# 人骨格筋の電気生理学的ならびに組織学的研究

## 第 1 編

人骨格筋の筋線維膜の電気的常数及び膜電位について

岡山大学医学部第1外科教室(指導:陣内傳之助教授)

大学院 篠 崎 有

【昭和 37.7.18 受稿】

## 第1章緒 言

Ling and Gerardl) が初めてガラス超微小電極を 用いて蛙の 筋線維膜の 静止電位を測定して以来, Nastuk and Hodgkin<sup>2)</sup>, Fatt and Katz<sup>3)</sup>, Del Castilo and Machne<sup>4</sup>) 及びその他の多くの研究者に より、筋線維の収縮過程に関係の深い筋線維膜の電 気的特性が、冷血動物について詳しく研究されて来 た。しかし、温血動物、ことに高等動物の骨格筋に ついては、古くは Grützner<sup>5)</sup> の記載から Denny-Brown<sup>6)</sup>, Bullard<sup>7)</sup> らの研究が散見せられ、近くは、 わが教室の近藤8), 緒方9), 斉藤10) 等の研究がある けれども、まだ明らかにされていない部分がきわめ て多い、温血動物の骨格筋では、冷血動物のそれと 異なり、いわゆる赤筋線維と白筋線維とが別個の筋 を形成せず、同一の筋内に分布し極めて密に混在し ていること8),恒温であること;比較的筋線維の細 いこと等,多くの特殊性を持つている.さらに人間 は直立位で生活する関係上、冷血動物とは勿論、他 の多くの温血動物とも異つた性格を獲得している可 能性があることは容易に想像されるところである。 しかしながら温血動物の筋の有する上述のような特 殊性が諸種の電気生理学的実験を困難にしており, ことに人の骨格筋に対しては、現在の破損しやすい ガラス超微小電極では in vivoの状態では全く不可 能で、in vitro で実験するより他に方法がなく、実 験材料を良い状態で得ることも困難であり、従つて 人に関するこの種の研究は極めて少い現状にある. Dillon et al<sup>11)</sup>, Creese et al<sup>12)</sup> 及び Elmqvist et al<sup>13)</sup> がわずかに肋間筋を Krebs 液又は Tyrode 液中に 保存し,これを用いて筋弛緩剤の実験及び電気生理 学的特性の測定を行つているに過ぎない. Creese et al12) によれば、人の骨格筋としては肋間筋のみ が in vitro での実験に耐えたという. しかし私は

開腹手術時に切除した腹直筋線維と,乳癌根治手術時に切除した大胸筋線維を用いて,in vitro で4時間余にわたり実験が可能であることを知つた.

人の骨格筋においては、2種の筋線維、すなわち 白筋線維と赤筋線維とが混合して存在しており、そ れぞれ組織学的、生理学的ならびに生化学的に異な つた性格を保持していることが明らかにされてきた. したがつて興奮伝導速度にも当然差があり、ひいて は筋線維膜の性格にも互いに異なるところがあるだ ろうことは容易に想像されるところである.したが つて本論では、筋肉を直接電気的に刺激すること によつて静止電位と活動電位とを測定し、次いで Square pulse analysis<sup>13)14)15)16)17)18)19)を用いて、 人の腹直筋と大胸筋の篏線維膜の電気的常数を計測 せんと試みた、</sup>

#### 第2章 実験方法

#### 第1節 実験材料

版直筋は上腹部正中切開による開腹術に際し, 腱 画から腱画まで両端の腱画を含めて長さ約 10cm, 巾約 5mm ほど正中線に近い部分を切除したもの を用いた. 臍より上には通常腱画は2つしかなく, 腱画を目標にしておけばいつも一定の筋の部分が得 られ,また切除時腱画のみを把持するようにすれば 筋線維を損傷することが少い.また,この際に筋膜 を残しておけば,術後患者にまつたく障害を残さな いですむ.実験時に筋を可及的原長に保持するため, 腱画間の距離を測定しておく.成人では 9cm 前後 である.

大胸筋は,乳癌の根治手術時に全摘したものの一 部を用いた。用いる部位は胸骨附着部附近にした. この場合も長さが充分あることが肝要で,少くとも 5 cm,多くの場合 10 cm 以上ある方が良い結果が 得られる。切除のしかたが短きにすぎると筋線維が 一部切断せられ、その結果わずかの時間で変性に陥 いる. 顕微鏡で観察すると、このようにして変性し た筋線維はあたかも珠数玉がつながつたように見え、 太くなり微小電極を刺入しても静止電位は 50 mV 以下しかなく、活動電位も表れないか、表れても経 過が緩慢なのですぐ区別がつく. しかしながら変性 に陥いつた筋線維が多く含まれるということは好ま しいことではない.

以上2種の筋を切除した患者には、現症及び既往 症に筋肉の疾患または筋肉に大きな影響を与えると 考えられる疾患の無い例を選んだ。

実験に用いた生理的代用液は次の組成を有する Tyrode 液で,これに5%のわりに CO<sub>2</sub> を加えた O<sub>2</sub> を泡立たせて用いた.

組成: NaCl 136.8 mM, KCl 2.68 mM, CaCl<sub>2</sub> 1.8 mM, MgCl<sub>2</sub> 0.49 mM, NaHCO<sub>3</sub> 11.9 mM, NaH<sub>2</sub> PO<sub>4</sub> 3.3 mM 及び Glucose 1 g を 1L 中 に含む.

切出した筋標本は直ちに 37°C に加温した Tyrode 液中に貯えておく必要がある.また実験前の温度は あまり影響がないが、乾燥させることは最も避けね ばならない.

#### 第2節 実験装置

図1の如きアクリール樹脂製の恒温槽の蓋の中央 部に7×10×2の図2の如きアクリール樹脂製の小





図2超微小電極用小水槽



fi

水槽が備えてある. EのヒーターとFのサーモスタ ットで恒温に保たれた温水の中にこの小水槽がつか つた状態になつているわけである. Tyrode 液は図 1のCから吸いこまれDで保温せられ, Bより5% CO<sub>2</sub> と 95% O<sub>2</sub> の混合ガスで飽和されながら泡の 浮力で吐出される. 恒温槽のサーモスタットを一度 調節すれば, ± 0.2°C の正確さで恒温が得られる. 筋肉片は両端を糸でしばり, 図2のD, Eの釘にひ つかけてから I, Jの釘に結びつけてほ、原長に固 定する. DとEの距離は 9 cm に作つてあり, 腹直 筋の場合は腱両に糸をかければ大抵の場合原長に伸 展せしめ得る. 筋肉のGの部に乗る部分はHの光源 からの集束光をFの鏡で反射せしめた光で照明され ており, このようにすれば 30~40 倍の双眼顕微鏡 で観察するのに便利である.

Square pulse を与えて筋線維膜の電位変化の経過 を見るに用いた回路は図3のようなもので、Aの微



小電極を通じて筋線維内に持続の長い矩形波が通電 される.通電には 50×106Ω の高抵抗を経て10-8A 程度の定電流を流せるようにしてあり、その時の膜 電位の変化をBの微小電極で測定するわけである. 初段の増巾には 12 AU7 型真空管を用いた Cathode follower で、図4のでとき回路<sup>21)</sup>のものを用い、 入力回路の時定数を 30 µsec 以下にしている.



用いたガラス超微小電極は、1.5 mm 径のテレツ クス中肉硬質ガラス管を一度引きにしたもので、ア ンドリウス型の改良型<sup>22)</sup>の puller で引いて用い ている.電極には田崎23)の方法を多少変更した方 法で 3M KCl の水溶液を充たして用いた。すなわ ち puller で引いた電極をスライドグラスに並べ、 ゴムバンドで止め、メチルアルコール中で減圧する。 常温で2分減圧し平圧にもどす. この操作を数回行 うと、減圧してももはや管内から泡が立ちのぼらな くなる. そのあと 15 分ほど平圧に放置する. それ から 10 分間蒸溜水に浸してから 3 M KCl 水溶液 中に1昼夜浸しておけばよい、実験でつかいあまし た電極は氷室に保存すれば翌日迄は使用に耐える。 電極を機械に装着するためには、松田24)の用いて いるホルダー(図5)と同様のものを自製して用い, Ag-AgCl 電極で 3 M KCl 溶液と接せしめて入力端 子につなぐ.

#### 図5 松田式微小電極ボルダー



塩化銀化した銀線 生ゴム輪 微小電極 電極の先の太さを知るにはやはり電気抵抗を測定 する方法がもつとも簡単で良い.すなわち図6の回 路のものを用いて交流を通じ,その電極の先の高抵 抗により分流された分を増巾し,その検波電流を測 る方法<sup>25</sup>)によつた.一般的な目的には 10~60× 106 Ω のものがよく使用に耐えた.

図6 電極先端の電気抵抗を測定するため に用いた回路



活動電位を取る目的で筋線維を直接刺激するに は、100µ 径の銀線を Tygon paint で coation し、 先の断面のみを露出させ塩化銀化したものを用いた。 刺激に用いる電流としては負の矩形波で、持続0.05 -0.1 msec, 電圧 0.5-2.0V の単発刺激を用いた. 矩形波を得るためには、日本光電製の電子管刺激装 置 MS-1A 型を改造,電圧を較正して用いた.

波形の記録には、三栄測器製の UB-203 及び UB 204 2 ビームオシロスコープを用い直流増巾器 として使用,波形は 35 mm フイルムに撮影して計 測した.

#### 第3節 実験方法

静止電位及び活動電位測定には、最初2ビームオ シロスコープの2つのビームを合せておき、超微小 電極を刺入,その時に起る電位差を静止電圧とし、 次いで前節で述べた方法で筋線維を電気的に刺激し て、活動電位を測定した。刺激の強さは、数本の筋 線維のみが収縮する程度の閾値直上の強さにしてお くと、周囲の収縮しなかつた筋線維が収縮した筋線 維の固定に役立ち、電極の破損や、筋線維の損傷も 少くてすむ.持続時間の測定としては、後電位のた め確実な方法とはいえないが、図7の如く、上昇相 と下降相とにおいてもつとも彎曲の強い2点間の時 間をもつて持続時間とした。この値は、したがつて 必ずしも外部電極による持続時間と一致するものと は限らないが、ある1つの指標として今後の実験に 用いられてよいであろう.





Square pulse analysis には Katz の方法<sup>15)</sup>を用 いた. すなわち, 10-9~10-8A 台の電流を 50— 100 msec の間 50×10<sup>6</sup>Ωの定抵抗を通じて1本の微 小電極より筋線維内に与え,他のもう1本の微小電 極を同一筋線維の0-0.1mm及び1.5-2.0mm の距離だけ先の電極からはなれた部位に2回刺入し, その時の膜電位の変化をフイルムに撮影して測定した(図8)

図8 Square pulse analysis の測定の1例





第4節 Square pulse analysis の理論 Square pulse analysis は細胞膜の電気的常数を知 る方法として Fatt and Katz<sup>18)</sup> により理論づけら れ,緒言に述べたように多くの人により追試せられ, その意義が認められている。我国でも動物実験には これに関する多くの業績があり,佐藤<sup>24)</sup> により詳 しく説明されている。 行

以下この論文に用いられる記号を記載しておく、 ri:単位長さ当りの内部抗(Ω/cm) rm:単位長さ当りの膜抵抵抗(Ωcm) Ri:内部比抵抗(Ωcm) Rm:膜の比抵抗(Ωcm2) Cm:膜の電気容量(μF/cm2)

λ:長さ定数=√rm/ri

rm:膜の時定数 (msec)

V: 通電時の最終電位変化値

I:通電電流量

X:2つの微小電極間の距離

p:筋線維の平均半径

筋線維を cable 的性格をもち線維膜が一 様で,容量と抵抗とが並列にならんだ電気 的回路網と等価なものとすると,筋線維膜 内外に矩形波を通電した時,通電電流に応 じた電位変化が筋線維に沿つて起ると考え られ,大量の Ringer 液に筋線維がつかつ ているときには通電時間が rm に比し充 分長ければ次の関係が成立つ.

 $V = \frac{I}{2} \sqrt{ri \cdot rm} e^{-\frac{\lambda}{\chi}}$ 

X が₁ ri・rm に比し充分小さいとゎは e<sup>- ★</sup>≍ ≒1 であるから

 $V = \frac{1}{2} I_{1} rm \cdot ri$ 

となる. Riを直接測定することはできないので Boyd and Martin<sup>19)</sup> に従い 125 $\Omega$  と仮定した. そのとき には  $\rho$  と Rm はそれぞれ

## $ho = \sqrt{\mathrm{Ri}/\pi\mathrm{ri}}$ , $\mathrm{Rm} = 2\pi\, ho\mathrm{rm}$

で表わされる. rm の測定には2つの測点における 電圧変化が,終値の  $\frac{1}{2}$  まで変化するに要する時間 を,距離に対して取ると,ほぼ 2 $\lambda$ /rm なる傾斜を 示すという Hodgkin and Rushtonの理論<sup>14</sup>)を用 いた.距離がほぼ0に近い場合,最終値の 83 %に 電圧変化値がなるまでに要する時間を測定するより も誤差が少い.以上の各式により2点におけるそれ ぞれの rm, V, I 及び距離 X を知れば Ri を 125 $\Omega$  と仮定した時の  $\lambda$ , ri, rm,  $\rho$ , Rm 及び Cm の値を知ることができる.

#### 第3章 実験成績

## 第1節 静止電位,活動電位及び活動電位 の持続時間

腹直筋 13 個体 131 本の筋線維, 大胸筋 5 個体 50

本の筋線維について計測した.測定する筋線維はま つたく at random に選んだ.その値を個体別及び 全体の平均値及び標準偏差の表にしたのが表1であ る.平均値は腹直筋の方が大胸筋よりもやや高く, 静止電位  $77.2 \pm 7.8 \text{ mV}$ ,活動電位  $93.9 \pm 9.7 \text{ mV}$ 及び持続時間  $1.9 \pm 0.22 \text{ msec}$  であるのに対し,大 胸筋は静止電位  $73.5 \pm 7.8 \text{ mV}$ ,活動電位  $87 \pm 8.0$ mV 及び持続時間  $1.8 \pm 0.18 \text{ msec}$  である.他の研 完者の他種の筋肉の筋線維の値と比較してみると, わたくしの値は Nastuk and Hodgkin<sup>2)</sup>が蛙の Musculus sartorius で測定した静止電位  $88 \pm 1 \text{ mV}$ , 活動電位  $119 \pm 1 \text{ mV}$ よりもはるかに低い.

静止電位に関しては、温血動物について行つた Elmqvist et al<sup>13)</sup>(人,肋問筋), Creese et al<sup>12)</sup> (人,肋問筋)及び Trautwein et al<sup>25)</sup>(猫,モル

M. RECTUS ABDOMINIS

モット)の値に近い.活動電位に関しては人の筋肉 で測定した人はまだないようで,比較できないが, Trautwein et al の猫,モルモットで測定した値よ りもやや低い.そしてどの活動電位にも over shoot を持つていることは他の動物におけると同様である. 持続時間は,後電位のため誤差が入りやすいはずで あるにもかかわらず比較的標準誤差が少く,このこ とは,臨床的筋電図で単一の筋線維からの放電を取 り得たと考えるためには,線維膜の内外に電極のあ る差は考えねばならないとしても,相当に持続時間 の短いものであると考えねばならないことがわか る.

## 第2節 Square qulse analysis による 筋線維膜の電気的常数

腹直筋3個体9線維、大胸筋3個体5線維につき

<b>衣</b> ] 一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一	地区及び店町竜区の肠続の美測能
--	-----------------

muscle No.	fibe <b>r</b> number	resting potential	action potential	duration	
1	16	75.9± 6.0mV	97.7± 7.0mV	$200 \pm 21  \mathrm{msec}$	
2	14	78.3± 5.3	95.4± 9.1	$181 \pm 13$	
3	12	83.6± 6.9	105.8±10.0	$162 \pm 11$	
4	2	70.5	94.5	161	
5	9	$74.0 \pm 8.1$	90.0± 9.0	$197\pm13$	
6	4	$74.3\pm$ $3.3$	85.5±10.1	$178 \pm 16$	
7	15	78.4±11.5	93.1±12.0	$183\!\pm\!19$	
8	8	$79.7 \pm 5.4$	87.5± 8.4	$196\pm\!17$	
9	10	78.3± 2.6	88.3± 8.7	$183 \pm 25$	
10	8	$75.3 \pm 8.1$	90.5± 7.0	$202 \pm 12$	
11	19	77.1± 8.8	97.1± 7.2	$187 \pm 19$	
12	10	$85.5\pm2.3$	105.5± 4.5	$194\pm13$	
13	4	$67.3 \pm 8.2$	87.2± 2.8	$191\pm16$	
average	131	77.2 - 7.8	93.9± 9.7	$190 \pm 22$	

M	PECTORALIS	MAJOR
	TROTORADIO	THE OWNER

muscle No.	le No. fiber number resting action potential potentali		action potentali	duration
	3	76.3± 3.9mV	$77.7 \pm 3.7 \mathrm{mV}$	$^{\times 10^{-2}}_{162.3\pm 26 msec}$
2	3	$64.7\pm~3.3$	84.5± 3.5	$165.7 \pm 61$
3	8	$68.9 \pm 6.2$	83.0± 7.8	$77.4 \pm 11$
4	25	$76.2 \pm 7.6$	88.7± 7.9	$188.6 \pm 17$
5	11	72.5± 4.8	90.3± 5.7	$177.5 \pm 16$
average	50	73.5± 7.8	87.2± 8.0	181.4±18

## 篠 崎 有

研 究 者 動物名 活動電位 持 続 靜止電位 (mV)(mV)(msec.) Trautwein et al27) 0.5 ネ J 79.5± 5.7  $116 \pm 4.4$ 同上 \_\_\_\_ モルモツト  $84.5\pm5.7$  $121 \pm 8.2$ Nastuk and Hodgkin<sup>2)</sup> 5.0 119±1 カエル 88 ± 1 Elmqvist et al13) 人(肋間筋)  $80.9\pm1.0$ \_\_\_\_ Creese et al12) 同  $\textbf{72.6} {\pm} \textbf{10.0}$ 上 \_\_\_\_ Boyd and Martin<sup>28)</sup> 木 Э 75

表2 諸研究者の靜止電位等の値

表3 筋線維膜の電気的常数

muscle	fiber	τm	ρ	<sup>1</sup> / <sub>2</sub> ν/γmγi	γm	γi	Rm	Cm	λ
No.	No.	msec	μ	$ imes 10^3 \Omega$	$\times 10^3 \Omega  \mathrm{cm}$	$ imes 10^8 \Omega$ /cm	$\Omega  { m cm}^2$	$\mu F/cm^2$	mm
1	I	8.60	73	386	20.1	2910	470	18.3	2.61
2	Ι	5.28	34	212	52.6	3420	1130	4.7	1.24
	II	8.53	36	243	76.3	3100	1720	5.0	1.57
	Ш	7.23	39	166	42.2	2610	1040	7.0	1.27
	īV	8.20	28	282	63.7	4980	1130	6.6	1.13
3	I	11.43	34	230	62.6	3380	1360	8.4	1.36
	I	13.08	29	280	64.9	4820	1170	12.3	1.16
	Ш	8.24	38	153	33.4	2810	790	10.0	1.09
	IV	6.25	25	269	56.6	5130	870	7.9	1.05
average		8.60 +2.22	33 + 5	247 +67	52.5 ±16.6	3680 ±1000	1080 ±325	9.1 ±4.1	1.39 ±0.47

M. RECTUS ABDOMINIS

muscle	fiber	τm	ρ	$\frac{1}{2}\sqrt{\gamma_m\gamma_i}$	γm	γi	Rm	Cm	λ
NO.	No.	msec	μ	$ imes 10^3 \Omega$	$\times 10^3 \Omega \mathrm{cm}$	$ imes 10^3  \Omega  / \mathrm{cm}$	$\Omega  \mathrm{cm}^2$	$\mu F/cm^2$	mm
1	I	4.95	25	282	48.5	6150	770	6.4	0.86
	П	5.88	34	241	68.4	3390	1480	4.0	1.42
2	I	8.74	20	458	82.5	10180	1010	8.7	0.90
3	I	5.96	30	284	75.0	4310	1430	4.2	1.32
	I	10.7	27	348	86.5	5620	1450	7.4	1. <b>24</b>
avekage		7.25 ±2.14	27 ±5	323 ±76	72.2 ±14	5930 ±2340	1228 ±187	6.1 ±2.3	1.15 ±0.23

M. PECTORALIS MAJOR

計測した.腹直筋は  $\tau$ m 6.3 msec, 半径 33  $\mu$ , Rm 1080  $\Omega$  cm<sup>2</sup>, Cm は 9 $\mu$ F/cm<sup>2</sup>, 大胸筋では  $\tau$ m 7.3 msec, 半径 27 $\mu$ , Rm 1230  $\Omega$  cm<sup>2</sup>, Cm 6 $\mu$ F/cm<sup>2</sup> で,両者の間には半径が腹直筋が大きいのと, Cm が腹直筋がやはり大きい他にはとくに差がない.他 家の報告の主なるものと比較したのが表4 である, Cm は佐藤の報告したガマの例は別として,他種の 筋における値より比較的大きく,これは腹直筋に著 しい.これはいくつかの Cm の大きな線維が含ま れているためと思われる. Rm の値は Boyd and Martin<sup>19)</sup>の猫の値に近く,その他  $\lambda$ や rm には ほとんど諸家の報告との差が認められない,

研究者	動	物	名	λ (mm)	τm (msec)	δ (μ)	Rm (Ωcm <sup>2</sup> )	$\begin{array}{c} \text{Cm} \\ (\mu \text{F/cm}^2) \end{array}$
Boyd and Martin <sup>28)</sup>	<b></b>		7	1.10	4.9	22	1430	3.5
Eimqvist et al18)			間*	2.24	18.9	31	4070	4.8
Katz <sup>15)</sup>	<b></b> <i></i>	I	v	1.1	18	45	4000	4.5
佐藤26	Я		7	2.27	40	183	2861	13.6

表4 筋線維膜電気常数の諸研究者の値

肋間筋

#### 第4章 考 按

筋肉は、血流を遮断してあつても、また数度まで 冷却しても、比較的障害を残さずに速かに回復する ことは、臨床的に良く知られており、この点では他 の組織よりもはるかに不良な外界の条件にも耐えら れることを意味し、したがつて生理的代用液中で の in vitro の実験が可能なわけである。 しかるに Creese et al<sup>12</sup>) によれば、人の骨格筋では肋間筋以 外は, in vitro では実験に耐えなかつたという。 私の経験では充分に長く切除出来さえすれば、どの 筋も in vitro で数時間に亘り実験が可能であり、 その間安定した静止電位と活動電位とを得ることが できた.

このことは結局筋線維が途中で切断されているか 否かに関係するのであつて、肋間筋のように短い筋 では切断される恐れが少いことを示しているにすぎ ない. 従つて腹直筋では両端に腱画をつけて切除し さえすれば、すべての筋線維は途中を切断されるこ となく切除できるわけである。したがつて肋間筋が とくに実験に便利であるというだけであつて、この 筋だけが体外にて活動電位導出可能なものであると いうようなことはありえない.

Bernstein<sup>29)</sup>の膜説以来,細胞膜の電位は,細胞 内外の Kalium ion の濃度の差による濃淡電池とし て説明できるとされている.人の筋線維にこの考え を当てはめて見ると次のようになる。細胞内の Kalium ion 濃度を 112 mEq/L と仮定すると (Deane and Smith<sup>30)</sup>)

$$\mathbf{E} = \frac{\mathbf{R} \mathbf{T}}{\mathbf{n} \mathbf{F}} \qquad \log \frac{\mathbf{K}\mathbf{i}}{\mathbf{K}\mathbf{o}}$$

但し Ki:筋線維膜内の Kalium ion 濃度 Ko:筋線維膜外の Kalium ion 濃度 R: 8.814 joule F : 96500 coulomb n:1

## T : 310° K

Tyrode 液の Kalium ion 濃度は 2.68 mEq/L で あるから静止電位は 99 mV となる. しかし, 人の 骨格筋の静止電位は他の温血動物同様 80 m∇ 前後 で 95 mV を越えることはまずない.実験条件が Tyrode 液中の in vitro であるという不利な点を 考慮に入れても 99 mV というような値にはならな いだろう. Ropes, Bennett and Bauer<sup>31)</sup> によれば 血漿中の Kalium ion はその 25 %が蛋白と結合し ていて電気化学的には不活性であるという. 筋線 維内には血漿中よりも蛋白含量は多いわけで、 Magnesium ion の如き血漿中よりも多量に含まれ ている ion の存在も考えねばならないとして も、少くとも血漿と同程度乃至は、さらに多くの Kalium ion が電気化学的に不活性であると考えて よいと思われる、この実験の場合には、外液は Tyrode 液でほとんど全部の ion が解離し、電気化 学的に活性であると考えれば良いわけである。ここ で、もし静止電位が 80 mV であつたと仮定すれば、 線維内で活性である Kalium ion は 54 mEq/L にす ぎぬことになる。したがつて実際には数 10 mEq/L の Kalium ion は、蛋白と結合して電気化学的に 不活性であつたとしても、それだけでは説明し難い ように思われる.

Hodgkin and Katz<sup>32)</sup> は活動時の膜電位の変化も 合せ考えて

PK(K)o+PNa(Na)o+PCl(Cl)i $\mathbf{E} = \frac{\mathbf{RT}}{\mathbf{n} \mathbf{F}} \log \frac{\mathbf{PK}(\mathbf{K})\mathbf{o} + \mathbf{PNa}(\mathbf{Na})\mathbf{o} + \mathbf{PCl}(\mathbf{Cl})\mathbf{i}}{\mathbf{PK}(\mathbf{K})\mathbf{i} + \mathbf{PNa}(\mathbf{Na})\mathbf{i} + \mathbf{PCl}(\mathbf{Cl})\mathbf{o}}$ 

(但し PK: PNa: PCl は Kalium ion, Natrium ion 及び Chlor ion の透過係数の比, (K)o, (Na)o, (Cl)o は線維外液の、(K)i、(Na)i、(Cl)i は線維 内液のそれぞれの Kalium-Natrium-, Chlor ion の 活動係数)という式を提出した. この式は少くとも ヤリイカの巨大神経線維については極めてよく実験 値と一致している. ここで PK: PNa. PC1=1: 0.04:0.45 というヤリイカの巨大神経線維の値30)

有

を借用して見ると、線維内の電気化学的活性な Chlor ion が 10.5 mEq/L あり、Kalium ion の25 %が電気化学的に不活性であるとすれば、静止電位 が約 80 mV となり実験結果と良く一致する. した がつてこれが Tyrode 液中における人の骨格筋の真 の姿ではないかと考えられる.

活動電位の発生は、現在 Natrium ion に対する 透過係数 PNa が増大して起ると解されている. こ れも ヤリイカの 巨大神経線維の値 すなわち PK: PNa: PCl=1:20:0.45 と同等であるとすると、 細胞内の Natrium ion の濃度を 37 mEq/L と仮定 して計算すれば約 32 mV となる. しかし人の 骨格 筋を in vitro で実験しても約 10~20 mV 程度の Over shoot しかしない. これは実験条件が不良な ために環境に対してもつとも敏感な電気的興奮時に おける膜の Natrium ion に対する透過性の抗進が 充分に起きなくなるためと解され、したがつて PNa の低下が起つているものと考えられる.

活動電位の上昇相と下降相のもつとも彎曲の強い 点の間の時間、すなわち持続時間に相当すると考え られる時間は約 1.9 msec であつて、この値はわれ われが臨床的に得られる筋電図の1つの NMU か ら得られたと考えられる放電の持続時間のうち、短 いものの値にほぼ一致する. 臨床的に筋線維の外部 から電極を当てた場合, 雙極誘導であれば、2つの 電極がうまく同一線維の長軸の方向にあたつていた としても、筋線維膜外から導出した活動電位は、膜 の電位変化のほか、その電極間に興奮が伝導する時 間、外液の比較的低抵抗による短絡のために早急に 消退する後電位等の総合であるから、直ちにこの値 と比較さるべくもないが、少くとも、筋電図上の持 続の変動は、筋線維く自体に基くものよりも、他の 筋線維との関係、電極の位置等に影響されることが 大きいということがわかる.腹直筋の131本の線維 について見た活動電位の持続時間をヒストグラムに して示すと、図9のごとくである. このヒストグラ ムは 1.78 msec と 2.03 mrec とに2峯があるよう にも見えるが、計算によると歪度 0.21、 尖度 2.69 であり、すなわち確実に2峯であるという証拠には ならない、むしろ正規分布をしていると考える方が 良いであろう.

筋線維膜の電気的常数は,平均値では多くの他の 動物の筋線維に関する報告と同じ程度の値であるが, その値のちらばりは比較的大きい.とくに筋線維膜 の Cm は極めてちらばりが大きく,測定誤差が大

### 図9 腹直筋活動電位の持続時間のヒストグラム



きいことが一因であるとしても、性格の異る2種の 筋線維のあることが推測される.rm は他の温血動 物、人の肋間筋の報告よりやや長いが、冷血動物に 関する報告よりは短い.これは筋線維の太さによる ものと考えられる.Riを 125Ω と見積つて計算し た筋線維の太さは、ホルマリン固定後、染色をほど こしたものに比すればかなり太い.この点に関して はまた第2編でふれることにする.

## 第5章 結論

手術時に,人の腹直筋及び大胸筋を切除,充分通 気した Tyrode 液中に保存,微小電極法により筋膜 の電気的常数と静止電位及び活動電位について研究 し,次の結論を得た.

1) 手術時に切除した人の腹直筋及び大胸筋の筋 線維は Tyrode 液中に保存しておけば、生理学的実 験に耐えることを証明した。

2) 静止電位は腹直筋線維では 77.2±7.8 mV, 大胸筋線維では 73.5±7.8 mV であつた. また活 動電位はそれぞれ 93.9±9.7mV, 87.2±8.0 mV であつた. これらの値は筋線維内の Kalium ion 濃度, Chlor ion 濃度をそれぞれ 112 mEq/L, 10.5 mEq/L とし,筋線維の Kalium ion の 25 %が電 気化学的に不活性であり,かつ RK: PNa: PCl が 静止時1:0.04:0.45,活動時 1:20:0.45 とし たときの値とほぼ等しいか,やや低い程度である.

3) 活動電位の持続は、活動電位の上昇相と下降 相のもつとも彎曲の強い点との間の時間で測定すれ ば、腹直筋では 1.90±0.22 msec, 大胸筋では 1.81 ±0.18 msec であつた.

4) 大胸筋と腹直筋の筋線維膜の電気的常数は多量の Tyrode 液中で測定すれば,次の如くであった,

τ	m <b>(msec</b> )	ρ(μ)	Rm (Ωcm <sup>2</sup> )	$Cm (\mu F/cm^2)$	λ (mm)
大胸筋	$7.25 \pm 2.14$	$33\pm5$	$1080\pm325$	9.1±4.1	$1.39 \pm 0.47$
腹直筋	8.60±2.22	27±5	$1228 \pm 187$	$6.1 \pm 2.3$	1.15±0.23

擱筆にあたり御懇篤なる御指導ならびに御校閲を 賜つた恩師陣内教授に深く謝意を表します。 (要旨は第15回日本筋電図学会総会において発表した。)

## 参考文

- Ling, G. and R. W. Gerad: J. cell. comp. Physiol., 34, 383 1949.
- Nastuk, W. L. and A. L. Hodgkin: J. cell. comp. Physiol., 35, 39-73, 1950.
- Fatt, P. and B. Katz: J. Physiol., 115, 320-370, 1951.
- Del Castillo, J. and X. Machne: J. Pkysiol., 120, 31-434, 1953.
- 5) Grützner, P: Breslauer Artzl. zeitschr., No. 24, 1883 (Denny-Brown, D.E. Proc. Roy. Soc. (London), 104B, 371-412, 1929 より 引用)
- Denny-Brown, D. E.: Proc. Roy. Soc. (London), 104 B, 371-412, 1929.
- 7) Bullard, H.: Am. J. Anat., 14, 1, 1912.
- 8) 近藤: 岡山医学会雑誌: 71, 3569-3580, 1959.
- 緒方: Acta Medicinae Okayama: 12, 216-227, 1958.
- 10) 斉藤:岡山医学会雑誌: 71, 4377-4381, 1959.
- Dillon, J. B., J. Fields, T. Gumas, D. J. Jenden and D. B. Taylor : Proc. Soc. eyp. Biol., N. Y., 90, 409, 1955.
- 12) Creese, R., J. B. Dillon, J. Marshall, P. B. Sabawala, D. J. Schneider, D. B. Taylor and D. E. Zinu: J. Pharmacol., 119, 485— 494, 1957.
- Elmqvist, D., T.R. Johns and S. Thesleff: J. Physiol. 151,, 602-607, 1960.
- 14) Hodgkin, A. L. and W. A. H. Rushton: Proc. Roy. soc. 133, B, 444-479, 1946.
- Katz, B.: Proc. Roy. Soc. 135B, 506-534, 1948.
- 16) Weidmann, S. J. Physiol., 114, 372-381,

1951.

嵐

- 17) Weidmann, S.: J. Physiol., 118, 348-360, 1952.
- 18) Fatt, P. and B. Katz: J. Physiol., 115, 320-370, 1951.
- Boyd, I. A. and A. R. Martin: J. Physiol., 147, 450-457, 1959.
- 20) Rauber-Kopsh: Lehrbuch und Atlas der Anatomie des Menschen, Band 1, 476, 1952.
- 勝木:微小電極法の手引き(微小電極研究班編)
   金芳堂, 35, 1957.
- 22) 勝木:科学, 25, 342-349, 1955.
- 23) Tasaki, I., E. H. Polley and F. Orrego: J. Neurophysiol., 17, 455, 1954.
- 24) 松田: 微小電極法の手引き(微小電極研究班編) 金芳堂, 125, 1957.
- 25) 医学エレクトロニクス, 南山堂, 1956.
- 26) 佐藤,石河:微小電極法の手引き(微小電極研 究班編)金芳堂,77-96,1957.
- Trautwein, W., K. Zink and K. Kayser: Pflügers Archiv, 257, 20-34, 1953.
- 28) Boyd, I. A. and A. R. Martin: J. Physiol., 132, 61-73, 1956.
- 29) Bernstein, J: Elektrobiolgie, Braunschweig,
  Vieweg (Weidmann, S.: Elektrophysiologie
  d. Herzmuskelfaser, 1957より引用)
- Deane, N. R. and H. W. Smith: J. Clin. Investigation, 31 197, 1954.
- 31) Ropes, M. W., G. A. Bennett and W. Bauer: J. Clin. Investigation, 18, 351-372, 1939.
- 32) Hodgkin, A. L. and B. Katz: J. Physiol., 128, 28-60, 1949.

篠崎 有

# Electrophysiological and Histological Studies on the Human Skeletal Muscle Part I Electrical Constants of the Membrane of Human Skeletal Muscle Fibers

## By

## Tamotsu SHINOZAKI

## Department of Neurological Surgery, Okayama University Medical School (Director: Prof. Dennosuke JINNAI)

The isolated human rectus abdominis muscle and the pectoralis major muscle were used, and these muscles were mounted in constant-temperature bath containing oxygenated Tyrode's solution, and resting potential, action potential and electrical constants of the muscle fiber membrane were measured.

1. These muscles are considered to be suitable for the examination of human skeletal muscle fibers in vitro.

2. Resting potentials of the rectus abdominis muscle and the pectoralis major muscle are  $77.2 \pm 7.8 \text{ mV}$  and  $73.9 \pm 9.7 \text{ mV}$  repectively, and action potentials of these muscles are  $93.9 \pm 9.7 \text{ mV}$  and  $87.2 \times 8.0 \text{ mV}$  respectively. These figures are in the same range of any other reported data of the mammalian muscle fiber, but distributions are little wider.

3. Durations of action potentials are about 1.9 msec. in both muscles.

4. Electrical constants of these muscles are as follows:

		τm(msec)	ρ(μ)	Rm (cm)	$Cm (\mu F/cm^2)$	λ(mm)
M.	pectoralis major	$7.25 \pm 2.14$	$33\pm5$	$1080\pm325$	$9.1 \pm 4.1$	$1.39\pm0.47$
M.	rectus abdominis	$8.60 \pm 2.22$	$27\pm5$	$1228\pm\!187$	$6.1 \pm 2.3$	$1.15 \pm 0.23$