

M波、H波の解説 第3版

2016年10月20日

目白大学 保健医療学部 理学療法学科 照井直人

無断転載を禁ず

図1. は、平成24年度の生理学実習のある班の結果である。様々な刺激強度の結果を重ね書き(オーバー・レイ)してある。

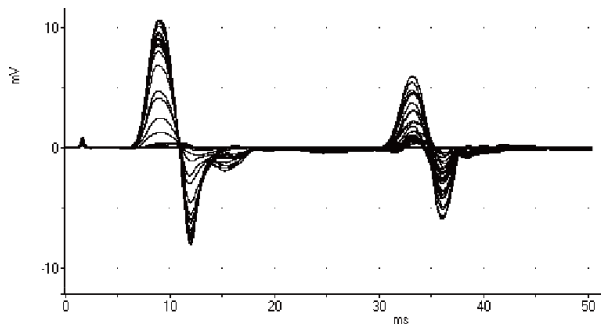


図1. 記録例。

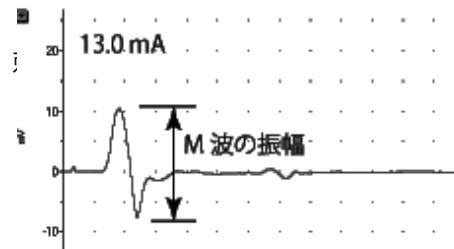
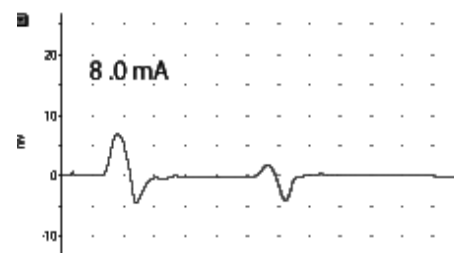
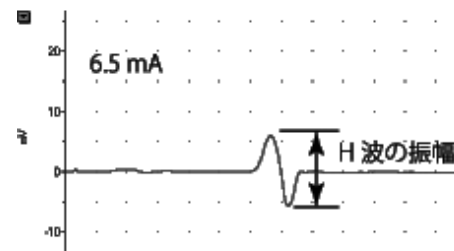
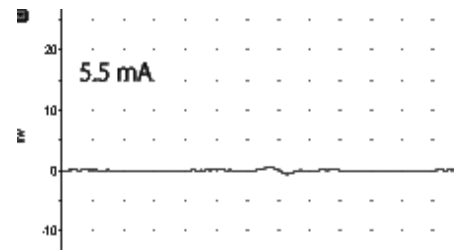


図2. にサンプルデータを示す。

図2. 刺激強度を変化させた時の誘発筋電図。8.0 mA、13.0mA。H波、M波の振幅の測定部位も示してある。

振幅は基線(0 V)から測定する 경우가多いが、この図のようにピーク間(peak-to-peak)でもいい。

10 ms

この結果をグラフにまとめたのが図3. である。

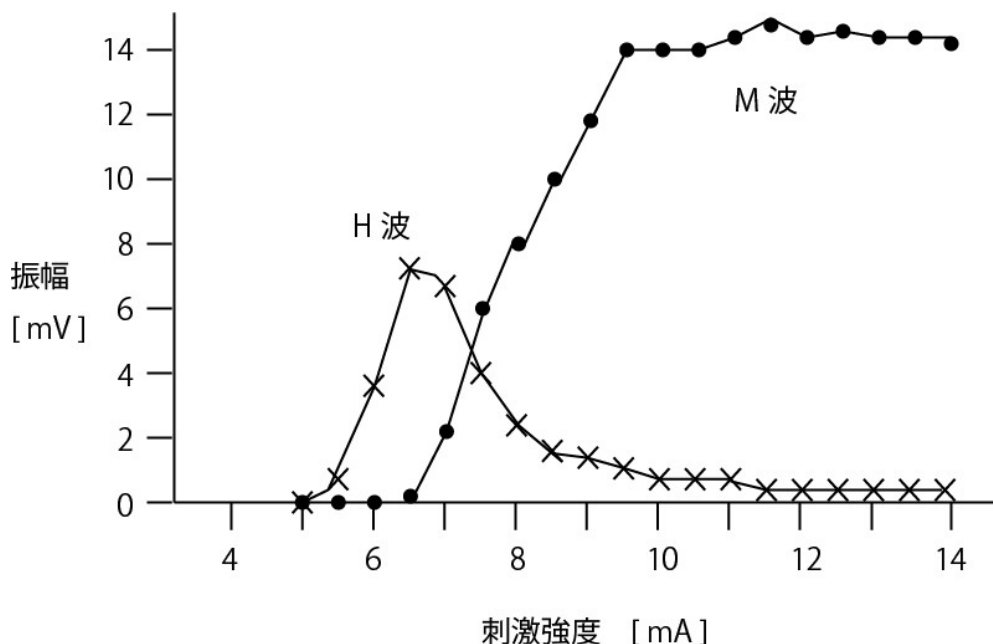


図3. 刺激強度に対する H 波、M 波の振幅の変化

諸君等の結果が上記のような結果である必要はないが、上記のような生データ (記録サンプル) 図とグラフがあれば結果の記述は十分であったと判定できる。場合によっては M 波しか記録できなかった、刺激強度の最大は 20 mA までしかできないので、最大刺激強度でも H 波は消失しなかった等、結果がこのグラフのようでもなくとも、それ事自体はレポートの評価に影響しない。レポートではなぜこのような結果になったかを説明するのが一番重要であるからである。

考察には、M 波、H 波がどのようにして誘発されるのか、そして刺激強度の変化に対して振幅はどのように変化するとと思われるか、結果は同じであったのか、予想と違ったらその原因は何かが書いてあれば良い評価になる。

M 波、H 波の成因は教科書にある。これを踏まえて、設問に答える。刺激強度の変化に対する M 波、H 波の振幅の変化について、以下のような主旨の説明があれば素晴らしい。

以下の説明は諸君等への説明なので詳細に書いてある。レポートには、ここまで詳細に書く必要はない。

(1) 軸索を伝導する活動電位の衝突

神経軸索の活動電位の伝導の方向性は決まっていない。つまり軸索では、その途中が電気刺激されると刺激部位から活動電位は末梢側にも中枢側にも伝導する。軸索の中枢

側かと末梢側が同時に刺激されるようなことがあると、中枢側から末梢側へ伝導してきた活動電位が、末梢側から中枢側へ伝導する活動電位と軸索の途中で衝突することになる(図

4)。

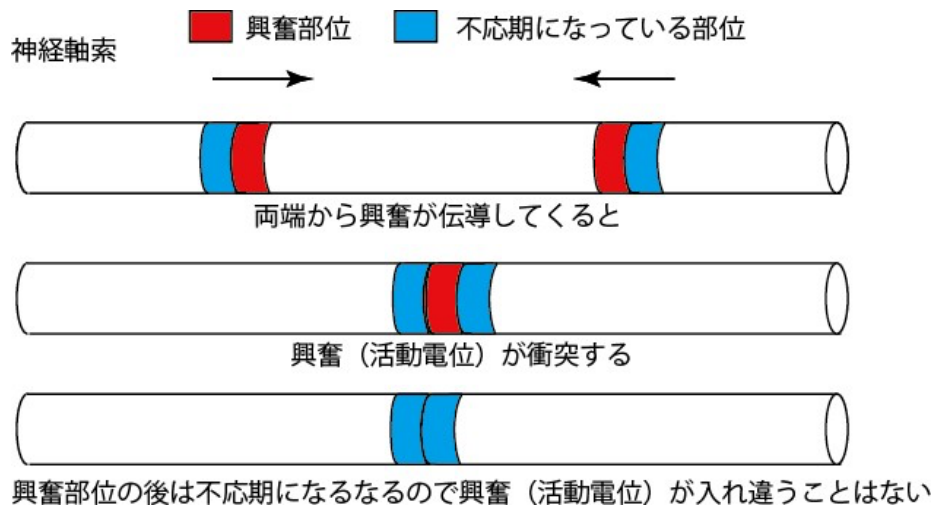


図4. 軸索上での活動電位の衝突。

活動電位が発生すると、一定時間、再度活動電位は発生できない(不応期)。活動電位の発生している部位は次の瞬間、活動電位が発生できない部位(不応期の部位)になる。活動電位が軸索を伝導している場合、活動電位が発生している部位(図4. 赤)は、常に後

(伝導方向とは逆の部位)に不応期である部位(図4. 青)が存在することになる。軸索の左右から活動電位が進行してくると、活動電位は入れ違うことなく、前後が不応期の部分になるので、活動電位は消失してしまう。これを活動電位の衝突という。

(2) Gl_a 反射(伸張反射)の神経回路

筋紡錘にある伸展受容器のグループIa線維群(GI_a線維)は筋が引き伸ばされたとき、その伸張の変化に応じて興奮する。この線維は脊髄でこの筋紡錘のある筋のA α 運動ニューロンに興奮性の単シナプス結合していて、筋の伸張は運動ニューロンの興奮を生じる。これをGl_a反射、伸張反射という。中枢のシナプス1つだけを経由するので単シナプス反射の例でもある。通常の教科書に描かれているのは図5. のような図である。

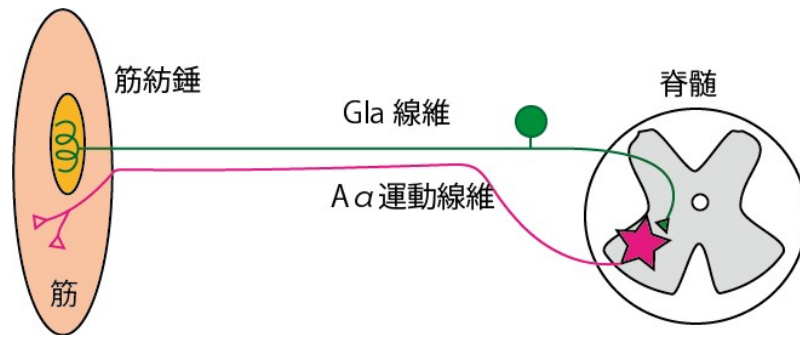


図 5. Ia 反射（伸張反射）の神経回路

運動ニューロンは上位中枢の影響（運動指令や緊張性の活動）を受けているので、この反射が必ず観察されるわけではない。上位中枢からの影響が少ないとき出現しやすい。

(3) H 波、M 波の刺激反応曲線

Ia 線維も Aα 運動ニューロン（線維）も複数あることを頭に置いておかねばならない（図4）。

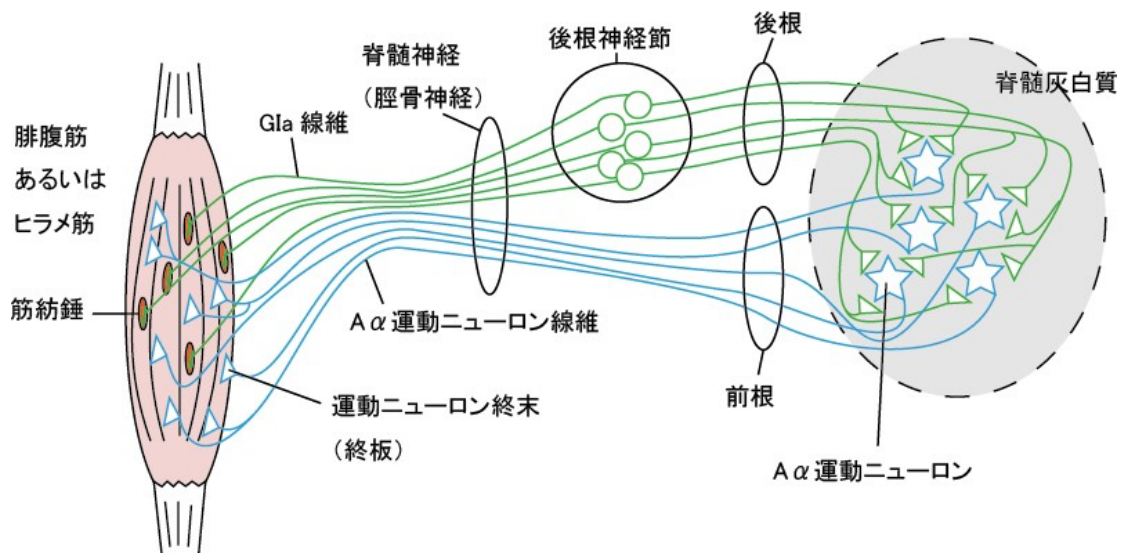


図 6. Ia 線維と Aα 運動ニューロン。

多くの教科書では、Ia 線維も Aα 運動ニューロン軸索もそれぞれ複数があることが神経内に存在することを明確に書いてない。図2の8mA 刺激時のように、M 波、H 波両方が出現するとき、それぞれの波形はそれぞれの最大値より小さい理由が、はっきり記述していない。図7の6、7の刺激強度では、全ての Aα 運動ニューロン軸索で衝突が発生したわけではないため、H 波が出現することを以下の記述から理解してほしい。

興奮性シナプスでは、シナプス前ニューロンの興奮に対してシナプス後ニューロンが必ず興奮（発火）するわけではない。例えばGla線維の活動電位1つに対して運動ニューロンの活動電位1つが発生するものではない。複数のGla線維が同時に活動して、あるいはGla線維が何回も活動電位を出して初めて運動ニューロンに活動電位が発生することも頭にいれておかねばならない（興奮性シナプス電位の空間的加重、時間的加重）。図6. の神経束（脛骨神経）を刺激し、ヒラメ筋あるいは腓腹筋の誘発筋電図を記録し、刺激強度と誘発筋電図の大きさをグラフに示すと図7. のようになる（刺激反応曲線）。

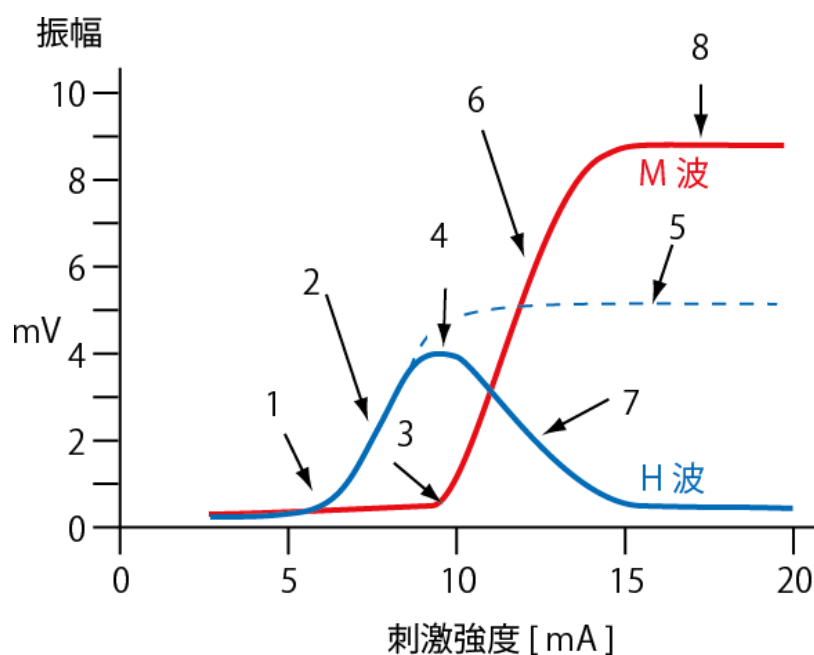


図7. 刺激強度と誘発筋電図の大きさの関係。5の点線は仮に衝突（本文参照）が生じなかった場合のH波の想定の大きさを示す。

図7. と図8. とを参照に以下の説明を読んでほしい。

Gla線維はA α 運動神経線維に比べ軸索の径が大きく、電気刺激に対して閾値が低く、伝導速度は大きい。したがってより低い刺激強度で興奮する。その結果、反射性に筋電図が生じる。この誘発筋電図は脊髄を経由しているので潜時が大きい。この誘発筋電図をH波と呼ぶ。H波の閾値が図7. の1の刺激強度である。Gla線維が興奮したら必ず α 運動ニューロンが興奮するわけではないからH波の閾値はGla線維の閾値より大きいはずである。A α 運動ニューロンが興奮するためには、もう少し多くのGla線維の興奮を必要とするからである。この実験ではGla線維の閾値は正確にはわからない。H波の閾値より少し小さいはずだが大差はないであろう。

さらに刺激強度が上がるとさらに多くの Ia 線維が興奮し、さらに多くの A α 運動ニューロンの興奮を引き起こす。したがって H 波は大きくなる (図 7 の 2、図 8 A)。

さらに刺激強度を上げ、A α 運動ニューロンがまだ興奮しないような刺激強度にする。より多くの Ia 線維が活動するよので、より多くの A α 運動ニューロンが興奮する (図 7 の 4、

図 8 B)。したがって H 波はより大きくなるが、それでもすべての A α 運動ニューロンが興奮するわけではない。

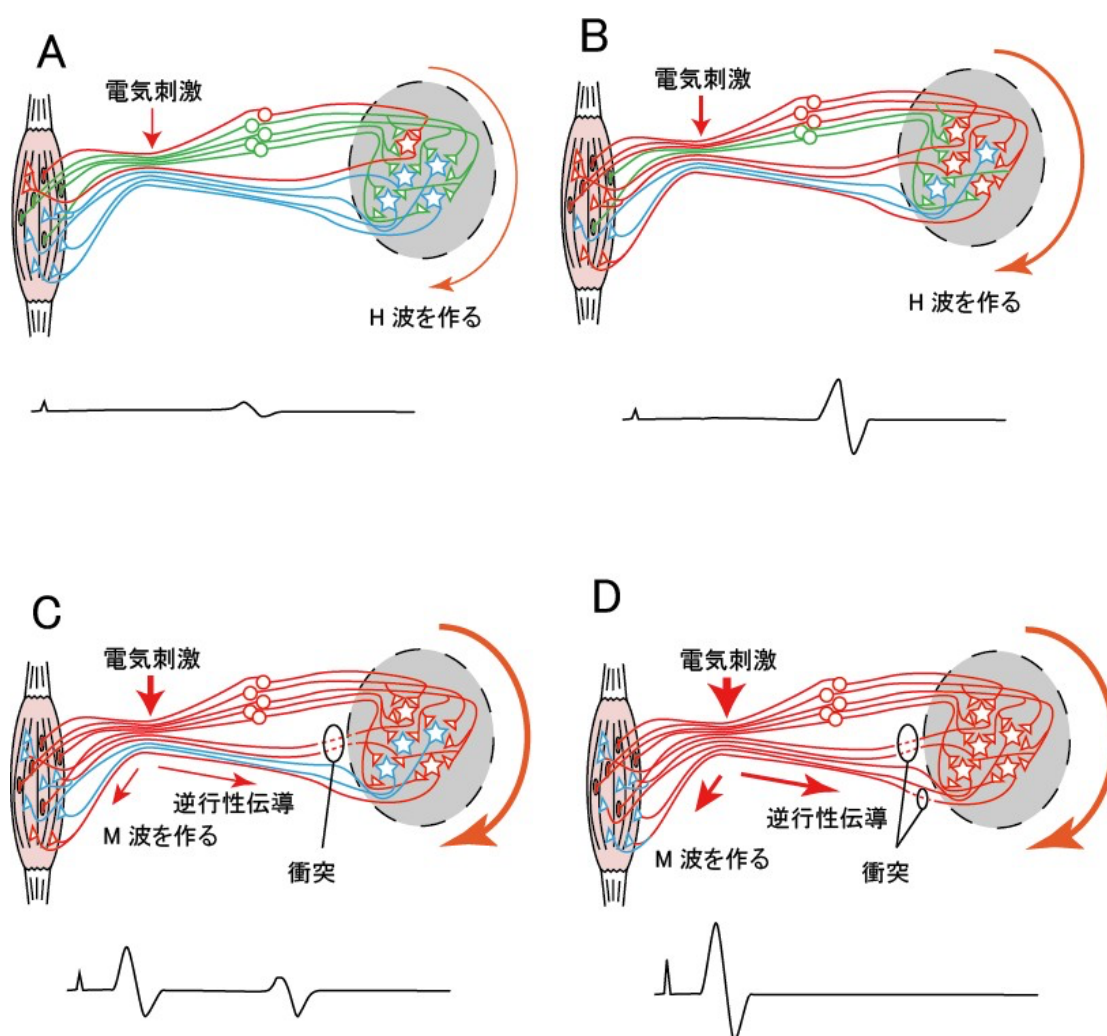


図 8. 刺激強度の違いによる興奮する神経線維の違い。電気刺激の結果興奮した神経線維を赤で示した。A から D へ刺激を次第に大きくした場合。

電気刺激により Ia 線維の遠位 (筋の側) の軸索も興奮するが、遠位にあるのは受容器で筋電図には反映されない。

さらに刺激強度を大きくし、A α 運動神経線維の閾値になったとする (図 7 の 3)。このとき

H波は最大になる。さらに少しだけ刺激を大きくして、少数のA α 運動神経線維も興奮したとする(図8C.)。A α 運動神経線維の興奮は末梢側(筋側)と中枢(脊髄側)両方に伝導する。末梢側へ伝導した活動電位は筋線維を興奮させる。この興奮で生じた波形をM波と呼ぶ。M波の閾値はA α 運動ニューロンの軸索の閾値にほぼ同じである。運動ニューロンが活動すると支配されている筋線維は必ずと言っていいくらい興奮するからである。刺激部位から筋までの伝導距離が短いので、M波の潜時は小さい。このとき運動線維の活動電位は脊髄側にも伝導する(逆行性伝導)。

Gla線維の伝導速度は α 運動神経線維の伝導速度より大きく、さらにシナプスでの遅れ(0.5~1 ms)を考えても、A α 運動ニューロンの細胞体の興奮はGla線維による場合のほうが、逆行性に伝導してきた結果による細胞体の興奮より早い。仮に伝導距離が1mとしGla線維の伝導速度が100 m/s、 α 運動ニューロン軸索の伝導速度が70 m/sとすると、脊髄に興奮が到達する時間は、Gla線維では10 ms 運動ニューロンの逆行性活動は15 ms程度になる。したがってシナプスでの遅れを考慮してもA α 運動ニューロンの細胞体では、逆行性に興奮するよりGla線維による興奮性シナプス経路で興奮するほうが早く生じる。

神経細胞(細胞体も軸索も)は一度興奮すると、その後一定時間興奮できない(不応期)。A α 運動ニューロンの軸索でGla線維由来の興奮により順行性に伝導して来た活動電位と、電気刺激で逆行性に伝導してきた活動電位が衝突する。この両方の興奮が出会ったとき、活動電位は不応期のため消失する(興奮の衝突)。決して入れ替わったりしない

(図4、図8C)。

衝突した場合、Gla線維によって生じた活動電位が末梢に伝わらない。これが原因でH波は生じないことになる。すべてのA α 運動ニューロンが逆行性に興奮するわけではないので、活動電位が衝突しなかった α 運動ニューロン軸索がある。つまり一部の運動ニューロン軸索ではGla線維によって生じた活動電位が順行性に伝導し筋線維を興奮させる。筋電図は複数の筋線維の活動の結果であるから、この衝突しなかった軸索の興奮により、H波が出現する。しかしその大きさは図8B. に比べ小さくなる(図7の7、図8C)。つまりA α 運動ニューロンが活動する閾値より刺激が大きくなると、それにともないH波は小さくなっていく(図7の6、7)。

A α 運動ニューロンすべてが興奮するような刺激強度(図7の8)では、Gla線維により興奮したすべての運動ニューロンで、順行性活動電位と逆行性活動電位が衝突するので順行性活動電位に由来するH波は消失する(図7の8、図8D)。このとき全ての

A α 運動ニューロンが興奮したので M 波は最大になる。つまり M 波が最大るとき H 波は見られない。M 波の最大振幅は必ず H 波の最大振幅より大きい。その理由は、先にも述べたように

G1a 線維がすべての運動ニューロンを同時に興奮させるわけではないのに対し、軸索の強い電気刺激はすべての運動ニューロンの軸索を興奮させるからである。

諸君らの実験で、刺激を最大 (20 mA) にしたのに H 波が消えなかったのは、刺激電極の位置が悪く、神経刺激が十分でなかったことが考えられる。

また筋電図記録電極の位置が悪く、2つの筋の筋電図を記録してしまい、2つの筋の G1a 線維や運動ニューロンの軸索の閾値が同じでも刺激電極からの距離が異なったため完全に H 波が消えなかったのかもしれない。刺激したとき、筋電図には2つの誘発筋電図がないのに、下肢が2回収縮しただろう。これは筋電図を記録している筋ではなく、他の筋に M 波、H 波が発生し収縮したからである。