

高 圧 の 骨 格 筋 に 及 ぼ す 影 響

第 1 編

神経及び筋肉の興奮性に及ぼす高圧の影響に就て

岡山大学医学部生理学教室 (主任 林 香苗教授)

助 手 丹 原 英 昌

[昭和 27 年 3 月 15 日受稿]

I 諸 言

筋肉や運動神経の一部分に局所的な圧を加へて筋の短縮を起させるには、僅かな圧を加へればよいが、筋肉の周囲全体から平等に圧迫して短縮を起させようとするれば、200~400 気圧と云ふ非常に高い圧を加へなければならぬ。此の様な高い圧の生物に及ぼす影響に就ては種々の研究がなされているが、就中筋肉に就ては P. Regnard¹²⁾ が始めて手を付けて以来 McK. Cattell, D. J. Edwards¹³⁾ 及び D. Gald, E. S. Brown¹⁰⁾ 等の研究が有り、又 U. Ebbecke³⁻⁹⁾ 一門に依つて多くの仕事が行なわれている。

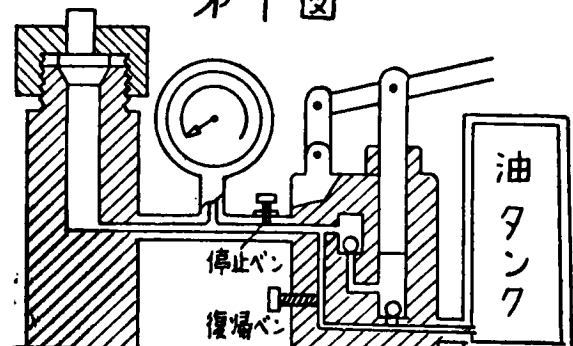
McK. Cattell と D. J. Edwards¹⁾ は筋の短縮が未だ現はれない 60 気圧迄の低目の圧を蛙の筋神経標本の全周囲に加へた状態で神経に単一電気刺激を与へて筋に短縮を起させ、発生張力の変化と熱発生の増減を調べて、加へた圧が高い程張力は増加し初期の熱発生も張力の変化に伴つて増加すると述べている。当教室の大和¹⁵⁾ は蛙の縫工筋に就て未だ筋の短縮が現はれる程度に到っていない 300 気圧迄の圧の下で、又川岡¹¹⁾ は蛙の脳、腎臓に就て同じく 300 気圧迄の圧の下で、共に酸素の消費量が平圧に於けるよりも著明に増加して来る事を証明している。そこで著者は圧迫に依る短縮が現はれる程度以下の圧迫時に標本の興奮性が如何に変つて来るかを確定する為に次の実験を行つた。

I 実験装置

筋肉に就て行つた実験に用ひた高圧ポンプ及びポンベは 600 気圧迄の圧を得る事が出来る機械で、其の後 2000 気圧の機械も出来たが、此処には前者だけに就て先づ説明する。機械の全貌は写真の如くであり、構造の大要は第 1 図に示した。

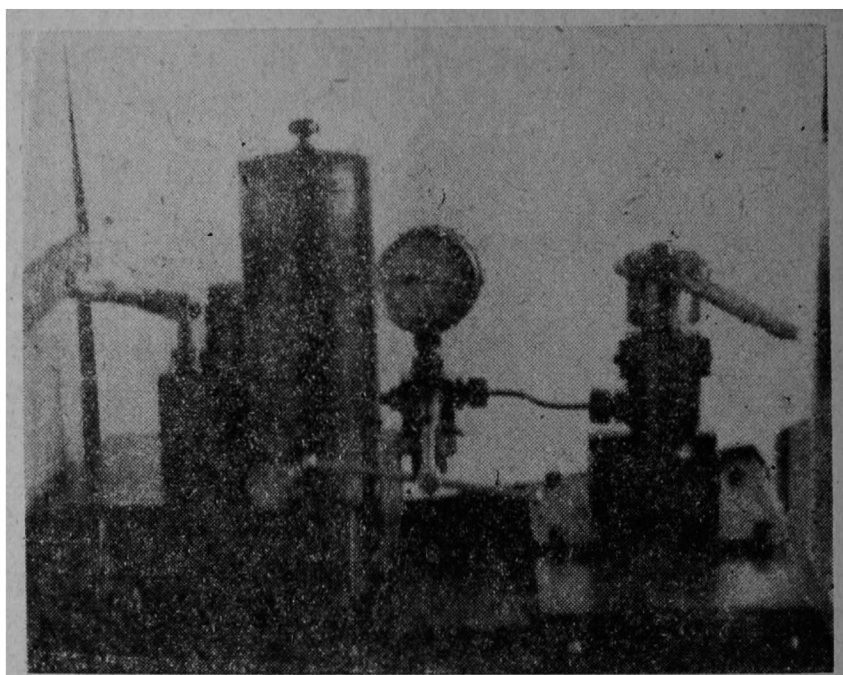
ポンベの内腔は直径 2cm 深さ 9cm の円筒形をなして居る。写真のポンベの両側の突出した部分は観察用小窓を設けようと試みた名残であり、長日月の努力にも係らず成功しなかつたので閉鎖したものである。ポンベ内に起る変化を直接光学的に観察する事は不可能となつたので筋の短縮を知る為に第 2 図に示す様にポンベの蓋に筋を吊す装置を取付け、短縮が起つたか否かは電流の断続として表はし蓋を通して外部に導いて、ポンベ内で起つた筋の短縮を知る様にした。第 2 図 (a) は筋を吊す装置である。a, b は筋を吊す鉤であり b は下部のネジに依つて適当に上下し筋

第 1 図



を一定の強さに張る事が出来る。c, d は共に金属の円板で直接相接して居り, a と c は一体であつてバネ e に依つて c は d に接着して居る。筋は b で下端が固定されて居るので, 短縮すると a を引下げ c は d から離れ, 弛緩するとバネに依つて又接着する。金属板 d から金属棒(2)が上部のエポナイト板を貫いて出て居る。又金属棒(1)は d とは接して居ないが, a, c が上下する場合の軸となつて居て c とは接して居る。従つ

て(1), (2)の上端を結べば(1) c d-(2)は回路をなすから, 第2図(b)のポンペの蓋に取付けて上部を銅線で結びその間に電池と抵抗計を入れると, 抵抗は0を示す。筋が短縮すると c, d が離れて回路が断たれて針は ∞ を示し, 弛緩すると又0に戻る。此の場合バネ e が強過ぎると筋は張力のみを増して c, d が離れないので, バネは僅かの張力の増加でも直ちに c, d が離れる様に充分に弱いものを用ひた。(3)・



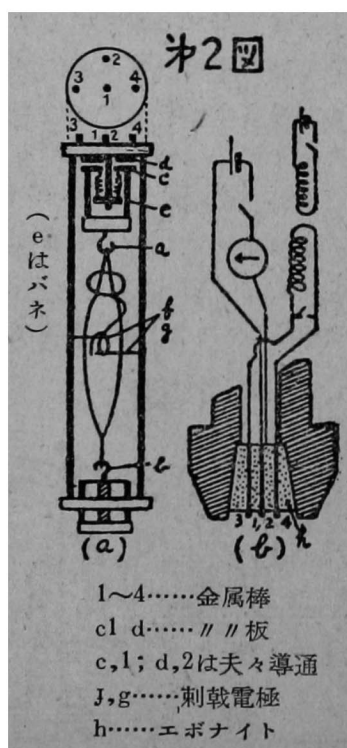
(4)の金属棒は支柱を為して居ると同時に中程に夫々銀線を取付け刺戟電極(f, g)とし, 蓋を通して外部に導き, 感応コイルの二次コイルに接続する。(b)はポンペの蓋で h はエポナイトである。之を貫いて互に絶縁された4本の金属棒が有り, 下部に(a)を取付けるとポンペ内圧は外に漏れる事なく, 電流が外と通じる事が出来る。

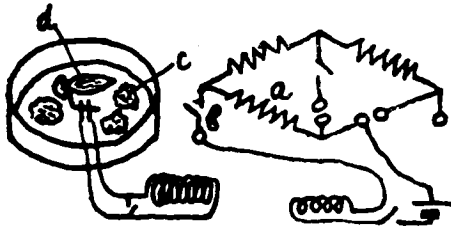
■ 実験材料及び方法

本実験は昭和24年5月から6月の間に間接刺戟に就て行ひ, 其後 Curare が手に入つたので26年7月に直接刺戟に就て行つた。標本にはトノサマ蛙 (*Rana nigromaculata*) の坐骨神経, 腓腹筋を用ひた。

先づ標本を装置に吊し, 全体が Ringer 氏液に没する丈 Ringer 氏液を入れた小試験管と共にポンペ内に入れた。圧はポンペ内のモビル油から Ringer 氏液を介して標本の全周囲に達する。電気刺戟には Du Bois-Reymond 型の感応コイル, 2 Volt の蓄電池を用ひて単一感応開放電流を加へた。刺戟閾値を求めるには30秒の関隔を置いて漸次強い刺戟を加へ, 抵抗計に反応が現はれる最も弱い刺戟に対する二次コイルの巻軸距離を以てした。

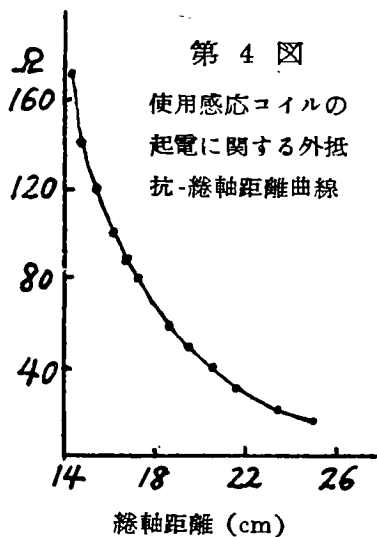
次に使用した感応コイルに就て巻軸距離





第 3 図

湿 室(左) ホイートストン
c...湿 綿 電橋(右)
d...腓腹筋 a...可変抵抗
 b...電 鍵



に対する刺激強度を調べた。其の方法は第 3 図に示した様に一次コイルの回路にホイートストン電橋を挿入し、b の電鍵を閉じ a の抵抗に対して筋が最小の短縮を起す総軸距離を求め、当該感応コイルの感応電流起電に関する外抵抗-総軸距離曲線(第 4 図)を画き、その曲線に由り任意総軸距離に対する抵抗を求めた。而して刺激感応電流の強度は一次回路の外抵抗の逆数ととり、更に興奮性は閾刺激強度の逆数として表した。

加圧実験には先づボンベ内で圧を加へる前に刺激閾値を測定しておき、次に圧を加へて閾値を求め、その時迄の経過時間を測つておき、圧を復して又同様な測定を行つた。

IV 実験成績

A 間接刺激に対する高圧の影響

坐骨神経腓腹筋標本は実験を行ふ 3 時間以上前に切出して Ringer 氏液に浸しておき、

装置に吊してから 30 分後に行つた。吊す際に筋自身には刺激電極が触れない様にし坐骨神経を巻付けて間接刺激を行つた。

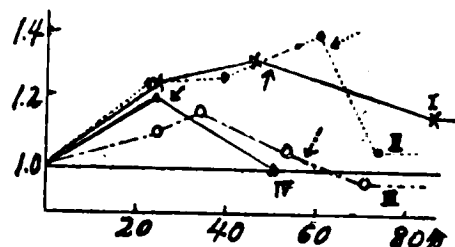
1. 50 気圧を加へた場合。

第 1 表に示す様に圧を加へて居る間は総ての場合、圧を加へる前及び圧を復した後の状態に比べて興奮性の亢進が認められた。今興奮性亢進の程度を知る為に表中の興奮性(1/R)の項に於て各例夫々加圧前の正常状態の興奮性の値を 1.0 とし、加圧中及び復圧後の値の割合を計算して之を第 5 図に表はした。図に於て縦軸は興奮性変動の割合を横軸には加圧後の経過時間を取り矢印は圧を去つ

第 1 表 50 気圧(間接刺激 21~23°C)

例	圧 力 (気圧)	経過時間 (分)	刺激閾値総距離 (cm)	刺激強度 (R)	興奮性 (1/R)
I	1		23.1	22	46
	50	23'	24.7	18	56
		46'	25.1	17	59
0.5g	1	22'	23.9	19	53
II	1		21.0	34	29
	50	22'	21.9	28	35
		39'	22.1	27	37
		60'	22.4	25	40
0.7g	1	11'	21.2	32	31
III	1		22.2	26	39
	50	24'	22.6	24	48
		33'	22.7	23	44
		52'	22.5	25	40
0.6g	1	19'	21.9	28	36
IV	1		24.4	18	56
	50	23'	24.9	15	67
	1	27'	24.4	18	56

第 5 図、第 1 表の図示



た事を示す。圧を加へてから始めて閾値を測定する迄及び圧を下げてから測定する迄の興奮性変化の経過は知る由もないので之等の間も直線で結んでおいたが、便宜上結んだに過ぎず経過を示したものではない（以下の図に於ても総て同じ）。今加圧後 20 余分過ぎた時に於ける興奮性亢進の度を 4 例に就て平均すると約 1.2 倍となつた。

2. 100 気圧の場合

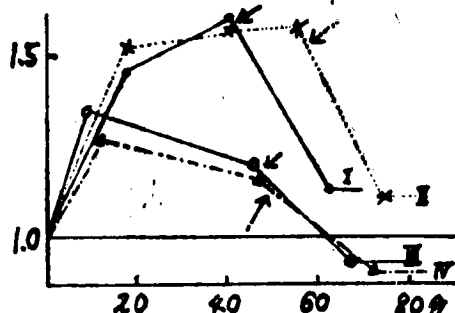
第 2 表に示す通り明らかに興奮性の亢進が認められる。50 気圧の場合と同様に第 6 図に

第 2 表 100 気圧（間接刺戟 21~22°C）

例	圧 力 (気圧)	経過時 間(分)	刺戟閾値総 距離 (cm)	刺戟強 度 (R)	興奮性 (1/R)
I ♂ 0.7g	1		15.6	119	8
	100	17'	17.3	82	12
		40'	17.7	74	14
II ♀ 0.5g	1	23'	16.2	104	10
	1		16.7	94	11
	100	18'	18.4	62	16
		40'	18.6	59	17
		54'	18.6	59	17
III ♂ 0.5g	1	20'	17.1	85	12
	1		15.5	122	8
	100	9'	16.8	92	11
		46'	16.3	102	9
IV ♀ 0.6g	1	22'	15.2	134	7
	1		17.2	84	12
	100	11'	18.2	65	15
		47'	17.8	72	14
		57'	18.2	65	15
	1	13'	16.8	92	11

興奮性の変動を表はした、加圧中に測定して図に示した 2 点を結ぶ直線は、興奮性の経過を示すものと考へて大差はないと思はれるので、例 III IV では図の上から 18~19 分の処に於ける興奮性の割合を、例 I II ではそのまゝを求めて 4 例の平均を出すと約 1.4 倍となり、圧を去ると概ね興奮性も旧に復した。

第 6 図 第 2 表の図示



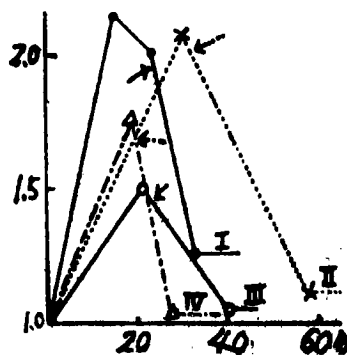
3. 200 気圧を加へた場合

第 3 表及び第 7 図に見られる様に 200 気圧加圧に依る興奮性亢進は著しいものがある。第 I 例では 30 分後に測定した値も 200 気圧と云う高い圧が長い間作用していたにかゝは

第 3 表 200 気圧（間接刺戟 21~22°C）

例	圧 力 (気圧)	経過時 間(分)	刺戟閾値総 距離 (cm)	刺戟強 度 (R)	興奮性 (1/R)
I ♂ 1.0g	1		19.9	44	23
	200	15'	24.0	18	56
		23'	23.1	22	46
II ♀ 1.0g	1	10'	20.8	36	28
	1		18.3	63	16
	200	30'	21.5	30	33
III ♀ 0.9g	1	17'	18.7	57	18
	1		16.3	102	10
	200	21'	18.0	68	15
IV ♀ 0.9g	1	19'	16.5	98	10
	1		17.5	77	13
	200	19'	19.9	44	23
V ♀ 0.9g	1	8'	17.7	74	14
	1		17.5	77	13

第 7 図 第 3 表の図示



らず依然高い興奮性を示した。20分前後に於ける測定値(例Ⅰは除く)からその平均を求めると200気圧の作用に依り興奮性は1.8倍に亢進したことになる。

小括：—50, 100, 200気圧下に於て坐骨神経腓腹筋標本に間接刺戟に依る電気刺戟閾値を調べ、それから標本の興奮性が平圧下のそれと比較して如何に変化しているかに就て調べた。その結果50気圧では20%, 100気圧では40%, 200気圧では80%増加と加へる圧が高くなればなる程標本の興奮性亢進の度も増加を示した。

B 直接刺戟に対する高圧の影響

標本を Curare 麻痺し高圧の下で筋に直接刺戟を与へて同様な実験を行つた。筋神経標本は作成して Ringer 氏液に30分浸した後 Curare 液に入れた、用ひた液は0.2% Tubocurarine Chloride (Squibb & Sons 製)を Ringer 氏液で3倍に薄め0.1%としたものである。60~90分後神経刺戟が完全に無効となつた事を確かめて装置に吊し刺戟電極を筋に接着せしめ30分後にボンベに入れて実験を行つた。共にボンベ内に入れた小試験管には0.01%の Curare-Ringer 液を用ひて標本が実験中に Curare から回復しない様にした。而して毎回実験終了後標本が Curare から回復していない事を確めた。

1 50気圧を加えた場合

第4表は50気圧を加へる前と加圧中と復圧後の筋の興奮性の変化を調べたものであるが4例共に明らかに刺戟閾値の低下が加圧中に見られた。加圧中に3回以上各例に就て測定を行つたが、之等の加圧中の興奮性の変化には何等一定の規則性は見られなかつた。第8図に之等の関係を示した。今9~12分間の間で4例に就て興奮性変化の程度の平均を求めると約1.4倍となつた。

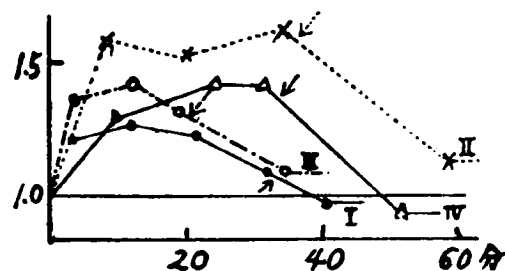
2 100気圧を加へた場合

圧を加へる前に比べて加圧中の興奮性は著明に総ての例に於て亢進して居り、圧を去ると又旧に復しているのが第5表に認められる。この関係は第9図に明瞭に表はれてい

第4表 50気圧(直接刺戟, 22~25°C)

例	圧力 (気圧)	経過時 間(分)	刺戟閾値 距離 (cm)	刺戟強 度 (R)	興奮性 (I/R)
I ♀ 1.0g	1		20.6	36	28
	50	3'	21.6	30	33
		11'	22.0	28	36
		22'	21.8	29	35
		32'	21.1	33	30
	1	10'	20.7	37	27
II ♀ 11g	1		19.3	50	20
	50	9'	21.3	32	31
		20'	21.1	33	30
		34'	21.5	31	32
		24'	19.8	44	23
III ♀ 0.9g	1		15.3	129	8
	50	5'	16.7	94	11
		12'	16.8	92	11
		19'	16.5	98	11
	1	15'	15.6	119	8
IV ♂ 0.8g	1		21.2	33	30
	50	10'	22.3	26	39
		25'	22.8	23	44
		33'	22.9	23	44
	1	20'	20.8	36	28

第8図 第4表の図示



る。8~12分間に於ける加圧による興奮性変動の割合を3例に就て(例Ⅲは除く)平均すれば約1.6となり、50気圧に比べ100気圧は一層興奮性を亢進せしめる事が判る。

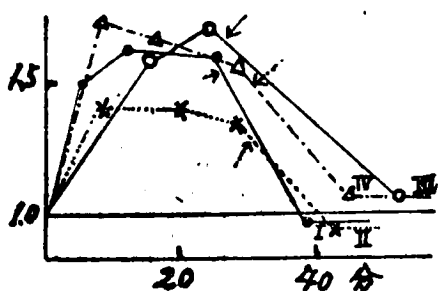
3 200気圧を加へた場合

200気圧に依つては少し変つた成績を得た。之は第6表及び第10図に示した。加圧後4~7分迄の間に於ける4例の興奮性変化の割合の平均を求めると2.0となり非常に亢進した事

第5表 100気圧 (直接刺戟, 22~25°C)

例	圧 力 (気圧)	経過時 間(分)	刺戟閾値 距離 (cm)	刺戟強 度 (R)	興奮性 (1/R)
I ♀ 0.9g	1		17.6	76	13
	100	5'	19.2	51	20
		11'	19.6	46	22
		25'	19.5	47	21
	1	13'	17.4	79	13
II ♀ 0.9g	1		22.8	24	42
	100	8'	24.4	17	59
		20'	24.3	17	59
		27'	23.9	18	56
	1	16'	22.4	26	39
III ♂ 0.8g	1		19.2	51	20
	100	15'	21.3	32	31
		25'	21.6	30	33
	1	28'	19.4	48	21
	1		18.6	59	17
IV ♀ 1.0g	1		18.6	59	17
	100	9'	20.9	35	29
		18'	20.8	36	28
		28'	20.5	38	26
	1	18'	18.8	56	18

第9図 第5表の図示



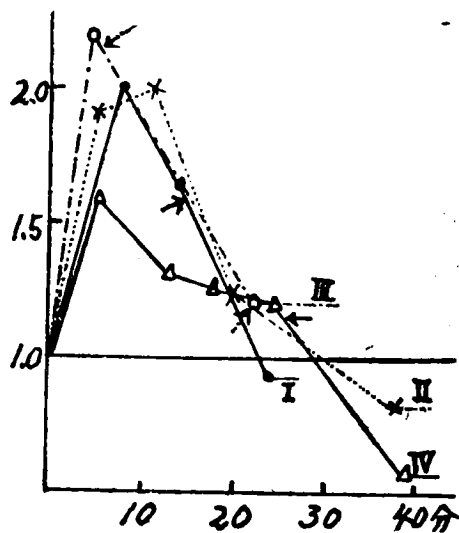
を示している。加圧後1分及び14分で圧を去った例Ⅲ及びⅠでは復圧後の興奮性は加圧前に比して低下はしていないが、加圧時間が20分、24分に及んだ例Ⅱ及びⅣでは加圧中にも興奮性亢進は初期に比して非常な低下を来し、圧を去った後にも加圧前に比して低下が現はれている。

小括：—50, 100, 200気圧を Curare で麻痺した筋に加へ直接刺戟を与へて閾値を調べ、筋の興奮性が加圧前に比して加圧中及び復圧

第6表 200気圧 (直接刺戟, 23~25°C)

例	圧 力 (気圧)	経過時 間(分)	刺戟閾値 距離 (cm)	刺戟強 度 (R)	興奮性 (1/R)
I ♂ 0.9g	1		19.4	48	21
	200	7'	22.6	24	42
		14'	21.8	29	35
	1	10'	19.1	52	19
	1		16.3	102	10
II ♀ 0.9g	1		16.3	102	10
	200	5'	19.0	53	19
		11'	19.2	51	20
		20'	17.7	83	12
	1	18'	15.4	124	8
III ♂ 0.7g	1		18.6	59	17
	200	4'	22.3	26	38
		22'	19.3	49	20
	1		20.6	37	27
	1		20.6	37	27
IV ♀ 1.1g	1		20.6	37	27
	200	5'	22.8	23	44
		13'	22.0	28	36
		18'	21.9	29	34
		24'	21.7	31	32
	1	15'	18.3	63	16

第10図 第6表の図示



後如何に変わるかを調べた処。50気圧では40%, 100気圧では60% (何れも加圧後約10分) 200気圧では100% (加圧後約5分) 増加と云ふ様に圧を加へると興奮性は何れも亢進し加へる圧が高い程興奮性亢進の度は大きくなっている。200気圧の場合長く圧を作用

させると (大体 20 分以上) 興奮性亢進は初期のそれに比べて非常に少くなり、圧を去ると加圧前に比べて低下を来した。

V 考 察

蛙の坐骨神経腓腹筋標本に間接刺激を与へて高圧の作用を調べた実験では刺激閾の低下が明らかに証明された。そこで興奮性変化の程度を何れに各閾値に於ける刺激強度の逆数を以て興奮性を表はした。此の様な表はし方に就ては異論がないわけではないが、此処では大体の傾向を知るのには充分であると考へられるので便宜上此の方法を用いた。此の様に興奮性変化の度を各気圧に於ける 3~4 例の平均を取つて比べると、200 気圧迄では加へる圧が高ければ高い程それに比例して興奮性も増加した。同じ様な実験を行つたものに Ebbecke⁹⁾ がある。それによると加圧の筋短縮に及ぼす興奮性亢進作用はあらゆる努力にかゝらず多くの場合に見失はれ唯稀に 100 気圧の場合に暗示的に不確実に認められたと云ふ。そこで彼は興奮性の変化が筋神経の何れに帰するかを知る為に坐骨神経腓腹筋標本に間接刺激を用ひて行つたが、興奮性増加は 2, 3 の場合に認められただけで実験は屢々無駄に終つたと述べ、常圧で *untermaximal* であつたものが 100 気圧で *übermaximal* となつたものもあるが之に反して、興奮性低下は 300, 200 多くの場合は 100 気圧でも得られたと記している。著者は 50, 100 は勿論 200 気圧に於ても明らかに興奮性の増加が証明され、200 気圧下に 30 分も保たれた標本ですら何等興奮性低下の徴候は見られなかつた。Ebbecke⁹⁾ 等は又筋神経に圧を加へ *maximaler* und *untermaximaler* Reiz を与へて動作電流を調べた結果間接刺激の際の興奮性低下は神経によるものではなく筋によつて起つたものであるとしているが、著者の間接刺激で確認された成績は神経の刺激閾値の低下即ち神経の興奮性亢進を示すものであろう。然し興奮性亢進が筋に起らないものかどうかは遽には断定出来ない。そこで行つたのが次の

Curare を用ひた直接刺激の実験である。興奮性変化の割合を比較した加圧後の経過時間が 50, 100 気圧では 10 分前後、200 気圧では 5 分前後に得られた価に就てではあるが、何れも直接刺激に対する刺激閾値が加圧で低下し、加圧に由つて筋の興奮性が亢進し而かも加へる圧が高ければ高い程興奮性増加の度も大となつてゐる事は何れも出来る。加圧直後の興奮性変化の経過は不明であるけれども圧を加へている間に総ての例に於て (200 気圧加圧の例を除く) 興奮性が漸次亢進するか低下するかに就ては一定の変化が認められない。之は恐らく余り変りがなく同じ状態が続くものではないかと考へる。そうであるとする加圧後異つた時間に調べた価を比較しても大差はないと考へられる。そこで 50, 100, 200 気圧に於ける興奮性増加の度を比較して見ると間接刺激では 20, 40, 80 % であり直接刺激では 40, 60, 100 % となつて居り後者の方が大であつた。即ち筋も神経以上に興奮性が亢進するのである。

大和、川岡の行つた酸素消費量測定の実験では 300 気圧迄の圧を作用させると組織の酸素消費量が増大すると云ふ。之は組織の代謝が高まる事に由るものであらう。従つて筋の興奮性が高まると云ふ上述の実験成績と關聯があり同じ様な結果を示すものと思はれる。

VI 結 論

1. 蛙の筋神経標本全体に平等に 200 気圧迄の圧を加へ単一感應開放電流を用ひて間接刺激し標本の興奮性の変化を調べた結果、加へる圧が高ければ高い程興奮性が亢進し圧を去ると興奮性も亦速かに旧に復する。

2. Curare を作用せしめた筋に就ても直接刺激による同様な実験を行つた。その成績も亦 200 気圧迄の圧を加へると筋の興奮性は増加しその度は加へる圧が高い程大であり、圧を去ると速かに旧に復した。しかし興奮性亢進の度は一般に間接刺激を用ひた場合より大である。

3. 従つて圧は筋並に神経の電気刺激に対

する興奮性を高めるが速かな可逆性を有する事及び此の程度の圧では神経に比して筋の興奮性を高める作用の方が大である事に就て述

べた。

撰筆するに当り終始御懇篤な御指導と御校閲を賜った恩師林教授に衷心から謝意を表する。

文 献

- 1) Cattell, McK. and D. J. Edwards, Am. J. Physiol., 86, 371, 1928.
- 2) Ibid., J. Cell. Compar. Physiol., 1, 11, 1932.
- 3) Deuticke, H. J. und U. Ebbecke, Zeitschr. f. Physiol. Chem., 247, 79, 1937.
- 4) Ebbecke, U., Pflügers Arch., 157, 79, 1914.
- 5) Ebbecke, U. und O. Hasenbring, Ibid., 236, 405, 1935.
- 6) Ebbecke, U., Ibid., 236, 658, 1935.
- 7) Ibid., 236, 662, 1935.
- 8) Ibid., 236, 669, 1935.
- 9) Ebbecke, U. und H. Schaefer, Ibid., 236, 678, 1935.
- 10) Gald, D. and E. S. Brown, J. Cell. Compar. Physiol., 4, 257, 1934.
- 11) 川岡曉美：本誌。
- 12) Regnard, P., La vie dans les eaux, Masson, Paris, 1891. (Traite d. Physiol. norm. et Pathol., 1, 861, 1923. より)
- 13) 大和人士：本誌。

高 圧 の 骨 格 筋 に 及 ぼ す 影 響

第 2 編

骨 格 筋 に 対 す る 圧 作 用 と 加 圧 条 件 に 就 て

岡山大学医学部生理学教室 (主任 林 香苗教授)

助 手 丹 原 英 昌

[昭和 27 年 3 月 15 日受稿]

I 緒 言

筋に短縮を起す程度の平流電氣を通じると通電の初と終り即ち閉鎖時及び開放時のみ筋は短縮するが、電流が流れて居る間は弛緩している。又電流を通ずる際に漸次電流強度を強めそして漸次弱めてゆくと、閉鎖並びに開放時に現はれるべき短縮は全く起らない即ち“忍び込み”現象が見られる事は周知の事である。Ebbecke¹⁾²⁾は圧刺激の場合と比べて、筋肉を周囲全体から平等に圧迫すると 200 乃至 400 気圧で普通短縮するが、此の程度の圧を筋に作用せしめると、筋は短縮し圧を此の状態に保つと筋も短縮した状態を持続

し圧を去ると始めて弛緩する。又圧を徐々に加へても“忍び込み”現象は見られないと述べている。事実急に圧を高めても徐々に圧を上昇させても一定の圧に達するならば筋は短縮する。徐々に圧を上げてゆき筋の短縮が起つた時の圧を以て圧閾値とすると、比較的室温の高い時と低い場合とでその値が異なり低温時は高温時に比し圧閾値が可成り高い。又圧閾値より少し低い圧に筋を保つと電氣刺激に比べて甚だしく長い時間の後に筋は短縮する。之等は筋肉の対圧被刺激性を正確に研究するに当り基礎的重要性が有ると考へられるので次の実験を企てた。

本実験は 1 月から 3 月迄の室温が 10°C を