

6 筋電図 Electromyography (EMG)

a. 目的

本実習項目は、神経・筋疾患の診断の1つに広く臨床応用されているので、正確にその導出方法を取得し、生体の電気現象とノイズとを明確にする。また記録波形を理解するとともにその発生機序についても考察する。具体的には以下のことについて学習する。

- 1) 筋電図から収縮と弛緩、伸筋と屈筋、主動筋と拮抗筋、同名筋と協力筋のそれぞれの関係を観察、理解する。
- 2) 等尺性収縮と等張性収縮の相違、関節の動きと筋収縮との関係を学ぶ。
- 3) M波とH波を記録し、それらの発生機序について考察してからこれが筋自体の疾患の検査だけでなく、中枢神経系の疾患の診断にもなっていることを理解する。
- 4) 運動神経と感覚神経の伝導速度の記録方法、伝導速度、それらを変化させる因子について学ぶ。

b. 解説

1) 骨格筋の種類

骨格筋は白筋と赤筋に分けられる。白筋は素早い運動を、赤筋はゆっくりとした持続的な運動を司り、

前者は男性的、後者は女性的の筋肉に例えられている。

また、個々の筋線維は収縮の特性により次の3種に大別される。

1. FF線維・・・収縮速度が速く、疲労しやすい線維で、白筋に対応する太い線維
2. FR線維・・・収縮速度が速く、疲労しにくい線維で、FFとSの中間の性質をもつ線維
3. S線維・・・収縮速度が遅く、疲労しにくい線維で、赤筋に対応する細い線維

さらに、筋線維を支配する運動ニューロンも、相動性運動ニューロン(phasic motoneuron)と持続性運動ニューロン(tonic motoneuron)の2つの種類に分けられる。

2) 筋電図の種類

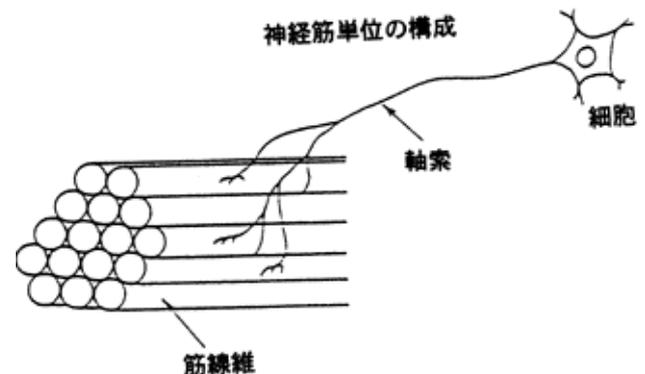
一般的によく行われている主な筋電図の種類を挙げると

1. 動作学的筋電図(記録に表面電極を用いる場合、表面筋電図とよぶこともある。)
異なる筋の活動電位を同時記録し、そのあり方から正常あるいは異常運動のパターンを分析したり、随意的な筋の伸展に対する筋の放電パターンから筋トーンの状態を知る。
2. 普通筋電図
針電極を用いて運動単位の状態を知ることができる。局所的な診断が可能な反面、筋に刺入した針電極が収縮により常に折れる危険性が伴うため、特に注意を要する。
3. 誘発筋電図
間接的に皮膚表面上から知覚神経あるいは運動神経に電気刺激を加え、それに対する反応をみる。それら末梢神経の伝導時間から経路の違いなどを知る。
4. 単一筋線維筋電図
単一筋線維活動電位の状態から神経筋伝達機能、筋線維の状態、運動単位、筋線維密度などを知る。

本実習項目では1. 3. の筋電図について観察、記録する。

3) 誘発筋電図の発生機序

中枢神経系（脳幹または脊髄）からの遠心性インパルスが 運動ニューロン（ -motoneuron ）(運動ニューロンには 運動ニューロンと 運動ニューロンがあり、前者は錘外線維 *extrafusal muscle*、後者は錘内線維 *intrafusal muscle* を支配している) を介して骨格筋に伝えられ、筋収縮が起こる。1 個の 運動ニューロンは末端で枝分かれして、下図のように 10 数本から 1000 本以上の筋線維とシナプス結合しているため、ある 運動ニューロンが興奮すればその支配下にある筋線維は同期して活動する。その活動により周辺部に大きな電場がつくられ、これを誘導したのが筋電図である。



誘発筋電図における M 波は皮膚表面から 運動ニューロンの軸索を刺激することにより、興奮が神経-筋接合部（ *myoneural junction* ）に伝わって、この部位では神経伝達物質 *neuro-transmitter* であるアセチルコリンが放出され、終板電位（ *endplate potential EPP* ）を発生して、筋肉（錘外線維）に活動電位を発生させたものである（実習項目 6.筋細胞の細胞内電位測定の解説を参照）。H 波は *GIa* 線維（求心性線維）の興奮により、脊髄でシナプスを越えて 運動ニューロンに *monosynaptic* な EPSP が生じて、活動電位を発生させ、それが神経線維を伝搬し、神経終末部から終板を越えて筋肉に活動電位を発生させ、それを導出したのである。このように M 波および H 波の現れ方には特徴がある。すなわち先に潜時の長い H 波が、次いで潜時の短い M 波が出現し、M 波の出現に伴い H 波は徐々に減衰し、最終的には M 波だけになる（図 4B 参照）。その原因は、神経線維の刺激に対する閾値や、神経における興奮伝達の性質である不応期（ *refractory period* ）さらに神経インパルスの衝突現象（ *collision phenomenon* ）などが考えられる。

c. 実習をスムーズに遂行するにあたって！

1) 全員が被験者になって体験すること。

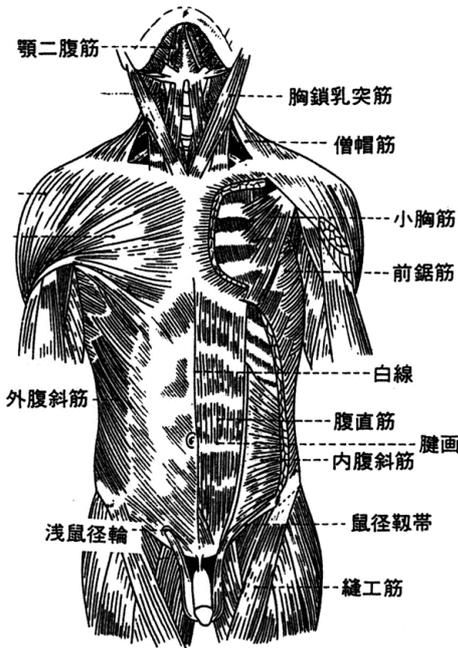
被験者は四肢の筋が容易に露出できる服装をする。例えば半袖シャツ、短パンなどを着用し、女子の場合は特にストッキングは着用しないこと。即ち、膝の上部が容易に露出できるようにしておく。

2) 三人が組になり、被検者、筋電計を操作する人、導出した記録紙へ記録条件などを記入する人にそれぞれ分担しておくことよい。

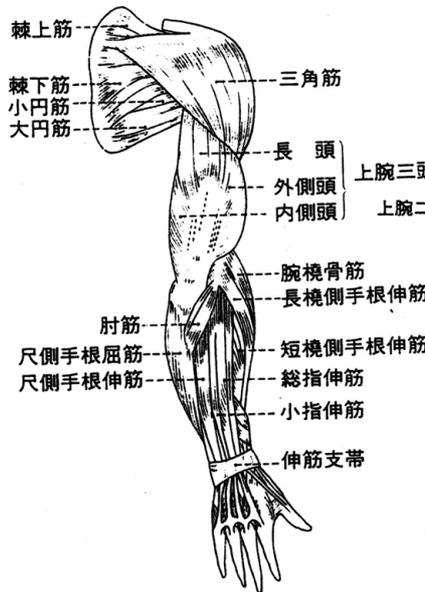
3) 実習前には実習書を熟読し、さらに挿入図や解剖学の本を参考にして筋肉名及びその箇所、神経

の走行部位などを確認しておくこと。また、人体解剖の神経、筋アトラスを持参すると便利である。

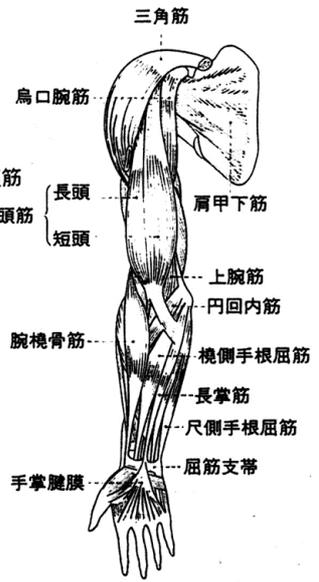
参考資料 1



胸部及び腹部の筋

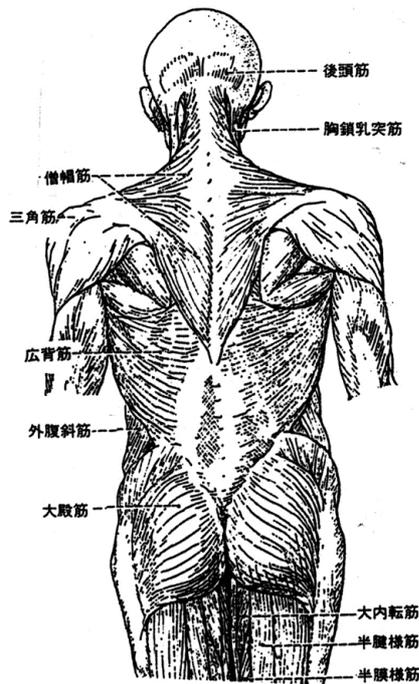


a. 伸側面

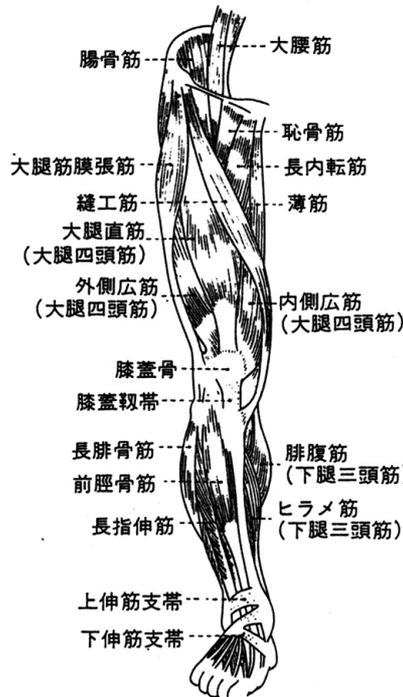


b. 屈側面

右上肢の筋

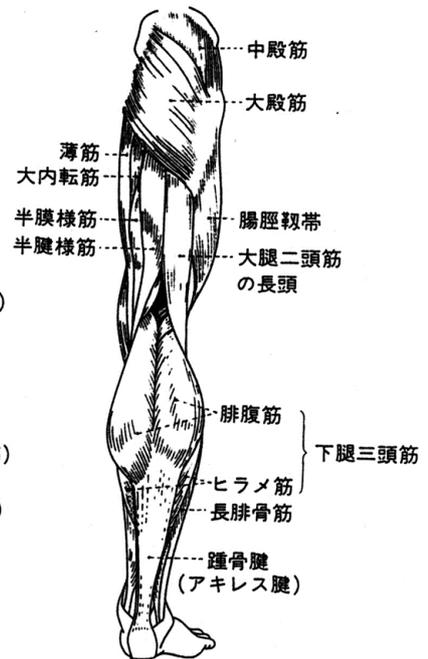


背部及び腰部の筋



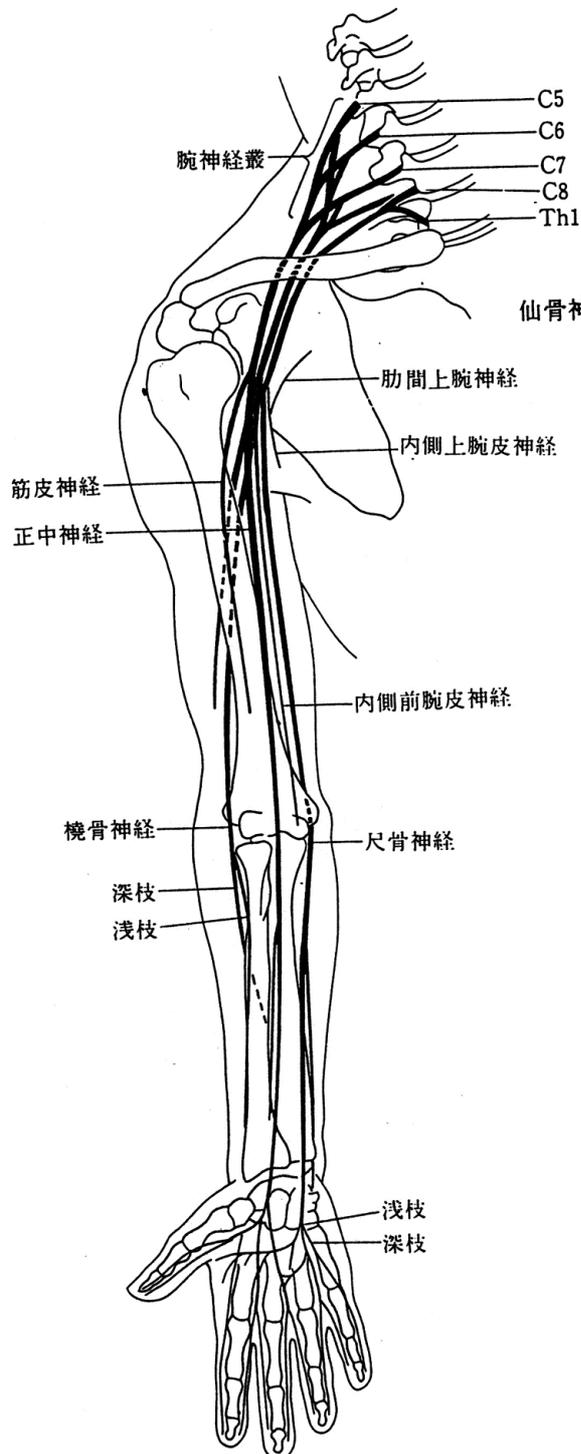
a. 伸側面

下肢の筋

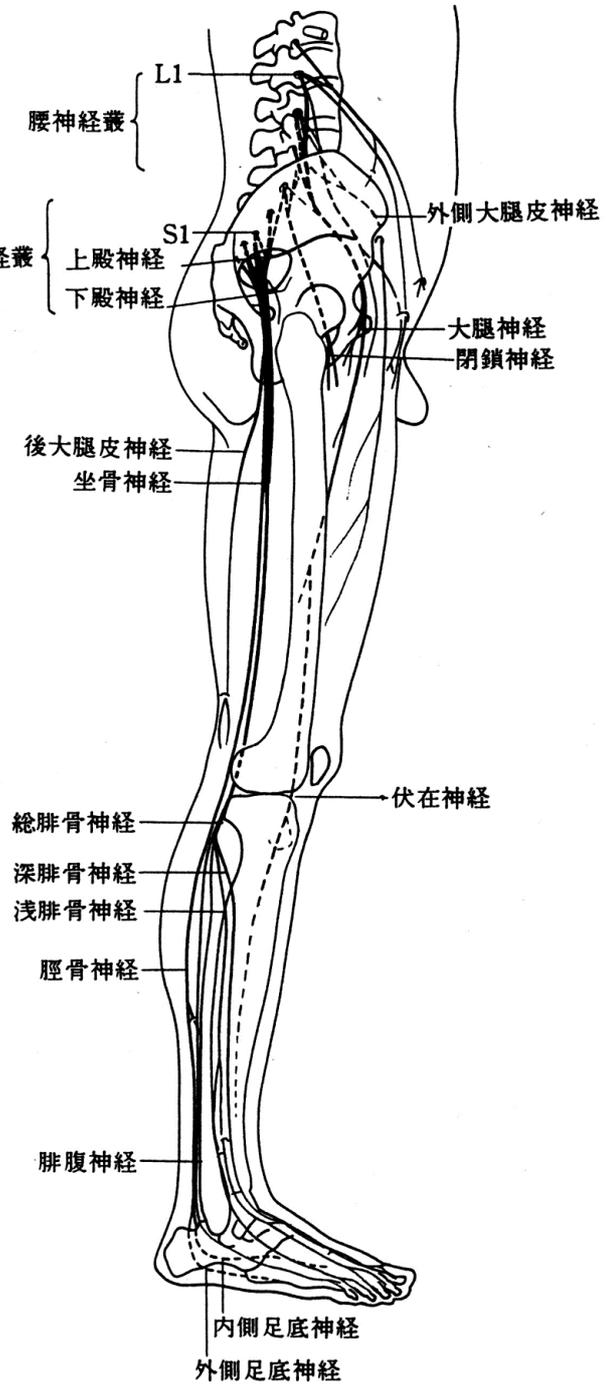


b. 屈側面

参考資料 2



上肢の神経



下肢の神経

1. 随意収縮時の表面筋電極

a. 目的

ヒトの筋を覆う皮膚に表面電極を貼付し、筋線維の興奮による膜電位の変化を貼付した表面電極からその筋の運動単位の活動電位の和を記録する。

b. 実験準備

銀板電極を電極糊を介して、対象の骨格筋（実習では各自拮抗筋または協力筋の筋電図を観察する。例：上腕二頭筋と上腕三頭筋）の表面皮膚上に筋線維の走方向に約 3 cm 隔てて二枚貼り、それぞれ絆創膏等を用いて固定する。この際、皮膚と電極間の抵抗をできるだけ小さくするため、あらかじめ皮膚をアルコール等でよく拭いておく必要がある。妨害電波が混入するので、付近（腓腹筋であれば足首、上腕の筋であれば手首）に不関電極を貼り接地する。本法では、個々の筋を分離して、その活動電流を見ることは困難である。電極付近の筋全部の電流が記録される。

c. 観察事項

表面電極法により、負荷を加えた場合と無負荷の場合（等尺性収縮と等張性収縮）の各運動時の筋電図を観察する。筋活動の強弱と筋電図との関係や主働筋と拮抗筋同名筋と協同筋などのそれぞれの相互関係を観察記録すること。

図 1 - 1. 随意収縮時の表面筋電図 振幅及び持続時間

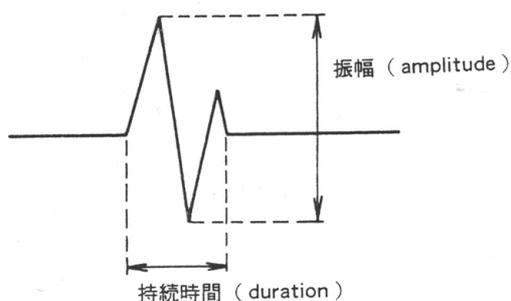


図 1 - 2. 随意収縮時の表面筋電図波形

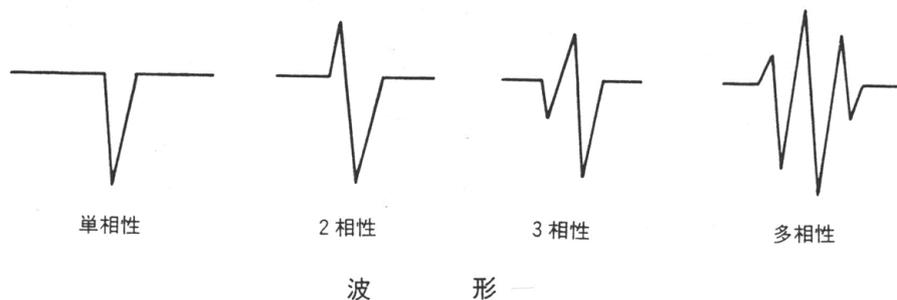
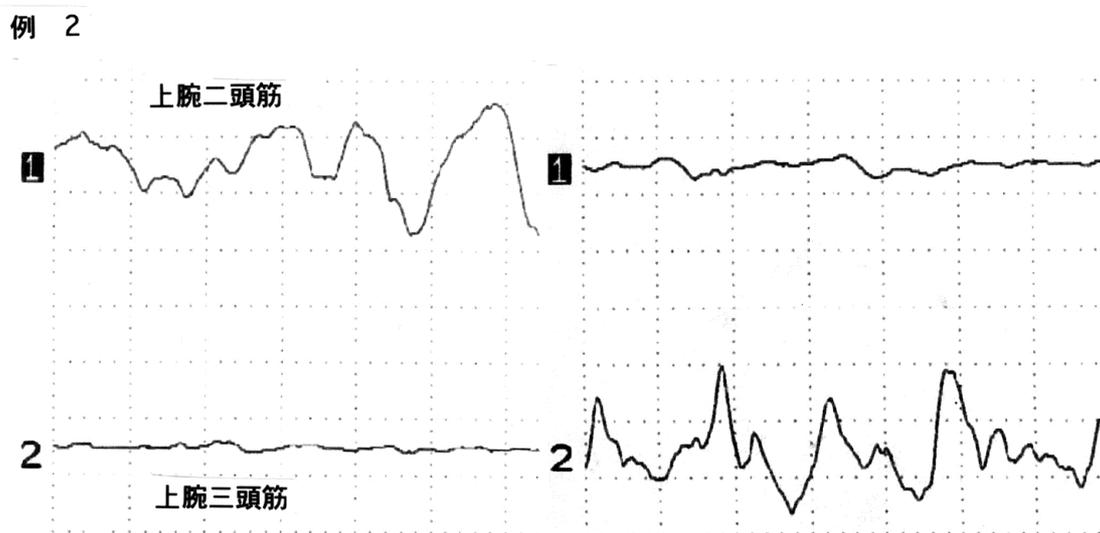
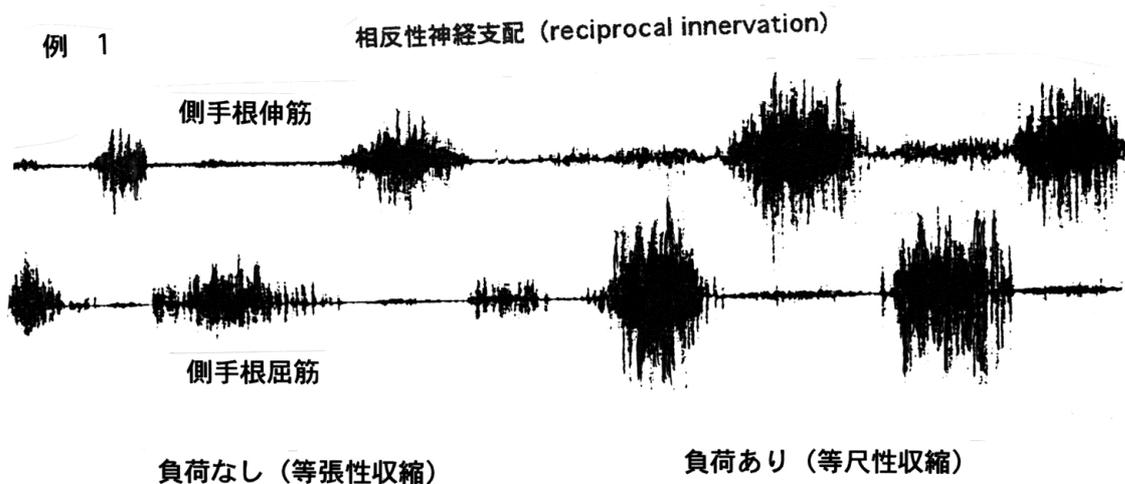


図 2. 表面筋電図の記録例 (過去の実習結果から)



【設問】

- 1) 双極誘導による表面筋電図の導出方法を詳しく説明せよ。
- 2) 等尺性収縮と等張性収縮を比べると、どちらが強い収縮を示すか。またその理由を考えよ。

2. 誘発筋電図によるM波・H波の観察

a. 目的

ヒトの末梢神経（混合神経）を単一の矩形波で電気刺激すると、ある筋では2度収縮し、潜時の短いものをM波、長いものをH波と言う。正常安静時では、脛骨神経（tibial nerve）の膝窩部での刺激によって下腿三頭筋（triceps muscle of calf）からM波とH波が誘発される。M波は運動神経線維が刺激され、そのインパルスによって発生した筋の電気活動によるものであり、応答潜時（latency）は約4～5 msecである。H波はGⅠaが刺激されて、そのインパルスが伸張反射経路を經由して筋を興奮させたために生じたもので、潜時は約30msecである。（図4）

b. 器具・装置

誘導電極は表面電極を用い、下腿三頭筋に貼付する。観察する現象は経過が速いためにブラウン管オシロスコープを用いる。また神経を刺激するために刺激電極と電気刺激装置が必要である。本実習ではこれらの機能を備えたニューロパック（日本光電）を用いる。

c. 実験方法

刺激電極の置き方の注意

- 1) 刺激電極を二頭股筋の腱の間で膝窩中央より10cm程中樞側にあてること。
- 2) 皮下脂肪が多い人は、少し強い刺激を要することがある。
- 3) 筋のよく動いている点に記録電極を置くこと。
- 4) 皮膚表面から神経が走行している部位を探索するので被験者に電気刺激による反応を聞きながら行う

とより早くみつげることができる。

実験の手順（図3d-左）は、まず記録電極（R1, R2）を下腿三頭筋のヒラメ筋上の皮膚面に約3cm離して貼付する。接地電極（E）は刺激電極（S）と記録電極の間に付ける。刺激電極の基準電極（陽極側）は下腿部に、探査電極（陰極側）は膝窩部の脛骨神経上にあてる。

刺激強度は0から始めて漸増する。筋が最もよく収縮する場所を適当な強度の電気刺激を与えながら探し、そこに記録電極を固定する。この刺激に用いる矩形波の持続時間は0.2～1.0 msec（できるだけ短い方がよい）とし、これを約0.8～1.0 secに1回の頻度で繰り返す。刺激装置には定電流刺激と定電圧刺激があるが、各々1mAから2mA、あるいは50Vから100Vくらいで適切な刺激点を解剖学的知識を参考にしながら探査する。

d. 観察・記録

刺激強度を次第に高めていくと、まずH波が現れ、次いでM波が現れる。さらに刺激強度を高めるとM波の振幅は増大し、H波の振幅は逆に減少する（図4B）。刺激強度を更に高めて最大強度にしてもM波の振幅は一定の大きさ以上にはならない。種々の刺激条件におけるこれらの波形の推移をメモリーオシロスコープで観察し、記録する。刺激は耐え難いほど不快なものではないことを各自がよく体験すること。

図3 運動神経伝導速度 (MCV) 検査の刺激部位と記録部位
 (脛骨神経刺激によるM波、H波の記録方法に参考)

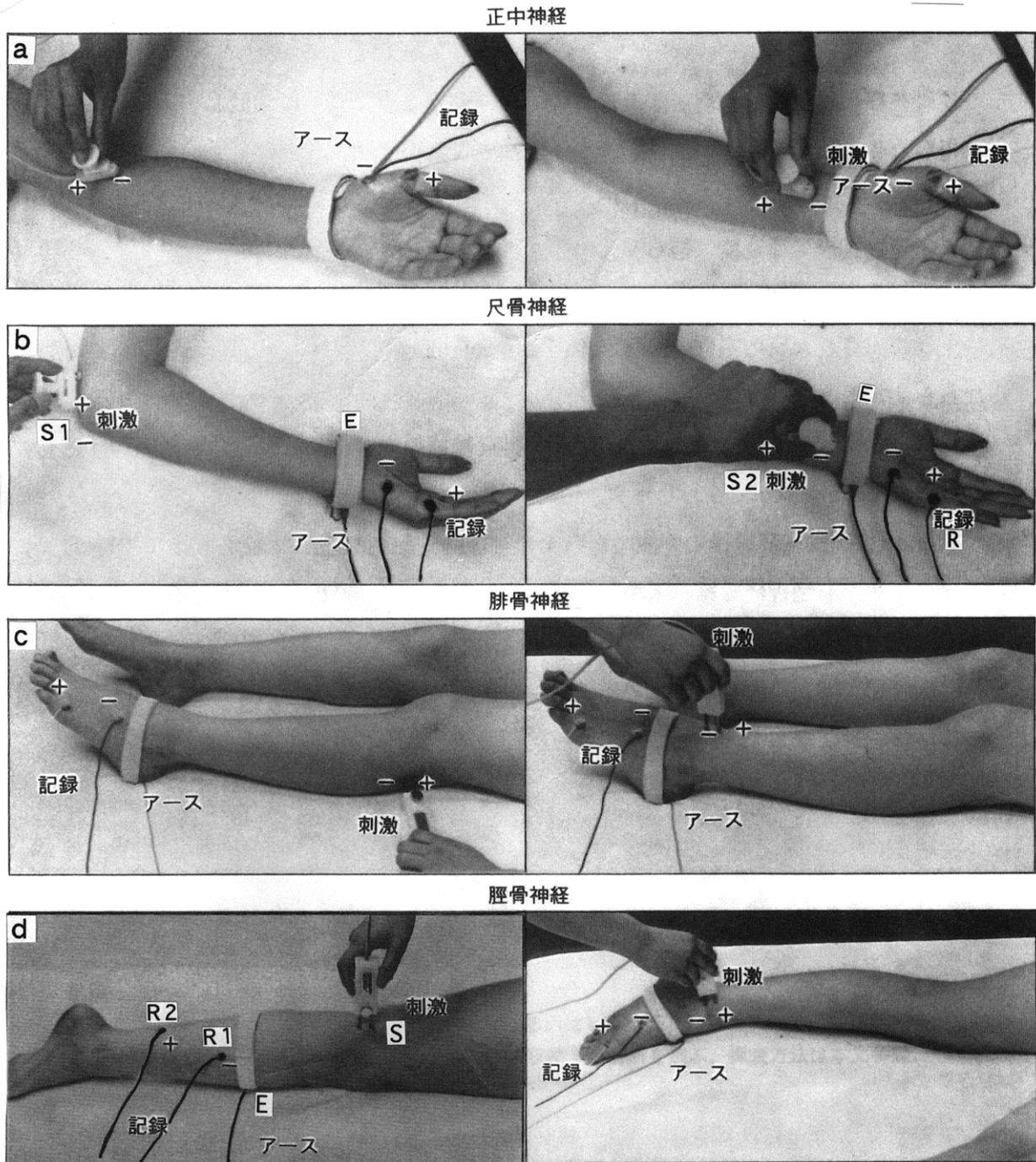
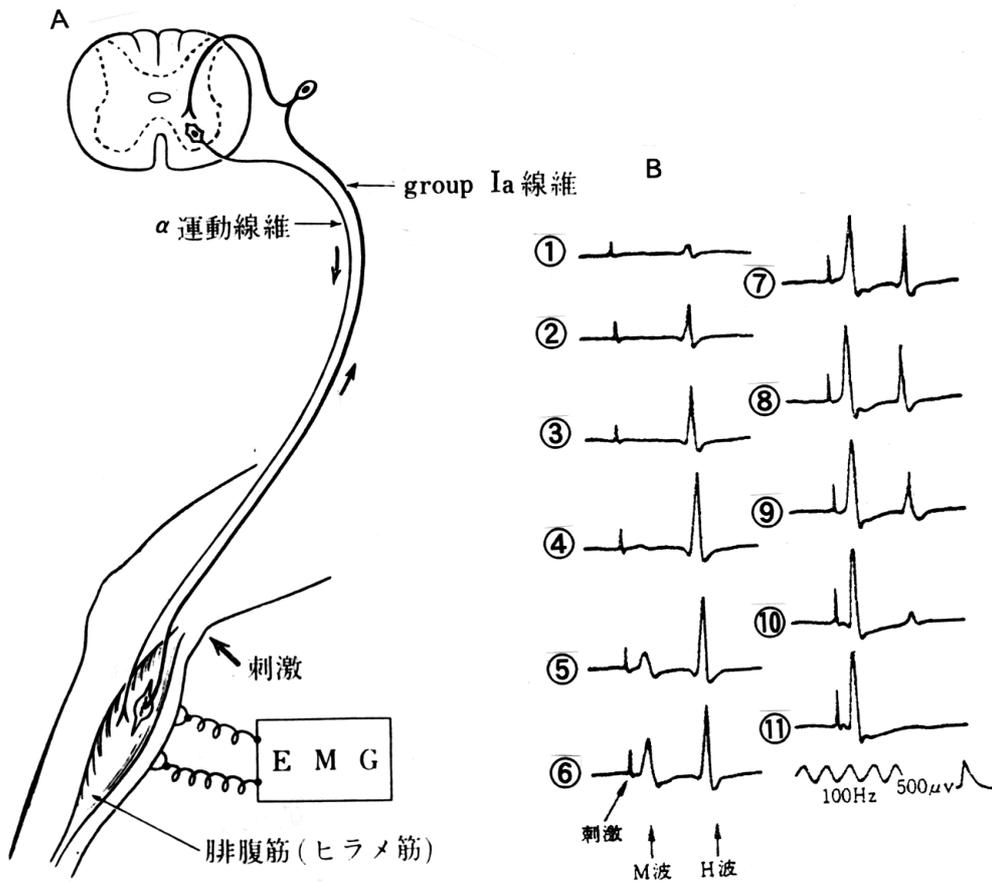


図4 M波とH波の現れ方とその記録



M波とH波の出現

膝窩部で脛骨神経に単一電気刺激を加えると潜時の違う2種類の誘発筋電図M波とH波が観察される。H波は脊髓反射性の波形である。

人の膝窩部で脛骨神経に対する刺激を1~11に強めていき、ヒラメ筋から誘導される電位を記録したものである。弱い刺激ではH波だけが出ているが、やがて消失し、一方、M波は刺激がある程度強まってから現れ、その後振幅を増やして、最高値を示すようになる。

【設問】

- 問1 電気刺激によって筋活動電位が発生する機序について考えよ。
- 問2 H波及びM波を発生する電気刺激の強度による違いを説明せよ。
- 問3 H波を発生する伸張反射回路及びM波の生ずる経路を描記せよ。
- 問4 問3の模式図から、刺激強度を高めるとM波が現れ、M波が大きくなるとH波が小さくなる機序を考えよ。

3. 誘発筋電図による末梢運動神経伝導速度

MCV (motor nerve conduction velocity)

a. 目的

ヒトの末梢神経を皮膚上においた表面電極で刺激し、誘発されたM波の潜時と距離を測定することによりその運動神経の伝導速度を測定する。これはその運動神経線維（線維）の最大伝導速度を表す。臨床的にはおもに針筋電図との併用により末梢神経障害（neuropathy）の診断（傷害部位及び性質の診断）に役立つ。

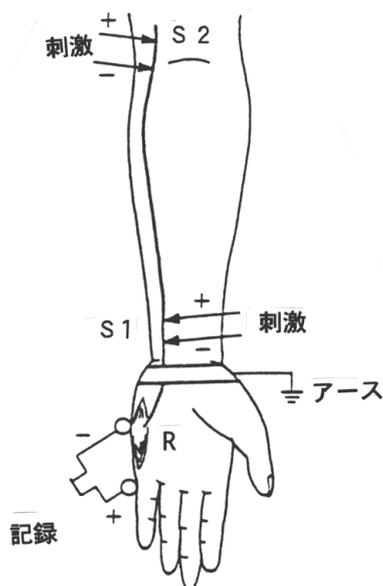
b. 器具・装置

（2）のM波・H波の観察と同じである。

c. 実験方法

1) ヒトの場合、運動神経の伝導速度が測定しやすい末梢神経は上肢では正中神経と尺骨神経、下肢では脛骨神経と腓骨神経である。本実習では尺骨神経を用いて運動神経の最大伝導速度を測定する（図3b参照）。刺激電極は尺骨神経の遠位側刺激部位（S1）として手関節近位部、また近位側刺激部位（S2）として上腕骨内側上顆付近の尺骨切痕部の皮膚上にそれぞれ装着して supramaximal(最大刺激出力の更に20%~25%増)の強度で電気刺激する。

図5 運動神経（尺骨神経）最大伝導速度の測定



記録電極（R）は小指球（小指外転筋）の中間部と小指基節骨基部に表面電極を装着する。手関節部に全周性にアース電極を装着する。

刺激は1 Hzで、持続時0.2msの矩形波を用いる。刺激強度は徐々に大きくし、最大の誘発電位が生じる強度を超える強さ（supramaximal）とする。この時には小指外転筋を支配する線維の全てが刺激によって興奮していることになる。筋電計の掃引速度及び増幅度はそれぞれ2~5ms/div. 2~5mv/divに調整して反応を観察する。

d.計測方法

1)画面上で観察された遠位側刺激及び近位側刺激により誘発されたM波をそれぞれプリントアウトする。この2つの刺激電極間の距離をM波の潜時の差で割った値が最大伝導速度となる。この時の被検者の体温を知るため、肘に温度計を挟んで測定すること。また、ここでは2つのM波の波形が同一であることが必要条件である。

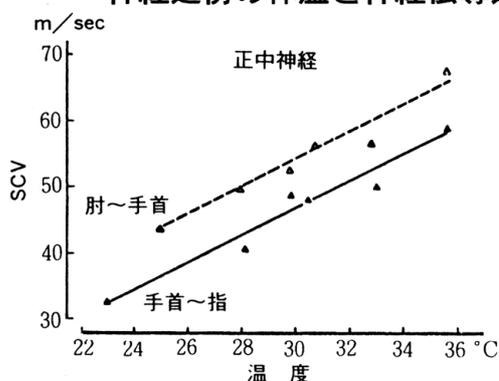
2) 神経の伝導速度は、温度に影響されることから前腕を冷水や温水に浸した後、1)と同様の実験を行って伝導速度と温度の関係を確かめる。本実習項目の場合、予め1)の項目で用いたS1、S2の刺激部位を印しておき、後腕を冷水や温水に浸してから再び同部位刺激(記録電極は付けたままで手に持って腕を浸す)で調べると、それぞれの結果が比較されるので便利である。(例えば、予備実験では、1)の実験で32で60m/sの人が、47の湯に5分間腕を浸けた後速度は64m/s、この時の肘の体温は35であった。湯の温度にもよるが6分間以上腕を湯や冷水に浸さないと温度による速度の変化が出にくい)

表1 運動神経伝導速度の正常値(成人)

神経	測定部位	伝導速度 (m/sec)	終末潜時 (msec)	M波振幅 (mV)
正中神経	肘一手	58 (51~65)	3.5 (2.3~4.6)	11.8(4.6~19.0)
尺骨神経	肘一手	60 (50~69)	2.6 (2.1~3.2)	15.5(9.1~21.9)
後脛骨神経	膝一足	48 (41~55)	5.4 (4.2~6.5)	13.2(5.0~21.4)
腓骨神経	膝一足	47 (43~50)	5.5 (4.7~6.8)	4.0(1.4~9.3)

数値は平均値
($\pm 2SD$)

神経近傍の体温と神経伝導速度



SCVは正中神経近傍の温度により、約2.1 m/sec/°C変化し、22~36°Cの範囲内ではほぼ直線的な相関を示す(19歳, 男,)

【設問】

- 問1 運動神経の伝導速度を測定するために何故刺激部位を複数にしなければならないのか
- 問2 運動神経の伝導速度を求める2つのM波が同一でなければならないのはどうしてか
- 問3 この方法では何故最大の伝導速度しか測定できないのか
- 問4 伝導速度は、温度によってどのように変化したのか、またその理由を考えなさい

4. 加算法による誘発電位の記録

感覚神経伝導速度 SCV (sensory nerve conduction velocity)

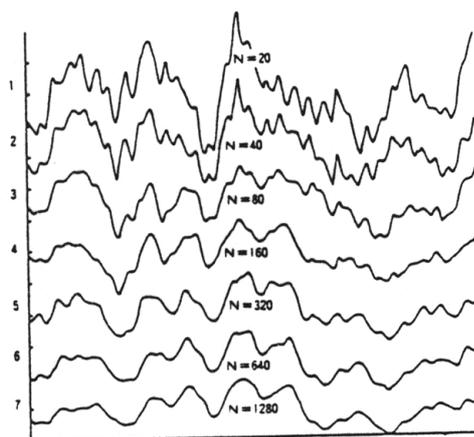
a. 目的

運動神経伝導速度と類似の方法により感覚神経の伝導速度が測定できる。ただし、感覚神経の場合は神経筋接合部における遅延時間がないため2ヶ所を刺激する必要はない。また検査には、末梢部を刺激し中枢部で導出する順行性法と、中枢部で刺激し末梢部で導出する逆行性法の2種類がある。逆行性法は順行性法に比べ得られる電位が大きく加算を必要としない場合があるが、運動神経も同時に刺激するためアーチファクトの影響を受けることがある。

b. 加算の意味

刺激により生ずる反応波などを得たいときに、実際に観測される信号には物理的な雑音(外来ノイズや、増幅回路自身を出すノイズ)や、生体の活動であっても刺激と関係の無い信号が含まれていて、判定しにくいことがある。ある信号(刺激)と関係のある部分のみを抜き出す方法に、加算平均法がある。刺激ごとに得られる波形を、刺激点に対して同一時間軸上で加算平均していくと、刺激に関係ない成分は相殺され、反応波だけが残る。N回の加算平均をしたとき、雑音は $1/N$ に減衰するため、S/N比はN倍改善される。

加算回数別にみた記録例



c. 器具・装置

運動神経伝導速度と同じ器具を用いるが、そのほかに指の感覚神経の刺激または記録のために作製された指電極が必要である。さらに加算器(averager)が必要である。

d. 実験方法

順行性の伝導速度の測定には、刺激電極を指電極として小指の第一および第二関節に装着する。記録電極は尺骨神経上に装着した表面電極とする。感覚神経の誘発電位は末梢感覚神経線維群の活動電位の総和であるが、M波に比べ極めて小さいので増幅度を大きくしなければならず(増幅度は $10\mu\text{v}/\text{div}$ とする)また30~100回加算をする。刺激条件は運動神経伝導速度の測定の場合と同様でよい。逆行性の伝導速度の測定は、順行性の場合と逆に刺激電極は運動神経の伝導速度の測定方法と同じ部位に装着し、記録電極を指電極とする。

e. 計測方法

伝導速度の算出は運動神経の場合と異なり、1ヶ所の刺激により誘発された活動電位の潜時で刺激電極と記録電極との距離を割れば良い。

順行性感覚神経（尺骨神経）の伝導速度の測定

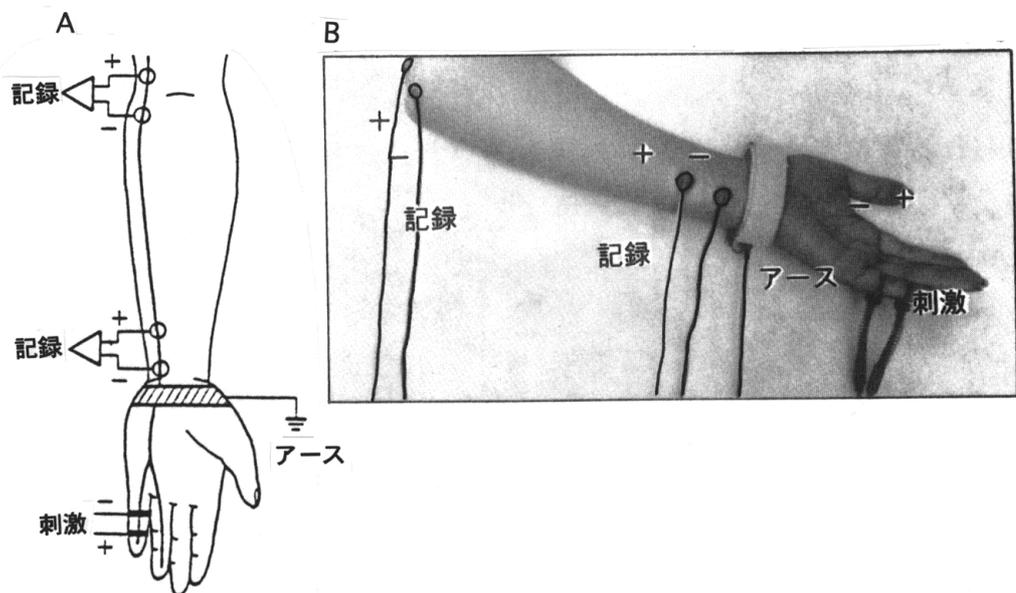


表2 知覚神経伝導速度の正常値（成人）

神 経	測定部位	伝導速度 (m / s e c)	神経活動電位 (μ V)	
			遠 位 部	近 位 部
正中神経	手-肘	62.2 (53.2-71.2)	手間接部	肘 部
			57.5 (28.7-86.3)	10.0 (0.8-19.2)
尺骨神経	手-肘	67.3 (59.7-74.9)	手間接部	肘 部
			50.4 (11.4-89.4)	13.1 (4.3-21.9)
後脛骨神経	足-膝	53.7 (42.7-64.7)	足間接部	膝 窩 部
			5.1 (1.5-8.7)	0.5 (0.3-0.7)
腓骨神経	人踝-腓腹	51.1 (41.3-60.9)		腓 腹 部
				9.1 (3.1-15.1)

針電極導出，() 内は正常範囲 ± 2 SD

【設問】

- 問1 この方法で測定された伝導速度はどのような神経線維の伝導速度と考えられるか。
- 問2 運動神経の伝導速度を求める方法と異なる点を述べなさい
- 問3 加算平均法の原理について考察し、微小な生体現象の観察におけるこの方法の長所および短所を書きなさい