単一運動単位の興奮の相対的閾値変動について

倉 田 博*

THE RELATIVE THRESHOLD OF ACTIVATION OF SINGLE HUMAN MOTOR UNITS IN VOLUNTARY MUSCULAR CONTRACTION

HIROSHI KURATA

In order to investigate the mechanism of activity of motor units, discharges of single human motor units in the m. vastus medialis in voluntary contraction by use of electrodes inserted in the muscles were simultaneously recorded with the tension developed at the knee joint in its extension effort. The results were as follows.

1) The single spike discharges of single motor units were observed at the rate of 54.5-86.2%, the total number of discharges being 100%, when the knee extension effort was gradually increased and was abruptly decreased by the time of spike wave appearance on the Braun tube.

2) When the tension of knee extending force was maintained steadily, the longest consecutive discharge in a single motor unit was observed for more than 90 minutes.

3) The tension of knee extending force at the recruitment in a certain single motor unit recorded in 15 seconds interval was nearly constant within 30-60 minutes tested with certain fixed value for each motor unit except some fluctuation.

(J. Physical Fitness Japan 1972, 21 : 176~182)

結 言

従来、随意運動における筋収縮はすべて強縮であり、単収縮は反射による場合にのみ発現すると言われている⁵⁾。単一運動単位のレベルで観察した場合に、随意的に単一のスパイクを発現し得るかどうかは、随意運動の調節という見地からは重要な問題である。この問題について筋内埋入電極を用いて検索を行なった。

また、随意運動時には運動単位は互に活動交代をしながら活動していると言われている⁶⁾⁷⁾⁸⁾。しかし、その活動交代がどのような様式で起っているかは検討の必要があるように思われる。そこで同じく筋内埋入電極を用い、長時間単一の運動単位の放電をとらえて、その様式を明らかにしようと試みた。

先の単一運動単位における単収縮の問題の検討の結果、筋力を漸増していく時、ブラウン管面上に現象波形でトリガーされたビームが掃引されるのを見て筋を弛緩する場合に、かなり高い頻度で

単一の放電を記録し得た。そこでそれを指標にし、その時の筋力の時系列を記録した。その筋力の時系列記録によって単一運動単位の相対的な閾値変動について検討した。

実 験 方 法

単一の運動単位の放電を記録するために、直径100 μ のポリウレタン絶縁銅線を2本接着して長軸に直角に切断し、1/3皮下注射針に通し先端約2mmを折り曲げて筋内に刺入した。後注射針を抜去した筋内埋入電極を用いた⁴⁾。入力は平衡入力方式とし、不関電極は直径10mmの銀板電極2枚に電極糊を充たして近傍の皮膚面上に貼布した。また、日本光電製の陰極線オシロスコープVC-7A(前置増幅器には生体電気用増幅器AVB-2及び2現象用増幅器AVM-2S使用)及び連続撮影装置PC-2Bを使用した。AVB-2の時定数は0.003秒とした。被験者は健康成人であり、被験筋には左右のm. vastus medialisを用いた。被験者は台に椅座し、下腿を膝関節が90°になるよう

* 東京慈恵会医科大学第一生理学教室 Department of Physiology, The Jikei University School of Medicine

に下垂させて随意的膝伸展を行ない、足関節部に発生する張力をストレインゲージでとらえ筋放電と同時記録した。張力記録のためには日本光電製ポリグラフ RM-150 及び歪計用前置増幅器 RP-3 またはマノメーター MP-3A を用い、VC-7A の AVM-2S に入力して撮影記録を行った。

単一運動単位において随意的に単一の放電を発現させ得るかどうかの検討のためには次のような方法をとった。電極を単一の運動単位のスパイクが記録できる位置に安定させて、陰極線オシロスコープを現象波形でトリガー掃引した。トリガーレベルは他の運動単位のスパイク等の小さい電位によってはトリガーされないで、対象とする運動単位のスパイクの大きい電位では十分トリガーされるようにレベルを設定した。ブラウン管に掃引が行なわれていない状態から徐々に膝関節の伸展張力を増大させていき、スパイクによって掃引が行なわれるのを見て筋を弛緩し、スパイクの記録を行なった。掃引速度はブラウン管面上で 0.2m sec/cm とし、現象波形によっては 0.5 及び 1.0m sec/cm にした。また、2 個の運動単位の活動電位を同時にとらえ、ブラウン管のビームを止めてオシロペーパーを 100mm/sec で送って張力と同時記録した。

運動単位の活動交代の様式の検討のためには同じく電極を単一の運動単位のスパイクが記録できる位置に安定させ、ブラウン管のビームの掃引を止め、オシロペーパーを 5 及び 10mm/sec の速度で送ってスパイクを張力と同時記録した。また、掃引の頻度を 1.0 または 0.1 cycle/sec とし、オシロペーパーを掃引の方向に対して直角方向に、送り速度 10.0, 2.5 または 1.0mm/sec で送って長時間の記録を行なった。

単一運動単位の相対的な閾値変動を検討するために、上述の単一スパイクを記録する方法により測定を約 15 秒間隔で 30~60 分間行なった。膝関節伸展張力の利得はブラウン管面上で 0.5kg/cm とした。

実験成績

陰極線オシロスコープを現象波形によるトリガー掃引にして、徐々に膝関節の伸展張力を増大させ、掃引されるのを見て張力を減少させると、単

Table 1. The rate of single spikes observed against the total number of spikes in various single motor units.

unit	N	number of single spikes	%
a	276	238	86.2
b	237	182	76.8
c	118	90	76.3
d	109	82	75.2
e	232	150	64.7
f	102	65	63.7
g	114	70	61.4
h	128	78	60.9
i	161	89	55.3
j	121	66	54.5

一のスパイク放電が記録できた。各運動単位から得られた種々の波形の記録を図 1 に例示した。測定は約 15 秒の間隔で行なった。二発以上のスパイクが記録される場合もあったが、注意深く行なうと単一のスパイクの記録される割合は表 1 に示す如く 54.5~86.2% に及んだ。また、2 個の運動単位の活動電位を同時に記録した例を図 2 に示した。一方のスパイク放電が持続しているとき、他方の単一スパイク放電が観察された。

単一の運動単位のスパイク放電が記録できる状態で、持続的に放電が続くほぼ一定の張力を保持すると、unit A において 90 分以上にわたってスパイク放電が持続した (図 3)。また表 2 に示すように放電している時間が大部分で、時々少時放電を休止する例も観察された。これらの場合の持続張力は 0.5~4.0kg であり、unit A, B における興奮に参加する時点の張力は 0.2kg, unit C では 1.0kg であった。

単一運動単位の最初のスパイクが発現する時点の膝関節伸展張力を約 15 秒の間隔で記録し、各運動単位についてその時の張力を時間に対してプロットすると図 4 に示す如くなる。この場合、同一波形のものだけをプロットするように注意した。unit 1, 2, 3 は 0.5kg 以内であり、unit 4, 5, 6 は約 0.5kg, unit 7 は約 1.5kg, unit 8, 9 は約 3kg, unit 10 は約 4kg を中心としており、動揺が見られた。unit 1, 2, 3 は動揺が小であり、unit 7, 9, 10 は比較的変動が大であった。unit 4, 5, 6 では時々急激に値が増大した。unit 1, 2, 3 では 40~

Fig. 1. Samples of spike forms recorded during the single spike discharges in different single motor units.

Fig. 2. Spike discharges of two single motor units and muscular tension simultaneously recorded.

60 分間にあたりほぼ一定した値を得た。また、unit 3 では 60 分間の測定に続き、約 5kg の張力を 10 分間持続負荷した後測定すると動揺の幅が増大した。

なお、この条件における膝関節伸展最大筋力は

左右とも約 60kg であった。大腿四頭筋が実際に発揮した張力はレントゲン撮影により算出した結果、その約 7.6 倍になる。

Fig. 3. Continuous recording of spike discharges in a single motor unit.

Table 2. Time length of spike discharge in various single motor units.

unit	tension of recruitment	sustained tension	f	s	f	s	f	s	f	s	f	s	f	s	f	s	f
A	0.2kg	1.0~1.5kg	94' 30"														
B	0.2	0.5~1.0	53' 30"														
C	1.0	1.5	20' 30"														
D		3.0	3' 27"	21"	6' 57"	2"	6"	10"	14' 15"	4"	42"	13"	2' 14"	40"	38"	5"	2' 00"
E		2.0~3.0	9' 25"														
F		4.0	8' 22"														

f : period of time of firing

s : period of time of silence

実験成績に対する考察

随意運動における筋収縮は一般に強縮であると言われるが⁵⁾、徐々に筋力を増大していき、スパイクの発現を合図に筋を弛緩する時単一運動単位において単一のスパイク放電が記録できる。したがって時実等⁹⁾¹⁰⁾が随意活動時に短母指外転筋で単収縮を認めたことと合せ考えると、運動単位のレベルでは随意運動において単一のインパルスによる単収縮が生じることがあるものと思われる。このことは筋力の随意調節が極めて微妙に遂行され得ることを示唆している。

単一運動単位のスパイク放電が 90, 50, 20, 14, 9 及び 8 分以上持続し得たが、これらの運動単位

は少くともそれ以内の時間では他の運動単位との活動交代を起していない。これらの場合の保持した膝関節伸展張力は 0.5~4.0kg なので、最大筋力が約 60kg であるのに対して、このような弱収縮時には比較的長時間にわたって放電が持続されるものと思われる。弱収縮時に活動している運動単位の数には少ないにもかかわらず、活動交代は相当長時間起り難いことが推定される。既に Smith⁶⁾、時実等⁷⁾⁸⁾によって上腕二頭筋及び下肢抗重力筋について弱収縮時には 10~14 分にわたって活動交代を生じないことが報告されているが、上記の結果はこれ等の成績を裏書きする。しかし 90 分にわたって活動交代をしない例が認められたことは留意に価するものと考ええる。また、一定の筋

Fig. 4. Muscular tension in relation with moments of recruitment of single motor units.

力を保持しているにもかかわらず、時々少時放電が休止したが、この時にはその運動単位の α 運動神経細胞の相対的な閾値が上昇したことも考えられる。

対象とした単一の運動単位が活動に参加する時の張力の時系列は、動揺を示しながらもほぼ一定している例が多い。そして、各運動単位はそれぞれほぼ特定の値を持っているように思われる。これは各運動単位がそれぞれの持つ特定の筋力値に達したところで活動に参加するものとも考えられる。Kugelberg 等¹⁾²⁾、時実等³⁾によって活動に参加する時の収縮の程度に運動単位による差異があることが述べられているが、その値がこのように長時間にわたって特定値を示すことは注目に値するものとする。この値に動揺が見られるのは、 α 運動神経細胞への興奮性及び抑制性インパルスの量的変動によるところの α 運動神経細胞の興奮の他の α 運動神経細胞に対する相対的な閾値の変動であることも考えられる。この変動は相対的閾値が大きい方が大である傾向が見られ、一定の筋力を保持する筋力調節の際の誤差が目標とする筋力の増大に伴って増大する³⁾⁴⁾ことと何等かの関係があるようにも思われるが、今後の検討を要する問題であると思われる。unit 4, 5, 6 において時々値が急激に増大したが、この大きい変動が何に起因したかは不明である。この場合その値以下ではその運動単位は興奮しない筈であるから、一定の筋力を発揮している時このような興奮の相対的閾値の上昇が起ればその運動単位はスパイク放電を停止することが推定される。運動単位の活動交代は、その根柢に各運動単位のこのような相対的閾値変動が存在することによって発現しているものと思われる。

この実験においては、筋力増減に伴う電極の動きによるところの成績の不確実さの問題が払拭できないけれども、筋力の増大に伴って振幅の増大する場合には運動単位の筋線維束と電極との位置が変動したものと思われる。しかし筋力の増大にもかかわらず振幅が変化しない場合には電極の位置は変らなかったものと考えられる。筋線維束に放電があるにもかかわらず電極にとらえられず、ある筋力に達したところで突然不連続的にとらえられるようになって、以後筋力を増大しても

振幅に変化がないということは一応考え難い。単一スパイクを記録するに先立って、筋力増大に伴う振幅の漸増のないことを記録確認し、また数発のスパイクを重ね撮りして異なった波形のものによってトリガーされず、またその波形では十分にトリガーされることを確認した後測定を行なったので、電極の動きによる成績の誤差は極力抑えられていると思われる。また図1に見られるように運動単位が異なると波形が種々変化するが、同一波形のものだけを問題にしたので他の運動単位との混同はまずないものと思われる。

摘 要

運動単位の特性を検討することを目的として、人の *m. vastus medialis* の単一運動単位の放電を筋内埋入電極でとらえて膝関節伸展張力と同時記録し、次のような結果を得た。

1) 徐々に張力を増大させ、ブラウン管の現象波形を見て張力を減少させる時、単一のスパイク放電が 54.5~86.2%の割合で記録された。

2) ほぼ一定の張力を保持する時、単一運動単位のスパイク放電が 90 分以上持続する例が記録された。

3) 単一運動単位の最初のスパイクが発現する時の張力を約 15 秒の間隔で記録すると、30~60 分間にわたって多少の動揺を示しながらもほぼ特定張力値を示す unit が多く観察された。

擲筆に当り、終始御懇篤なる御指導、御校閲を賜わった名取教授に深甚の謝意を表する。

(受付 昭和 47 年 10 月 25 日)

文 献

- 1) Kugelberg, E. and Skoglund, C.R. (1946) Responses of single human motor units to electrical stimulation. *J. Neurophysiol.* **9**, 391-398
- 2) Kugelberg, E. and Skoglund, C.R. (1946) Natural and artificial activation of motor units—a comparison. *J. Neurophysiol.* **9**, 399-412
- 3) 倉田 博, 馬詰良樹, 柳本昭人, 森下芳郎, 山本直道(1970) 筋力の調節能力について. *体力科学*, **19**, 36-46
- 4) 倉田 博, 柳本昭人(1971) 筋力の調節時の筋

- 電図について. 体力科学, **20**, 118
- 5) 名取礼二(1968) 現代スポーツ生理学, 初版, 運動に關与する身体各部の働き, 日本体育社, 東京, 1-36
- 6) Smith, O.C. (1934) Action potentials from single motor units in voluntary contraction. Amer. J. Physiol. **108**, 629-638
- 7) 時実利彦, 小片 保, 近藤達子, 田中宜子 (1951) 抗重力筋 antigravity muscles に就て Neuromuscular unit の活動様式に関する研究 (5), 体力科学, **1**, 61-66
- 8) 時実利彦, 津山直一(1951) 筋電図とその臨床的応用—総覧—, 東京医学誌, **59**, 62-87
- 9) 時実利彦(1955) 人間の骨格筋の機能分化 I—運動の Corticalization と Spinalization—, 科学, **25**, 229-233
- 10) 時実利彦 (1955) 人間の骨格筋の機能分化 II—運動の Corticalization と Spinalization—. 科学, **25**, 291-297