

表 題：筋疲労時における伸張反射の電気生理学的特性と筋力

著者名：小林 貴法 (公益社団法人北海道柔道整復師会附属北海道柔道整復専門学校 柔道整復専科教員)

萩原 正和 *1、石川 紀道*2

*1: 公益社団法人北海道柔道整復師会 会長

*2: 公益社団法人北海道柔道整復師会附属北海道柔道整復専門学校 名誉教頭

【要旨】

<目的> 柔道整復学では組織損傷における原因の一つに身体の基礎的状态が挙げられ、疲労による損傷を起こす場合があるとされている[1]。筋損傷においては筋疲労が損傷原因の一つと考えられるが、その科学的根拠は報告されていない。本研究は、柔道整復学において最も重要な損傷の一つである筋損傷のメカニズムを科学的に明らかにすることを目的とし 2011 年から実施されてきた。2011 年及び 2012 年には公益社団法人全国柔道整復学校協会の研究助成金交付による研究を行った。筋疲労は中枢性の疲労と筋自体の末梢性の疲労に分けて考えられるが[2-4]、本研究では伸張反射を用いて筋自体の疲労を明らかにし筋損傷と筋疲労を関連付け、筋損傷の予防に役立当てる。<方法> 被検者は健康で大腿部損傷の既往がない男性 3 名 (28 歳から 42 歳、平均 34 歳) で行った。表面筋電図は追坂電子機器株式会社製の personal emg を、筋力は竹井機器工業株式会社製 張力センサーTKK1267a, ストレイアンプ TSA-110 を用いて測定した。筋疲労は、股関節および膝関節を 90 度屈曲位とし最大収縮力で等尺性収縮を行い、収縮開始直後の最大筋力 (MVC) の 70% (70%MVC) に低下するまで持続的な収縮を行わせることで起こした。その直後に膝蓋腱反射を 5 から 7 回起こしそれぞれの表面筋電図と筋力を記録した。以上を約 7 分間隔で 5 回繰り返して行った。筋電図の解析は、随意運動に関しては高速フーリエ変換で、反射に対しては最大エントロピー法を用いて解析した。<結果> 随意運動の持続により表面筋電図の周波数は低下し、Sadoyama[5] らと同様の結果を得た。膝蓋腱反射の周波数は繰り返し筋疲労により同様に低下することが本研究で明らかになった。膝蓋腱反射において、表面筋電図の 2 乗平均と筋力の比例係数は、疲労していないときに比較して低下し、合成活動電位に対して筋力が低下していることが分かった。膝蓋腱反射において、筋出力の持続時間は、疲労の随意運動開始直後には延長し、繰り返し随意運動させることで短縮することが分かった。<結論> 大腿四頭筋の筋疲労時には膝蓋腱反射の表面筋電図において周波数が減少する傾向にあることが分かった。筋力も随意運動の場合と同様に減少するが、表面筋電図合成活動電位の 2 乗平均と筋収縮力の係数では、筋疲労していないときに比較して合成活動電位に対して筋出力が低下する事が分かった。膝蓋腱反射の持続時間について、疲労し始めでは一度延長するが、繰り返し筋疲労を起こすと短縮することが分かり、前述の合成活動電位に対する筋力の減少はこの時間の短縮が原因の一つと考えられる。しかし時間の短縮より以前に合成活動電位と筋収縮力の係数が減少しているため、筋収縮力の減少には他に原因があると考えられる。従って疲労時の膝蓋腱反射における筋力の減少は筋収縮力の持続時間の減少によるものが主と考えられるが、他にも何らかの原因があり筋収縮力が減少すると示唆された。以上は被検者 3 名の研究であるので、今後被検者を増やして実験を行う。

[1] 公益社団法人全国柔道整復学校協会編集『柔道整復学・理論編』改訂第 5 版 p.17、南江堂、2012 年

[2] Kent-Braun JA. Central and peripheral contributions to muscle fatigue in humans during

sustained maximal effort. Eur J Appl Physiol. 1999; 80:57-63.

[3] Bigland-Ritchie B, Jones DA, Hosking GP, Edwards RH. Central and peripheral fatigue in sustained maximum voluntary contractions of human quadriceps muscle. Clin. Sci. Mol Med.1978; 54: 609-614.

[4] Boerio D, Jubeau M, Zory R, Maffiuletti NA. Central and peripheral fatigue after electrostimulation-induced resistance exercise. Med Sci Sports Exerc. 2005; 37: 973-978.

[5] Sadoyama T, Miyano H. Frequency analysis of surface EMG to evaluation of muscle fatigue. Eur J Appl Physiol 1981; 47: 239-246.

【本文】

筋疲労時における伸張反射の電気生理学的特性と筋力

【緒言】

一般的に筋疲労により筋損傷が起こりやすいと考えられているがそのメカニズムはまだ分かっていない。筋疲労は中枢性の疲労と末梢性の疲労に分けて考えられ[1-3]、それぞれの研究が行われている。本校では2011年から伸張反射を用いることで末梢性の疲労を抽出し、筋自体の疲労を表面筋電図により解析してきた。2011年度および2012年度は公益社団法人全国柔道整復学校協会研究助成金の交付を受けた。

筋疲労時には伸張反射が一過性に亢進する[4]。しかし膝蓋腱反射の表面筋電図による当校のこれまでの研究において、持続的に筋疲労を起こした後、伸張刺激により発生する筋の合成活動電位の積分は増大しているのに出力が減少する傾向を見出した。しかし伸張反射の筋電図解析と筋出力に関する研究はこれまでに報告がない。本研究では、2014年度全国柔道整復学校協会の研究助成金により筋力計を購入し、大腿四頭筋疲労時における膝蓋腱反射の表面筋電図と筋力を同時に測定することが可能となった。これにより筋疲労時の合成活動電位と筋力の関係を正常時と比較し、筋疲労の筋の生理学的特徴を明らかにすることが本研究の目的である。現在までに5例実験し、3例のデータ取得に成功した。

【対象および方法】

material and subjects: 表面筋電図は追坂電子機器株式会社製の personal emg を、筋力は竹井機器工業株式会社製 張力センサーTKK1267a, ストレイアンプ TSA-110 を用いて測定した。被検者は健康で大腿部損傷の既往がない男性3名(28歳から42歳、平均34歳)だった。

protocol: 筋疲労は、股関節および膝関節を90度屈曲位とし最大収縮力で等尺性収縮を行い、収縮開始直後の最大筋力(MVC)の70%(70%MVC)に低下するまで持続的な収縮を行せることで起こした。その直後に膝蓋腱反射を5から7回起こした。それぞれの表面筋電図と筋力を記録した。以上を約7分間隔で5回繰り返し行った。

analysis: 筋電図の解析は、随意運動に関しては高速フーリエ変換で、反射に対しては最大エントロピー法を用いて解析した。筋疲労の評価は、上記 protocol の直前に10秒間の随意収縮を行い、その表面筋

電図の高速フーリエ変換による周波数を基準の周波数とし規格化することで行なった。また膝蓋腱反射の筋電図の周波数は、筋疲労を起こす前に 5 回膝蓋腱反射を行い、その筋電図を最大エントロピー法で周波数解析し、周波数の平均値により規格化し筋疲労後の周波数を評価した。膝蓋腱反射で記録された表面筋電図の周波数解析に用いたデータの 2 乗平均を活動電位の発生電気量とした。反射の筋力は、記録された最大筋力の 10%以上をデータとして扱い、その積分値 (int-PWR) と表面筋電図の二乗平均値 (RMS) との相関を調べた。

【結果】

RMS と int-PWR との相関係数は、筋疲労を起こす直前の相関係数で規格化した。その結果を表 1 に示す。筋疲労直後に取得した反射の表面筋電図周波数の推移を表 2 に示す。随意運動中の表面筋電図周波数は、随意運動開始直後よりも 70%MVC に落ちた時の周波数の方が低下しており、Sadoyama[5] らと同様の結果を得た。反射の筋出力で、最大筋力の 90%の時間間隔の結果を表 3 に示す。

【考察】 これまでに筋疲労時、随意運動の表面筋電図のみならず、反射の表面筋電図においても周波数が減少することが示唆される (表 2)。今回の報告では被検者数が少ないが、今後、実験を繰り返すことで、新知見が得られる可能性が示唆される。加えて、筋疲労の初期の段階では、正常時の活動電位の発生電気量で予想される筋力の積分値以上になる傾向を見出している (表 1)。これは一見すると筋疲労で筋出力が低下することに反し矛盾した結果が得られたことになる。しかしこの現象は、筋力の積分値が増大したことは、筋出力の時間が延長した結果 (表 3) から説明できる。この結果は筋弛緩に時間がかかったことを表す。従ってカルシウムイオンの筋小胞体への回収に時間がかかっていることを示唆し、筋疲労の初期では ATP の不足が筋疲労の主な原因であると考えれば合理的に説明できる。筋疲労を繰り返し起こすと、反射においても活動電位の積分値に比較して筋出力が低下することが分かった (表 2)。しかし筋収縮力の持続時間が減少するタイミングは、合成活動電位の RMS と収縮力の係数が減少するタイミングよりも遅い。これは収縮力が減少するのは筋収縮力の持続時間が減少する以外にも原因があることを示唆する。収縮力が減少する原因は筋の ATP 不足以外にも、筋細胞周囲の内部環境なども考えられる。筋細胞周囲の環境に関する研究としては筋周囲組織のアシドーシスにより収縮力が低下する報告[6]、細胞外液のカリウムイオン濃度増加の報告[7]がある。今後、被検者数を増やし発表する。

【まとめ】

今回の研究から大腿四頭筋の筋疲労時には膝蓋腱反射の表面筋電図において周波数が減少する傾向にあることが分かった。筋力も随意運動の場合と同様に減少するが、合成活動電位の RMS に比較すると、筋疲労していないときの RMS に比較して筋出力が低下する事が分かった。この筋力の減少は筋収縮力の持続時間の減少によるものが主と考えられるが、他にも何らかの原因があり筋収縮力が減少すると示唆された。以上は被検者 3 名の研究であるので、今後被検者を増やして実験を行う。

[1] Kent-Braun JA. Central and peripheral contributions to muscle fatigue in humans during sustained maximal effort. *Eur J Appl Physiol.* 1999; 80:57-63.

[2] Bigland-Ritchie B, Jones DA, Hosking GP, Edwards RH. Central and peripheral fatigue in

sustained maximum voluntary contractions of human quadriceps muscle. *Clin. Sci. Mol Med.* 1978; 54: 609-614.

[3] Boerio D, Jubeau M, Zory R, Maffiuletti NA. Central and peripheral fatigue after electrostimulation-induced resistance exercise. *Med Sci Sports Exerc.* 2005; 37: 973-978.

[4] S. C. Gandevia: Neural control in human muscle fatigue - changes in muscle afferents, moto neurones and moto cortical drive, *Acta Physiol Scand* 1998, 162, 275-283.

[5] Sadoyama T, Miyano H. Frequency analysis of surface EMG to evaluation of muscle fatigue. *Eur J Appl Physiol* 1981; 47: 239-246.

[6] Metzger JM and Moss RL, Greater hydrogen ion-induced depression of tension and velocity in skinned fibres of rat fast than slow muscles, *J Physiol. (Lond.)*, 1987, 393: 727-742.

[7] Mohr M, Nordsborg N, Nielsen JJ, Pederson LD, Fischer C, Krustup P and Bangsbo J, "Potassium kinetics in human muscle interstitium during repeated intense exercise in relation to fatigue, *Pflugers Arch*, 448: 452-456.

表 1: RMS と int-PWR の係数

	Subject1	Subject2	Subject3
nonfatigue	1	1	1
fatigue1	1.29	1.33	1.03
fatigue2	0.424	0.740	0.835
fatigue3	0.400	0.715	0.486
fatigue4	0.299	0.682	0.441
fatigue5	0.370	0.519	0.368

表 2: 反射の表面筋電図周波数の推移

	Subject1	Subject2	Subject3
nonfatigue	1	1	1
fatigue1	0.992	0.785	0.871
fatigue2	0.940	0.747	0.840
fatigue3	0.864	0.7951	0.795
fatigue4	0.908	0.790	0.855
fatigue5	1.023	0.8218	0.865

表 3: 反射の筋出力の持続時間(90%の時間)

	Subject1	Subject2	Subject3
nonfatigue	1	1	1
fatigue1	1.099	1.238	1.908
fatigue2	0.926	0.949	1.242
fatigue3	0.830	0.927	1.045
fatigue4	0.847	0.978	0.909
fatigue5	0.807	0.720	0.830