

# 細胞内微小電極法による赤筋線維並びに白筋線維の 機能分化による興奮伝導速度の差に関する研究

## 第 3 編

### 人腹直筋筋線維の静止電位、活動電位及び 興奮伝導速度の時間的变化について

岡山大学医学部第1外科教室（指導：田中早苗教授）

副 手 島 田 彦 造

〔昭和39年3月11日受稿〕

#### 第1章 緒言

すでに第1編において、人とラットの骨格筋筋線維について興奮の伝導速度を調べ、それは筋線維の機能分化の程度と関係があるということを見た。つづいて第2編では、赤筋線維あるいは白筋線維の各々の興奮伝導速度について調べた結果、白筋線維の方の伝導速度が速いことを知り、その理由について種々の推論をした。しかしながら、こうした検索は、用いた筋線維が新鮮なものであるとはいえ、既に生体外に取り出した材料についての実験であり、人工体液の中において、既に電気生理的に変化を受けているものである可能性が考えられるものである。現在用いられている超微小電極は細胞の生理的状態を失うことなしに、数時間も実験が可能であることは既に報告されている。しかし、私は生体外に切り出し、人工体液で、還流した人腹直筋は超微小電極を刺入した場合、それほど長時間正常状態を保つことはできないのではないかと疑った。そこで私は本編では生体外に取り出して人工体液で還流した個々の筋線維について、活動電流の棘高、静止電位及び興奮の伝導速度の時間的な変化を調べてみることにした。

#### 第2章

##### 第1節 実験材料

第1編の人腹直筋におけるごとくである。

##### 第2節 実験装置

第1、2編に用いたと同じ装置である。

##### 第3節 実験方法

ブラウン管の蛍光面上に2本のビームを重ねてお

き、一本のビームに現象、他の一本のビームに1目盛1 msecの時標を示すようにした。超微小電極を筋線維に刺入して、60—70mVの静止電位であることを確めた。刺激電極より興奮を送り、活動電流の記録できる部を探して、刺入した電極はそのままとして30秒毎又は1分毎に刺激を行ない、活動電流を記録した。2分30秒—15分後活動電流の棘高が小さくなり、計測が困難となるまで測定した。

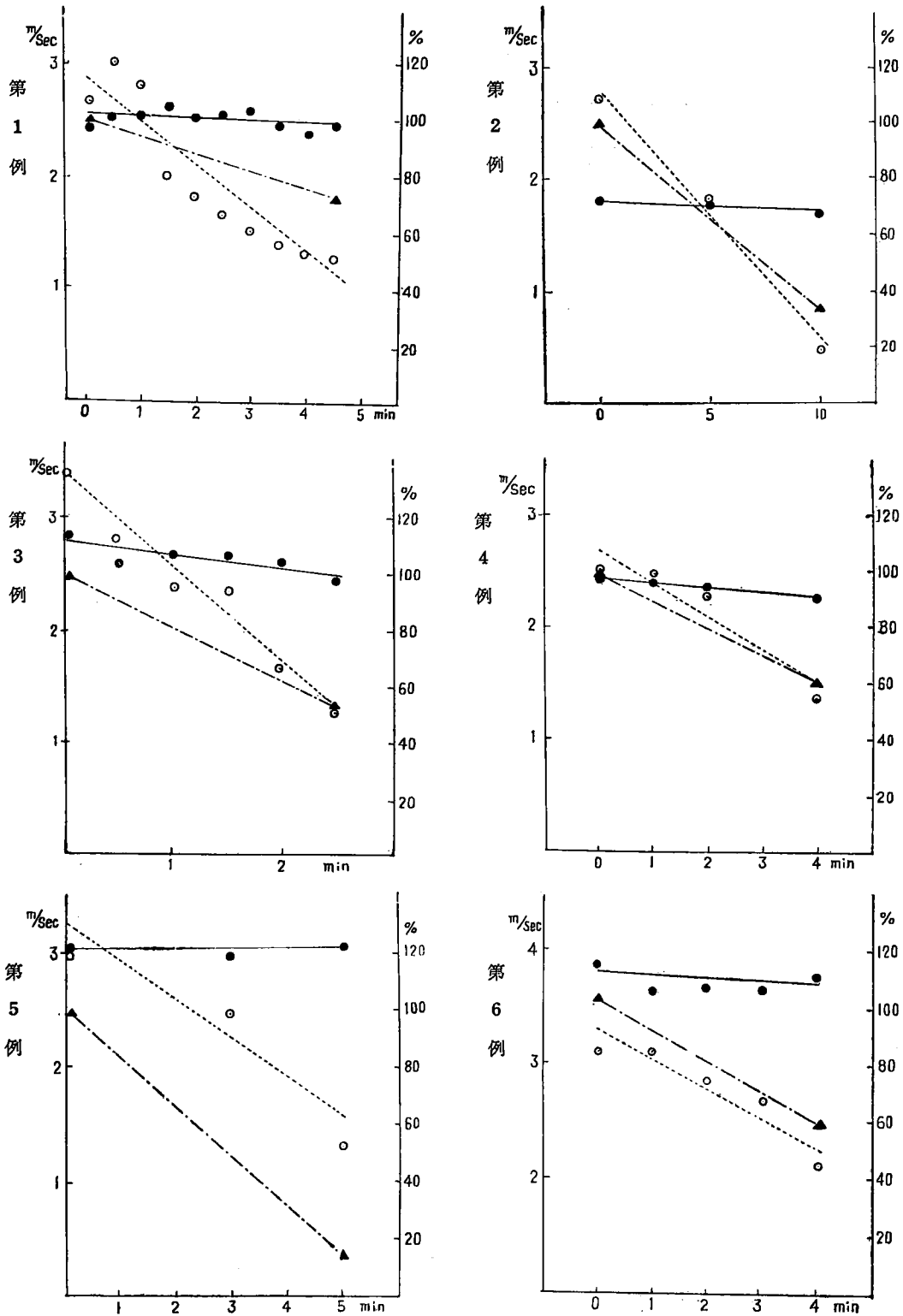
静止電位は電極刺入時には正確であるが、時間の経過と共にビームが変動するため、途中では正確に測定不能であった。この変動は増巾器の不安定なためか、又は電極のインピーダンスの変化によるものと思われる。一本の筋線維についての実験終了後、超微小電極を抜きビームの変位を補整した。そのため静止電位は実験の始めと終りにのみ測定した。なお、一本の筋線維より正常の活動電流及び静止電位が測定できなくなつても、すべて隣接の筋線維から、正常の活動電流及び静止電位が測定できた。

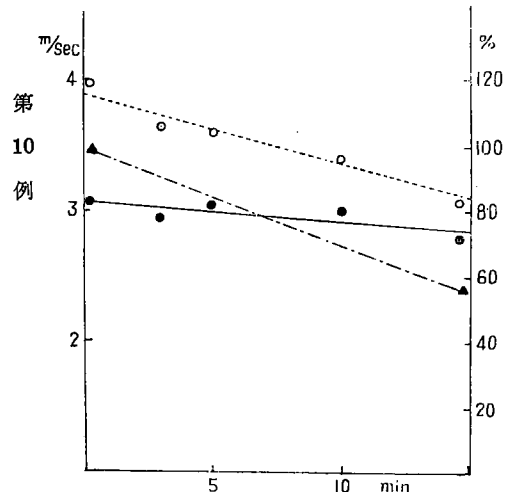
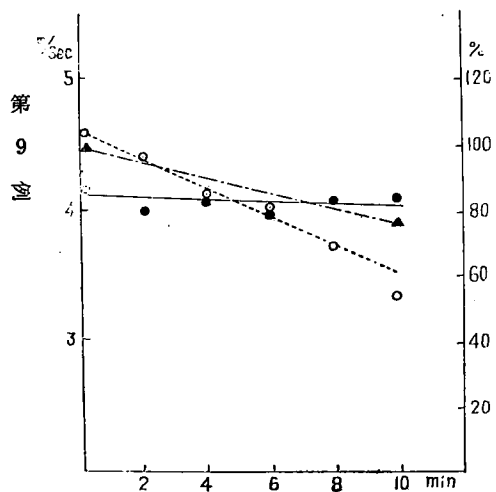
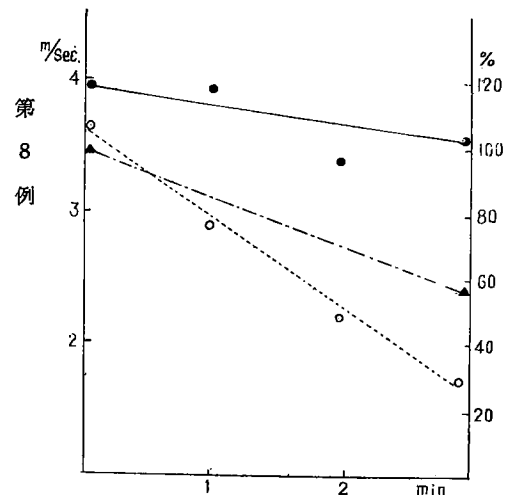
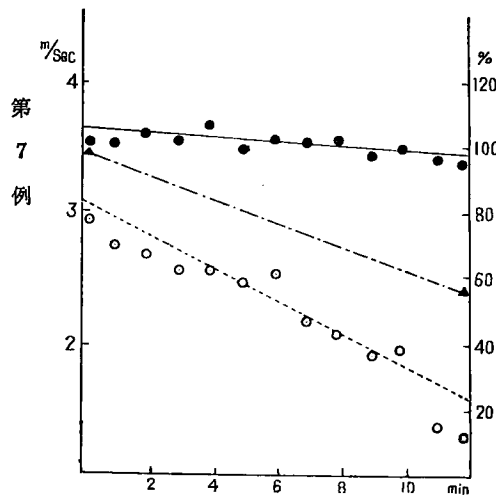
興奮の伝導速度の測定は両電極間の距離を対物マイクロメーターで測り、刺激のアーチファクトより活動電流の立上りの部までを測り、計算した。

#### 第3章 実験成績

一本の筋線維に電極を刺入したまま興奮の伝導速度、活動電流の棘高及び静止電位の変化を時間的に追求し、相互の関係を比較、検討した。結果は第1図のごとくである。なお、グラフ中、左の縦軸は伝導速度を示し、右の縦軸は電極刺入時の静止電位を100%とし、刺入時の活動電流の棘高を%で示すようにした。すなわち、棘高の%が静止電位の%より

第1図. 人腹直筋線維一本の興奮伝導速度, 活動電流の棘高及び静止電位の時間による変化. —●—: 興奮伝導速度. ---○---: 活動電流の棘高. ---▲---: 静止電位. 超微小電極刺入時の静止電位を100%とする.





も大きいことは活動電流が逆転 (overshoot) していることである。横軸は時間である。

全10例共伝導速度、活動電流の棘高及び静止電位は大体同じような傾向を示した。

伝導速度は第9例のように 4m/sec 以上のものから、第2例のように 2m/sec 以下のものまでであるが、時間的経過はほぼ同じような傾向を示している。すなわち、時間と共にわずかに減少していつてはおるが、活動電流の棘高及び静止電位が測定困難なほど少なくなつても、速度の減少は10%以内の減少にとどまっている。伝導速度が減少していく時間的關係は筋線維によつて差があり、2分30秒から15分で大体10%近くの減少をみるものである。全例に共通していることは、増加したものはないが減少しても10%以内のことである。

活動電流の棘高は時間の経過と共に著明な減少が

見られ、2分30秒—15分で105—120%あつたものが20—60%まで減少している。第3, 8例のように非常に早く測定不能になるものや、第2, 7, 10例のように比較的長く測定できるものなど色々であつた。

静止電位は活動電流の棘高の時間的経過と非常によく似ており、著明な減少を示す。すなわち、100%あつたものが2分30秒—15分後に30—60%まで減少している。早く測定不能になるものや、比較的長時間測定可能なものなどがあつた。

以上のことにより、活動電流の棘高及び静止電位は同様の時間的経過をたどるが、伝導速度は前二者が30—60%にまで減少してゆくにもかかわらず、わずか10%以内しか減少せず、またその時間は筋線維によつて種々である。

#### 第4章 考案

すでに緒言において述べたごとく、何らかの影響によつて筋線維の状態に変化がおこつたような場合に、その興奮伝導速度にも変化がおこるのではないかと考えて本編の実験を行なつた。すなわち、生体外に取り出し、人工体液で還流した一本の筋線維の興奮伝導速度、活動電流の棘高及び静止電位は時間的にどのような変化をうけるかということ測定したグラフが第1図の第1—10例である。この図より分ることは、活動電位及び静止電位が減少して、筋線維の状態が悪くなつても、伝導速度にはほとんど影響のないことである。そして活動電位と静止電位とは時間の推移につれて急速に減少してゆくが、この両者は同じような経過をたどっているが伝導速度にはほとんど変化がみられない。こうしたことから推測し、活動電位と静止電位は同じような発生機序によつておこるものであり、伝導速度はその両者とは異つた別の発生機序によつておこるものであろうと考える。

また、従来、細胞に先端直径  $0.3-0.5 \mu$  の超微小電極を刺入した場合、その細胞は生理的に長時間正常に働くといわれてきた<sup>12)</sup>。しかし私の実験で一本の筋線維に超微小電極を刺入することは、筋細胞にかなりの侵襲をあたえることが判明した。すなわち、超微小電極を刺入したまま一方より時間をおいて刺激してみると、2分30秒から15分で活動電流の棘高と静止電位が著明に減少し、遂にはまったくみられなくなつた。すぐ隣接した筋線維からは正常の大きさの活動電流と静止電位がえられたので、全部の筋線維が死亡したのではないことが分る。

活動電流の棘高及び静止電位が著明に減少する原因として、超微小電極刺入によつてできる細胞膜と電極との間の孔より  $\text{Na}^+$  及び  $\text{K}^+$  の流入、流出することが推測される。活動電流について細胞内外のイオンの変化を考えてみるのに、Hodgkin and Katz<sup>3)</sup> はヤリイカの巨大神経線維で、外液の  $\text{Na}^+$  濃度が非常に大きく活動電流に影響するといっている。すなわち、外液中の  $\text{Na}^+$  が正常の  $1/3-1/6$  になると活動電流の棘高は低下し、逆転 (overshoot) しなくなる。蛙の筋線維についても同様のことが認められている<sup>4)</sup>。私の実験の場合、外液中の  $\text{Na}^+$  濃度の変化は考えられないので、超微小電極を刺入した部より細胞内外に  $\text{Na}^+$  の移動がおこり、外部に比べて  $\text{Na}^+$  の濃度が低い細胞内部に  $\text{Na}^+$  が流

入したのではないかと考えられないであろうか。細胞内外に  $\text{Na}^+$  の濃度差が減少し、そのために活動電流の棘高が低下したのではなからうか。

静止電位の減少についても、静止電位の成立に関係していると考えられている  $\text{K}^+$  (50677) の細胞内外の濃度差が、刺入孔よりの  $\text{K}^+$  の移動によつて低下し、静止電位の減少をきたしたと考えられないであろうか。

すぐ隣接した筋線維より正常の活動電流及び静止電位がえられることより、超微小電極の刺入が活動電流の棘高及び静止電位の減少をきたす直接の原因であろうともゆうことは容易に推測される。すなわち、人腹筋筋線維の場合、電極の刺入は筋線維にかなりの侵襲をあたえることが分る。

以上述べたように筋線維の状態が悪くなつて、活動電流の棘高及び静止電位が減少しても、興奮の伝導速度にはほとんど影響しないといえるであろう。このことは第1, 2編の筋線維の興奮伝導速度のばらつきが、筋線維の新鮮さに影響されているものではないことが推察される。

次に、赤筋線維及び白筋線維によつて、活動電流の棘高及び静止電位に差があるかどうか検討してみた。第2編の骨格筋筋線維の機能分化による興奮伝導速度の差より、第1, 2, 4例は赤筋線維であり、第3, 5, 10例は中間型線維、第6, 7, 8, 9例は白筋線維と考えられる。しかしこれらの間には有意の差は認められなかつた。

#### 第5章 結語

人の腹直筋筋線維に超微小電極を刺入し、興奮伝導速度、活動電流の棘高及び静止電位を時間的に測定し、筋線維の新鮮さが興奮の伝導速度にどのように影響するかを検討してみた。また赤筋線維と白筋線維について比較してみたところ次のようになった。

- 1) 人腹直筋筋線維の興奮伝導速度は超微小電極を刺入後、2分30秒~15分で10%以内の減少であり、あまり著明ではない。
- 2) 人腹直筋筋線維の活動電流の棘高と静止電位は極刺入後、2分30秒~15分で著明に減少する。
- 3) 人腹直筋筋線維は状態が悪くなつても、その興奮伝導速度はあまり変化をうけない。
- 4) 生体外に取り出され、人工体液中に侵された人腹直筋筋線維に超微小電極を刺入することは、その筋線維にかなりの侵襲をあたえる。

5) 赤筋線維及び白筋線維で、興奮の伝導速度、活動電流の刺高及び静止電位の時間的経過に有意の差は認められない。

擧筆にあたり御懇篤なる御指導並びに御校閲を賜わつた恩師田中教授に深く謝意を表し、また直接御指導を賜わつた西本、奥村及び緒方の諸講師に深く謝意を表します。

## 参 考 文 献

- |  |   |
|--|---|
| 1) Ling, G. and Gerard, R. W.: J. cell. comp. physiol., 34, 383, 1949.   | 4) Nastuk, W. L. and Hodgkin, A. L.: J. cell. comp. Physiol., 35, 39, 1950. |
| 2) Creese, R., Dillon, J. B., Marschall, J., Sabawala, B., Schneider, D. J., Taylor, D. B. and Zinn, D. E.: J. Pharmacol., 119, 485~494, 1957. | 5) Bernstein, J.: Pflüg. Arch. ges. Physiol., 92, 521, 1902.                |
| 3) Hodgkin, A. L. and Katz, B.: J. Physiol., 108, 37, 1949.  | 6) Höber, R.: Pflüg. Arch. ges. Physiol., 92, 521, 1902.                    |
|  | 7) Adrian, R. H.: J. Physiol. 133, 631~658, 1956.                           |

An Electrophysiological Study on the Differences of Conduction Velocity between the Red and white Muscle Fibers.  
Part III. Changing of Conduction Velocity, Amplitude of Action-potential and Resting-potential according to the Times from the Insertion of Microelectrode into Musclee Fibers.

by

Hikoze SHIMADA

Department of Surgery and Neurosurgery, Okayama University Medical School  
(Director: Prof. Sanae TANAKA)

Using the intracellular microelectrode, the relationship between the freshness of muscle fibers and their electrophysiological character was studied in the surgically extirpated human m. rectus abdominis, namely, the decrease rate of their conduction velocity, amplitude of action-potential and resting-potential was measured according to the times from the insertion of microelectrode into muscle fibers and the following results were obtained.

1. The decrease of conduction velocity was not so obvious for 15 minutes, namely, its average decrease rate was about 10 % for 15 minutes.

2. The decrease of amplitude of action-potential and resting-potential was prominent for 15 minutes, namely their average decrease rates were about 50 % for 15 minutes. It was further assumed that the main cause of these decrease might be attribute to the mechanical injury of muscle fibers by the insertion of microelectrode into them.

3. No marked difference was observed between the decrease rate of conduction velocity, amplitude of action-potential and resting-potential of the red and that of white muscle fibers.