度表面筋電図を外側広筋から取得し、個々の運動単位活動を記録した。運動前後に外側広筋の筋断面積を超音波診断装置にて計測し、電気的誘発筋力も記録した。検出された運動単位数は求心性条件で64、遠心性条件で53であった。その結果、両条件ともに中高強度で動員される運動単位が有意に動員閾値を下げた。特に求心性条件後に有意に大きな発火頻度上昇と大きな筋断面積の即時増加が生じた。両条件で電気誘発筋力は低下し、条件間差はなかった。これら結果から、求心性収縮を疲労困憊まで行うと、遠心性収縮よりも大きな筋への神経入力が発

生し、代謝ストレスも大きくなることが示唆された。

#### 緒 言

レジスタンス運動は様々な要素から成り立っており、それらは形態学的または神経学的適応を引き起こすが、神経学的適用については方法論的制約によって詳細に検証することが難しかった。近年、高密度表面筋電図を用いることで中枢神経系特性を計測できる新たな方法が開発された<sup>1,2)</sup>。運動単位の動員閾値で階層分けを行い、異なる発揮筋力の強度ごとの発火頻度を評価することで、運動単位活動特性を中枢神経系から末梢の筋への神経入力指標として詳細に調べることが可能となり<sup>3,4)</sup>、神経筋システムのより詳細な生理学的情報が明らかになってきた。

異なる収縮様式、つまり求心性収縮と遠心性収縮とでは発揮トルク、神経筋適応、代謝反応が異なる。遠心性収縮は求心性収縮よりも強い張力

を発揮でき、機械的ストレスが大きくなる<sup>5)</sup>が、神経活動は抑制される<sup>6,7)</sup>。遠心性収縮は酸素消費量や乳酸蓄積量などに示されるように代謝コストを少なくし<sup>7,8)</sup>、そのため遠心性収縮は求心性収縮よりもパフォーマンスコスト比が大きくなる<sup>9)</sup>。遠心性および求心性収縮中の運動単位発火特性を調べた先行研究では遠心性収縮よりも求心性収縮が高い発火頻度を有することを報告した<sup>10)</sup>。しかしながら、収縮様式が高閾値、低閾値動員の運動単位それぞれにどのような影響を与えるかについては不明な点も多い。動員閾値毎に運動単位には異なる特徴や、異なる変化を示すことが多くの研究で報告されている<sup>3,11)</sup>。

レジスタンス運動後には、筋力が低下し、これは神経筋疲労と定義され<sup>12)</sup>、中枢と末梢の疲労を含んでいる<sup>13)</sup>。本研究の目的は、求心性または遠心性収縮による疲労運動課題直後の運動単位の発火特性、筋収縮特性、代謝反応の即時的変化を調べることにした。

## 1. 研究方法

下肢に神経学および整形外科的な既往のない18名の健常若年男性(平均±標準偏差, 年齢: 24.9 ± 5.3歳, 身長: 170.8 ± 5.6 cm, 体重: 67.2 ± 11.4 kg)が研究に参加し、1週間の間隔を空けて2度実験室に訪れ、求心性条件、遠心性条件を実施した。参加者には事前に実験の目的および手順を書面と口頭で説明し、同意を得た後に実施した。なお本研究は中京大学の「人を対象とする研究に関する倫理審査委員会」の承認を得て実施された。

参加者は膝伸展筋力計 (Takei Scientific Instruments Co., Ltd.) にて膝関節屈曲90度位の最大等尺性膝伸展筋力 (MVC) を計測した。50% MVCの漸増的筋力発揮中の外側広筋の活動電位を64の表面電極 (電極間距離8mm) からなる高密度表面筋電図 (GR08MM1305, OT

Bioelectronica, Torino, Italy) を用いて、デジタルアナログ変換器 (Quattrocento, OT Bioelectronica, Torino, Italy) にて2048Hzのサンプリング周波数で取得し、10-500Hzのバンドパスフィルターで処理した。電極貼付位置は大転子と膝蓋骨外側上縁の midpoint とし、剃毛とアルコールでの脱脂処理後に貼付した。得られた単極信号はソフトウェア上 (MATLAB R2019a, MathWorks GK, Tokyo, Japan; DEMUSE software ver. 5.0.1; The University of Maribor, Slovenia) で個々の運動単位に分解された。生理学的なエラーを含むものを除外し、得られた個々の運動単位波形を元に疲労運動前後に同様の波形を追従できたものを解析に用いた<sup>14,15)</sup>。個々の運動単位の発火頻度は、漸増筋力発揮中の0-25%, 25-40%, 40-50% MVC中の発火頻度平均として算出した。さらに動員閾値毎に、0-25%MVCで動員され始める運動単位群 (MU0-25), 25-40% MVCで動員され始める運動単位群 (MU25-40), 40-50%MVCで動員され始める運動単位群 (MU40-50) と仕分けた。

電気刺激装置 (DS7AH, Digitimer, Ltd., Hertfordshire, UK) を用いて、大腿四頭筋近位部と遠位部に装着した表面電極から200マイクロ秒の単発矩形波を最大の誘発筋力が出力できる電流を流すことで誘発筋力を測定した。

超音波診断装置 (LOGIQ e Premium, GE Healthcare) の拡張モードを用いて、臥位にて外側広筋の筋断面積を計測した。計測部位は、大転子と外側上顆を結ぶ30%, 50%, 70%位にて計測し、その平均値を解析に用いた。

運動課題はダイナモメーター (CON-TREX; CMV AG, Dübendorf, Switzerland) を用いて実施し、膝関節屈曲90度から20度までの範囲での求心性収縮または遠心性収縮を全力で実施する課題とした。角速度は毎秒30度とし、10回を1セットとした。セット間休息は60秒間とし、セット間に膝関節屈曲90度での最大等尺性膝伸展筋力

を計測し、運動開始前の80%を下回るまでセットを繰り返し行った。

統計分析において、反復測定二元配置分散分析にて筋断面積と誘発筋力の変化を検討した。分割プロットデザインの二元配置または三元配置分散分析を用いて、各運動強度での運動単位発火頻度の変化、動員閾値の変化を検討した。各値は平均値±標準偏差で記載した。有意水準は5%とした。

## 2. 研究結果

求心性運動は6.6±3.6セット、遠心性運動は7.4±3.3セット実施された。得られた運動単位数は求心性条件で66、遠心性条件で53の運動単位が抽出された。

動員閾値の変化は表1に示す。三元配置分散分析の結果、有意な時期の主効果を認め(p<0.001)、動員閾値が疲労運動後に低下した。さらに収縮様式と時期の交互作用を認め(p=0.031)、遠心性収縮条件での動員閾値低下の程度が大きかった。

発火頻度の結果を表2に示す。0-25%MVC発揮中の発火頻度における二元配置分散分析および25-40%MVC発揮中の発火頻度における三元配置分散分析の結果、交互作用は認めず、時期の主効果を認めた(ともにp<0.001)。40-50%MVC発揮中の発火頻度における三元配置分散分析の結果、時期の主効果(p<0.001)と併せて収縮様式と時期の交互作用も認め(p=0.030)、求心性条件で大きな発火頻度上昇を認めた。

筋断面積および誘発筋力の結果を表3に示す。筋断面積における二元配置分散分析の結果、時期の主効果(p<0.001)と交互作用を認め(p=0.001)、求心性条件で大きな断面積上昇を認めた。誘発筋力の二元配置分散分析の結果、交互作用はなく(p=0.110)、時期の主効果のみ認めた(p<0.001)。

## 3. 考察

求心性収縮および遠心性収縮による疲労運動課題を実施し、その前後で運動単位活動、筋断面積、電気刺激による誘発筋力の評価を行った。両条件

表1 各運動単位群における動員閾値の変化(単位は%MVC)

	求心性条件		遠心性条件	
	運動前	運動後	運動前	運動後
MU0-25	18.8±4.3	18.5±4.3	19.2±4.3	17.6±5.1
MU25-40	33.5±4.1	29.6±4.4	33.6±4.2	28.1±4.8
MU40-50	43.8±3.0	37.1±4.5	43.4±3.2	34.8±3.9

表2 各運動単位群における発火頻度の変化(単位はpps)

		求心性条件		遠心性条件	
		Pre	Post	Pre	Post
0-25%MVC発揮中	MU0-25	8.9±1.7	9.6±2.6	7.7±1.5	8.8±2.1
	MU25-40	11.5±1.7	14.0±3.1	10.5±1.6	12.8±2.5
25-40%MVC発揮中	MU0-25	9.2±1.7	12.1±2.6	8.4±1.9	10.7±2.2
	MU25-40	13.8±2.1	17.6±3.6	12.5±2.0	15.3±2.9
40-50%MVC発揮中	MU25-40	11.9±2.2	15.4±2.9	10.8±2.0	13.6±2.3
	MU40-50	8.9±1.5	13.4±3.0	8.7±2.2	12.7±3.0

表3 筋断面積および誘発筋力の変化

	求心性条件		遠心性条件	
	運動前	運動後	運動前	運動後
筋断面積 (cm <sup>2</sup> )	63.6±8.8	70.3±10.1	63.6±9.7	67.9±10.0
誘発筋力 (Nm)	51.2±8.9	30.7±8.0	52.3±6.8	35.1±10.1

ともに運動単位の発火頻度上昇と誘発筋力の減少が生じ、筋末梢性の疲労が生じたことで、中枢神経系が補間するようにはたらいとと考えられる。筋断面積も両条件で増加し、代謝性の反応が生じた。条件間の比較において、求心性運動後に筋断面積上昇が大きく、運動単位発火頻度も高強度筋力発揮中に顕著な上昇を認めた。

疲労運動課題後に発火頻度が上昇するのは、筋末梢性の疲労により筋の出力低下が生じたため、それを補うように中枢神経系の活動が上昇したと考えられる<sup>16)</sup>。本研究で用いた電気刺激による誘発筋力は、中枢神経系の活動を切り離し、筋末梢性の収縮特性のみを評価することができる。誘発筋力は両条件で有意に減少し(表3)、本研究課題で用いた運動開始前の80%以下に最大筋力が低下する疲労運動課題によって、筋末梢性の疲労を誘発したと考えられる。

40-50% MVC 発揮中において、求心性条件で顕著な発火頻度上昇を認めた(表2)。前脛骨筋で収縮様式ごとの運動単位発火特性を調べた先行研究<sup>6)</sup>では、求心性収縮中に大きな発火頻度を有することを示しており、これは求心性が大きなエネルギー消費を要することが原因と考えられる<sup>17)</sup>。実際に本研究においても、即時的な筋断面積増加で評価した代謝性変化は、求心性条件でより顕著な増加を示した(表3)。即時的な筋断面積の増加は、筋肥大に重要な代謝性ストレス指標であり<sup>18, 19)</sup>、大きなエネルギーコストおよび代謝ストレスが、求心性条件での中枢性の変化を誘発した可能性がある。

本研究は即時的な神経筋の収縮特性を評価したにすぎないため、トレーニング介入における各特性の変化については明らかでなく、今後さらなる検討が必要である。

#### 4. 結 論

求心性または遠心性収縮の運動を疲労するまで

実施した際の運動単位活動および筋収縮特性を評価した。疲労運動後に筋断面積の即時的な増加、誘発筋力の低下そして運動単位発火頻度の上昇が生じた。特に求心性収縮条件後には、筋断面積の増加と高強度筋力発揮時の運動単位発火頻度上昇が顕著であった。これら結果より、求心性収縮疲労運動は遠心性収縮と比較して、筋への大きな神経入力と代謝性ストレスを誘発することが示唆された。

#### 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。研究指導いただいた中京大学の渡邊航平教授に感謝申し上げます。解析手法についてご指導いただいたUniversity of MariborのAleš Holobar教授にも感謝申し上げます。また、本研究に参加していただいた参加者の皆様にも感謝申し上げます。

#### 文 献

- 1) Holobar, A. and D. Zazula, On the selection of the cost function for gradient-based decomposition of surface electromyograms. *Annu Int Conf IEEE Eng Med. Biol. Soc.*, 2008: p. 4668-71 (2008)
- 2) Holobar, A. and D. Zazula, Correlation-based decomposition of surface electromyograms at low contraction forces. *Med. Biol. Eng. Comput.*, 42 (4) : p. 487-95 (2004)
- 3) Watanabe, K., et al., Age-related changes in motor unit firing pattern of vastus lateralis muscle during low-moderate contraction. *Age (Dordr)*, 38 (3) : p. 48 (2016)
- 4) Watanabe, K., et al., Modulation of Neural and Muscular Adaptation Processes During Resistance Training by Fish Protein Ingestions in Older Adults. *J. Gerontol. A Biol. Sci. Med. Sci.*, 75 (5) : p. 867-874 (2020)
- 5) Hanten, W.P. and C.L. Ramberg, Effect of stabilization on maximal isokinetic torque of the quadriceps femoris muscle during concentric and

- eccentric contractions. *Phys. Ther.*, **68** (2) : p. 219-22(1988)
- 6) Duchateau, J. and S. Baudry, Insights into the neural control of eccentric contractions. *J. Appl. Physiol.* (1985), **116** (11) : p. 1418-25(2014)
  - 7) Gonzalez-Izal, M., E. Lusa Cadore, and M. Izquierdo, Muscle conduction velocity, surface electromyography variables, and echo intensity during concentric and eccentric fatigue. *Muscle Nerve*, **49** (3) : p. 389-97(2014)
  - 8) Hoppeler, H., Moderate Load Eccentric Exercise: A Distinct Novel Training Modality. *Front Physiol.*, **7**: p. 483(2016)
  - 9) Nishikawa, K., Eccentric contraction: unraveling mechanisms of force enhancement and energy conservation. *J. Exp. Biol.*, **219** (Pt 2) : p. 189-96 (2016)
  - 10) Pasquet, B., A. Carpentier, and J. Duchateau, Specific modulation of motor unit discharge for a similar change in fascicle length during shortening and lengthening contractions in humans. *J. Physiol.*, **577** (Pt 2) : p. 753-65(2006)
  - 11) Watanabe, K. and A. Holobar, Quercetin ingestion modifies human motor unit firing patterns and muscle contractile properties. *Exp. Brain Res.*, **239** (5) : p. 1567-1579(2021)
  - 12) Gandevia, S.C., Spinal and supraspinal factors in human muscle fatigue. *Physiol. Rev.*, **81** (4) : p. 1725-89(2001)
  - 13) Siegler, J.C. and P. Marshall, The effect of metabolic alkalosis on central and peripheral mechanisms associated with exercise-induced muscle fatigue in humans. *Exp. Physiol.*, **100** (5) : p. 519-30(2015)
  - 14) Kunugi, S., et al., Motor unit firing patterns on increasing force during force and position tasks. *J. Neurophysiol.*, **126** (5) : p. 1653-1659(2021)
  - 15) Del Vecchio, A., et al., 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** (9) : p. 2445-2456(2019)
  - 16) Contessa, P., A. Adam, and C.J. De Luca, Motor unit control and force fluctuation during fatigue. *J. Appl. Physiol.*(1985), **107** (1) : p. 235-43(2009)
  - 17) Pinniger, G.J., et al., Tension regulation during lengthening and shortening actions of the human soleus muscle. *Eur. J. Appl. Physiol.*, **81** (5) : p. 375-83(2000)
  - 18) Schoenfeld, B.J., Potential mechanisms for a role of metabolic stress in hypertrophic adaptations to resistance training. *Sports Med.*, **43** (3) : p. 179-94 (2013)
  - 19) Hirono, T., et al., Relationship Between Muscle Swelling and Hypertrophy Induced by Resistance Training. *J. Strength Cond. Res.*, **36** (2) : p. 359-364 (2022)