

等尺性筋収縮時の力の発揮勾配と筋活動電位の立ち上がりの関係性

The relationship between rate of force development and initial rise in muscle action potential when performing isometric exercises

上村 孝司*, 村松 憲*, 吉岡 耕一**, 伊藤 拳**, 渡辺 剛***, 日下部 辰三**

Takashi KAMIMURA*, Ken MURAMATSU*, Koichi YOSHIOKA**, Susumu ITO**
Tsuyoshi WATANABE*** and Tatsumi KUSAKABE**

Abstract

The purpose of this study was to examine the relationship between the maximum rate of force development (RFD) and maximum rate of rise of the absolute electromyography amplitude (RRE) of elbow extensors in healthy subjects. Elbow extension force and triceps brachii EMG amplitude were isometrically measured at 25, 50, 75, and 100% target contraction intensities relative to the maximal voluntary contraction. The force signal was numerically differentiated to estimate the RFD. To calculate the RRE, the absolute values of EMG amplitude signal were first numerically filtered with a Gaussian filter with a cutoff frequency of 4Hz, and then numerically differentiated. These RFD and RRE increased almost linearly with contraction intensity, and they showed a significant positive correlation. These results suggested that the RRE might be useful as an index of neural components in muscle contraction activity.

Key words; Force, EMG, RFD

I. はじめに

筋出力の評価として、筋力発揮時の力曲線における発揮勾配、つまり単位時間あたりの力の変化率の最大値（力の最大発揮勾配；Rate of Force Development；RFD）が用いられている。先行研究ではRFDに影響を及ぼす生理学的要因として、筋線維タイプとミオシン重鎖の配列、筋横断

面積、最大筋出力、筋腱複合体の粘弾性要素及び筋の神経支配が挙げられている（Wilkie, 1949；Grimby et al., 1981；Schmidtbleicher, 1992；Harridge et al., 1996；Aagaard & Throstensson, 2003；Bojsen-Moller et al., 2005；Andersen & Aagaard, 2006）。また、Aagaard et al. (2002) やGurber & Gollhofer (2004) は、レジスタンストレーニングや神経系トレーニング前後のRFD

* 健康科学大学健康科学部理学療法学科 (Department of Physical Therapy, Health Science University)

** 国士舘大学大学院救急システム研究科 (Graduate School of Emergency Medical System, Kokushikan University)

*** 国士舘大学大学院スポーツ・システム研究科 (Graduate School of Sport System, Kokushikan University)

の増加は、Ia シナプス前抑制が関与する神経要因によると報告している。すなわち、それらのRFDの増加に関して、収縮要素だけではなく神経要因の関与が示唆されている。

近年我々は、筋電図より得られた信号をもとに筋活動電位の変化率の最大値 (Rate of Rise of absolute EMG amplitude ; RRE) を検討した (Kamimura et al., 2009)。RFDは神経要因と収縮要素の複合であるので、RFDの解析のみでは神経要因の検討としては不十分である。すなわち、筋出力発揮時の神経要因の関与を明らかにするには、筋活動電位から得られるRREの検討が有用であると考えられる。また、RREが筋活動における神経要因の指標をあらわすならば、RREが筋活動測定の新たな指標になりうると考えられる。

本研究では、収縮強度を変化させた肘関節伸展におけるRFDとRREの関係を検討することにより、RREの妥当性を明らかにすることを目的とした。

II. 方 法

1. 被験者

被験者は健康かつ活動的で、肘関節に既往症または外傷等の経験のない男性8名 (年齢 24.3 ± 4.0 歳、身長 177.1 ± 3.2 cm、体重 72.7 ± 12.1 kg、平均値 \pm 標準偏差) とした。被験者には事前に十分な説明を行い参加の同意を得た。

2. 測定姿勢

測定はKamimura et al. (2009) の測定に準じて行った。測定は被験者全員の利き手である右腕とし、被験者を肘関節屈曲及び伸展動作を分離できるようにセッティングしたテーブルに座らせた。被験者は高さの調節できる椅子を用いて、座位にて肘関節及び肩関節を矢状面にて90度に屈曲位となるように調節し、肘がテーブル上で水平になるようにした。右腕の手首及び前腕中部をロードセルに装着した木製のプレートにベルトにて固定

した。木製プレートはテーブルに垂直になるようロードセルに固定した。また、前腕は中間位とした。それぞれの被験者は、緊張性頸反射による肘関節屈曲及び伸展時の促通が起きないように、頭部を安静時の姿勢とした。また、左腕は体躯の左側に安静にさせた。

3. 筋出力発揮

ロードセル (ECB-50N, Showa Measuring Instrument Inc.) を用いて肘関節伸展時の筋出力を測定した。筋出力は増幅器を介して増幅し、10Hzのハイカットフィルターを介した後、サンプリング周波数1kHzにてデジタル化し、コンピュータシステム (Leg-1000, NIHON KODEN Ltd) に保存した。

4. EMG測定

筋活動 (EMG) の測定における被験筋は上腕三頭筋 (triceps brachii) とした。電極間3cmの双極表面誘導にてAg/AgCl電極 (直径10mm) を測定筋の筋腹に添付した。また、電極の走向は筋線維の走行に平行となるようにした。電極添付前に被験筋の皮膚毛を剃り拭き取ったのち、電極添付部位をアルコールで拭き前処理を行った。すべての測定において、皮膚表面の抵抗値は10k Ω 以下になるようにした。測定により得られたEMG信号は増幅器を介して増幅し、バンドパスフィルター (10-500Hz) を介したのち、サンプリング周波数1kHzにてデジタル化し、コンピュータ内のLeg-1000取り込んだ。

5. 実験手順

事前に動作を慣れさせるため、等尺性の肘関節伸展及び屈曲を複数回行わせた。次に、5秒間の肘関節等尺性最大伸展を3回行わせ、最も高かった値を最大随意収縮 (MVC) とした。その後、目標収縮強度を4段階に変化させた肘関節伸展を4回ずつ計16回行わせた。4段階の目標収縮強度は25%、50%、70%、100% MVCとし、被験者

ごとに無作為に収縮強度を組み合わせランダムに行わせた。それぞれの休息時間は5分とした。発揮された筋出力は、被験者前方に置かれたモニター上に表示し、被験者には目標の強度に合わせるよう指示した。

6. データ解析

被験者Aにおける肘関節等尺性伸展時の代表的な結果をFig.1に示した。力の最大発揮勾配(RFD)は筋出力発揮を微分し、肘関節伸展相での最初のピークとした。筋活動電位の最大変化率(RRE)を算出するために、Sakmann and Neher (1983)を参考に、区分周波数4 Hzのガウシアンフィルターを用いて、筋電図信号(EMS amplitude)を平滑化した。平滑化した信号を微分し、最初のピーク振幅をRREとした。区分周波数4 Hzのガウシアンフィルターを用いる前提として、被験者の実験試技を各周波数(1-5Hz)のガウシアンフ

ルターで平滑化し、ピークの確認を行った後、4 Hzのガウシアンフィルターを採用した(Fig2)。

被験者により偏差が異なるため、RFD及びRREは、5秒間の肘関節等尺性最大伸展の値によって標準化した。データ解析にはKyPlot5.0(KyensLab Inc)を用いた。

7. 統計処理

測定値は平均値 \pm 標準誤差で示した。各測定条件におけるRFDとRREの相関関係はピアソンの相関係数を用いて求めた。危険率はすべて5%とした。

Ⅲ. 結 果

収縮強度を変化させた際の肘関節伸展時のRFDとRREの値と各目標収縮強度における両データ間の相関係数をTable.1に、目標収縮強度に

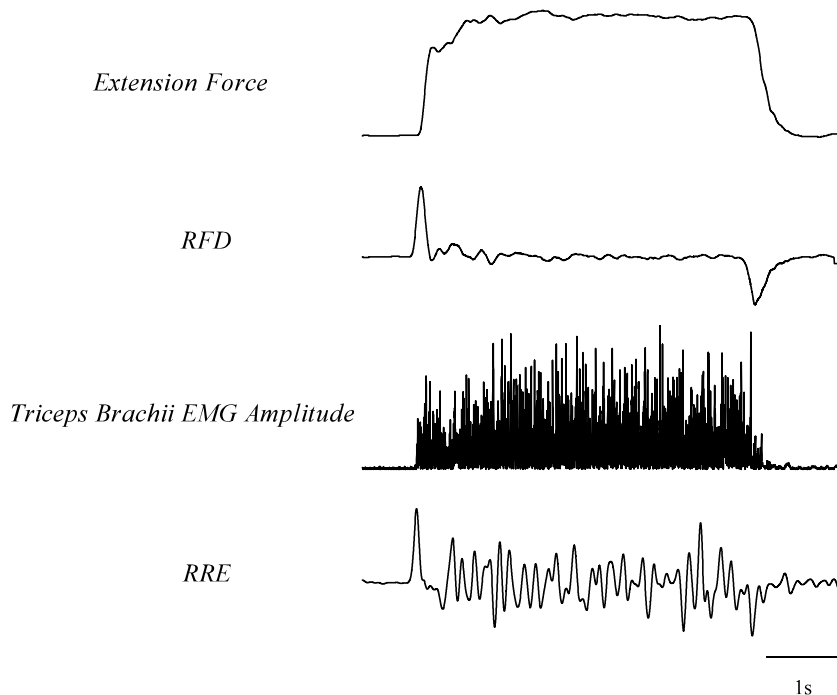


Fig.1 Representative records of force, its rate of rise (RFD), absolute amplitude of triceps brachii EMG, and its rate of rise (RRE). Positive deviation from the baseline in the force curve (top) represents isometric elbow extension.

対する実際の収縮時のRFDおよびRREの平均値をFig.3に、RFDとRREの相関関係をFig.4にそれぞれ示した。RFD及びRREは、目標収縮強度とほぼ同程度の値を示した。各収縮強度において、それぞれRFDとRREの間に有意な相関関係を示した。また、RFDとRREは、収縮強度の増加と共にほぼ直線的に増加し、全データによる相関係数は0.824 ($p<0.001$) で有意な正の相関関係を示した。

Ⅳ. 考 察

本研究では、収縮強度を変化させた肘関節伸展における力の最大発揮勾配（RFD）と筋活動電位の最大変化率（RRE）の関係を検討することを目的とした。

実験の結果、収縮強度の増加に伴いRFDとRREはほぼ直線的に増加した（Fig.3）。100% MVCの強度では事前のMVCよりも高くなる傾向を示し

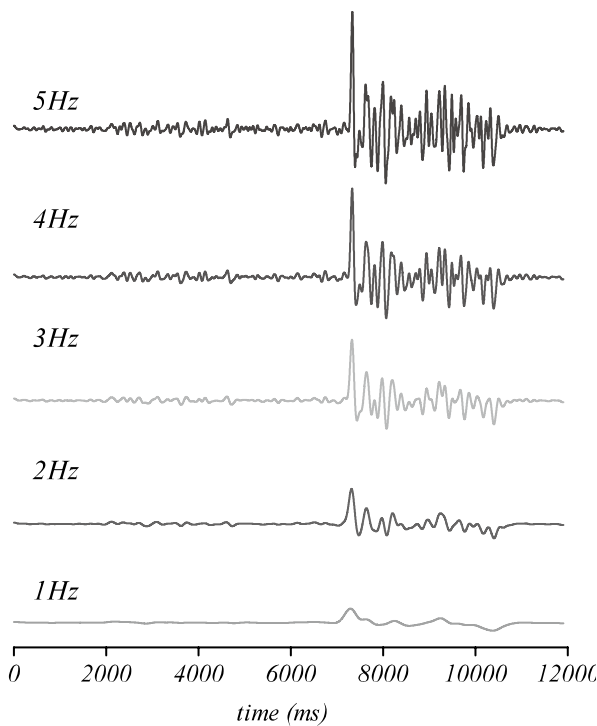


Fig.2 Representative records of rate of rise of absolute amplitude of triceps brachii EMG after applying gaussian filter with different cutoff frequencies in one subject.

Table.1 Values of RFD and RRE at each target contraction intensity. r represents the correlation coefficient of the data at each target contraction intensity.

	%MVC	25	50	75	100
RFD	(%)	38.18±6.66	63.27±8.53	80.61±9.23	130.21±12.73
RRE	(%)	26.29±5.28	44.56±8.52	70.18±12.56	113.52±14.74
correlation	r	0.841	0.639	0.436	0.703
	p-value	p<0.001	p<0.001	p<0.05	p<0.001
					mean±SEM

たが、その要因として動作に対して慣れが起こったことにより、大きな値となった可能性が考えられる。また、各収縮強度におけるRFDとRREは高い正の相関関係を示した(Fig.4)。Mirkov et al. (2004) は異なる収縮強度時のRFDを検討し、発揮する力の大きさによりRFDは直線的に変化することを報告している。本研究の結果も、Mirkov et al.の結果と同様なものとなり、RREはRFDと同様に低い運動強度に対しても収縮強度を反映する値となることが明らかとなった。ただし、Fig.3でみられるように、各収縮強度でRREはRFDより低い値となる傾向があった。このため、Fig.4ではRFDとRREの関係性は、 $y=x$ の線よりもRFD寄りに偏っている。その要因として、RREは神経要因のみを反映しているのに対し、RFDは収縮要素も反映しており、等尺性収縮であっても筋腱複合体の要因などが関与したのではないかと推察された(Bojsen-Moller et al., 2005)。

Agarred et al. (2002) やGurber & Gollhofer (2004) は、レジスタンストレーニングや神経系トレーニング前後では、Iaシナプス前抑制などの神経要因により、力の発揮勾配が増加する事を報告している。RFDは神経要因と収縮要素の複合であるのに対し、RREは神経要因のみである。つまり、これまでに検証されてきたRFDに比べ収縮要素を考慮せずに神経要因を検討するには、本研究のRREのような指標がより神経要因の影響を明らかにできると考えられる。

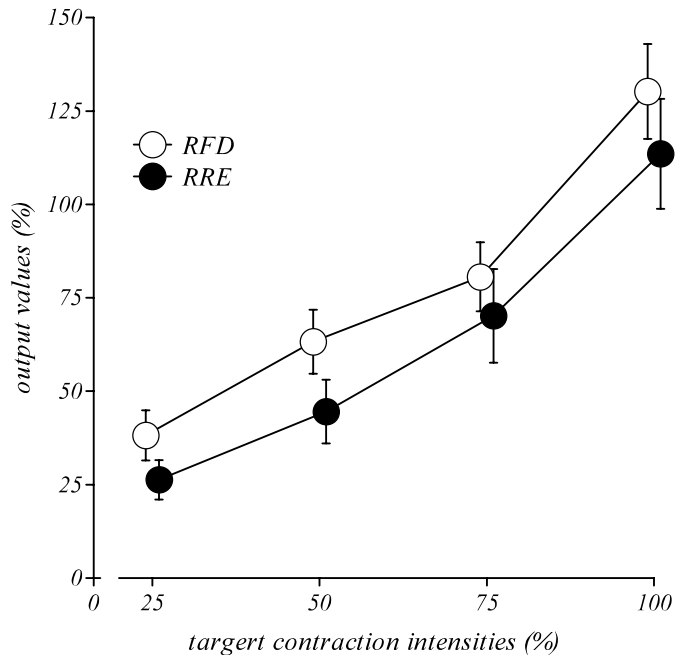


Fig.3 Values of RFD and RRE at various target contraction intensities. mean ± SEM.

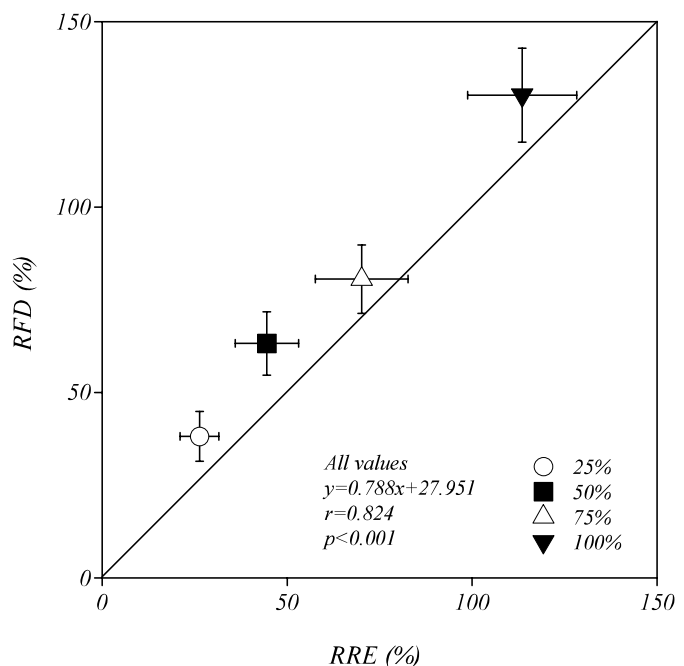


Fig.4 Correlation between RFD and RRE at several target contraction intensities. mean ± SEM.

本研究の結果から、RREは収縮強度に応じて変化し、また、RFDとの相関も高いことから、RREが筋活動測定時の有効な一つの指標としてなりうると考えられ、特に、神経要因の影響を検討する上で有効であると考えられた。

引用・参考文献

- 1) Wilkie DR. (1949). The relation between force and velocity in human muscle. *The Journal of physiology* : 110, 249-280.
- 2) Grimby L., Hannerz J., Hedman B. (1981). The fatigue and voluntary discharge properties of single motor units in man. *Journal of Physiology* 316, 545-554.
- 3) Schmidtbleicher D. (1992). Training for power events. In : Komi PV (eds) *Strength and power in sport*. Blackwell Scientific Publications, London. pp381-395.
- 4) Harridge SDR., Bottinelli R., Canepari M., Pellegrino M. A., Reggiani C., Esbjörnsson M., Saltin B. (1996). Whole-muscle and single-fibre contractile properties and myosin heavy chain isoforms in humans. *Pflügers Archiv European Journal of Physiology* : 432, 913-920.
- 5) Aagaard P., Thorstensson A. (2003). Neuromuscular aspects of exercise—adaptive responses evoked by strength training. *Textbook of Sports Medicine*, Blackwell, London. pp70-106.
- 6) Bojsen-Møller J., Magnusson SP., Rasmussen LR., Kjaer M., Aagaard P. (2005). Muscle performance during maximal isometric and dynamic contractions is influenced by the stiffness of the tendinous structures. *J Appl Physiol* 99 : 986-994.
- 7) Anderson LL., Aagaard P. (2006). Influence of maximal muscle strength and intrinsic muscle contractile properties on contractile rate of force development. *European Journal of Applied Physiology* : 96, 46-52.
- 8) Aagaard P., Simonsen E B., Andersen J L., Magnusson, P., & Dyhre-Poulsen, P. (2002). Increased rate of force development and neural drive of human skeletal muscle following resistance training. *Journal of Applied Physiology* : 93, 1318-1326.
- 9) Gruber M, Gollhofer A. (2004). Impact of sensorimotor training on the rate of force development and neural activation. *Eur J Appl Physiol* 92 : 98-105.
- 10) Kamimura T., Yoshioka K., Ito S., Kusakabe T. (2009). Increased rate of force development of elbow flexors by antagonist conditioning contraction. *Human Movement Science* : 28, 407-414.
- 11) Sakmann B., Neher E. (1983). *Single-Channel Recording*. New York : Plenum.
- 12) Mirkov DM., Nedeljkovic A., Milanovic S., Jaric S. (2004). Muscle strength testing : evaluation of tests of explosive force production. *European Journal of Applied Physiology* : 91, 147-154.