

動物生理学実験 C

筋電図・神経興奮の記録と解析

この実習では、精密な信号増幅器を使って、生体の発生する電氣的信号を計測する実験と、その信号の解析方法について演習します。

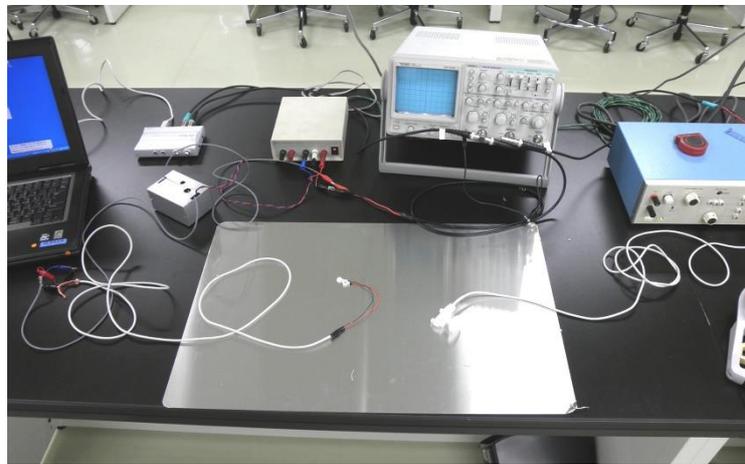
生体の感覚受容、筋収縮、神経細胞などの活動、およびその制御は、すべて細胞膜の電氣的な活動を介して行われます。単細胞の生き物から、私たちのような複雑な構造の生き物まで、その電氣的な興奮は極めて類似した分子機構、チャネルタンパク質による膜電位の変化（感覚受容による電位変化や興奮の時に生じる活動電位）によって発生します。具体的な観察記録の解析を通して、そのしくみを理解することが、この実験の目的です。

実験材料の違いはあっても、生体の電気現象の記録方法は似かよった手法が使われます。このような生体の発生する電気信号は、数ミリボルト（mV、1/1000 V の電圧の単位）の微弱な電気信号であることが多く、正確に計測・記録するには、雑音となる外部のノイズをどのように取り除くかが重要です。また、興奮、その結果、発生する電流については、解説をテキスト後半にまとめてありますので、実習の前には熟読し、内容を十分理解しておくのが大切です。

この実験で得られるデータは、被験者の筋やカエルの神経が発生する電氣的な信号です。電氣的な刺激の強度を変えたりすると、その反応は大きく変わってきます。その変化をコンピュータに記録してデータとします。得られたデータは、単に測定された数千個の数値が時間の順番に並んだだけのもので、エクセルなどの他のプログラムで読み取りグラフ表示します。数値化されたデータを使って、筋や神経の発生する信号はどのようなものか解析してレポートにまとめます（後述の「レポートを完成させる上での注意事項（C-13）」を参照）。こういった実験データの操作の中で、場合によっては、ノイズを減らす目的や実験によるばらつきを見るために、平均値と標準偏差を求める作業、有効数字の取り扱いも必須です（テキスト末の「実習に役立つ統計学入門①」を参照）。

この実験をスムーズに実施する上で、3つの大きなポイントがあります。1つ目は、さまざま測定装置・電子機器・ソフトウェアに慣れて、それらを使いこなせるようになることです。装置のしくみをある程度理解することで、作業の効率は格段に向上します。2つ目は、私たち自身やカエルの神経を使って実験しますが、測定の条件は時間とともに微妙に変化します。実験材料の状況が大きく変わることもあり、一般に生物試料を使う場合、この点で十分な配慮が必要です。再現性を見るには、同じ条件で複数回の記録を取ること、場合によっては、被験者や実験材料を変えても同じような結論に達するかどうか（通常は実験や研究上では必須）を確認することも重要です。どのようにしたら、正確で再現性の良いデータが取れるかを配慮しながら実験します。実験条件、たとえば、刺激の強さなどを変える順番（徐々に大きくする、小さくする、ランダムな順序かなど）や、頻度、間隔などにも配慮します。3つ目は、データの解析です。主にエクセルを使ってデータの処理を行います。観察波形の変化について（下記参照）、実験条件でどのように変化するか調べます。それらの変化はどのようなものか、実験の途中であっても、およその傾向としては理解できるかと思えます。解析とは、記録された正確なデータに基づいて、できるだけ数字の上で具体的に結果を表現する工夫を指します。

データの解析やレポートをまとめる上で、次のような点に留意します。この実験では、刺激の強さ、刺激頻度、温度など、実験の条件を変えた時、どのように観察結果が変わるかを調べる実験が中心です。このような実験では、まず、(1) いくつかの実験条件で、予備的な観察を実施して、どのような変化が観察されるか、概要を把握しておきます。(2) 次に、変化する理由が何かを考えます。これまで学んだ知識の中から、観察結果をうまく説明できるような仮説を考えます。(3) その変化に着目しつつ、できるだけ広い範囲で、実験条件を変化させて、再度、正確な記録をとります。(4) 実験後、結果を詳細に解析し、観察されるパラメータ（振幅、波の幅、形や数の変化、時間の経過、遅延時間など）の中から、先に立てた仮説を検定するのに必要なものを選び出し、実験条件によってどのように変化するか、グラフや表で示すことで表現します。(5) 解析の結果から、仮説がどの程度正しかったかを評価し、さらに、それを確かなものにするために、あるいは、何らかの修正を加えるならば、そのための次の実験プランを提案します。具体的なレポートとしての記述に関しては、後述の「レポートを完成させる上での注意事項 (C-13)」を参照します。



装置の全容

<装置の概要>

電気的な信号を記録する時の装置の概要は以下の通りです。信号の流れの順番にリストしてあります。

- a. 実験試料（ヒトの掌や取り出したカエルの神経）。雑音（ノイズ）を防ぐために、アース線につないだアルミ板を試料の下に置きます。
- b. 電気信号を検出する電極（皮膚に貼り付けて使用する電極やカエル神経を入れた箱に付いた電極）。
- c. 電極から増幅器へつなぐ信号線
(灰色の信号線で、中に3種類のリード線、赤 ($V_1 / +$)、黒 (アース線)、青 ($V_2 / -$) が入っています)。
- d. 増幅器 (+/-) の信号線の間電位を約 100 倍増幅します)。この時の電圧は、電極の間で流れる電流の大きさ相当し、(+) \Rightarrow (-) と電流が流れているときに、正の値になります。測定する電圧は、膜電位などの絶対値ではなく、神経細胞や筋の外側を流れる電流の大きさを反映した相対値であることに注意します。
- e. 増幅器の信号をコンピュータへ取り込む装置（サウンドプロセッサを使用）。

- f. サウンドプロセッサとコンピュータの間の接続（通常の USB ケーブル）。
- g. データを記録・表示するコンピュータ
- h. 解析用のソフト（Visual Analyzer とエクセル）。

記録したデータはエクセルなどの表計算・グラフ化のためのソフトで処理します。

この他に、実験の種類によっては、以下の装置も使用します。

- i. 電気刺激装置（神経に電気刺激を与えるときに使用、補遺参照）。
- j. 握力計（EMG 測定時に被験者の出している力を測定）。

<増幅器の特性>

ここで用いる増幅器は、差動増幅器と呼ばれる装置です。手製ですが高性能の増幅素子を内蔵し、低ノイズの増幅が可能な装置です。電源は、直流（+18V と -18V、または、+12V と -12V）の正負 2 電源を用います。同時に、0 V となる GND（接地）にも接続されていなければなりません。電源から電圧が正しく出ていること、増幅器が電源に正しく接続されていることを確認します（デモで紹介するグループの結線方法を参照します）。



用いる増幅器（左：表のスイッチパネル、中：入力、出力、電源リード線、右：内部の構造）

増幅器へは、指定された電極（上記リストの c）を使って、2本の信号（ V_1 （赤）と V_2 （青））へ入力しますが、その間の電圧の差（ $V_1 - V_2$ ）を約 100 倍に増幅して出力できるようになっています。出力の信号は、GND（接地）に対しての値として得られます。被験者に、 V_1 と V_2 に相当する入力値を得るための 2 つの電極を動かない様に注意して、固定用テープを使いしっかりと固定します。電極の位置が不安定でたびたび動くと、測定される電位に再現性が無くなり、精度の悪い実験となるので要注意です。電気現象は皮膚下の組織（主に筋）で起こりますが、皮膚の電氣的な抵抗を減らすために、導電性のグリースも使います。この 2 つの電極（ V_1 と V_2 ）と同時に、必ず GND の線もアルミ板を介して被験者につながっているようにします。これは雑音を軽減する意味があります。これらの配線の詳細は、実際のデモンストレーションで示します。

<増幅器からコンピュータへ>

増幅器の出力は、 V_o と GND の間の電圧差として得られます。この信号をサウンドプロセッサの R (赤、右) の信号として ONKYO 社製の装置 (補遺参照) に入力します (赤色のピンジャック)。L (白、左) には、電気刺激装置の TRIG 出力 (後述) からの結線をつなぎます。これは電氣的な記録を開始するタイミングを合わせる Trigger 信号として用います。



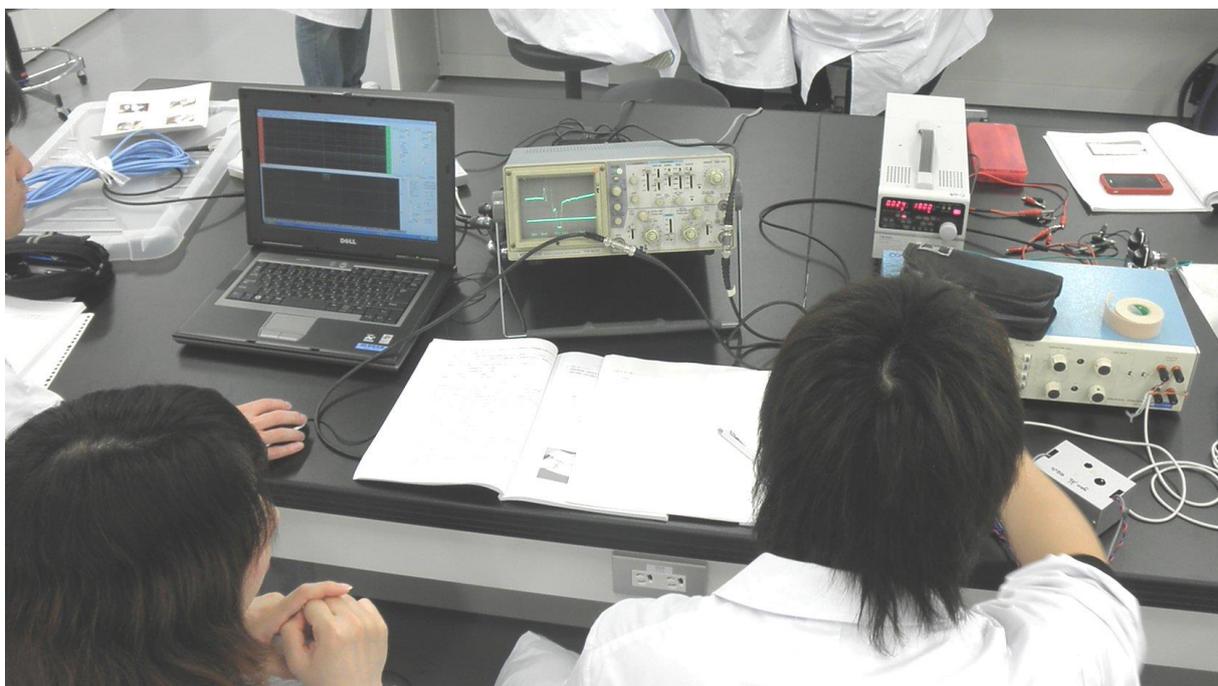
<用いる記録用ソフトの概要>

Visual Analyzer (付属資料: 計測ソフト Visual Analyzer の使用方法 参照) はコンピュータの音声信号 (ステレオの右(R) と左(L) の信号) を表示したり、周波数を調べたりするためのソフトウェアです。別紙の使用方法を参照します。実際の実験記録に取りかかる前に、信号の記録や再生の練習をおこない、このソフトウェアの機能・記録方式・使用上の制約・Trigger 機能などを十分に理解し慣れておくことが大切です。データの記録は、音声信号として一旦、*.tee や*.wav として保存することもできます。この実習では、tee 形式、および、エクセルで処理するためにテキストファイルの両方の形式で保存します (C-22 参照)。

エクセルは、一般に、65,000 行×256 列のデータが使いやすいデータ数です。これに対して、上のサウンドプロセッサは 96kHz の非常に速い速度でデータを変換して、コンピュータに送り込むことができます。また、Visual Analyzer は、11~96kHz の速度でデータを取り込み処理できるソフトです。筋電図などの電氣的な信号は、0~100 ミリ秒の現象、周波数では 0~2,000Hz の周波数の信号が理想的な解析領域です。このような観察対象、計算処理上の制限を考慮して、データの取り込みの速度 (Sampling 速度 Sampling frequency などと呼びます) や、記録するサイズ (何行分のデータとするか) を選びます。例えば、100 ミリ秒 (0.1 秒) の短い時間の間に終わってしまう現象を 96kHz で 10 分間も記録したとします。その場合、せっかく記録した 96,000(Hz) ×600 (秒) 個の膨大な数のデータの中で、599.9/600 (99.98%) は意味のないデータとして捨てることになり、データ処理の無駄な時間を費やします。この実験では、11~49 kHz のデータ取り込み速度で 1 秒間 (データ数で合計 11,000~49,000 行のデータ) を標準として記録するのがベストです。

<エクセルによるデータの計算>

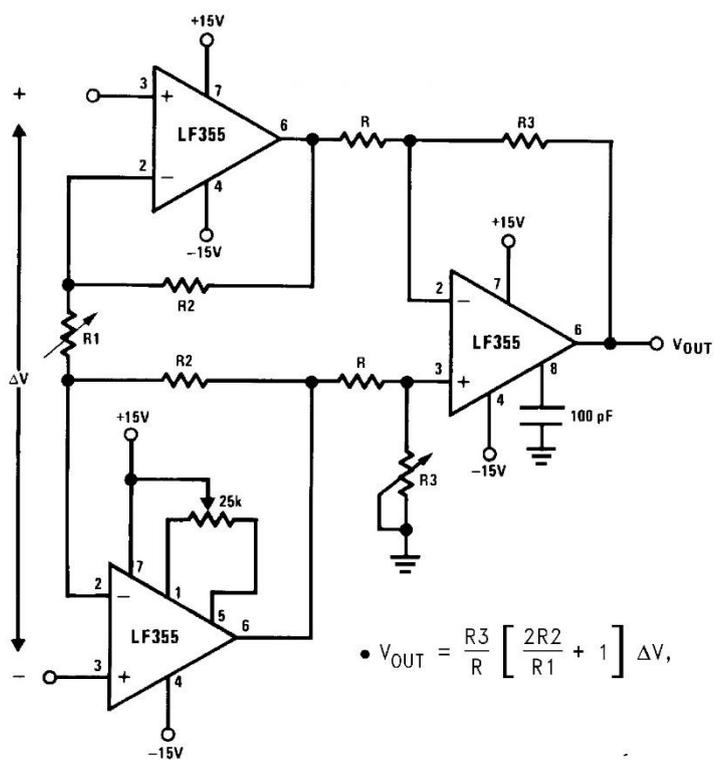
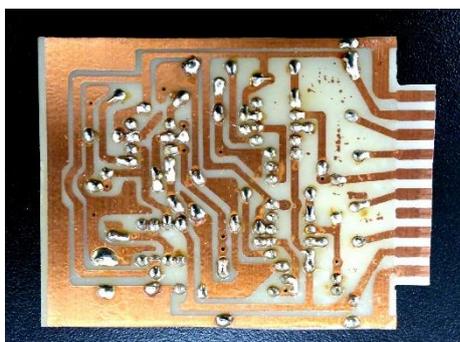
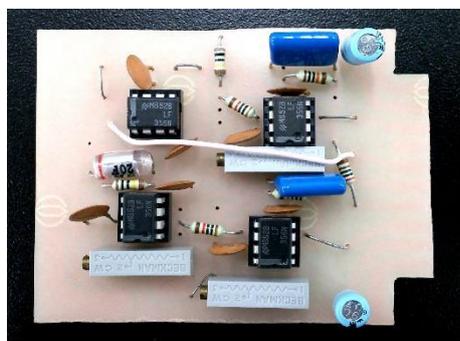
一般に実験で得られた多量のデータを処理する場合、それぞれの目的に合った専用ソフトを開発したり、購入したりして処理しますが、ここでは、汎用性の高いエクセルを使った処理を行います。得られたデータをもとに、グラフ、ヒストグラムや表などを作成します。平均値「=Average(**)**)」や標準偏差「=Stdev(**)**)」などのエクセルの関数も必要に応じて使います。Visual analyzer で作成したデータをエクセルで読み込む方法は、後述の解説 (§ 付属資料: データをエクセルで読み出す方法) を参照します。



実験の様子

<補足>

用いる作動増幅器は、下のような 10 個ほどの簡単な素子を配置したものです。2つの入力信号の間の電圧差 (ΔV) を正確に増幅します。同じように変動する大きな雑音が含まれていても、その差だけを増幅するので、生体の発生する微小電圧 (心電図や脳波など) を測定するための増幅器として、よく使われる電子回路です。



<筋誘発電位の計測>

上腕部の神経（運動神経・感覚神経も含まれる）を直接電気刺激すると、そこで生じた神経の興奮は掌部へと伝わり、そこにある複数連の筋がほぼ同時に興奮・収縮します。その興奮を大きな電気信号として、通常、刺激からある一定の時間（約 0.02～0.03 秒後）の後に観察ができます。人為的な刺激によって誘発される電位変化という意味で、誘発性の筋電図（筋電位）と呼ばれています。ここでは、刺激後、どのような時間経過で筋の電気的な興奮が起こるのか、刺激条件（強さや2回の連続刺激）でどのように反応が変わるかを調べることを目標にします。被験者によっては、計測しやすい人、雑音が大きく測定しにくい人などあるかも知れません。予備実験でグループの中から測定しやすい被験者2名を選び、本番の被験者とします。

手足の骨格筋は、脊髄にある種々の神経繊維につながっています。この中で、筋収縮を直接支配する神経（遠心性の神経）を運動神経と呼びます。私たちが手足の筋を収縮させるとき（随意運動の時）は、約 10～20Hz の一連のバースト状（頻度の高い繰り返し信号）の神経興奮が運動神経を伝わり、筋は連続的な収縮（強縮、tetanus）を引き起こします。しかし、人為的に短い単パルス刺激を与えた場合でも筋収縮は起こり、この時は、1回の短い収縮となります。短縮（twitch）と呼ばれる収縮現象です。

ここでは、短縮の時に筋で発生する電気的な信号（筋細胞の興奮による筋電図）を計測し、人工的に与えた刺激パルスとの時間的な関係、刺激の強度や刺激電極の極性との関係などを調べます。刺激強度を非常に強くした場合、運動神経とは別の筋紡錘の神経（感覚神経）が刺激され、脊髄へのフィードバックループを経由し、2つ目の筋収縮が観察されることもあります。強い刺激は多少の痛みを感じることもあるので、刺激強度を変える実験は、被験者に十分に了解を得た上で実施します。高い頻度での繰り返し刺激は避けます。心臓に問題のある場合やペースメーカーなどを使用している学生は、被験者とならず、計測やデータ記録の担当に専念します。皮膚に刺激電極や記録電極を付けるときには、導電性のペーストを使用しますが、使用後はアルコールでふき取るようにします。刺激性のあるペーストではないものの、皮膚の過敏な学生も被験者になるのは避けます。

4～5名で1組のグループ（別表参照）を作ります。被験者を選び、筋収縮にともなう誘発性の筋電位を記録します。被験者以外は、他の計測装置、コンピュータ等の操作を行います。

神経の刺激には「電気刺激装置（補遺資料参照）」を用います。この装置は、0.1～1ミリ秒（ms）の短い時間で、振幅 0～20V ほどの矩形の電気パルスを発生させる装置です。接地とは直接つながっていない回路（アイソレーターと呼びます）を使った刺激電流を発生します。これは増幅器や計測系への電流が直接流れこむのを防ぎ、刺激電流がノイズとして影響しにくい特徴があります。以下の手順で、上腕を使った筋誘発電位の計測を行います。

<実験の手順>

- a. 電気刺激装置の出力を最小にした状態で、ON にします（出力端子左側のつまみ）。繰り返しの刺激（repeat の選択）とします。刺激の周波数は 0.5~1Hz、刺激時間（duration）は 0.5~1.0 ms とします。
- b. 上腕部を露出し、刺激電極をヒジに当てる。物にぶつけると指先にシビレを感じない箇所がありますが、その敏感な場所に相当します。
- c. 上腕部は、接地に接続された（接地された）アルミ板上に、手のひらを上向きにして置きます。アルミ板は、オシロスコープの GND 端子、増幅器入力部の GND 端子とつながっていることを確認します。
- d. 刺激電圧を次第に強くしながら、指先の筋肉（小指の付け根付近）が収縮を始める刺激強度、刺激場所を見つけてみます。痛みを感じることなく小指付近の筋肉が収縮する条件（刺激強度と刺激電極の位置）を見つけてみます。
- e. 電気刺激がうまく実施できない場合は、刺激電極のペーストを追加したり（スポンジ状の先端部やその内側へも）、電極の位置を多少前後左右に移動させたりして、もっとも効率よく刺激できる箇所（安定した記録の取れる場所）を見つけてみます。
- f. 掌（小指の付け根付近）の筋収縮が安定して観察されるような刺激場所を見つけたら、刺激装置の出力を OFF（出力端子の左側の黒いボタンを押す）にします。一旦、最適な刺激条件を見つけたら、被験者は刺激電極の位置を変えないようにして、そのまま待機します。電極の位置を変えると、記録される電気信号が大きく変わり、データの再現性が悪くなるためです。
- g. 筋収縮の見られた付近の皮膚に EMG 記録用の電極を貼り付けます。導電性のペーストを付け、ビニールテープ等でしっかりと固定します。筋収縮によって電極が動くと、記録条件が変わり、再現性の良いデータは得られなくなるので、電極の固定方法には十分に注意します。
- h. 増幅器の入力リード線（ V_1 と V_2 ）、接地（黒の GND）を以下のように接続します。
 - V_1 → 記録電極の赤いリード線
 - V_2 → 記録電極の黒いリード線
 - GND → シールドの銅線
- i. 増幅器の出力リード線（ V_o ）、出力（黒の GND）を以下のように接続します。
 - V_o → オシロスコープとサウンドプロセッサの R（ワニグチクリップ）
 - GND → オシロスコープとサウンドプロセッサの GND（ワニグチクリップ）
- j. 電気刺激装置の出力を ON とし、EMG を記録します。オシロスコープやサウンドプロセッサの表示・記録は、電気刺激装置の刺激に同期させてトリガーすると便利です。これには電気刺激装置の背面から出力される信号をつかって trigger するしくみを使います。詳しくは、補遺資料を参照します。
- k. EMG の記録は、記録電極の位置でも大きく変わります。黒色（ V_2 ）の電極を小指の付け根か掌の部分に、赤色（ V_1 ）の電極を小指の中程に置くと記録し易くなります（赤・黒が逆でも同じ）。また、刺激される筋肉（刺激場所による）によっても記録される筋電図の大きさや波形は大きく変わります。被験者によっても信号を取りやすい場合とそうでない場合があります。被験者を変えて、何通りか試み

ます。雑音に対して、十分大きなシグナルのとれる条件を探します。

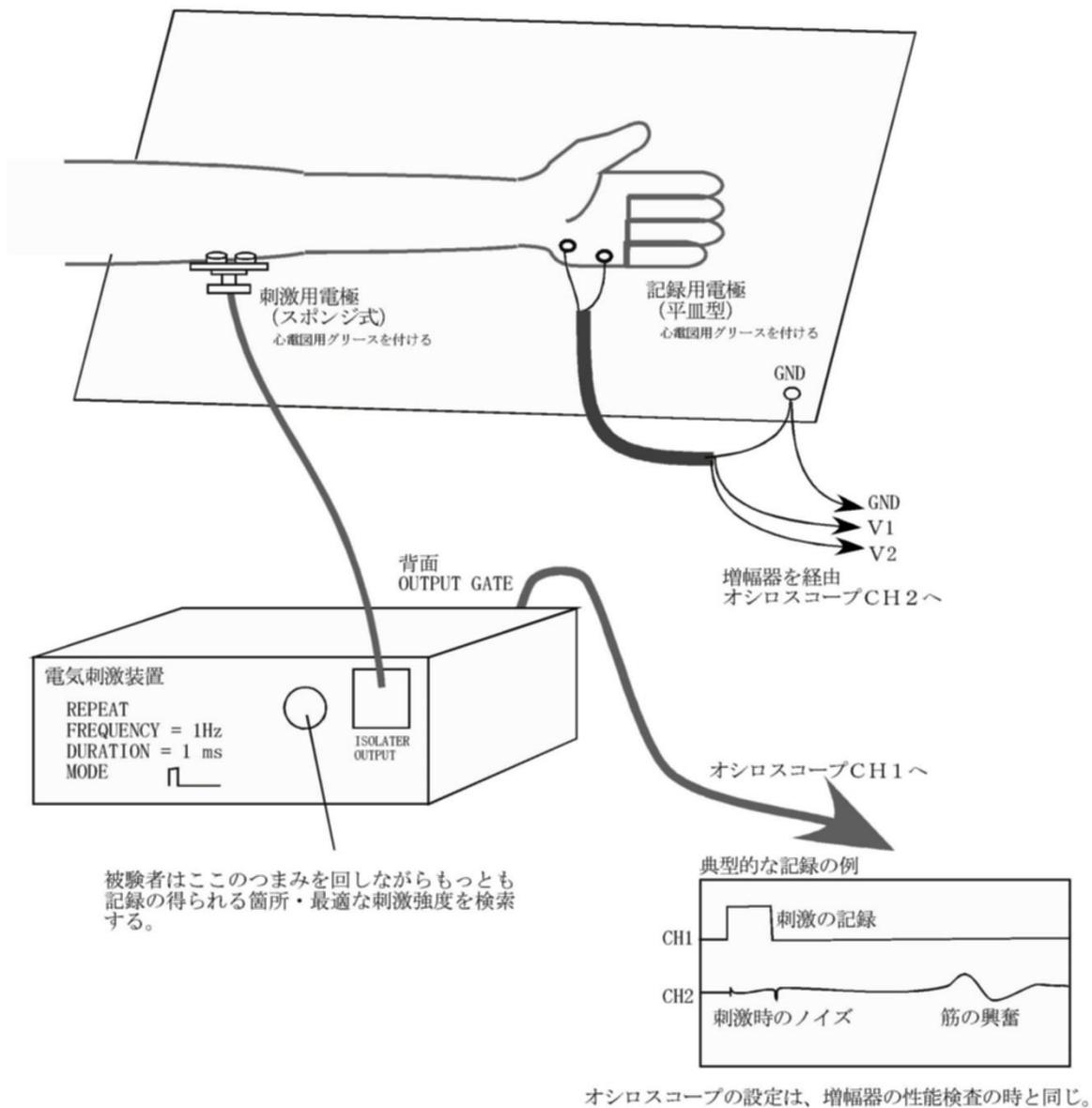
1. EMG 波形の記録が再現性よく繰り返すことのできる条件が確認できたら、以下の項目をチェックします。

- ※ 刺激したときにのみ再現性よく観察される波形（ノイズではない部分）を確認します。電気刺激と同時に現れるノイズと、筋の興奮として観察される信号を正確に区別します。なぜ、そのような波形となるのか、考察します。
- ※ 刺激電流の流れる方向（刺激の正負極性）を変える（出力端子の左側の押しボタン、黒の上下のボタンで極性が変わります）と、観察波形はどのように変わるでしょうか？どのように変わるべきでしょうか？なぜ、そのような変化が起こるのか、理由を考察します。
- ※ 刺激強度を変えた時、観察波形はどのように変わるでしょうか？どのように変わるべきでしょうか？なぜ、そのような変化が起こるのか、理由を考察します。複数の被験者を使い、複数のデータを記録して、刺激強度と波形の変化についての詳しい解析を行うためのデータを収集します。刺激強度と反応の関係について、特に着目して解析し、結果をレポートにまとめます。
- ※ 刺激パルスと記録波形との間の時間遅れを調べ、神経興奮伝導＋興奮のシナプス伝達＋筋興奮にかかる時間を求めます。時間がわかれば、刺激電極・記録電極の間の距離を測り、信号の伝わる速度を計算することはできますが、この計算は正しいでしょうか？
- ※ 十分強い刺激強度（観察波形がそれ以上大きな変化を見せない程度の十分強い刺激）を選択し、短い時間をおいて2つの連続刺激を与えます（補遺：電気刺激装置のマニュアル参照）。2つの刺激の時間間隔を少しずつ狭くして行ったとき、EMG の信号にはどのような変化が現れるか調べます。どのように変わるべきでしょうか？なぜ、そのような変化が起こるのか、理由を考察します。また、複数の被験者を使い、複数のデータを記録して、刺激間隔と波形の変化についての詳しい解析を行うためのデータを収集します。

m. 実験が終了したら

電機刺激装置、増幅器用の電源、オシロスコープ、コンピュータの電源を OFF にします。使用した刺激用電極（白いスポンジ部分も取り外して）、記録用電極の先端を 70%アルコールで拭いてグリースを取り除きます（グリースには塩が含まれているので、錆防止のため）。

誘発筋電図の実験の概要



誘発筋電図測定の様子

＜カエル座骨神経標本の作成と神経興奮伝導速度の計測＞

ここではウシガエルの腓腹筋 (Gastrocnemius muscle) へ至る神経 ([座骨神経](#)) を、脊髄部分から大腿部まで連続して取り出して用います。神経細胞を直接取り扱うことを経験するとともに、これまでの非破壊的な実験 (解剖や単離など試料に損傷を与えない実験) で確かめて来たことを、より直接的な方法で確認することを目的にします。時間的に余裕のある場合、神経興奮の温度依存性についても調べます。

この実験では、神経をできるだけ損傷の少ない方法で取り出す標本作製が重要です。特に、

- ・神経を機械的に刺激しない、
- ・乾燥させない、
- ・神経をピンセットで直接摘まない、
- ・神経をむやみに引っ張らない

ように十分注意します。一度、ダメージを与えると二度と回復しないことが多いので、標本作成を担当した学生は十分注意します。

操作手順

- a. [神経標本の単離方法](#)は、実験期間にデモンストレーションします。ウシガエルを解剖して、右の写真の神経をできるだけ長く取り出します (C-Suppl - 1～2 参照)



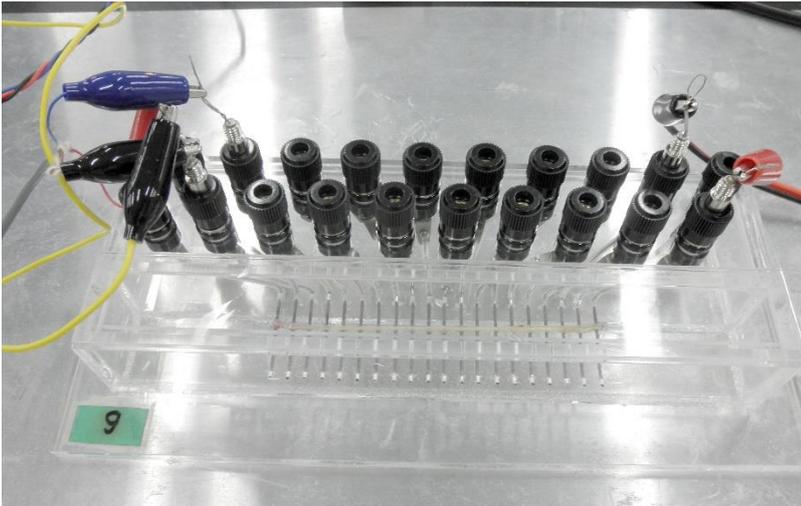
ウシガエルの座骨神経 (腹側)

取り出した座骨神経



- b. [単離した神経筋標本をアクリル製チェンバー内にセット](#)します。チェンバー底部には、カエルの生理食塩水 (リンガー液) を少量入れ、神経が乾燥しないようにします。ピンセットで神経を直接摘むようなことはしないように十分に留意します。ただし、電極の間にリンガー液がついている場合、刺激が効率よくできなかつたり、神経興奮の記録が微弱になつたりするので留意します。電極や神経に付着している水滴などは、キムワイプなどで注意して拭き取ります。

記録用アクリル箱の中に入れたカエル座骨神経

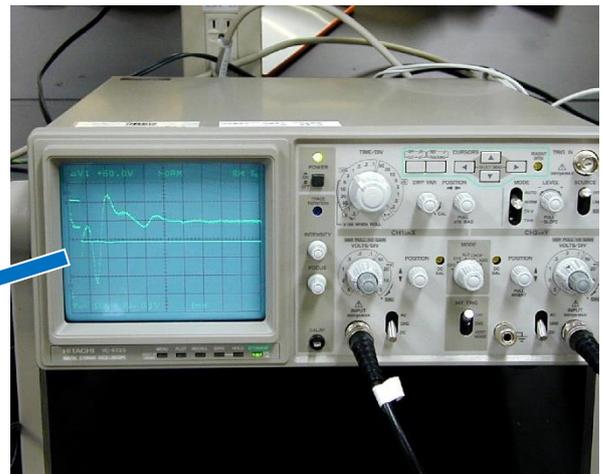
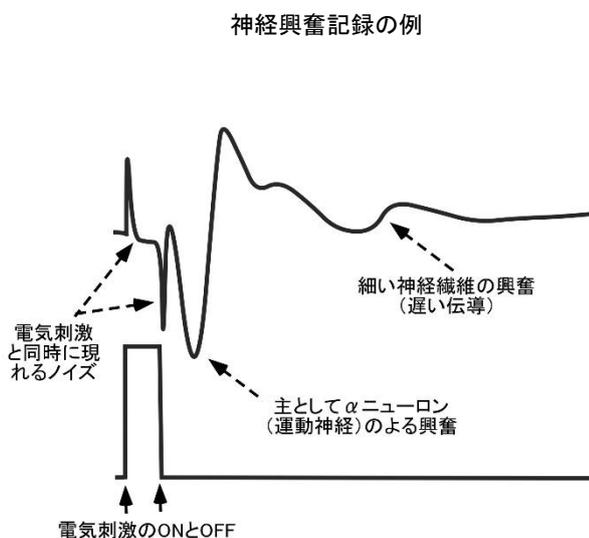


刺激（右）・記録用（左）のリード線が見える。

刺激用電極：（黒・赤）のケーブルで隣接した電極に接続する。刺激の+・-の極性と、刺激する位置の対応は実験ノートに記録を残しておく。

記録用電極：ここでは（赤・黒・青）の順番で、隣接した電極に接続している。逆の順番でも良いが、必ず中に黒（GND）の接続を行う。これは、記録のノイズを減らすため。

- c. 神経刺激をする箇所は、求心端側（筋肉とは反対側で脳に近い端）の電極2つを選びます。それより遠心端側（筋肉側の端）の箇所で、神経の興奮を調べます。ここでは刺激の頻度は1Hzとして、電気刺激装置の繰り返しモード（Repeat）で刺激します。ただし、信号を測定記録する時以外は、神経細胞の疲労をできるだけ防ぐために、無駄な刺激は行わないように注意します。写真のような記録（波形は標本の作り方や電極位置で異なる）が再現性よく現れる刺激条件・記録箇所を選びます。



- d. 以下の項目について調べます。

- ※ 刺激と興奮記録の関係から、興奮が神経繊維に沿って伝播する速度を求めます。写真のように複数のピークが見られた場合、それぞれの伝播速度も求めます。できるだけ正確に伝導速度を求めるためには、どのような工夫が必要でしょうか（例参照）？
- ※ 刺激強度を変えながら、測定される波形（興奮の振幅、波の数や形、遅延など）がどのように変わるか調べます。ここで用いる座骨神経には、複数の神経繊維（太さも種類も異なる）。

が含まれていますが、一般に刺激が弱いと太い神経のみが先に興奮し（写真4）、刺激を強くすると細い神経も興奮するようになり、また、興奮する神経の数も増えます。このことを考慮すると、刺激強度を変えた時、観察波形はどのように変わるべきでしょうか？なぜ、そのような変化が起こるのか、理由を考察します。刺激強度と波形の変化についての詳しい解析を行うためのデータを収集します。刺激強度と反応の関係について、特に着目して解析し、結果をレポートにまとめます。

- ※ 刺激する電極の極性 (+/-) を変えた場合どのような波形上の変化が発生するかを見ます。一般に、刺激電極の負極側（負極側付近）で興奮が先に起こることと考えられています（なぜでしょうか？）。そのため、刺激の極性 (+/-) を変えることで、刺激位置が変わると考えられます。この点を考慮して、得られた実験結果を考察します。[2回の連続した刺激への反応](#)も、時間の余裕があれば確かめてください。
- ※ 典型的な興奮波形の見られる条件で、[バットに氷を入れ、その上に神経を入れた容器ごと載せ覆い](#)をします。温度を徐々に下げたとき、どのような変化が起こるか観察します（これは時間的な余裕のある場合でよい）。温度によって最も大きく影響を受けるものは何でしょうか？[観察される波形](#)から、変化の現れるパラメータ（伝導速度やピーク数など）。に着目して解析します。10°Cの温度変化で、どの程度の違いが出るか比で示したものを Q_{10} といいます（たとえば速度比や振幅比など）。データから得られたパラメータを使って、 Q_{10} を求めます。

e. 実験が終わったら

- ※ リンガー液は海水と同じ様に多くの塩分を含んでいます（組成表参照）。付着した塩類は、金属や電極を腐食させるため、用いた用具類（解剖用具、アクリル製箱など）は、水道水・蒸留水・100%アルコール液の順番によく洗浄し、乾いた紙（キムタオル）の上に置いて乾かしておきます。

レポート作成の要点：科学的な実験レポート作成上の一般原則と例
＜記載形式を実験Cの重要なレポート採点基準とします＞

一般的な科学的な作業（科学的な考え方）の流れ

- I 仮説を立てる
- II 実験で検証する
- III 仮説との整合性を議論する
- IV 合致→次の発展的な仮説を立てる実験
矛盾→仮説の立て直し

実習での作業手順

- ① テキストに示された実験手順を理解して実施
例：神経を刺激するときの強度を変えて、それに対応してどのような変化が起こるかを調べる。
- ② 観察データの理解と記述（実験条件、時間、温度などの記録を可能な限り詳細に残す）
例：刺激強度の違いで変化した現象について（ピークの位置、数、振幅、広がり、ピーク間隔など）
事実を正確に記録する（実験の実施時間、被験者などの詳細）。
- ③ 観察データの数値化とグラフ表示
例：ピークの数調べて、刺激の強度との関係を表やグラフで示す。
- ④ 仮説 の設定（I）
例：ピーク数は、神経活動のどのような機能と直結しているかについて、理由（仮説）を考える。
- ⑤ 仮説との整合性の議論（II）
例：立てた仮説で実験結果がどの程度説明できるか。説明できない点は何か。について議論する（III）。
- ⑥ 上の議論で解決できなかった問題点の対策を考える。新しい実験を提案する（IV）。
例：よりシンプルな実験系、カエルの神経などで確かめて、仮説を確認する。

レポートのまとめ方

- A 表紙：設定した仮説の内容に沿ったテーマ（下記例）を表題とする。氏名と学生証番号を明記する。
- ・ヒト誘発筋電図の振幅と刺激強度との関係
 - ・ウシガエル誘発筋電図波形と刺激条件との関係
 - ・ウシガエル脊髄神経の興奮伝導速度の計測
 - ・ウシガエル脊髄神経の興奮伝導速度の温度依存性に関する研究 など
- B 要旨：上の①～⑤の内容に沿ったあらすじを10行程度の文章でまとめて要旨とする。
要旨の文章構成は次のような順序と構成にすると読み手に伝わりやすい。

(a)一般論の記述、(b)背景、(c)言葉や実験材料の定義、(d)結論・結果、(e)欠点・反省、今後の展望

＜例文：実験内容とは関係ありません＞

ショウジョウバエは、遺伝子の解析が進み、現在は、多くの分子生物学的な研究で多用される重要な実験動物である^(a)。しかし、羽化後の生殖器の変化に関しては、詳細がわかっていない。特に生殖器の発達についての研究があまり行われておらず、オスの生殖器内の精子がどのように成熟し、運動の活性化はそのどのような過程で起こるのかは不明である^(b)。野生型のキイロショウジョウバエ (*Drosophila melanogaster*) を用いて^(c)、形態観察とオス生殖器の発達について

て調べた結果をここで報告する^(d)。オス蛹の生殖器内で、羽化2日前より徐々に精子形成が開始するが、運動が活性化するのは羽化3日後であることがわかった^(e)。実際に交尾が開始する前日までに、ほぼ精子形成は完了すると考えられる。この活性化にともなう生殖器の構造変化、活性化因子に関しては、まだ不明の点が多く、どのような因子が活性化に関わるのか、今後の研究が必要である。

C 導入：実験の目的や背景

上の要旨の前半の導入部分の詳細をここで繰り返すことになる。しかし、単純な繰り返しではなく、次のような構成となるように心がける。

- ・一般的な概念・事実の記述
- ・ここで明らかにしたいテーマとは何か
- ・明らかにすることで、何が解明できるか
- ・実験上の特記すべき工夫や改善点、実験の特徴
- ・どのような結果になったかの概要

D 方法：実験材料と方法

どのような手順で、何を行ったか、可能な限り詳細を記述する。テキストの引用の場合には、どの部分の引用か、明確にする。実験条件は、共同実験者、被験者、気温、実験材料の処理方法などを記載。

E 結果と考察：上の③～⑥を簡潔にまとめる。テーマ項目ごとに分けて、項目別の番号、小見出しタイトルを付けて、全体構成がわかりやすいように工夫する。実験データは、もとの記録波形をそのまま載せることはしない。代表的な例示を1～2例示だけで、羅列することはしない。必ず、振幅、遅延時間など、解析データとして抽出して、グラフにして示す。考察は、小項目ごとに行っても、最後にまとめて記載しても良い。

F 文献：この実験をまとめるに当たって、参考にした文献、教科書、webサイトなどの資料の出典がわかるように列記する。

<参考プログラム：10個ずつ拾い出して時間平均化するマクロ>

<http://www.bio.chuo-u.ac.jp/nano/books/averaging.xls>

Excelのソフトで「ツール」→「オプション」→「セキュリティ」→「マクロセキュリティ」でセキュリティレベルを落として使用。

<参考プログラム：記録箇所のみを抽出して表示するエクセルファイル

<http://www.bio.chuo-u.ac.jp/nano/books/xls/ExpC.xlsx>

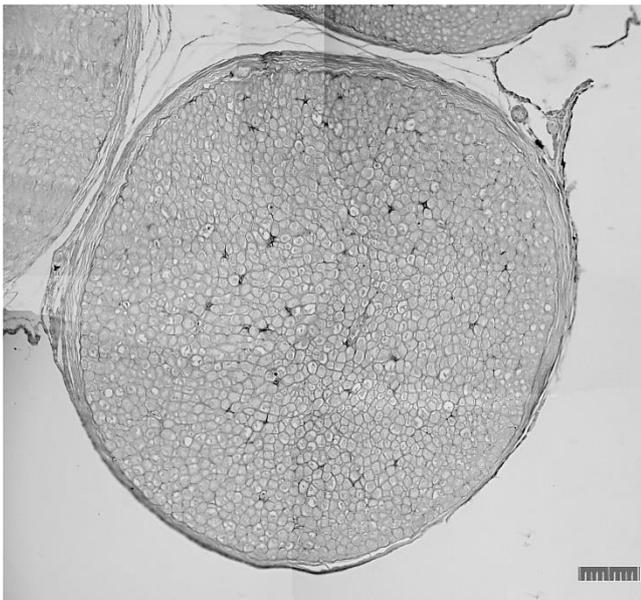
レポートを完成させる上での注意事項

- ・レポートには、実験で記録した波形データ（コンピュータで記録した興奮の波形の生データ）をそのままの形で載せたり、羅列したり記載しない。波形データから読み取った数値をもとにして、その分析（解釈）した結果を記載する。例えば、刺激の強さを変えると、どのような点が大きく変化するのか、個々の記録データより読み取って調べ、その結果をグラフ（横軸に刺激強度などを使う）などでわかりやすく表現するのが望ましい。
- ・例外的に、波形データを直接表示するのは、特別な理由、波形を詳細に比較する意味が明確な時、特異的な観察例として示す必要がある時、レポート本文中で波形について言及している箇所がある場合に限る。
- ・この実験では、非常に膨大な量の記録データが得られる。そこから特に着目したいテーマに絞って詳しく解析するのが望ましい。期日までに間に合わせるように注意し、各自、どのような点に着目して解析したかを明確にしたうえで、レポートに仕上げること。
- ・以下のような点を考慮すると、より理解がより深まる（下の質問に1つ1つレポートで解答する必要はない）。
 - ☆ ヒトの誘発筋電図と、上のカエル神経興奮波形観察の実験は、操作の上はほとんど同じ実験であるが、根本的な違いがある、それは何か？
 - ☆ 単一神経繊維を用いた実験系と、ここで行った神経繊維束を用いた実験系とでは違いは何か？
 - ☆ 興奮の速度を求めるときは、刺激電極は固定したままで、記録電極の位置を遠ざけたり、近づけたりして複数の記録を取る。その後、「電極間の距離 vs 時間的な遅れ」の間の関係を調べると、より正確な伝導速度が求まる。なぜか？一箇所の記録から求める場合と、どのような点で異なるか？（添付資料：「実習に役立つ統計学入門②」参照）。
 - ☆ 一般に、「神経の伝導速度 \propto (神経の直径)^{1/2}」の関係がある。この点を考慮して、実験結果の中で解釈できる部分はどこか？
 - ☆ 実験条件を同じにした場合、測定される神経や筋の電気的な反応は、常に一定となるべきか？そう考える根拠は何か？そうならないと考える根拠は何か？この可能性を考慮した上で、実験データをどのように記録し、どのように取り扱う事がよいか？

レポート提出期限について

「動物生理学実験C」のレポートは、words ファイルにまとめ、最終実験終了日から1週間後（翌週同曜日の13:00）までに提出します。提出先は、manaba上でA1-1ページの指定された方法で提出してください。

付図 カエル座骨神経の断面写真、多数の神経繊維からなることがわかる。
 (神経束の切片写真、氏原氏提供、スケール最小メモリは10μm)。



付 表 1

リンガー液 (カエル用生理食塩水) の組成表

Frog Ringer's Solution		
NaCl	6.5 g/l	111 mM
KCl	0.14	1.8
CaCl ₂	0.12	1.2
NaHCO ₃	0.2	2.4
Glucose	0.4	2.2
		pH 7

付 表 2

カエル座骨神経の構成神経繊維とその興奮伝導速度

繊維種別	伝導速度 (m/s)	髄鞘	求心/遠心	神経種別
A α	47.3	有髄	遠心性	運動神経/感覚神経
A β	28.7	有髄	求心性	感覚神経
A γ	19	有髄	求心性	感覚神経
A δ	13.6	有髄	求心性	感覚神経
B 1	16 - 8	有髄	遠心性	自律神経
B 2	1.5 - 3	有髄	遠心性	自律神経
C	0.8 - 0.3	無髄	求心性	自律神経/痛覚神経

<筋電図の記録と解析（予備課題）>

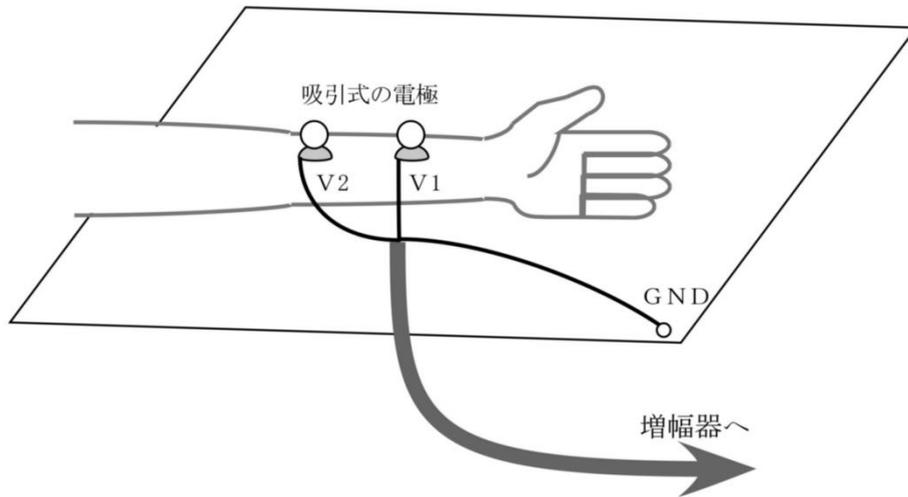
筋誘発電位の測定と同じように、[筋の自発的な活動（収縮や興奮）](#)も、電気的な信号として調べることができます。どのような信号として観察されるかを見ます。また、その[信号と筋の発生する力との関係](#)を調べます。

一般に、骨格筋の収縮は **10~20Hz** のバースト状の電気的な興奮（高頻度で繰り返して起こる興奮）を伴うことがわかっています。自発的な収縮では、多くの筋細胞で同じようなバースト状興奮が、タイミングをずらしながら発生します。筋電図は、その全信号の足し合わせたものとして観察されることになります。筋誘発電位との大きな違いはこの点です。ここでは、計測される電気的な信号波形の中で、どのようなパラメータ（周波数、振幅、位相など）が、筋の発生する力と直接的な関係を示すのかを調べます。

ここでも、**3~4名**で1組のグループを作り、各自、自分を実験台として、自発的な筋収縮にともなう筋電図の記録を試みます。被験者、記録担当を互いに交代しながら実験をすすめます。必ずしも、筋肉の量のある人が被験者として向いているわけではありません。

- ※ 下の図を参考にして、[前腕に記録電極を2箇所付けます](#)。その電極と増幅器の V_1 、 V_2 の入力端子と接続する。
- ※ 腕の全体を接地（GND）端子に接続した導電性マット（または、アルミ板）の上に載せます。
- ※ 被験者は、握力計を用いて、ほぼ一定の握力のある一定時間（計測中）、継続して発生できるように練習します。
- ※ さまざまな握力（**0kg**~出せる最大握力まで、**10種類**ほど）を発生中の筋電図を記録します。
- ※ 発生する握力の大小によって、記録される **EMG** の信号はどのように変化するかをみます。波形だけを観察したときにわかる範囲でメモを記録しておきます。同時に、観察時の条件（被験者の名前、腕の左右、時間、出している握力など）も詳細を実験ノートに記録します。
- ※ 発生する握力は、筋の中で興奮している細胞（筋繊維）の数に比例します。計測される信号を処理して、どのようなパラメータを得るのが適当と考えられるでしょうか。どのようなパラメータが、興奮している筋繊維の絶対数を直接反映するものと期待できるか、考察します。その実験的な裏付けを得られるかどうか、データを解析します。逆の方法として、実験的な証拠を積み上げて、経験則として、そこから結論を導く方法も可能です。

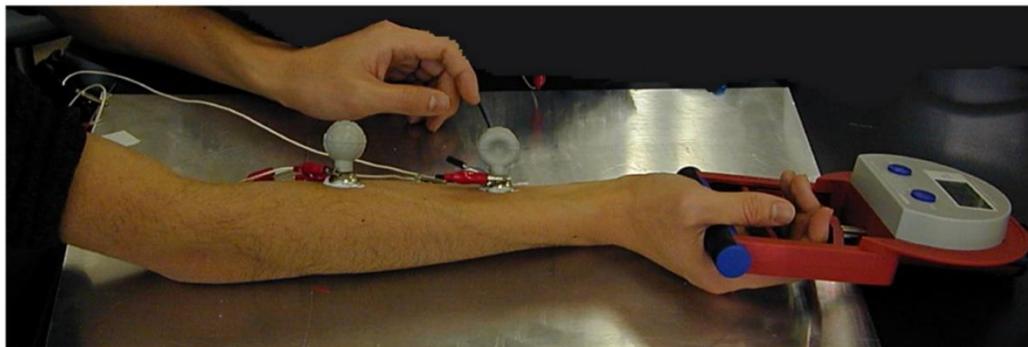
実験が終了したら、電機刺激装置、増幅器用の電源、オシロスコープを **OFF** にします。使用した刺激用電極、記録用電極の先端を **70%**アルコールで拭いてグリースを取りのぞきます。



静止時



握力を発生させた時



§ 付属資料：計測ソフト Visual Analyzer 2011 (Alfredo Accattatis ver 4.1) の使用方法

- ① ソフトの起動：右のアイコンをクリックしてプログラム（Visual Analyzer）を起動させます。下のような主画面が現れます。この画面の設定は共通した基本設定を使いますが、(ア)「Setting」をクリックすると、次ページのような設定画面（Main）が出てきます。その中で(イ)Open Configをクリックして、デスクトップの「basic_setting.ini」のファイルを読み込むと、初期画面が変わって、2つの波形が表示されるようになります。



(キ) On

(ア) Settings

(オ) Trig がレ

(カ) 閾値の設定
Vpos より上に設定

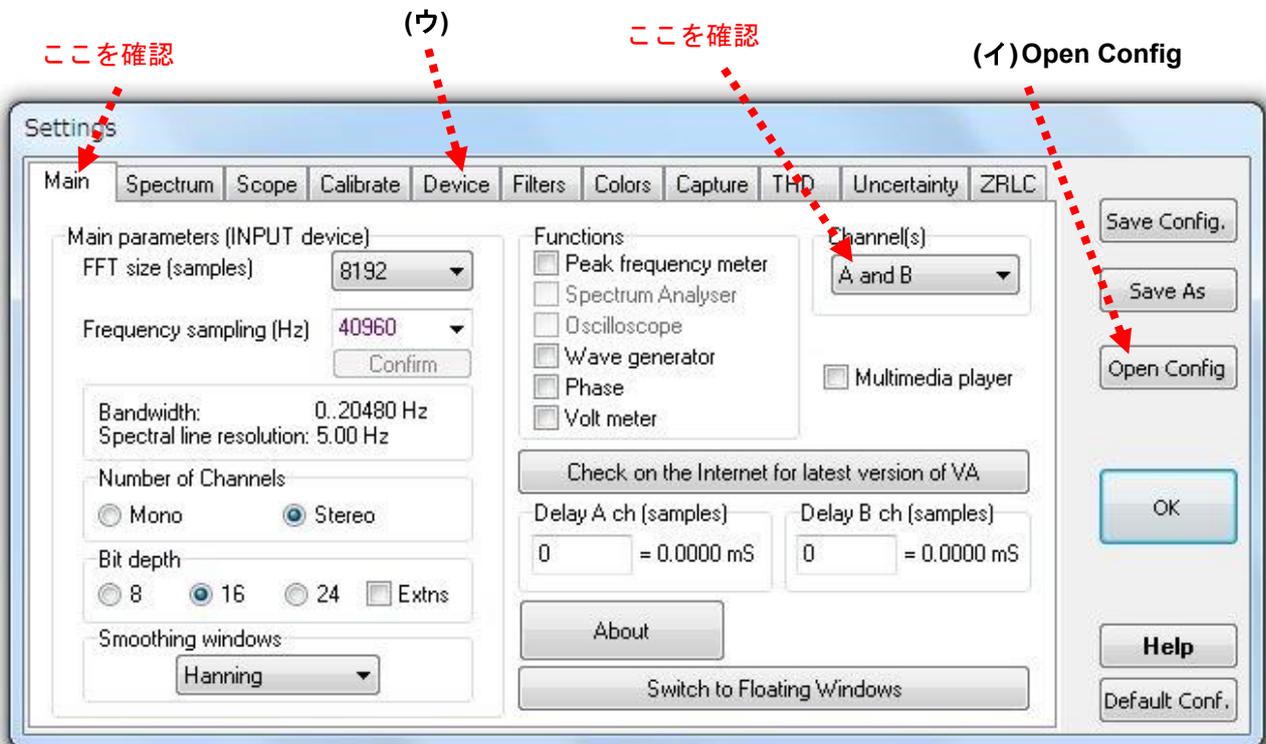
(ク) Capture Scope

波形表示部
Scope

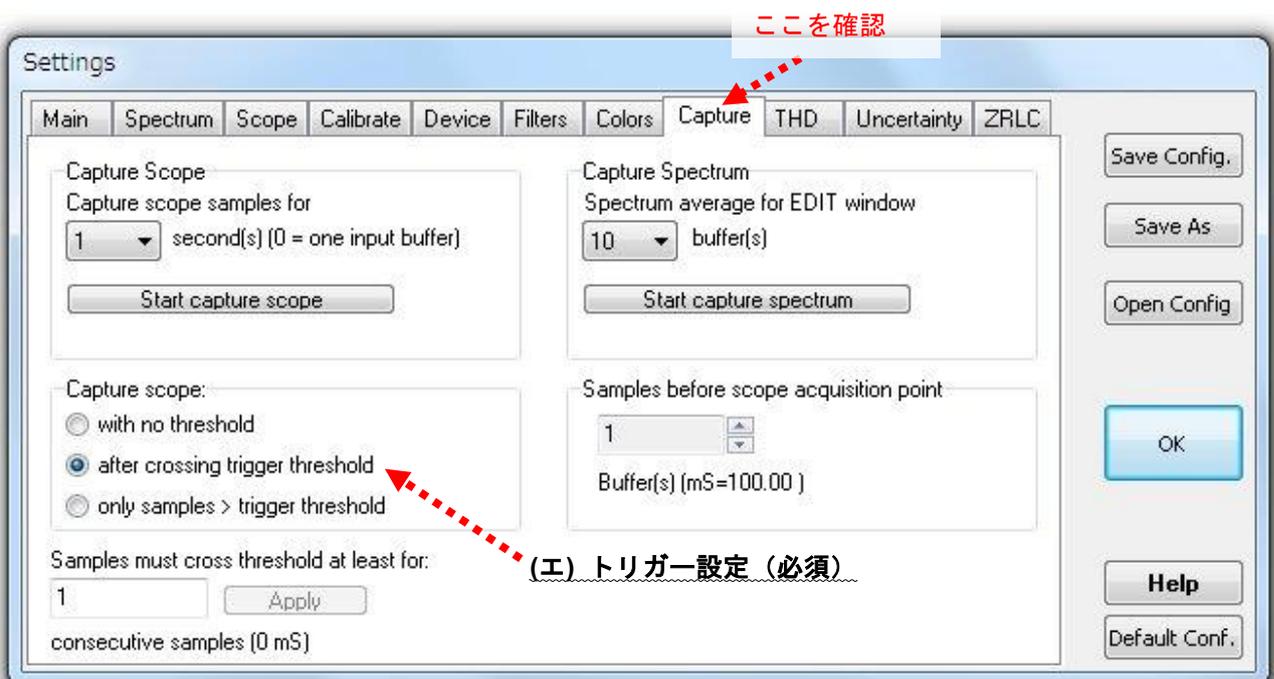
周波数分析結果表示部
Spectrum

- ② (ウ)「Default Window...」と書かれた箇所をクリックして、このソフトで処理する信号の入力装置を指定します。ここでは、「SE-U33GX Audio (Onkyo 社のサウンドプロセッサ)」を選択します。
- ③ 「Setting」をクリックし、次ページのような設定画面（Capture）を選択し、(エ)の「after crossing

trigger threshold」を選択します。これは、信号の大きさがある閾値を通過したら、コンピュータへの記録を開始するという設定です。「Trigger」は、神経興奮のような非常に速い現象に合わせてコンピュータを駆動させ、信号記録を開始させ上で必須の機能です。この実験では、Aチャンネル（このソフトでは、Ch A(L)と表示）に入力させた同期信号（電気刺激装置から取り出したタイミングを合わせるための信号）を使います。上の画面で、(オ)Trigはとなっていることを確認します。(カ)のつまみをドラッグして、実際の閾値を設定します。

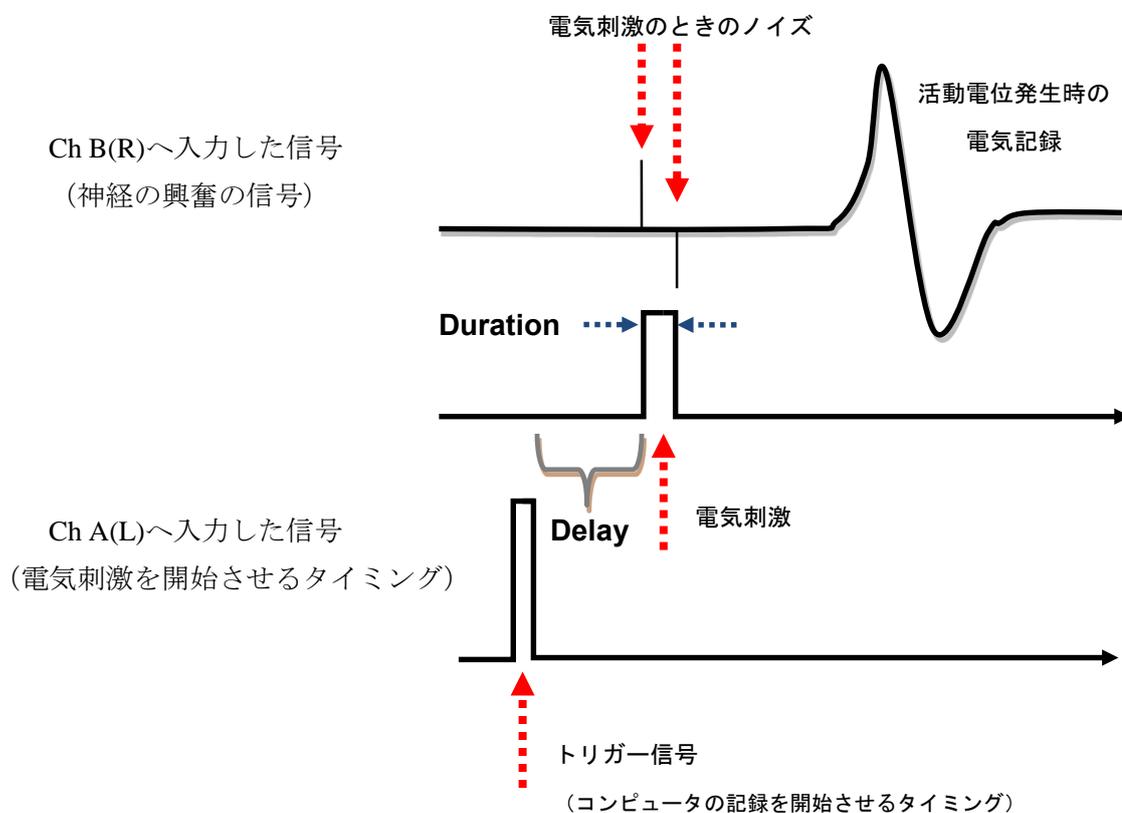


設定画面 (Main) を開いたところ



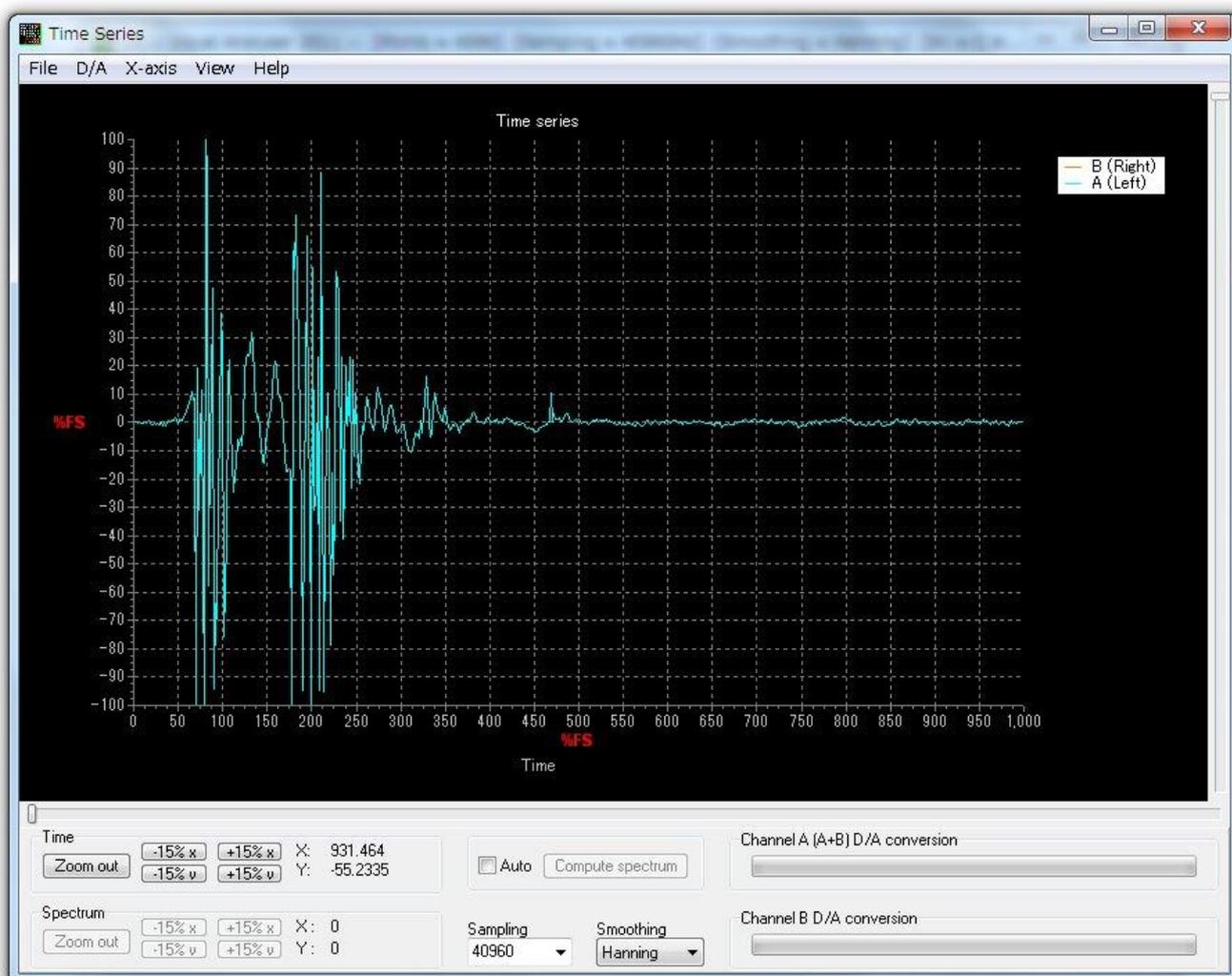
設定画面 (Capture) を開いたところ

- ④ これまでの設定が終わった時点で、(キ)「On」をクリックすると、波形 (Scope画面) が上側に、その周波数分析した結果 (Spectrum画面、FFT計算結果) が下側に表示されます。他のソフトは起動している場合など、ときどき動作の不安定になることもあります。その時は、一旦、ソフトを終了させて、①～④の操作を繰り返します。周波数の画面は、筋電図記録のときに使用します。
- ⑤ 誘発筋電図、あるいは、神経興奮の記録は、(ク) Capture Scopeをクリックしてから始めます。「Trig」の設定が正常に行われていると、このクリックだけでは記録は開始しません。波形画面上に「Waiting for samples...」と表示され、Ch A(L)に閾値を超える信号が入ってくるのを待っている状態になります。
- ⑥ ここで、刺激装置を使って刺激すると、そのタイミングに合わせて、Ch A(L)に信号が入り、はじめて、神経興奮の記録が始まることとなります。このタイミングは、模式的に表すと下のようになります。



- ⑦ 設定では、トリガー信号が入力されると、1秒間の間に、96000個のデータが自動記録されます。その後、次ページのような波形が表示されます。これで記録完了ですが、レポート作成やエクセルを使った解析のためには、データを保存する必要があります。「File」をクリックして、テキスト形式で保存します。ファイル名は、実験の内容、実験番号、実験者など、実験ノートに記載した記録と対応が明確につくようにします。データの取り込み (サンプリングという) の数や速度は自由に設定可能ですが、神経の興奮は非常に短い時間の速い現象のため、48～96 kHz (1秒間に48,000～96,000個のサンプリング) が適当です。

ここをクリックしてデータをテキスト形式等で保存

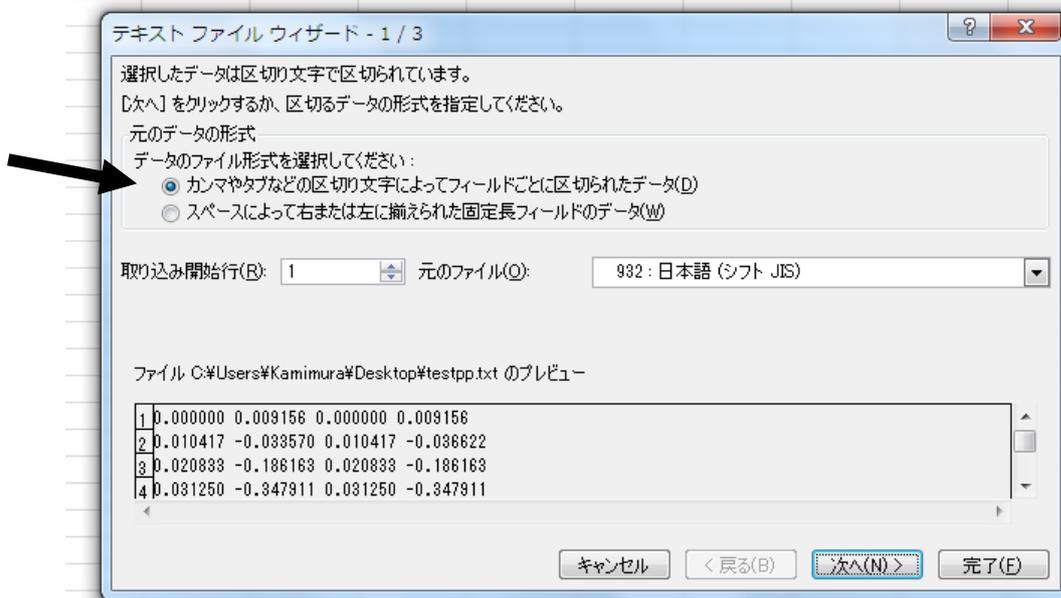


保存には、次の4つの種類が選択できます。「Zoom out」をクリックすると、記録された波形全体が表示されます。

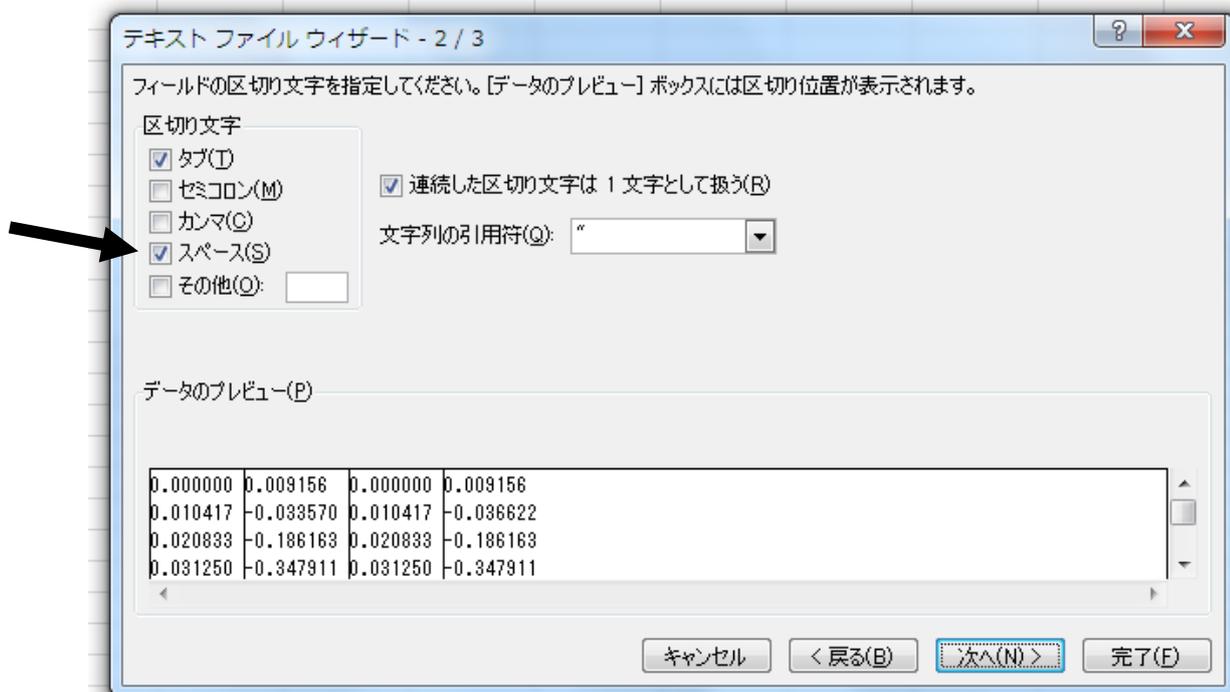
- (1) 「Save」：Visual Analyzer特有の形式(*. tee)で保存されます。波形データの表示や解析には便利です。
- (2) 「Save as WAVE」：音声ファイルの一般的な(wav形式)で保存されます。他のソフトとの互換性あり。
- (3) 「Save as text file」：データをエクセルで読むための形式(テキストデータ)です。画像データも同時に記録されます。
- (4) 「Save to clipboard」：データをコンピュータ上のメモリ内へ、画像のデータとして保存されます。他のソフト上で、「Ctrl+V」で貼り付けることができるようになります。この機能では、保存された内容は、他の同じ操作で上書きされます。

§ 付属資料：データをエクセルで読み出す方法（例 1, 例 2, 例 3）

- ① エクセルから、保存したファイルを読み込みます。その時、下のような画面が現れます。このメニューから、テキストデータの読み込み方法を定義します。この作業は、毎回、行う必要があります。下のよう「カンマやタブなどの区切り文字によって・・・」の項を選び、「次へ」をクリックします。



- ② 下の画面が表示されたら、区切り文字として「スペース」を選択します。データの中のスペースに、下のような縦線が表示されます。これで読み取る準備が完了です。「完了」をクリックします。



- ③ エクセルの画面上でのデータ（ワークシート）を見ると、下のような表示になります。各セル内にデータが1つずつ入っていることを確認します。ここでは、2つのチャンネル（RとL、ChAとChB）のデータが併記される形で表示されます。A列とC列は、それぞれL（ChA）とR（ChB）の時間（波形データの場合）、または、周波数（スペクトルデータの場合）のデータです。B列とD列は、それぞれL（ChA）とR（ChB）の信号（波形データ）データです。エクセルの上で、グラフ表示（散布図表示）させると、Visual Analyzer と同じデータとなることも確認できます。

	A	B	C	D	E	F	G
1	0	0.009156	0	0.009156			
2	0.010417	-0.03357	0.010417	-0.03662			
3	0.020833	-0.18616	0.020833	-0.18616			
4	0.03125	-0.34791	0.03125	-0.34791			
5	0.041667	-0.4181	0.041667	-0.4181			
6	0.052083	-0.39674	0.052083	-0.39979			
7	0.0625	-0.33265	0.0625	-0.33265			
8	0.072917	-0.28382	0.072917	-0.28382			
9	0.083333	-0.26856	0.083333	-0.26856			
10	0.09375	-0.28077	0.09375	-0.28077			
11	0.104167	-0.26246	0.104167	-0.26246			
12	0.114583	-0.18922	0.114583	-0.18922			
13	0.125	-0.07935	0.125	-0.07935			
14	0.135417	0.009156	0.135417	0.012207			
15	0.145833	0.04883	0.145833	0.045778			
16	0.15625	0.018311	0.15625	0.018311			
17	0.166667	-0.05188	0.166667	-0.05493			
18	0.177083	-0.16785	0.177083	-0.16785			
19	0.1875	-0.26246	0.1875	-0.26246			

④ データ解析上の注意事項

- ・この実験では、データ数は、1回の記録で48,000~96,000個です。その中で必要な記録の残っている箇所だけを選んで解析します。1日の実験で、膨大な数の数値データが集まるので、整理して解析する必要があります。
- ・記録されるタイミングも実験ごとに異なります。これは、速い現象のためにコンピュータの記録開始と、実際の電氣的な信号発生が微妙にずれるためです。電気刺激の行われた時間を明確にして、それから何ミリ秒遅れて、目標の興奮が起こっているかを調べた上で解析を進める必要があります。
- ・記録された信号は、いつ、どのような条件で行った実験かを明確にして、レポートには整理して記載します。
- ・得られたデータを未整理のまま、あるいは、処理もせずに、すべてレポートに順番に掲載するのは、ほとんど意味のない作業です。必ず整理して、レポートで記述する現象、効果、反応などの例として典型的と考えられるものだけを例示します。
- ・データの中で、波形の他に、振幅、信号発生のタイミング、波の数、正負のいずれの振れ、波の幅など抽出して意味のあるパラメータは、神経興奮現象の何を議論するかによって大きく変わります。次ページ以降の「神経興奮のしくみ（高校の教科書の抜粋です）」を参考に、レポートを作成します。

神経標本の作り方

[動画リンク先](#)



後肢の皮を剥ぐ

1

2



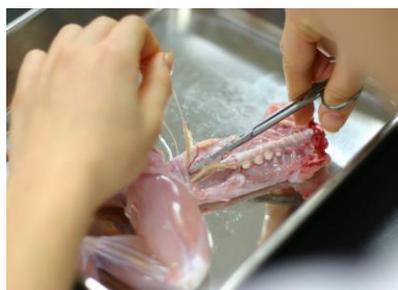
腹側の様子
(背骨に沿った座骨神経)

3



座骨神経の下に糸を通して結ぶ準備

4



脊髄に沿った神経の外し方
(引っ張らないように軽く持ち上げて)



後肢背面の神経束は筋膜を切り、広げると、筋の下に見えて来る。

参考：一部単離するとガルバノピンセットでの刺激で神経の活動を確認できます。

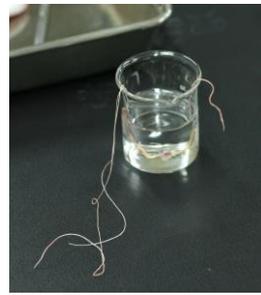
5

6



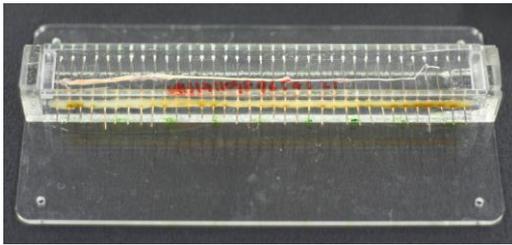
神経をとり出したところ

7



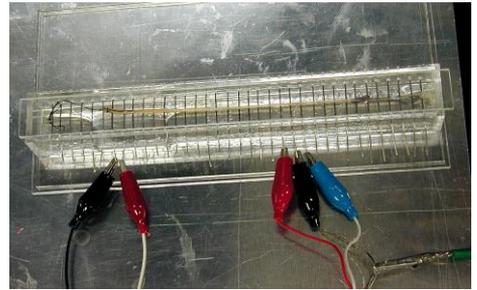
取り出した神経の保管方法
(十分量のリンガー液に入れて)

8



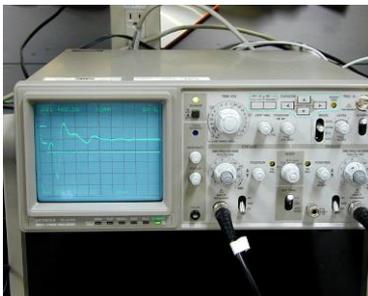
取り出した神経をチェンバーにセット

9



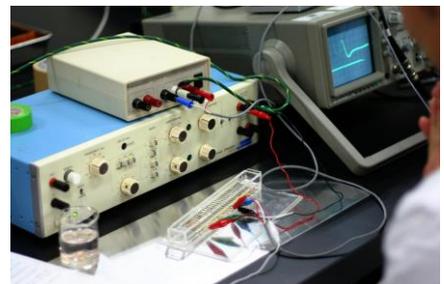
チェンバーに電極を接続する

10



記録の例
(左の矩形波が刺激. 興奮波形が複数観察できる)

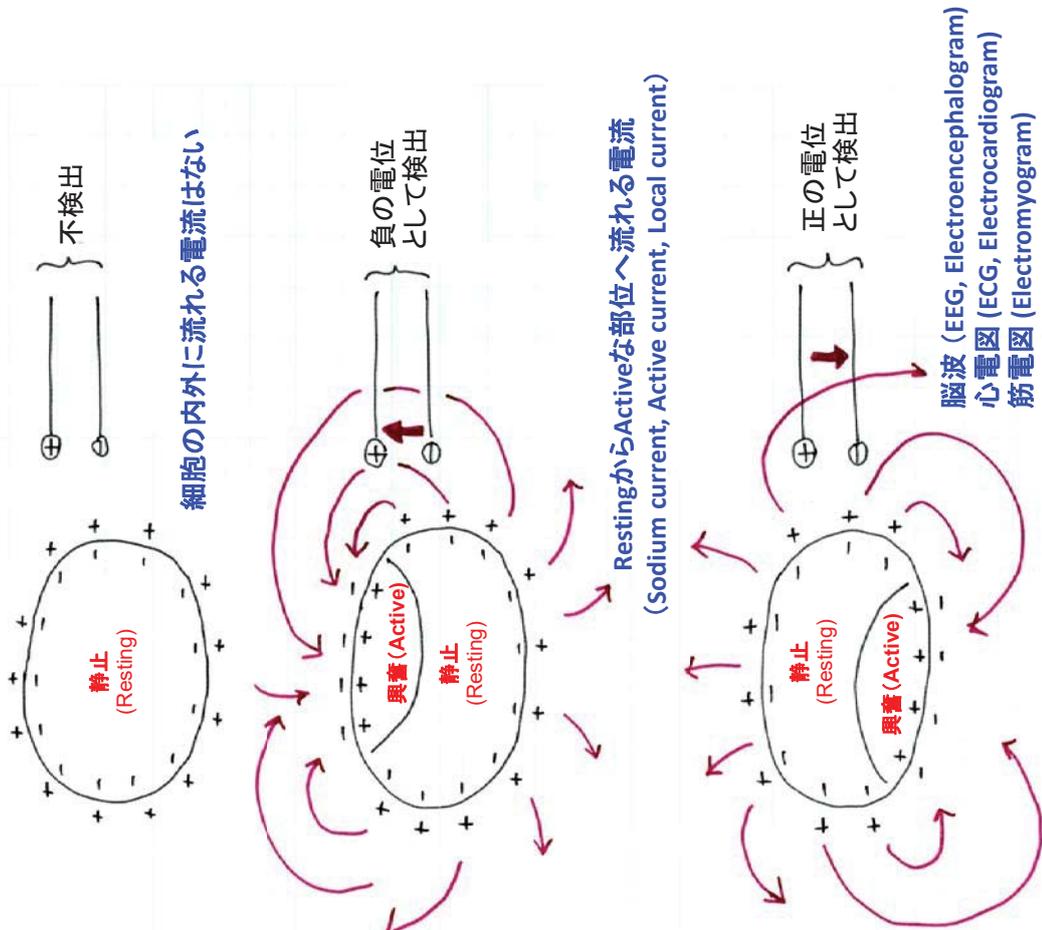
11



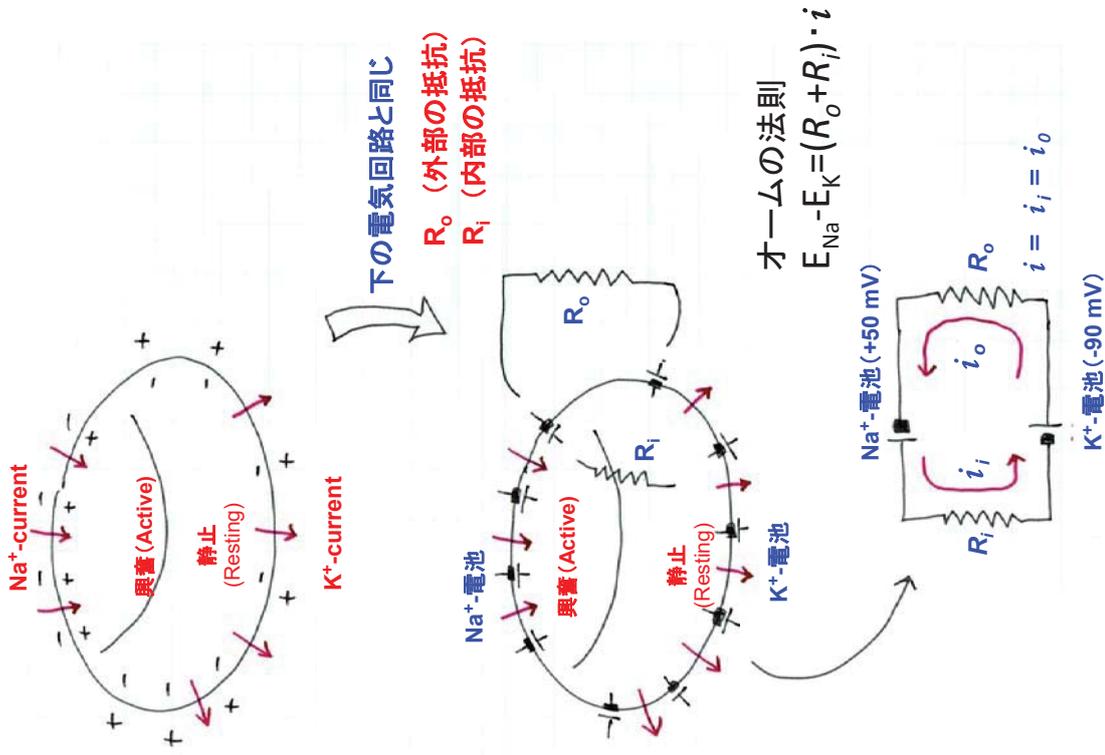
興奮を記録する様子
(設定はヒトを使った実験と同じ. 結果も同じか?)

12

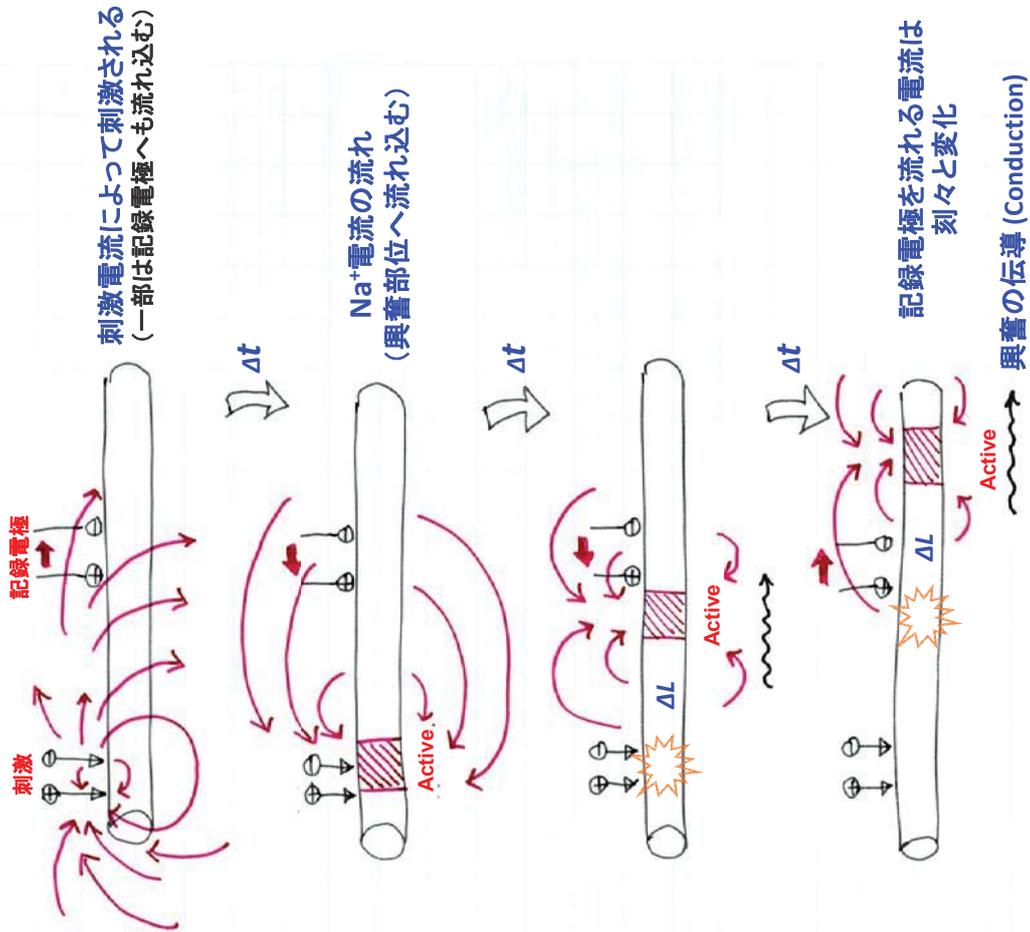
① 興奮する細胞の周りで流れる電流を測る (細胞外記録法)



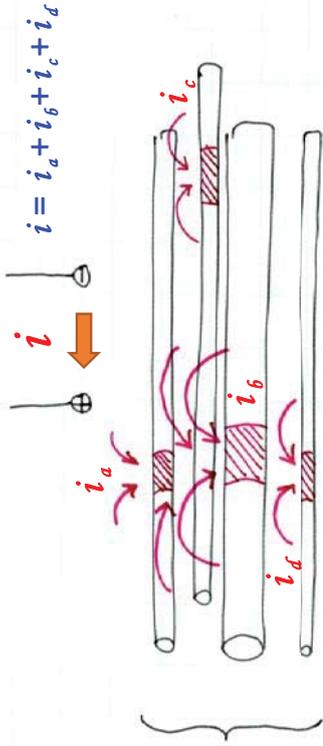
② 興奮する細胞の周りで流れる電流の等価回路



③ 興奮部位が移動するとき(興奮の伝導)



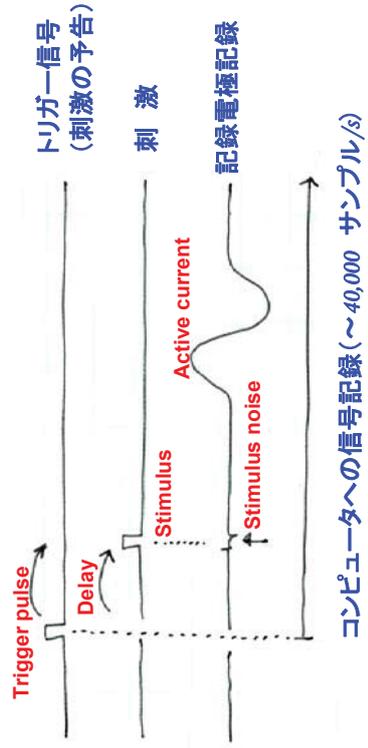
④ 多細胞系では



※全電流の総和が観察される

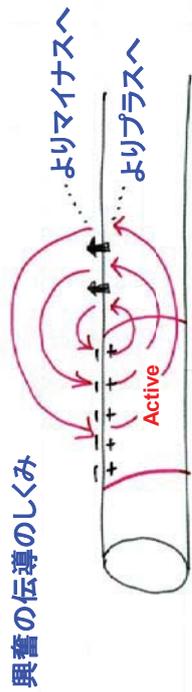
※電流値は
神経繊維の数
神経繊維の太さ
神経繊維と電極間の距離
時間的な加算・減算
で決まる

⑤ 速い現象を記録する方法



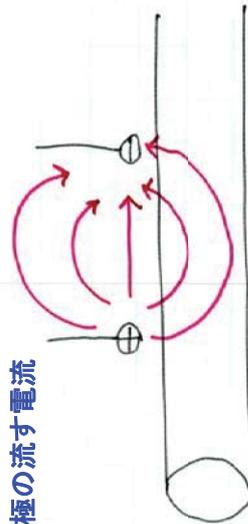
⑥ 電気刺激で起こること

... 電位依存性のNa⁺チャネルを刺激する



外向きに流れるNa⁺電流が隣接する膜電位を逆転させる
→ 次の興奮を引き起こす

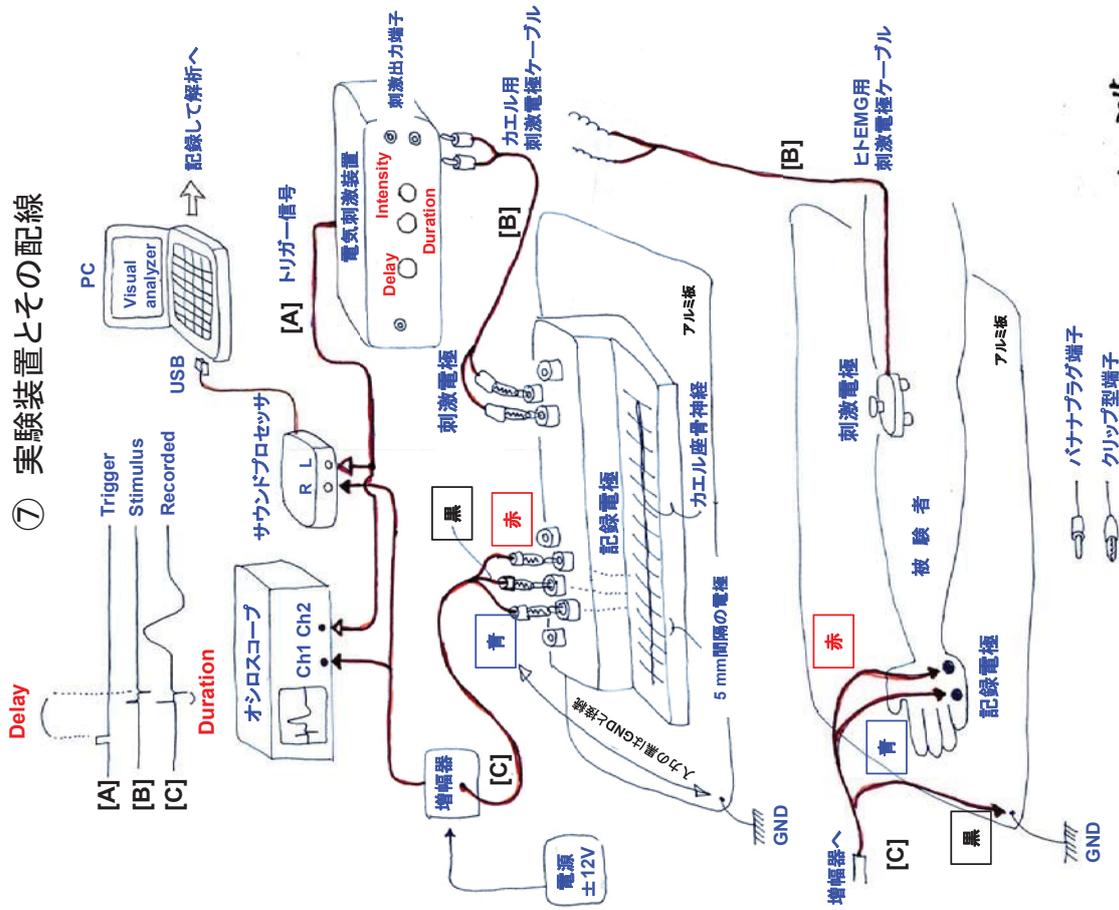
刺激電極の流す電流



刺激電極のまわりの電流によって
→ 次の興奮を引き起こす

Q: 正負、どっちの電極側で興奮が開始するか?

⑦ 実験装置とその配線



S/cain 2015.

興奮の伝導と伝達

A ニューロンの構造

ニューロンは、他のニューロンや感覚受容細胞から興奮を受け取る入力場所としての細胞体や樹状突起、他のニューロンや効果器へと信号を出力するシナプス、その間をつなぐ細長い繊維状の神経軸索の3つの部分からできている。軸索で、まわりを髄鞘（神経鞘）と呼ばれる構造で囲まれたものを有髄神経繊維、囲まれていないものを無髄神経繊維と呼ぶ。有髄神経は、3~120 m/sもの速い速度で興奮を伝えることができるのが特徴で、ヒトの体では感覚神経や筋を動かす運動神経の繊維として多く見られる。これに対して無髄神経は0.3~1.5 m/sのゆっくりした速度で信号を伝え、自律神経系や温度・痛みの感覚神経に見られる。神経繊維は、大変長いものもあり、例えば、ヒトの足先の筋を収縮させる運動神経の場合、1 mもの長さを持つ。体の中のある決まった箇所から他の箇所へと、決まった一定の方向に、遠く離れた所であっても、高速に正確な情報を伝える重要な役割を持つ。

B 興奮のしくみ

ニューロンの興奮は、細胞膜に沿って発生する電気的な信号として伝える。その信号は、細胞膜が静止状態と興奮状態との2つの状態をとることによって発生する。静止状態では、細胞膜の外側を基準として細胞膜の内側が負の電圧、 $-50\sim-90\text{mV}$ となっている。この電位を静止（膜）電位という。安定した静止電位を発生する上で、細胞内の K^+ が細胞外に比べて多いことが不可欠である。この電位は、細胞の内側にガラス電極などを入れて、細胞膜の表裏で電圧差を測定することで検出することができる。細胞の内外で測定できる、このような電位差を、膜電位という。

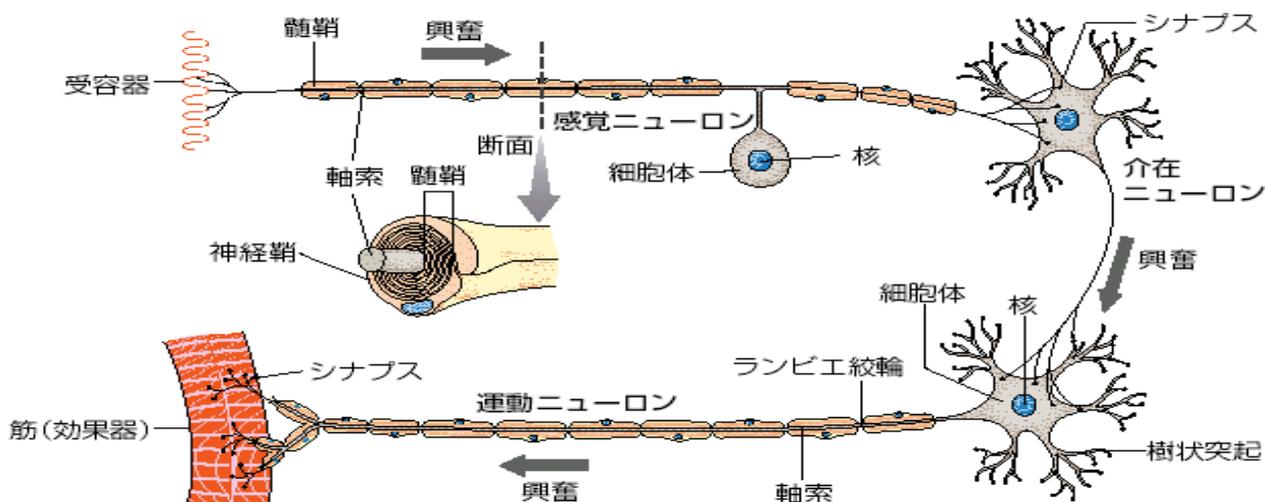


図 いろいろなニューロン 樹状突起は、興奮を細胞体の方向に伝える。

ニューロンが、他の細胞からの信号を受け取ったり、あるいは、実験で電氣的な刺激を受け取ったりすると、その部分の膜電位が、瞬間的に負から+30～+60mVに反転する。これが興奮である。この状態は一瞬のもので、すぐにもとの静止状態に戻る性質を持っている。このような膜電位の急速な変化を**活動電位**という。ニューロンが、活動電位を発生させることを神経の**興奮**という。活動電位を発生する上で、 Na^+ が K^+ とは逆に細胞内で少ないことが不可欠である。

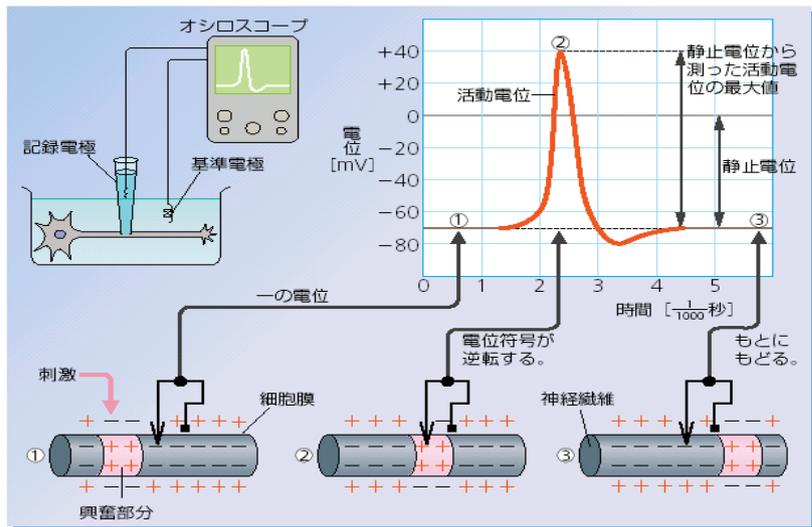


図 活動電位と興奮（神経線維を左から右へ興奮が伝わる時）

C 膜電位が発生するしくみ

膜電位の変化は、ニューロンの細胞膜が持っている特別なしくみ、 Na^+ 、あるいは、 K^+ チャネルによって行き起こされる。イオンチャネルは、特定のイオンだけを通す状態（**開状態**）と、通さない状態（**閉状態**）の2つの状態を高速で行き来する性質をニューロンの膜に含まれるタンパク質である。膜電位を発生するしくみはイオンの拡散エネルギーが原動力となっているので**拡散電位**と呼ばれている。

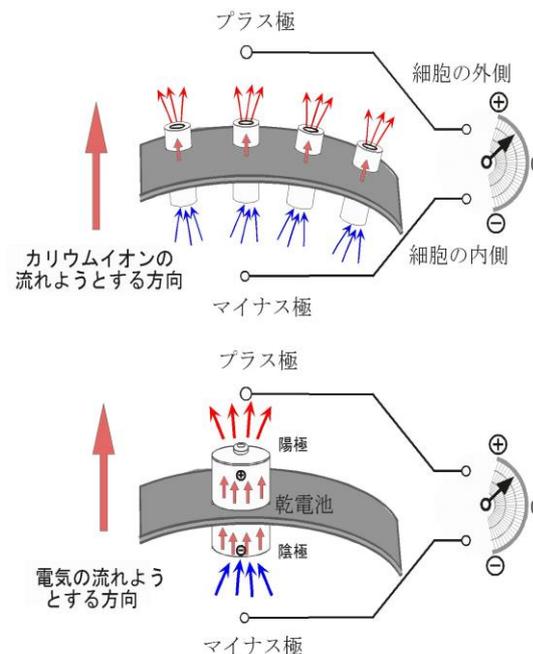
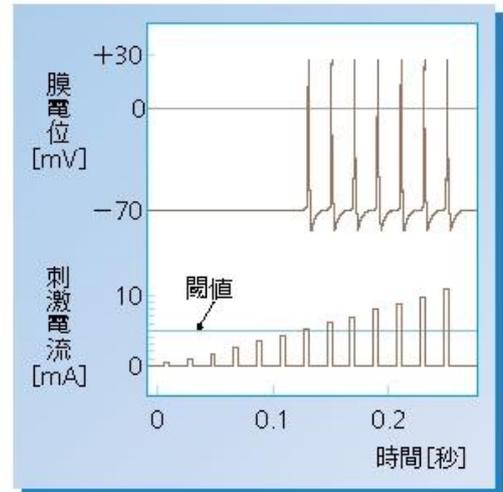


図 膜電位発生のしくみ

ニューロンの内側と外側とでは Na^+ や K^+ の濃度が違い、濃度の高い方から低い方へとイオンは自然に拡散しようとする。例えば、 K^+ だけを通すチャネルだけが開くと、このチャネルは K^+ を濃度の高い細胞の内側から外側へと通そうとする。このイオンの流れが細胞の外側を正、内側を負とする膜電位を発生させる。これが静止電位を発生するしくみである。逆に活動電位を発生するときは、 Na^+ チャネルだけが開いて、 K^+ とは逆に、外側から内側へ向かって流れている状態である。チャネルの開閉を高速で切り換えるしくみがあるのでニューロンは 1/1000 秒もの速い速度で興奮・静止状態を切り換えることができる。

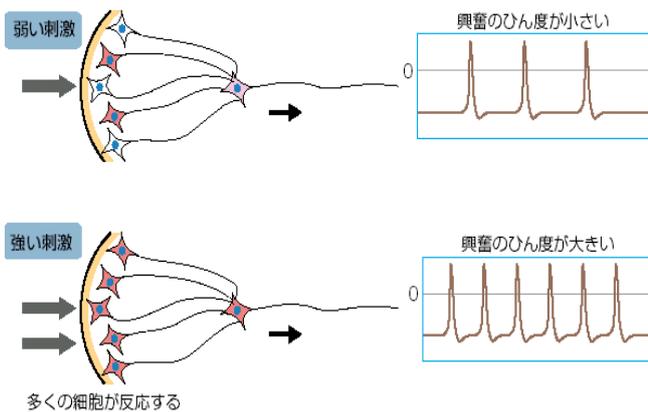
D 全か無かの法則

1個のニューロンに着目してその膜電位の変化を見ると、右図が示すように、ニューロンに与えられた刺激の強さが、ある強さ（**閾値**）以上ないと興奮は発生しないことがわかっている。また、閾値よりも大きな刺激が来ると、非常に短い時間だけ Na イオンチャンネルが開状態になり決まった大きさの活動電位が発生する。活動電位の振幅は、刺激がどんなに強くても、一定で大きさは変化しない。このような性質を、**全か無かの法則**という。



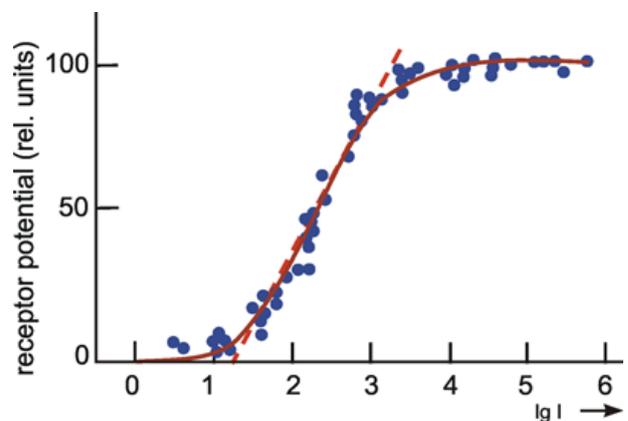
E

▲図17. 刺激の強さ(下)と活動電位の大きさ(上)



刺激の強さの情報

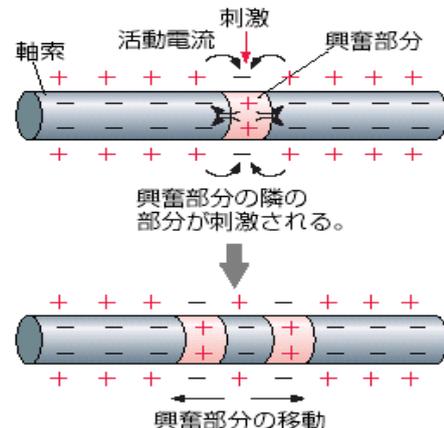
感覚器の受容細胞の発生する受容電位は、多くの場合、刺激の強度が閾値を越えて徐々に増すと、段階的に変化することが知られている。その情報はどのように伝わるのであろうか。感覚神経は、他のニューロンと同じように、すべて全か無かの法則にしたがって同じ大きさの活動電位を発生する。しかし、刺激の強さが大きいと、閾値をこえて反応する感覚神経の数がふえる。さらに、1つ1つの感覚神経繊維が発生する活動電位のひん度も高くなり、その結果、伝わる信号の頻度も増えることになる。信号の強さは活動電位の振幅ではなく、ひん度の違いとして脳へ伝えられる。



F 神経繊維に沿った興奮の伝導

軸索の一部が興奮すると、その場所と隣接した静止状態の部分とは、逆方向の電位が生じ、電位の高い方から低い方へ向かって活動電流が流れる。この電流は静止している場所に閾値をこえる刺激を与え、そこ

軸索の途中を人為的に刺激した場合



に活動電位が発生させる。この興奮はさらにその隣にある静止部分を次々に刺激する。このようにして、興奮は同じ細胞の膜に沿ってドミノ倒しのように順々に伝わってゆくのである。これを**興奮の伝導**という。

興奮がすでに終わった部分では、1~2/1000 秒の短い間、刺激に反応できない状態（**不応期**）になる性質を持っている。このため、興奮が一旦終了した箇所へ逆方向に興奮は伝わることはない。このようなしくみで刺激を受けた場所で発生した活動電位は一方通行にしか伝導しない。

軸索のまわりが**髄鞘**に囲まれている**有髄神経繊維**では、髄鞘が絶縁体の役割を果たすため、活動電流は隣の絞輪部まで長い距離に渡って流れる。そのため興奮はとびとびに跳躍するように伝導できる。これを**跳躍伝導**と呼ぶ。無髄神経繊維に比べて、有髄神経繊維では速い伝導速度となるのは跳躍伝導が起こるためである。無髄神経繊維でもイカやミミズの持つ太い神経（巨大神経軸索）は伝導速度が速い。これは、太い軸索の内部で活動電流が流れやすいためである。

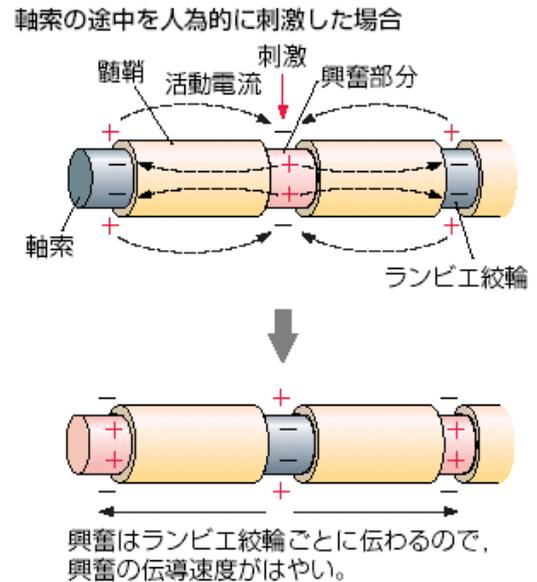


図 跳躍伝導のようす

F ニューロン間の興奮の伝達

ニューロンの間では、アセチルコリン、ノルアドレナリン、アミノ酸などの化学物質のはたらきによって、シナプスを使って隣のニューロンへと伝えられる。これを**興奮の伝達**という。これらの化学物質は**神経伝達物質**と呼ばれ、神経終末の中の小さな袋（**シナプス小胞**）の中に含まれていて、ニューロンの細胞体から末端までゆっくりと運ばれて蓄えられている。

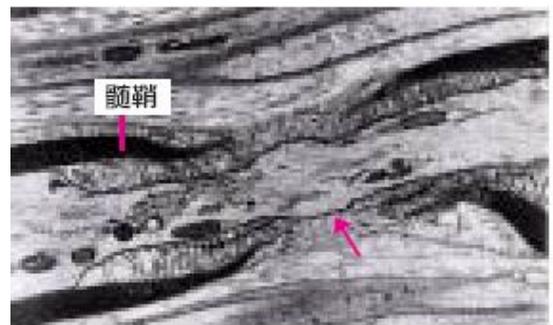
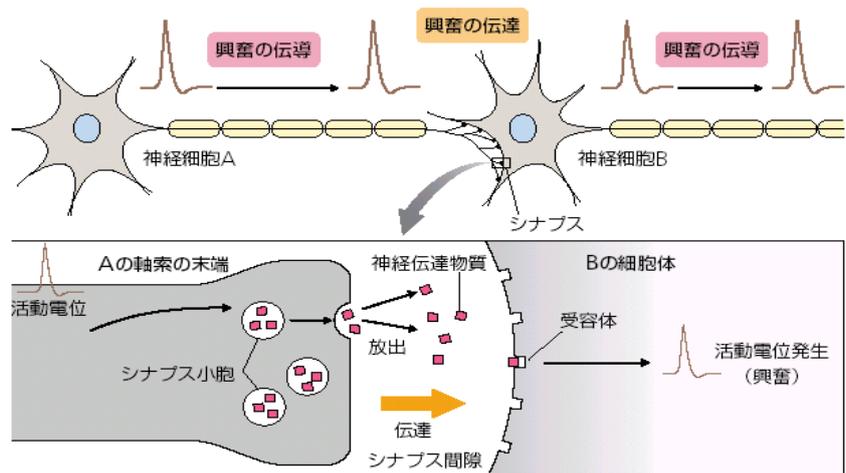


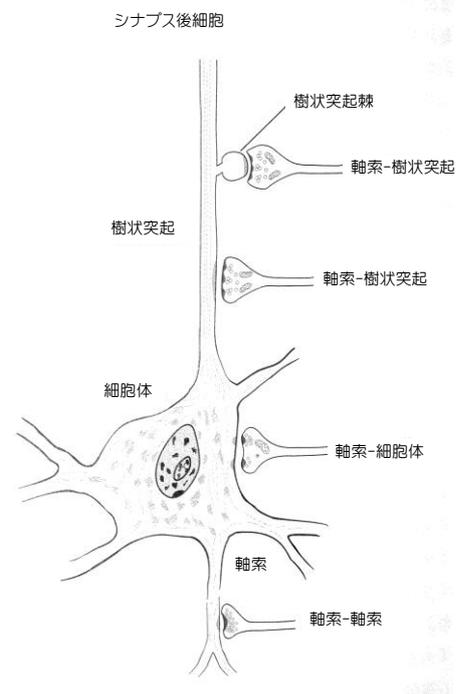
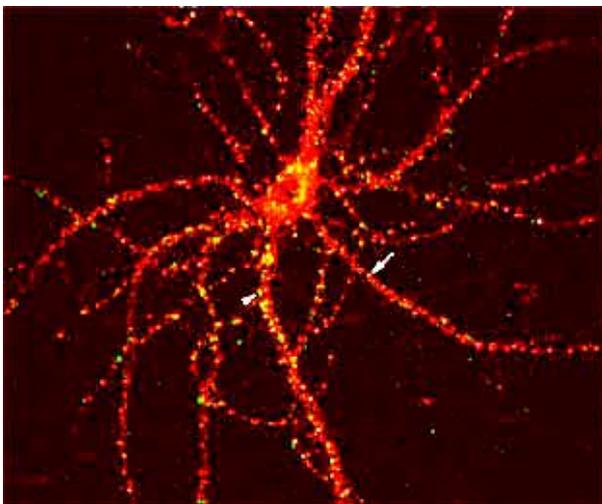
図 ランビエ絞輪 (約 7500 倍)

神経の興奮が神経繊維の終末まで伝わると、シナプス小胞内部の伝達物質は**シナプス間隙**と呼ばれるせまい隙間に放出される。隣のニューロンには、決まった神経伝達物質だけに結合し、正の膜電位を発生させる受容体がある。受け取った神経伝達物質の量が多いと、大きく膜電位



が変化し、繰り返して活動電位が発生するようになるので、隣のニューロンへは強い信号として伝えられる。分泌された神経伝達物質は、分解されたり、神経終末で再び回収されたりして、興奮の伝達は終了する。神経伝達物質が放出される場所は、神経終末から隣のニューロン側への一方向だけなので、興奮の伝達は、ある決まった方向にしか起こらない。

興奮を伝えるシナプスとは逆に、隣接する細胞の興奮を抑えるような神経伝達物質を持つシナプスも知られている。シナプスは、ニューロンの樹状突起の他に、細胞体や軸索にも観察される。特に、脳や脊髄の中ではニューロンは、興奮を伝えたり抑えたりするシナプスを複雑に組み合わせてネットワークをつくり、高度な情報処理を行うことができる。1つのニューロンは平均して 2,000 個のシナプスを持つと見積もられていて、中枢神経の中のニューロンの数が 10^{11} 個あると考えられているので、シナプス接合の組み合わせは膨大な数となる。脳や脊髄の中で行われる複雑な処理はこの様なシナプスのしくみによる。また、私たちの馴れや記憶などは、以前に起こった興奮がシナプスの神経伝達の効率を少しずつ変化させることで、起こると考えられている。



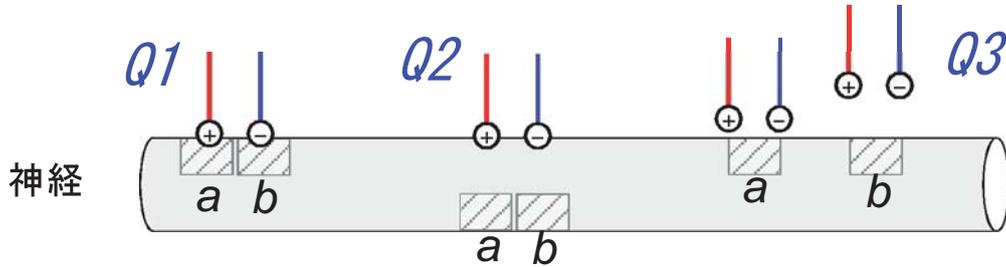
(右図) 様々なシナプスの構造。

(左図) 視床下部のニューロンのシナプスが見えるように染色した試料。

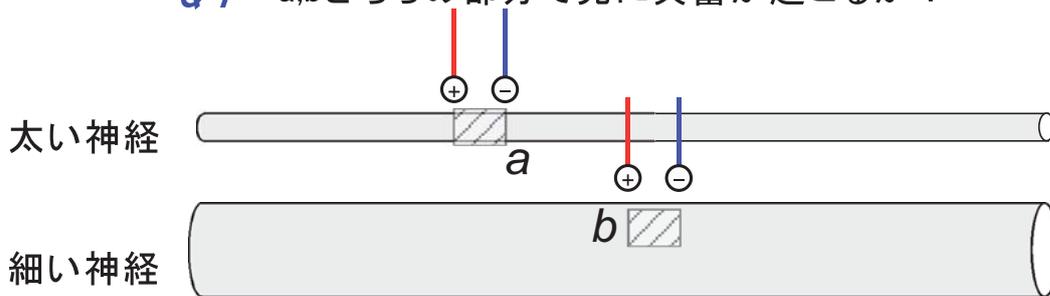
1 個のニューロンへ多数の入力があることがわかる。

Quizを考えて神経を理解

a,bどちらの部分で先に興奮が起こるか？

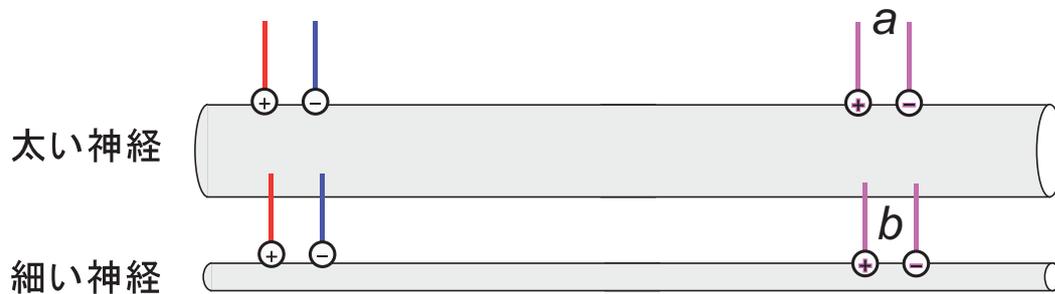


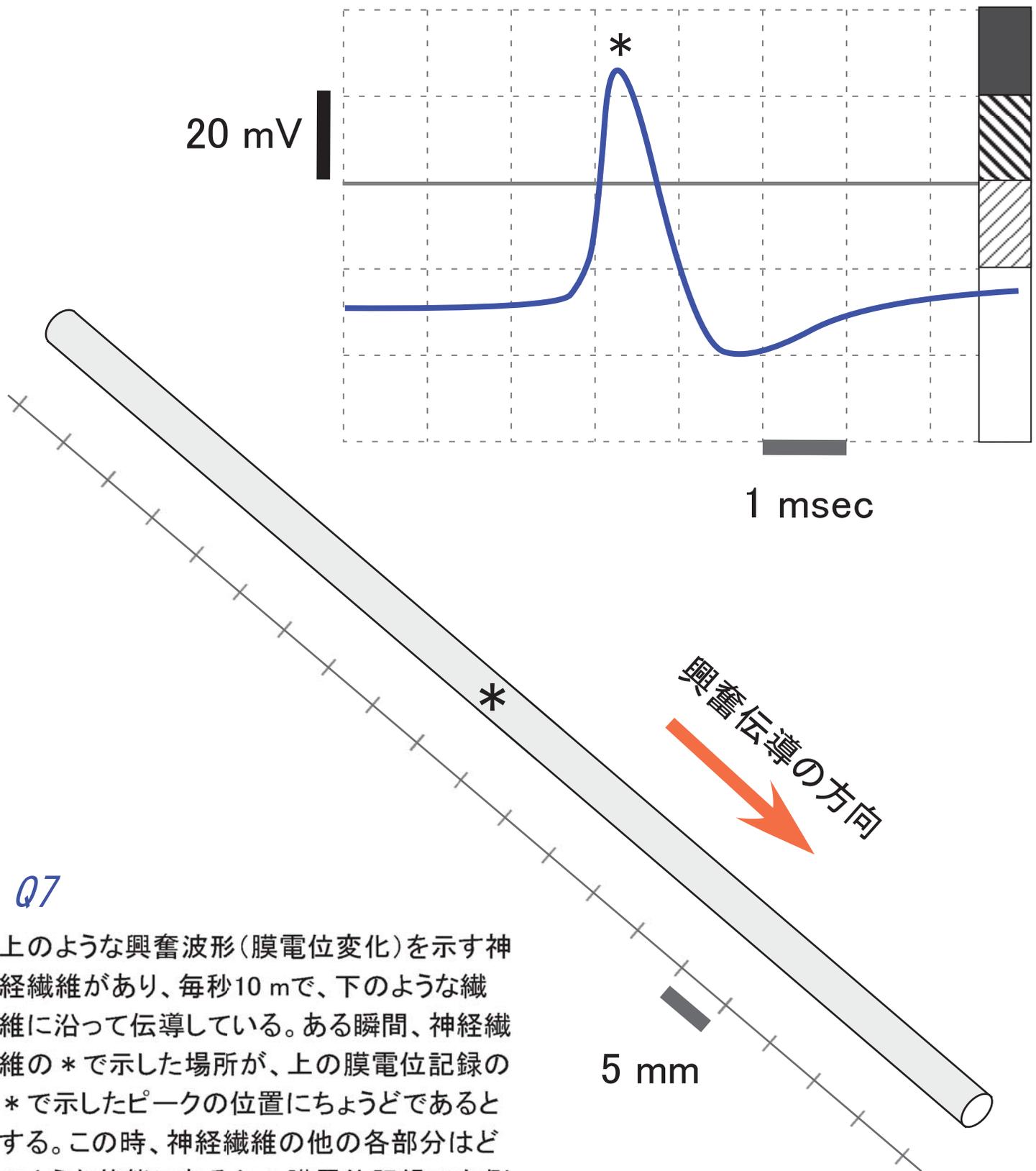
Q4 a,bどちらの部分で先に興奮が起こるか？



Q5 a,bどちらの部分で先に興奮が観察されるか？

Q6 a,bどちらで観察される電位変化(振幅)が大きいか？





Q7

上のような興奮波形(膜電位変化)を示す神経繊維があり、毎秒10 mで、下のような繊維に沿って伝導している。ある瞬間、神経繊維の*で示した場所が、上の膜電位記録の*で示したピークの位置にちょうどであるとす。この時、神経繊維の他の各部分はどうのような状態にあるか？膜電位記録の右側に示してある■、▨、▧などの表記方法で区域をのの違いを表示すると、どのようになるか？

レポート（実験C）の記述方法

表紙

表題、氏名、学生証番号を明記する。実施した実験の中から、一週間で解析を完了できるわかりやすいテーマを厳選して絞り込み、その内容を端的に示すことができる表題とする。

<例：ウシガエル座骨の神経伝導速度の対するアルコール麻酔の効果>

要旨（Abstract）：論文全体を200～400文字で簡潔にまとめたもの。導入となる文、実験で解決したい内容、どのような実験をしたか、結果と結論のすべてを示す簡潔な文章が望ましい。

<例：アルコールは、神経細胞の膜にして麻酔作用を示すことが知られている。この麻酔作用は、神経繊維の示す電気的な興奮伝導の時間経過を遅延させることが主な原因と考えられるため、ここでは、特に伝導速度の変化に着目して、アルコールの効果を調べた。材料は、ウシガエル成体から単離した長さ150 mmの座骨神経を0～30%アルコールで5分間処理したものを使い、電気刺激後の時間的な遅れから伝導速度を計測した。その結果、コントロールに対して、観察される興奮波形の振幅にはほとんど差はなかったが、30%アルコール処理で伝導速度が20%減少する結果となった。興奮波形も同様の時間的な遅延現象が見られたために、この伝導速度低下の主な要因は、発生する活動電位の経過時間の遅延であると結論した。321文字>

2 ページ目以降

導入（Introduction）：実験の着想、解決したいこと、なぜ、それを疑問に思ったのか、あるいは、解決方法の提案、仮説などを説明する。

<例：アルコールは、高濃度では脱水効果を示し殺菌作用があるが、低濃度では細胞の膜に作用して、Naチャンネルなどの神経活動に関わる膜タンパク質の活動を抑えると考えられる。単離した神経を、低濃度のアルコールを含む生理食塩水にさらし、その後、電気的な反応を調べることで、直接をアルコールの効果を確認できることを期待し、本実験を行うことにした……>

方法（Materials & Methods）：実験の方法と手順を記述する。材料の準備方法も記載する。カエルの座骨神経のように、実習書に詳細な記載がある場合、その箇所を引用する（ページ数を明記する）のでもよい。1つ1つ実施した実験手順、記録方法、解析方法などを、段落別にして詳しく文章で記述する。実習書にない記述、温度、被験者の選択、刺激や記録の具体的な条件等は必ず明記する。

結果（Results）：上で書いた実験の方法や手順に沿った形で結果を記載する。どの方法を使って得られた結果であるかは、の文書を抜粋した短い文章で繰り返して記述すると読みやすい。一般には、得られたデータをすべて示す必要はなく、全体を代表するような典型的なものを1～2例示し、どのような解析を行ったか記述する。結論に直接結びつくような重要なデータは、グラフや表に示し、その結果が何を示すかの説明を、各図表、あるいは、本文中に示す。実験方法や結果の種類ごとに複数の段落に分けて記述することが望ましい。

注意点

- ・平均値を計算するときは、有効数字を意識すること、また、標準偏差とデータ数を必ず付記すること。

考 察 (Discussion) : 上で書いた実験結果の1つ1つに、解釈を加える。導入で述べた実験開始の動機、追究したかったこと、仮説に対応させた形の記述とする。結果では、明らかになった事実を記述するにとどめるが、ここでは、その事実から推定・推論できる事柄や、さらに詳細や不明な点を明らかにしてゆく上で必要になってくる観察、追加すべき実験、実験の改善すべき点、そこから予測できることなども記載してよい。考察の段落では、一番最後に全体の総括、結論を記載することが望ましい。

注意点：論文を書き上げる順序（導入を先に書きはじめるのは避ける）

表題→ 方法→ 結果→ 考察→ 導入→ 要旨、の順序に書き上げてゆくと書きやすい。