カエル縫工筋の単収縮における張力と 電氣的活動の關係について

山口大学教養部

河 合 洋 祐 皆 川 孝 志

教育学部 佐 藤 吏

医学部 丹 生 治 夫

(受付 昭和 44 年 5 月 10 日)

THE RELATION BETWEEN THE ACTION POTENTIAL AND THE TWITCH TENSION INDUCED BY IT.

Y. Kawai T. Minagawa

Faculty of Liberal Arts, Yamaguchi University

O. Sato

Faculty of Education, Yamaguchi University

H. Niu

Yamaguchi University School of Medicine

A study has been made of the relationship between the mechanical and the electrical response of the nerve muscle preparations of the frog sartorius induced by a single direct and indirect stimulation. The electrical response was recorded from the surface of the muscle, and its area and amplitude were measured. The stimulation parameters were: pulse....square wave; pulse duration....1 msec in direct and 0.01 msec in indirect stimulation; intensity....from threshold to supramaximal. The combinations of stimulation and lead were as follows: 1) unipolar lead and direct stimulation, 2) unipolar lead and indirect stimulation, 3) bipolar lead and indirect stimulation.

The data gained under these three conditions of experiment were analyzed statistically. The correlation coefficients of tension and the action potential area were from 0.896 to 0.995 ($p < 0.001$), and those of tension and amplitude were from 0.831 to 0.996 ($p < 0.001$). Any significant difference was not found between these two groups of correlation coefficients.

The experimental results were discussed in detail.

緒 言

近年、運動生理学、スポーツ医学、キネシオロジー等において個々の筋肉が発生する張力を筋電図により知ろうとする研究が多く見られている。

等尺性随意収縮に関して、Haas (1926) は筋の電氣的活動の振幅と張力との間に比例関係があることを見出している。その後も Dempster et al

(1947) は人の筋における電氣的活動の複合指数, Inman et al (1952), Lippold (1952), Edwards et al (1956), Fischer et al (1961), de Vries (1968) 等は積分値が張力との間に直線的又は何らかの關係を示すことを報告している。

de Jong et al (1967) は同じく人の筋肉において単一刺激による電氣的活動の振幅と張力とに直線關係を見出している。

更に動物の摘出筋においても Watts (1924) は同様の関係を見出し, Bigland et al (1953) は電氣的活動の面積と張力との間に同様の関係がみられることを報告している。

Loofbourrow (1948) は反復刺激における一定の条件においては両者の間には平行関係があることを主張している。

これに反し Schaefer (1940), Bishop et al (1927), Rosenblueth et al (1941) 等は一定の条件下においては両者の間に特定の関係が存在しないことを報告している。

そこで我々は筋収縮における電氣的活動と張力の関係を更に明確にするために蛙の摘出筋神経標本に直接あるいは間接に単一電気刺激を加えて細胞外記録により発生張力と電氣的活動の間の関係を追求した。

方 法

被験標本としてはヒキ蛙(*Bufo bufo japonicus*)及び食用蛙(*Rana catesbeiana*)の縫工筋の神経筋標本を用いた。筋は支配神経である座骨神経、大腿神経をつけたままリンゲル液中で注意深く摘出し、起始端は恥骨の一部をつけたまま標本箱に固定し、他の一端はストレインアンプ(日本光電社製)に連結した。

標本はほぼ生体内の長さのばし、表面電位の記録は銀の薄板で作製した直径4mmの皿状電極を用い、活動電位を張力と同時にブラウン管オシロスコープ(日本光電社製 VC-7A)を通して写真記録した。

活動電位の単極誘導は関係電極をほぼ筋腹中央に置き、筋の恥骨端の一部を加熱により損傷し、当部位に無関電極の銀線を刺入して誘導した。双極誘導は一方の電極を筋腹中央に置き、他方の電極を付着端に置いた。

電気刺激の方法としては、神経を介して筋を刺激する間接刺激法と筋自体に直接電極をあて刺激する直接刺激法の二つの方法を試みた。直接刺激の場合には標本の筋束全体が刺激に応じて興奮するように、刺激極で筋束を巻くフィールド刺激法を用いた。

刺激のパラメーターとしては、1) パルスは矩形波であり、その幅は間接刺激では 0.01m sec.,

直接刺激では 1m sec. であり、2) 強さは閾値よりはじまり過最大までである。

刺激は単一刺激で閾値から過最大まで可能な限り多くの段階で刺激するよう努力した。更に刺激による疲労現象の影響を避けるため同一段階の刺激は 15 秒間隔で3回行い、1分間の休息の期間をおいて次の段階に移行した。

刺激と誘導法の組合せは

1. 単極誘導, 直接刺激
2. 単極誘導, 間接刺激
3. 双極誘導, 間接刺激の3種である。

活動電位の面積(陰, 陽性を含める)測定はブラニメーターを使用した。

本実験に使用したリンゲル液の組成は NaCl 113, KCl 2.5, CaCl₂ 2.0, NaHPO₄ 1.1, NaH₂PO₄ 0.4mM であり, pH は 7.2~7.4 である。実験期間は 1969 年 1 月から 4 月にわたった。

実 験 結 果

誘導法は単極, 双極の2誘導法を用いた。

単極誘導について: 単極誘導は双極誘導に比較して関係電極, 無関電極間の影響をほとんど無視出来る。双極誘導, 間接刺激では電極の位置の変化が2つの電極にそれぞれ影響を及ぼすとともに陰性波と陽性波が互に複雑に干渉し合い、張力との関係を観察する際に困難を伴うことが予想された。そこで無関電極の位置, 刺激電場等と与える影響を考え、いわゆる“無関電極”を腱上、リンゲル液中、長さ15cmのアガールリンゲル液中に置いた。それにもかかわらず、それは双極誘導の波形と何らの変化もみとめられなかった。次に加熱により筋は部分的損傷を与えられ、その部位に無関電極をおき、関係電極の位置をかえて直接刺激法により活動電位を記録し同一筋線維内の伝導であることを考慮して、その陰性波の移動と陽性波の関係を見た。Fig.1 (a, b) は直接刺激による双極誘導を示したものであり、a, b 共一極は同一位置におき他極の位置を変化させた場合である。双極誘導でみられた陽性波 (Fig. b) が c, d では容積伝導に起因するスロー・コンポネントのみとなり無関電極からの電位変動の影響がみられない。つまりかかる誘導は単極誘導であることが確認された。

Fig. 1. Simultaneous recordings of electrical and mechanical response to a single direct stimulation. a, b; Bipolar lead. One electrode, 5mm. and 30mm. away from stimulating cathode respectively. Another on tendon both. c, d; Unipolar lead. Electrode; 8mm. and 35mm. from cathode respectively.

Fig. 2. Simultaneous recordings of electrical and mechanical response to a single indirect stimulation, Unipolar lead.

波形について：間接刺激では、(1) 神経筋単位の分布、(2) 神経の伝導速度の差、(3) 誘導部位における活動筋線維の量的差異は、電極位置とともに波形の変化を生ずる (Fig. 2)。それ故、その変化が活動電位と張力との間に及ぼす影響も検討した。直接刺激では Fig. 1 に示されるごとく d は

c に比べて振幅が小さいのは主として無関電極と関係電極との距離が非常に近く電極間の抵抗が小さくなり、短絡を生じたためと考えられる。しかしながら基本的には波形の差異は認められない。このことは直接刺激では上述した波形変化の要因を除外出来ることを意味している。かくして、間

接刺激、双極誘導よりも単極誘導、直接刺激が電氣的活動と発生張力との間によりはっきりした関係が求められるはずと考えた。

電氣的活動の測定について：面積及び振幅を測定した。振幅は波形の頂点から頂点までの距離とした。面積は単極誘導、双極誘導ともにその基線と波形によって囲まれた全面積を測定した。実際に活動電位を誘導するに際して電極部位のみの活動を考慮するならば容積伝導に起因する波形は無関係と思われる。単極誘導では陰性波の前後に現われる陽性波、双極誘導の場合は主放電前後の各波形は電極部位の近くの活動を意味しているものであるが、実質的に電極下の活動の開始と終りが陰性相のどの時点であるかが判明しない。更に発生張力は筋全体からとったものであり、従ってこれには波形に現われたすべての相が関与しているはずである。又以上の理由のみならずヒトの筋活動に応用する場合、特に随意収縮の際にはすべての波形を加える必要があるとの理由から一応すべての面積を求めた。

1. 単極誘導、直接刺激時の張力と活動電位の関係

単極誘導、直接刺激の場合、筋束に含まれる神経末梢の刺激効果を完全に遮断するために $10 \times 10^{-3} \text{g/cc}$ の D-ツボクラリン（アメリゾール）を加えたリンゲル液中に 2 乃至 3 時間放置後、間接刺激により筋線維が全く興奮しないことをたしかめた上で筋の一部（起始側）を損傷し付着側から段階的に直接刺激を行い損傷の影響が誘導部位に及ばない時間内に段階刺激を実施した。

段階的に刺激の強さを増すにつれて、全ての被験筋（7 例）で張力と活動電位の面積が共に増加し、両者は比例関係にあることがわった。Table 1 の 1) は統計的に分析した結果である。活動電位の面積と張力の相関係数は 0.922 から 0.955 であり、 $p < 0.001$ 水準で有意であった。Fig. 3 はその中の 1 例について図示したものである。Fig. 4 は活動電位の振幅と張力の関係を示したものであり、相関係数は 0.831~0.996 ($p < 0.001$) であった。活動電位の面積と張力の相関係数と活動電位の振幅と張力の相関係数との間には有意差がなかった。

2. 単極誘導、間接刺激の場合

単極誘導、間接刺激では、神経線維が分布して

Table 1. Correlation Coefficients of Tension vs. Action Potential

1) Unipolar lead, Direct stimulation		
Case No.	Tension-Area	Tension-Amplitude
1	0.995	0.994
2	0.990	0.960
3	0.948	0.831
4	0.995	0.996
5	0.989	0.994
6	0.922	0.914
7	0.984	0.991
2) Unipolar lead, Indirect stimulation		
1	0.978	0.975
2	0.980	0.983
3	0.990	0.949
4	0.964	0.934
5	0.981	0.976
6	0.984	0.980
7	0.991	0.986
8	0.975	0.983
9	0.965	0.924
10	0.984	0.982
3) Bipolar lead, Indirect stimulation		
1	0.995	0.987
2	0.896	0.908
3	0.992	0.985
4	0.950	0.965

* Correlation Coefficients were significant at the $P < 0.001$ level.

Fig. 3. Relation between twitch tension and area of action potential. Unipolar lead, Direct stimulation.

いないといわれている起始側の末端約 5mm を損傷して無関電極を刺入し、損傷による神経への影

Fig. 4. Relation between twitch tension and amplitude of action potential. Unipolar lead, Direct stimulation.

Fig. 6. Relation between twitch tension and amplitude of action potential. Unipolar lead, Indirect stimulation.

響をさけるよう考慮した。間接刺激では関係電極の位置により波形の変動がみられるがこの変動とは無関係に次のことがみとめられた。即ち段階的に強さを増しても直接刺激の場合の様に、全ての段階で張力と活動電位が刺激強度に応じて連続的に増加せず、ある一定の刺激強度までは両者の値が一定であり、次の段階で両者が急激に増加する傾向が閾値から最大までの間で数回みられた。しかし全ての被験筋（10例）において活動電位と張力は比例関係にあることがわかった。統計的に分析した結果は Table 1, 2) に示した。活動電位の面積と張力の相関係数は 0.964 から 0.991 の間であり、 $p < 0.001$ 水準で有意であった。Fig. 5 はそ

の一例を示したものである。Fig. 6 は活動電位の振幅と張力の関係を示したものであり、相関係数は 0.924 から 0.986 ($p < 0.001$) であった。活動電位の面積と張力の相関係数と、活動電位の振幅と張力の相関係数の間には有意差は認められなかった。

3. 双極誘導、間接刺激の場合

2 で述べた如く段階的に刺激の強さを増しても全ての段階で張力と活動電位が連続的に増加しない傾向が閾値から最大の間で数回みられた。しかし全ての被験筋（4例）において張力と活動電位は比例関係にあることがわかった。統計的分析は Table 1, 3) に示した。活動電位の面積と張力の

Fig. 5. Relation between twitch tension and area of action potential. Unipolar lead, Indirect stimulation.

Fig. 7. Relation between twitch tension and area of action potential. Bipolar lead, Indirect stimulation.

Fig. 8. Relation between twitch tension and amplitude of action potential. Bipolar lead, Indirect stimulation.

相関係数は 0.896~0.995 の間であり, $p < 0.001$ 水準で有意であった。Fig. 7 はその 1 例を示したものである。活動電位の振幅と張力の相関係数は 0.908~0.987 ($p < 0.001$) であり, その 1 例は Fig. 8 に示した。

活動電位の面積と張力の相関係数, および張力と活動電位の振幅の相関係数の間には有意な差はみられなかった。

考 察

摘出した神経筋標本を用いて等尺性単収縮に際しての発生張力と電気的活動の面積および振幅との間の関係を追求した結果, 直線的比例関係のあることがわかった。しかしながら従来までの多くの研究の中には無関係な結果を得たことを述べるものもある。即ち, Bishop and Gilson (1927) は薬物投与又は蒸溜水中に筋を浸すと活動電位は認められるが収縮は生じないといっている。Rosenbluth et al (1941) も又薬物投与の結果張力と電気的活動の間には一定の関係が存在しないといひ, Gellhorn et al (Loofbourrow, G.N. 1948 による) は小児マヒ患者について僅かな筋収縮に伴う異常に大きな電気的活動を記録したと報告している。然しながら以上はいずれも非生理的条件下での実験である。

生理的条件下でも de Jong et al (1967); Watts (1924) 等は単収縮に際して電気的活動の振幅と発生張力との間に直線関係があると述べている。

Bigland et al (1953) はまた, 電気的活動の面積との比較において比例関係を見出している。ここにおいて我々は, 生理的条件下で筋収縮に際しての発生張力と電気的活動の関係を基礎的に追求するため, 先ず単一の電気的刺激で筋を直接に刺激し, 単極誘導で電気的活動を記録することを試みた。単極誘導では電気的活動の波形が単純であり, 且つ直接刺激であれば間接刺激に比較して神経の伝導速度その他の要因の影響を除去できるためである。また, 細胞外誘導による電気的活動の記録は本質的には細胞膜を通して細胞外に流れる電流を記録することであるので, 活動に参加する筋線維数の増加が即ち膜電流を増大させることになることは明らかである。

もし筋線維がほぼ平行であり, しかも筋の全長にわたって連続的に一本であれば, 電源もほぼ並列であり, 電気的活動の量的変化を追求するのに適しているはずである。以上の意味においてカエル縫工筋を選んだ。更に同様な実験をカエル腓腹筋についても試みたが, 筋線維の配列が双羽状形になっているために電気的活動の波形が電極位置によりかなり変化することを認めた (未発表, 佐藤, 河合, 皆川, 丹生)。

結果で述べた如く, 電気的活動と発生張力との間に高い正の直線関係を認めた。一般的にいえば, 張力の増大は, 1) 活性化された運動単位の数の増加に基き, 2) 各神経線維の放電頻度の一定範囲内の増加に基くものであるが, 単一刺激であれば後者の要因は除くことができる。即ち, 張力の増加は参加する筋線維の数の増加に基くものと考えられる。

次に神経刺激による影響を考慮するため, 間接刺激, 単極誘導の組合せで行った。実験結果 (波形について) に述べた理由により, 電極位置の変化は波形に影響をおよぼした。しかしながら張力との間の関係において, 直接刺激と同様に高い正の比例関係がみられた。

間接刺激 (もしくはモトニューロン興奮), 双極誘導は, 一般的に人の筋活動の研究に用いられる方法ではあるが, 神経刺激および誘導法に含まれる複雑な要因が影響するために電気的活動と発生張力との間の相関関係が低くなると推察した。しかしながら, それにもかかわらず正の直線的比例関

係が認められた。

以上のことから、単純な筋線維の配列をもつ抽出筋であるので、単一電気刺激では刺激法、誘導法に関係なく非常に高い正の相関関係をもつものと考えられる。

要 約

カエルの摘出した縫工筋を用い、神経を通して間接的に、あるいは筋に直接に単一刺激を加え、細胞外誘導により活動電位および発生張力を同時記録した結果、次のような結果を得た。

1. 活動電位の面積および振幅と張力との間の関係は、
 - A) 単極誘導-直接刺激
 - B) 単極誘導-間接刺激
 - C) 双極誘導-間接刺激の3条件とも非常に高い正の直線的比例関係がみられた。
2. 電極位置の変化による波形差異は間接刺激においてみられたが、活動電位の面積および振幅と張力との関係は正の直線関係がみられた。
3. 活動電位の面積と張力の相関係数および振幅と張力の相関係数との間には有意な差を認めなかった。

References

- 1) Adrian, E. D. and D.W. Bronk: The discharge of impulses in motor nerve fibres. Part 1. J. Physiol. 66; 81-101, 1928.
- 2) Adrian, E. D. and D.W. Bronk: The discharge of impulses in motor nerve fibres. Part 2. J. Physiol. 67; 119-151, 1929.
- 3) Bigland, B., O.F. Hutter and O.C.J. Lippold: Action potentials and tension in mammalian nerve-muscle preparations. J. Physiol. 121; 55-56p, 1953.
- 4) Bigland, B. and O.C.J. Lippold: The relation between force, velocity and integrated electrical activity in human muscles. J. Physiol. 123; 214-224, 1954.
- 5) Botelho, S.Y.: Comparison of simultaneously recorded electrical and mechanical activity in myasthenia gravis patients and in partially curarized normal humans. Amer. J. Med. 19; 693-696, 1955.
- 6) de Jong, R. H. and F. G. Freund: Relation

between electromyogram and isometric twitch tension in human muscle. Arch. Phys. Med. 48; 539-542, 1967.

- 7) Dempster, W. T. and J. C. Finerty: Relative activity of wrist moving muscles in static support of the wrist joint: An electromyographic study. Amer. J. Physiol. 150; 596-606, 1947.
- 8) de Vries, H.A.: "Efficiency of electrical activity" as a physiological measure of the functional state of muscle tissue. Amer. J. Phys. Med. 47; 10-22, 1968.
- 9) Eccles, J.C. and C.S. Sherrington: Numbers and contraction-values of individual motor-units examined in some muscles of the limb. Proc. Roy. Soc. B, 106; 326-357, 1930.
- 10) Edwards, R.G. and O.C.J. Lippold: The relation between force and integrated electrical activity in fatigued muscle. J. Physiol. 132; 677-681, 1956.
- 11) Fischer, A. and J. Merhautova: Electromyographic manifestations of individual stages of adapted sports technique. Health and fitness in the modern world. Chapter 13. Chicago, The Athletic Institute, 134-147, 1961.
- 12) Gilson, A.S. and W.B. Mills: Activities of single motor units in man during slight voluntary efforts. Amer. J. Physiol. 133; 658-669, 1941.
- 13) Gray, E.G.: The structures of fast and slow muscle fibres in the frog. J. Anat. 92; 559-562, 1958.
- 14) Haas, E.: Über die Art der Tätigkeit unserer Muskeln beim Halten verschieden schwerer Gewichte. Pflügers Arch. f. d. ges. Physiol. 212; 651-656, 1926.
- 15) Inman, V.T., H.J. Ralston, J.B. deC.M. Saunders, B. Feinstein and Jr. E.W. Wright: Relation of human electromyogram to muscular tension. EEG Clin. Neurophysiol. 4; 187-194, 1952.
- 16) Lippold, O.C.J.: The relation between integrated action potentials in a human muscle and its isometric tension. J. Physiol. 117; 492-499, 1952.

- 17) Loofbourrow, G.N. : **Electrographic evaluation of mechanical response in mammalian skeletal muscle in different conditions.** J. Neurophysiol. 11 ; 153-167, 1948.
- 18) Ralston, H.J. : **Uses and limitations of electromyography in the quantitative study of skeletal muscle function.** Amer. J. Orthodontics 47 ; 521-530, 1961.
- 19) Rosenblueth, A., J.H. Wills and H. Hoagland : **The slow components of the electrogram of striated muscle.** Amer. J. Physiol. 133 ; 724-735, 1941.
- 20) Watts, C.F. : **The relation between the size of the electrical response and the tension developed in the contraction of striated muscle.** Amer. J. Physiol. 59 ; xv-xvi, 1924.