

昭和 25 年(1950) 11 月

筋肉の交流刺激閾値に関する研究*

1 (250)

筋肉の交流刺激閾値に関する研究¹⁾

井上清恒(昭和醫大生理)(1949年12月15日受領)

緒言 従来の電気刺激の実験には多くは直流、蓄電器の放電、充電電流などが使用され、その刺激閾値に關しては幾多の精密な実験結果が累積し、又これらの結果を基礎とするいくつかの刺激理論も展開されている。しかし交流による刺激実験はその報告も少く、これに關する理論もまだ完全であるとは言い難い状態である。これは任意の周波数の定常な交流を実験室内で自由に発生させる技術上の困難と、その実験結果の複雑さに起因するものである。著者等は一昨年來交流による刺激実験を行い、従来の諸理論の検討を行つてゐる。ここにはその結果のうち、交流の刺激閾値に關する部分だけを發表する。

実験方法 材料には冬眠中のヒキガエル *Bufo vulgaris* の縫工筋を用いた。體外に切出して1時間くらい正常リンゲル液にひたして、定常状態に達してから実験を開始した。筋肉は刺激の結果収縮するので、刺激電極の位置が移動する恐れが非常に多いから、これをさけるために中央に隔壁を設けた液體電極を使用した。電極箱はパラフィンを浸みこませた木製のもので、長さ10cm 幅5cm 深さ3cm、この中央にセルロイド製の隔壁を設け、そのさしこみ蓋によつて縫工筋の中央部を固定した。隔壁によつて2分せられた電極箱の兩室にはリンゲル液を充たして筋肉をひたした。

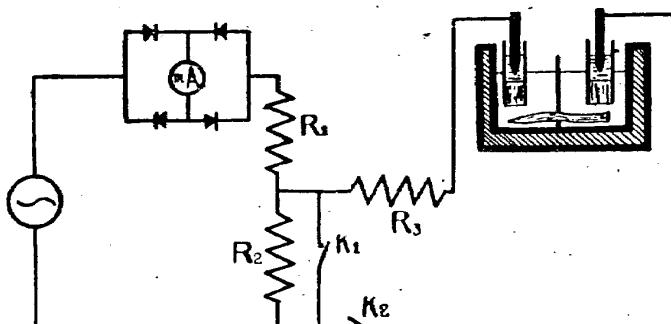
刺激電極には Zn-ZnSO₄-ゼラチン-リンゲル系のものを用い、これを電極箱の兩室に夫々1個宛裝置した。この電極を通じて電流は電極箱の1室のリンゲル液に流れ、更に隔壁の部分で急に電流密度が大きくなつて筋線維中に入り隔壁下だけでは筋肉内を流れ、電極箱の反対側の室に入ると共に再び筋線維を出でて、周囲のリンゲル液を通じて第2の刺激電極に入ることになる。このような装置に於ては刺激作用は隔壁の部分に生ずる生理學的な陰極で發生することになるのである。

刺激閾値を決定するには筋肉の最小収縮を目標とした。

交流發生装置には横河製測音1號CR型發振器を用いた。本器は蓄電器Cと抵抗Rの同調回路を反結合の媒體とする發振器で、發生周波数は同調回路の容量C或は抵抗Rに逆比例するように設計せられ、20cycle/sec から 11,000 cycle/sec まで直讀式ダイヤルの調節によつて自由に變えることが出來た。

發振周波数は 1000 cycle の音叉發振器を標準としてオシログラフの寫真によつて補正したが、大體に於て正確にダイヤルの目盛と一致し、しかも安定であつた。なお波形はブラウン管によつて檢したが、各周波

數とも可なり正確な正弦波で倍音をふくんでいた。本器には真空管としてはCZ501が2個、CZ504が2個使用され、出力回路には變成器が附屬し、その出力側に亞酸化銅整流型の出力電壓計が附いている。この電壓計は勿論實効電壓を示すもので、ブラウン管の尖頭電壓によつて檢した結果周波数によつて指示電壓の變化が多少起ることが明になつたので實驗にあたつては補正した値を使用した。



第 1 圖

刺激回路は第1圖に示されている。發振器の出力端に R_1, R_2 なる抵抗を連結して、これを電圧分割器とした。即ち $R_1 + R_2$ の値は常に一定になるようにし (5000Ω か或は 2000Ω)、 R_1, R_2 の比率によつて筋肉に加えられる刺激電壓を加減するのである。又筋肉に至る回路中には R_3 なる抵抗を入れ、筋肉、電極、及び R_3 を加えた抵抗が $20,000 \Omega \sim 50,000 \Omega$ に調節した。刺激電極をふくめた筋肉の抵抗は實驗の始めに刺激実験の場合とおなじ條件にして弱い交流を通じて亞酸化銅整流形のミクロアンメーターを用いてその値を読み、次に刺激電極、筋肉の代りに普通の抵抗器を挿入して、前と同じ振れを生ずるように抵抗を調節し、

1) 文部省科學研究費による。

この抵抗値をもつて電極、筋肉系の抵抗とした。この値は大體 5000~6000 Ω であった。

抵抗 R_2 には短絡電鍵 K_1 を附屬させ、又筋刺激回路には電鍵 K_2 を入れた。まず K_1 を開くことによつて筋肉に刺激電流を通じ、 K_2 を開くまでの時間を 1 秒とした。

刺激にあたつては発振器の出力の實効電壓は常に 20 volt に一定し、 R_1 、 R_2 の調節によつて刺激電流を變化し、最小收縮を起す最も弱い電流、最小收縮を起し得ない最大の電流を求め、その中間の値をもつて刺激閾値とした。この際刺激電壓即ち R_2 の兩端に加わる電壓を V とすれば

$$V = \frac{E}{\frac{R_2(R_1 + R'_3)}{R_1 R'_3} + 1}$$

但し E は発振器出力の實効電壓即ち 20 volt で、 R'_3 は抵抗 R_3 及び刺激電極一筋肉系の抵抗である。したがつて筋肉を流れる刺激電流 i は次式で示されるも即ち $i = \frac{V}{R'_3}$

實驗結果 以上のような方法によつて 30 cycle/sec から 11,000 cycle/sec に至る周波數の範圍で各周波數の交流に對する刺激閾値を測定した。次にその結果を示す。閾値は實効電流のミクロアンペアによつて示されている。

第 1 表 (溫度 16°C)

cycle/sec	40	60	80	100	150	200	400	600	800	1,000	2,000	4,000	6,000	8,000	10,000
閾値 μA	18	16	15	14.8	14.7	14.8	17.4	20.0	22.2	25	40.1	80.3	134.2	202	213

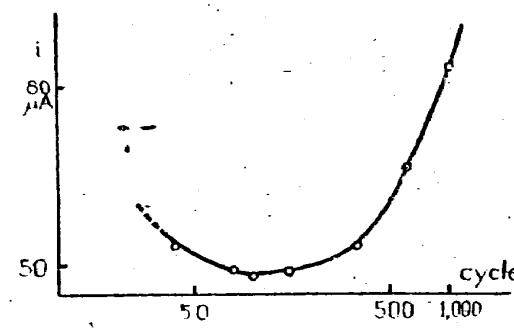
第 2 表 (溫度 14°C)

cycle/sec	40	80	100	160	320	640	1,000	1,280	2,560	5,120	8,000	10,240
閾値 μA	5.3	5.0	4.8	5.0	5.3	6.7	8.3	100	147	245	372	482

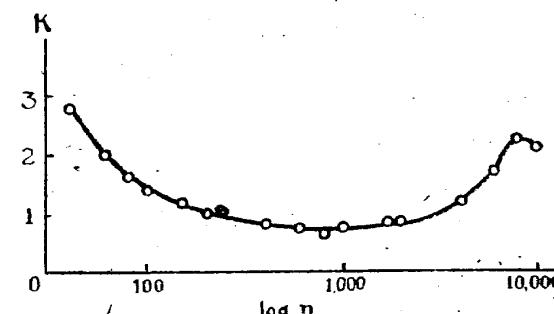
以上の例から明かなように、周波數が増加するにつれて閾値が上昇する。これは神經の交流刺激について從來知られている現象で、交流刺激に於ては陰性半波が刺激作用を呈するものとすれば、周波數の增大に伴なつてその持続時間、換言すれば利用時間が短くなることを考慮すれば當然のことである。

又周波數を少くすれば閾値は次第に低下するが、ある周波數に至つて極小値を呈し、これより周波數が減少すると再び閾値が上昇する。上に掲げた例では 150 cycle/sec 及び 100 cycle/sec にあたつて極小閾値が現われている。極小閾値を示す周波數を Hill は optimum frequency と呼んでいる。optimum frequency 以下の周波數で閾値が上昇するのは電流の經過が緩やかになるために accommodation が發生するためであることは神經の交流刺激について多くの人々に認められている所である。骨骼筋に於ては神經の交流刺激の場合に起る現象が大體平行的に現れることが以上の實驗結果から明にされた。optimum frequency は溫度に影響せられることも從來の神經刺激の實驗結果から確認せられ、溫度の下降は optimum frequency が周波數の少い方に移動するといふのであるが、著者等の實驗に於ても大體この傾向が見られた。

なほ著者等の用いた發振器は 20 cycle 以下の周波



第 2 圖



第 3 圖

昭和 25 年(1950) 11 月

筋肉の交流刺激閾値に関する研究

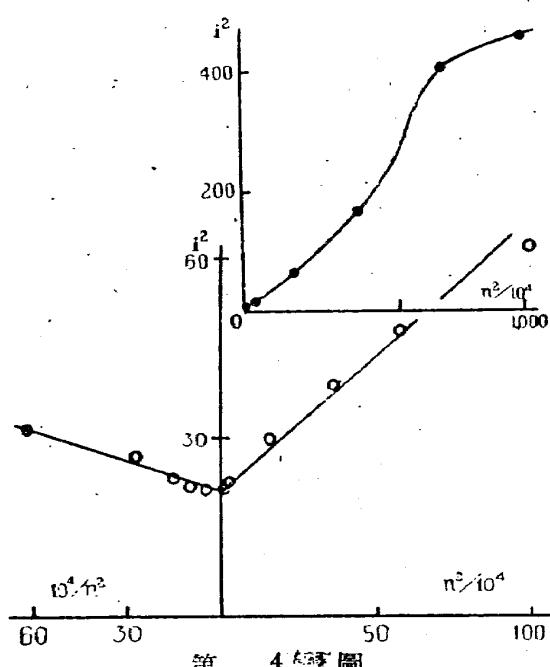
3 (252)

數の交流を発生せしめることが出来ないので、30 cycle 以下に optimum frequency が移行した場合は測定が不能で、極小閾値が得られない例も多數あつた。

Nernst の理論の検討 Nernst は被刺激形態に電流を通じるとき、形質膜の陰極に集積するイオンが一定濃度に達したとき興奮が起るという想定のもとに刺激理論を建設し、交流刺激にあたつては次の式が成立することを述べている。即ち $i = K\sqrt{n}$ ここに i は閾値電流强度、 n は周波数、 K は常数である。上式を変形すれば $i/\sqrt{n} = K$ となる。 K は以上の理論から周波数 n にかかわらず一定となるべきことが要請せられる。それで著者等の実験結果につき K の數値を計算した。その結果 K は常数とならず、 n の函数であることが明かとなつた(第 2 図)。したがつて Nernst の理論は交流刺激にあたつては、その周波数の廣い範囲にわたっては適用不可能なことが知られた。

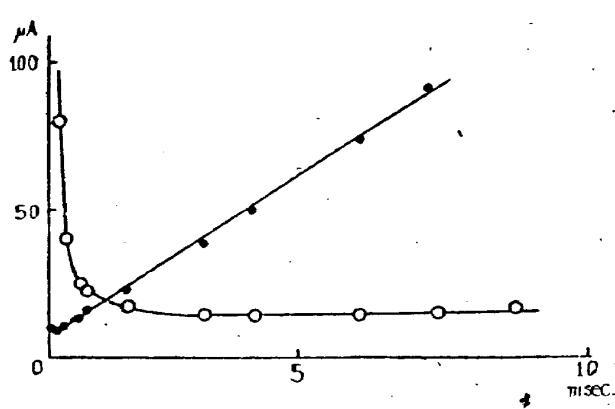
Hill の理論の検討 1936 年に Hill は Nernst とは全く別の假定から電流刺激の理論を提出した。彼は電流を被刺激形態に通じるときは local excitation (V) と稱する變化が発生し、同時に閾値(U)も変化するものとした。そして V が高まつて U を越すときに興奮が起るとしたのであつた。彼の理論を交流刺激の場合に適用すれば、閾値電流強度を縦軸に、又周波の數對數を横軸にとると曲線が optimum frequency を中心として左右に相稱的な形になる。著者等の実験例につきこれを検して見たが第 3 圖に示すように optimum frequency の現われるような例では大體 Hill の理論による要請が満足されるようである。

更に Hill の理論によれば optimum frequency より周波数の低い側では $\frac{i^2}{i_0^2} = 1 + \frac{1}{n^2} \cdot \frac{1}{4\pi^2\lambda^2}$ 又



第 3 圖

高い側では $\frac{i^2}{i_0^2} = 1 + 4\pi^2 K^2 n^2$ となることが要請せられる。ここに π は圓周率、 λ 及び K は常数、 n は周波数、 i は閾値電流强度、 i_0 は rheobase である。 i_0 、 K 、 λ が常数であるから i^2 は夫々 $1/n^2$ 及び n^2 の一次函数となるべきである。それで optimum frequency より周波数の小さい部分では i^2 を縦軸に $1/n^2$ を横軸にとれば直線が得られ、又 optimum frequency より周波数の大きな側では同じく i^2 を縦軸に横軸には n^2 をとればやはり直線が得られる筈である。實際 Hill 及びその門下は神經についてこの關係が成立することを實驗的に證明したのであつた。著者等もこれにならい筋肉について得られた実験例からこれを検したが、第 4 圖に示すように 1,000 cycle/sec に相當する附近までは大體に於て理論的要請を満足するが、これ以上の周波数の域に於ては直線とならず曲線となるので、高周波域に於ては Hill の理論から逸脱することが明となつた。同様な傾向は Hill 等の神經についての実験結果の場合にも現われている。これは高周波域に於ては被刺激形態内部を通じる電流の流線や抵抗等が變り、又地球の容量効果などが實驗成績を亂すことが考えられるが、何れにせよ高周波域に於ては Hill の理論はそのままでは妥當しない。



第 4 圖

Weiss の式の検討 次に著者等は從來直流刺激について廣い妥當性を有する Weiss の實驗式によつて著者等の実験結果を整理してみることにした。

Weiss の式は $i = a + b t$ なる形で示され、 i は閾値電流强度、 t は利用時、 a b は夫々常数である。なお蓄電器の放電電流による刺激に關しては Hoorweg の實驗式、充電電流刺激に關しては Fabre の實驗式が行われ、これらの式は共に $V = a + b / CR$ (但し C は蓄電器の容量、 R は回路の抵抗) によつて現わされ、Weiss の式と同一形式である。交流刺激にあたつて刺激作用を起すのは全波ではなく陰性半波であることが想像されるので、その利用時は $1/2n \text{ sec}$ となる。それで横軸に $1/2n$ をとり、縦軸に閾値電流强度をとると第5圖に示すように optimum frequency 以上の周波數の域では大體双曲線を呈する。即ち $i = a + \frac{b}{1/2n}$ なる式が成立つのである。なおこれを検するには $i \cdot 1/2n = a + 1/2n + b$ なる式になおし、縦軸に $i \cdot 1/2n$ をとり 横軸に $1/2n$ をとるとときは大體直線となる。但し $1/2n$ の小さい範囲即ち非常に周波數の大なる部分では直線からの逸脱が起るが、これは直流刺激の場合でも t の値が小さくなる場合には一般に見られる現象である。したがつて交流刺激にあたつては大體直流刺激の場合とおなじように Weiss の式と同一形式の實驗式が成立する。

総括 1) 30~10,000 cycle/sec の交流により、*Bufo vulgaris* の縫工筋を刺激し閾値を定めた。2) 多くの實驗例に於ては Hill のいわゆる optimum frequency が現われた。3) optimum frequency より周波數が大となつても小となつても閾値は上昇する。4) Nernst の理論式を得られた實驗結果から検討したが i/\sqrt{n} の値は周波數によって變り常数とならないから、この理論の交流刺激に對する妥當性は小さい。5) 1936 年の Hill の電流刺激に關する理論を検討した結果、筋肉の刺激にあたつては 1000 cycle/sec 以下の低周波域に於ては大體この理論は妥當であるが、周波數がこれより大きくなるとこの理論からの逸脱が大きくなる。6) 刺激の閾値電流强度 i と周波數の 2 倍の逆數、即ち $1/2n$ とは双曲線關係を示す。したがつて直流刺激の場合の Weiss の式と同一形式の $i = a + \frac{b}{1/2n}$ なる實驗式が成立する。

本實驗にあたつては教室同人石崎芳夫、武重千冬兩君の助力を受けたことを附記し謝意を表する。

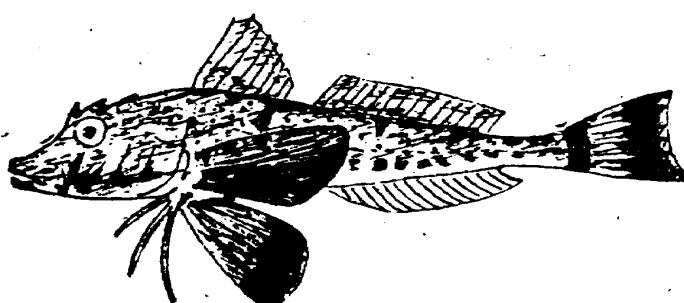
文献 Nernst, W. '08 Pflüger's Arch., 122. Hill, A. V. '36 Proc. Roy. Soc. Lond., Ser. B, 119.

ホウボウの稚魚に就て

黒田長禮 (1950年3月13日受領)

此魚は吾々の最もよく知る種類で、其分布も廣く、本州・四國から南は支那海・馬來群島・濠洲・タスマニア・ニュージーランド並に南アフリカにも及んでゐる。學名 *Chelidonichthys kumu* (Lesson et Garnot) と稱し、英名でも Kumu Garnard とか Red Garnard とか呼ばれる。斯様に赤色の名があるが、成魚でも活魚は赤味が少なく、死後に増していくことが多い。稚魚では全く赤味がないと云つてもよい程である。此種は沼津市桃郷の沿岸に近い處に棲んでいて、成魚は稍々深所に移るものである。以下に稚魚16點の調査の結果を報告する。

稚魚新鮮色——1946年3月6日桃郷の小曳網にて捕獲の全長53.5mmのもの。體形・斑紋等は大體親魚と同様であるが體色は鱗死後のものと雖も全く赤味がなく、頭及び背面は黒灰色で體側中部以上の背方は淡灰色の地色中に多數の大小不規則の暗色斑(圓點・長條斑等)が一面にあり、その内で體の後方のもの4~5箇は多少他より濃色の横斑状となる。尾鰭は黒色で基底近き部に1淡横斑(殆んど白)がある。背鰭棘部には淡色膜中に淡褐色の1大斑がある(親のように2箇はないか、又は2縦帶の例はある)。第2背鰭は淡色膜中に親同様2縦列帶があるが、赤色ではなく灰色である。胸鰭の長さの割合は大體親と同様に長く、外面黑色で軟條部上半は桃色と擬白色との交互斑をなし、軟條部中央に擬白斑がある。胸鰭内面は黑色に約4横帶を形成する淡褐色12點を算え、この點の數は相當の變化があることは後に表記する通りである。胸鰭の遊離軟條は下方のものは白色に桃色の中央1小點があり、他2本は擬黑色で、基部と先端とは白い。腹鰭は白色で先端黑色。臀鰭は白色。上顎側に灰黑色斑



第1圖 沼津市桃郷ホウボウ稚魚 實大(73mm)
(28. V. 1948)

◆