

# 経頭蓋的磁気刺激による脊髄前角細胞の興奮性に関する研究

## —正中神経刺激による脊髄前角細胞の興奮抑制時間の測定—

平岡 崇

脊髄前角細胞について、その興奮に続く抑制時間を検討した報告は少ない。そこで健康成人93名を対象として、末梢神経の電気刺激による前角細胞の興奮に続いて、経頭蓋的磁気刺激法による再興奮の有無を検討した。表面電極、同心型針電極および single fiber 針電極を用いて単独で運動誘発電位を記録したところ、これら3群間に電極による明らかな潜時の差は認められなかった。前角細胞より末梢で collision (衝突) を起こさせた波形を経頭蓋的磁気刺激法のみ波形と比較したところ、collision technique を用いた場合の方が有意に潜時の延長が認められた。電気刺激が先に前角細胞に到達した後に磁気刺激が前角細胞に到達するよう設定した場合、多くの例で潜時の遅れが認められた。以上の結果から、従来報告されている descending volleys の骨格筋での記録は疑わしいと考えられる。また、多くの前角細胞は、末梢神経の電気刺激によって、数 ms ~ 数十 ms 以上の興奮抑制が生じると推察される。

(平成13年10月16日受理)

## Excitability of Spinal Anterior Horn Cells after Transcranial Magnetic Stimulation

### — Measurement of the Excitation Suppression Time in Spinal Anterior Horn Cells after Median Nerve Electrical Stimulation —

Takashi HIRAOKA

Few studies have previously evaluated the suppression time following excitation of spinal anterior horn cells. Therefore, using 93 healthy adult volunteers, we evaluated whether the anterior horn cells were re-excited by transcranial magnetic stimulation (TMS) following initial excitation after electrical stimulation (ES) of peripheral nerves. When motor evoked potentials (MEPs) were independently recorded using surface electrodes, concentric needle electrodes, or single fiber needle electrodes, there were no significant differences in the electrical potentials obtained by the three types of electrodes. When waveforms after the occurrence of collision in the distal to the anterior horn cells were compared to those obtained after TMS alone, the latency by the collision technique was significantly longer than that by TMS alone. When the anterior horn cells were excited by ES before the arrival of TMS, the latency was prolonged in many subjects. These findings suggest that the recording of previously reported descending volleys on muscle fiber membrane is questionable. A lot of anterior horn cells may be inhibited for more than 10 ms after

ES to peripheral nerve. (Accepted on October 16, 2001) *Kawasaki Igakkaishi* 27(4): 293-303, 2001

**Key Words** ① **Motor evoked potentials (MEP)** ② **Electric stimulation (ES)**  
 ③ **Transcranial magnetic stimulation (TMS)**  
 ④ **Excitation suppression time**

## はじめに

運動の遂行に関わる中枢神経系の作用機序を解明することは、脳血管障害をはじめとする運動障害を生じる疾患に対して機能回復訓練を行う上で重要である<sup>1)</sup>。特にリハビリテーション医学の分野においては、永続的な運動障害を残す中枢神経障害患者に対して、新たな運動を再学習する有効な手段の開発が不可欠である。それには、随意運動の発現機構を正しく理解し、その機序に基づいた有効な手段が開発されるべきである。すなわち、効率的な運動学習手段の開発と遂行には、つねにヒトの随意運動の発現に関わる運動神経の生理学的機序を考慮する必要がある。

運動の発現機構に関する神経生理学的解析の多くは従来、末梢神経を電気刺激 (electrical stimulation: 以下 ES と略す) するという電気生理学的手法を用いて行われていた。しかし、近年経頭蓋的磁気刺激法 (transcranial magnetic stimulation: 以下 TMS と略す) の普及に伴い、上位運動中枢の運動制御機構をより直接的に解析する試みがなされるようになっていく。

TMS は誘導電流により脳を経皮的に興奮させる方法で、いわば electrodeless electrical stimulation である<sup>2)</sup>。一側大脳半球の一次運動野 (primary motor area: 以下 M1 と略す) を刺激することによって対側の骨格筋を興奮させ、運動誘発電位 (motor evoked potential: 以下 MEP と略す) として記録する。Barker ら<sup>3)</sup>による最初の報告以来、TMS はその簡便性と非侵襲性から、主に運動機能に関する基礎的な研究と運動障害の診断・評価に広く用いられてきた<sup>4)</sup>。

一方、ヒトの末梢神経の不応期に関する研究は1960年代に始められたが、その大多数は、い

まだ知覚神経と混合神経に限定されている<sup>5)~9)</sup>。しかし、TMS を併用することで、運動神経単独における不応期の研究も可能となってきた。TMS による錐体路系の伝搬は、descending volleys として記録されると言われる<sup>10)~12)</sup>。すなわち、M1 への1回限りの TMS によって生じる錐体細胞の興奮は決して単発ではない。軸索近位端または軸索小丘 (axon hillock) の直接的興奮と皮質介在ニューロンや前運動野・感覚野・視床などからの興奮性入力線維の発火による間接的興奮が一連のインパルス群を形成し、その結果として多数回の伝搬を生じる。1つの錐体細胞からの多数回興奮の伝搬である descending volleys を脊髄側索において記録すると、直接的興奮による1個の D-wave に続いて間接的興奮による I-wave が1~2 ms 間隔で数個連なって観察される<sup>10)~12)</sup>。

末梢神経の不応期は、一般に数十分の1 ms~1 ms といわれているが<sup>13)</sup>、脊髄前角細胞については、その興奮に続く抑制時間を検討した報告は少ない。そのために、descending volleys の全てが前角細胞を興奮させているかどうかについても明らかでない。骨格筋から記録された MEP に descending volleys が反映されるとの報告も認められるが<sup>14)</sup>、実証されたとは言い難い。そこで末梢神経の ES による前角細胞の興奮に続いて、TMS による再興奮の有無を検討した。両者の刺激の間隔を変化させることによって、前角細胞の興奮抑制時間を計測した。

## 対象と方法

対象は、本研究の意義および方法を説明し同意の得られた健康成人93名で、中枢神経系・末梢神経系・筋骨格系に異常を認めるものは除外した。実験1では31名 (男性11名、女性20名:

平均年齢 $22 \pm 3$ 歳，18～29歳），実験2では62名（男性22名，女性40名：平均年齢 $21 \pm 2$ 歳，18～28歳）について記録した。2つの実験の方法は，以下に示す通りである。

### 【実験1】記録電極の違いによるMEP波形の比較

室温 $25^{\circ}\text{C}$ のシールドルーム内にて，背もたれのある椅子に深く腰掛け，体幹角度約 $90^{\circ}$ 度，左肘関節屈曲 $45^{\circ}$ 度の姿勢で1分間座位をとらせリラックスさせた。頸部については固定を行わなかった。その後同姿勢のまま以下の実験を遂行した。TMSは，左側大脳運動野で上肢に該当する部位を8の字コイルを用いて行った。対側の短母指外転筋から得られるMEPを記録した。まず，TMSに関して，刺激部位は10～20法に基づいて，鼻根点と外後頭隆起を結ぶラインと，両側外耳孔を結んだラインとの交点（cz点）から外側4～6cm前方1～2cmで最も高い振幅の得られる部位，つまり最適刺激部位を求めた。刺激強度は，最適刺激部位においてMEPが100%記録される最低強度の1.2倍の強度とした。刺激方法は，日本臨床神経生理学会の磁気刺激に関する委員会によって報告された大脳皮質の標準的的刺激法に従い，M1を後方から前方に横切る向きに誘導電流を流した（Fig. 1）。なお，刺激間隔は特には決めず，最低でも2secはあけて8回刺激を行った。TMSの際にはは促通手技は行わず，安静開眼とした。記録は各被験者について，表面電極，同心型針電極およびsingle fiber針電極の3種類を用いて行った。

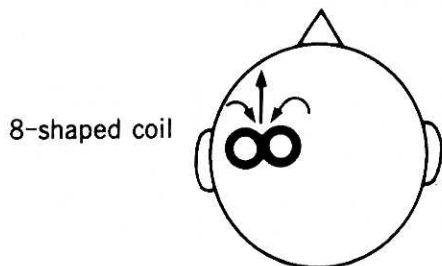


Fig. 1. Method of applying TMS to the motor cortex  
The left motor cortex is stimulated to acquire responses from the right limb muscles.  $\curvearrowright$ : coil current,  $\uparrow$ : induced current.

表面電極のとりつけに関しては，皮膚表面を生体信号モニター用皮膚前処置剤にて研磨し，皮膚インピーダンスを減じた上で，直径7mmの銀電極をビニールテープにて固定した。同心型針電極はMedelec社製FCD 37-16827（直径0.3mm，電極部分の直径 $200\mu\text{m}$ ），single fiber針電極は同じくMedelec社製SF-25（直径0.46mm，電極部分の直径 $25\mu\text{m}$ ）を使用した。記録電極の位置は3種類ともすべて短母指外転筋の筋腹中央部，不関電極は短母指外転筋腱（右母指MP関節部），アースは右手関節部とした。記録の設定は，振幅 $0.5 \sim 2\text{mv/div}$ ，掃引速度 $5 \sim 20\text{ms/div}$ とした。このとき低域遮断フィルターは500Hz，高域遮断フィルターは10kHzに設定した。解析項目は，各々の波形における潜時，振幅，位相の数とし，電極の違いによる比較を対応のあるt検定によって分析した。

使用機器は刺激装置としてDantec社製Mag-Lite，コイルは8の字コイル（Dantec社製YM-112B），計測記録装置として日本光電社製Neuropack 8を使用した。

### 【実験2】末梢神経のESによる前角細胞の興奮に続くTMSの反応

実験1をもとに，末梢神経として正中神経を電氣的に刺激し，同時あるいは時間的な間隔を持ってTMSを行った。前角細胞より末梢部および前角細胞においてESとTMSによる興奮を衝突させ（collision），前角細胞の興奮に続く抑制時間を計測した。短母指外転筋から記録されるMEPについて潜時を測定し，TMSのみの場合とcollisionさせた場合の潜時の差をt検定を用いて比較した。

TMSに関しては，実験1に準じた方法で行い，記録は右側の短母指外転筋から直径7mmの銀電極（表面電極）にて行った。ESに関しては，手関節部において双極電極にて正中神経を最大上刺激した。刺激は持続時間 $0.1\text{ms}$ の矩形波とし，刺激間隔はとくに定めなかったが，最低でも5secは間隔をおいた。刺激の具体的方法はFigure 2に示した通りである。

collisionの方法に関しては，TMSによる

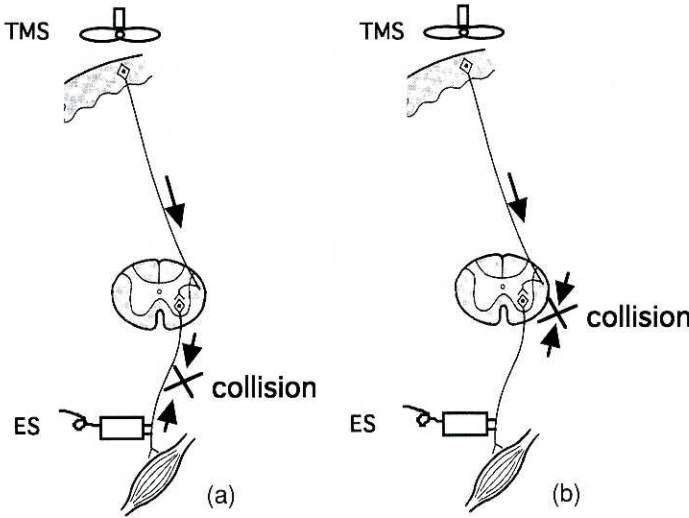


Fig. 2. Collision technique between TMS and ES. The site of collision is either distal to the anterior horn cells (a) or at the anterior horn cells (b). The delay times of TMS following ES is adjusted by calculation. TMS : transcranial magnetic stimulation. ES : electrical stimulation.

MEPとESによるM波、F波から計算により前角細胞付近でTMSとESによる興奮が衝突するよう、delay time (ESからTMSまでの時間)を調節した。M波は、末梢神経のESがそのまま下行性に伝達されて誘発する筋活動電位である。一方、末梢神経に加えられた刺激は、運動線維を伝わって逆行性に前角細胞を興奮させ、その興奮が順行性に運動線維を戻って誘発する筋活動電位がF波である。また、前角細胞のself excitationには通常1msを要するとされている。したがって、手関節の刺激部位から前角細胞までの近位部潜時は、 $(F-M-1) / 2$ として求めることができる。また、TMSが前角細胞を興奮させるまでの時間(中枢伝導時間)は、MEPの潜時- $(F+M-1) / 2$ として求めることができる。この両者の値から、脊髄付近のどの部位でcollisionを起こさせるかを設定することが可能である。実際のdelay timeの設定は、まず、TMSが前角細胞を興奮させてから10ms後にcollisionが末梢神経の部位で生じるよう設定した。ついで1msごとに衝突部位を中枢側へ

とずらしていき、ESが先に前角細胞を興奮させるようになってからも10msまでは1ms単位で調節し、その後はdelay timeを中潜時として31ms、長潜時として101msに設定した。

結 果

【実験1】記録電極の違いによるMEP波形の比較

表面電極、同心型針電極およびsingle fiber針電極を用いて単独でMEPを記録した各々の波形の一例は、Figure 3に示した通りである。表面電極および同心型針電極で記録した波形は、全例とも、

なだらかな2相性~6相性の波形を示していた。single fiber針電極を用いた場合の波形は、表面電極および同心型針電極の場合とは異なり、形の異なる先鋭な2相性ないし3相性波形が多数記録された。振幅、潜時ならびに持続時間について、これら3群間で比較したところ、電極による明らかな差は認められなかった。位相の数に関してはsingle fiber針電極による記録では $11.9 \pm 1.4$ 回となり表面電極や同心型針電極による記録に比較して明らかに多かった(Table 1)。

【実験2】末梢神経のESによる前角細胞の興奮に続くTMSの反応

まず、前角細胞より末梢でcollisionを起こし

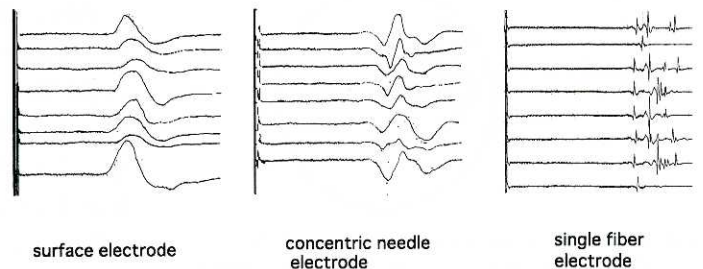
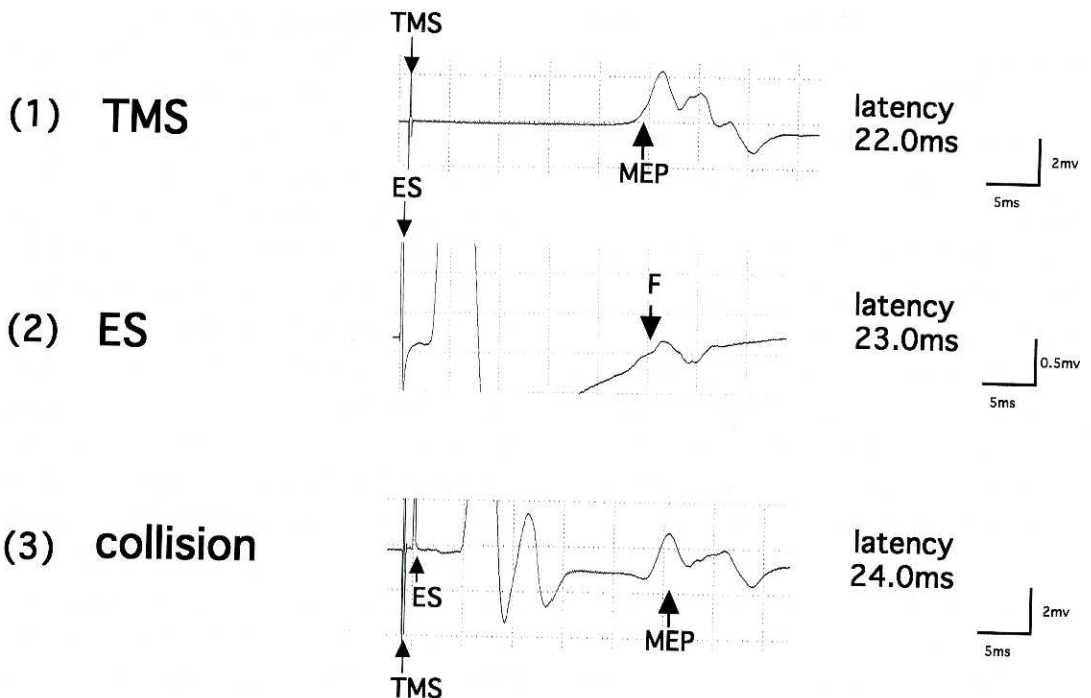


Fig. 3. Comparison of MEPs wave patterns

2mv  
5ms

**Table 1.** Analysis of wave patterns of MEPs (n = 31)

electrodes	surface electrode	concentric needle electrode	singlefiber electrode
latency(ms)	24±1.1	25±1.7	24±3.6
amplitude (mv)	2.1±1.1	1.8±0.9	1.5±1.2
phase	2.0±0.2	3.1±1.2	11.9±1.4

**Fig. 4.** Outcome of collision occurring distal to the anterior horn cells in a subject

(1) shows waveforms obtained after TMS alone. (2) shows waveforms obtained after ES alone. (3) shows waveforms obtained after ES following 1 ms of delay time after TMS using the collision technique.

た結果の一例を **Figure 4** に示す。上段は TMS のみを加えたもの、中段は ES のみを加えたもの、下段は collision technique を用いて、delay time-1 ms (TMS が ES に 1 ms 先行) の波形である。この被検者では、上段の波形から MEP 潜時は 22.0 ms、中段の波形から M 波の潜時が 3.8 ms、F 波の潜時が 23.0 ms であるため先の計算式に当てはめて collision を起こす部位を割り出すと、近位部潜時は 9.1 ms、中枢伝導時間

も 9.1 ms となる。計算上は TMS・ES 同発時に前角細胞で collision することとなる。1 ms TMS を先行させた場合には、collision は確実に神経根にて生じている計算である。潜時を比較したところ、collision technique を用いた場合は TMS 後 24.0 ms、TMS のみを加えた場合は 22.0 ms にやや形状の異なる波形が認められた。全例について TMS のみの波形と前角細胞より末梢で collision を起こさせた波形とを比較したと

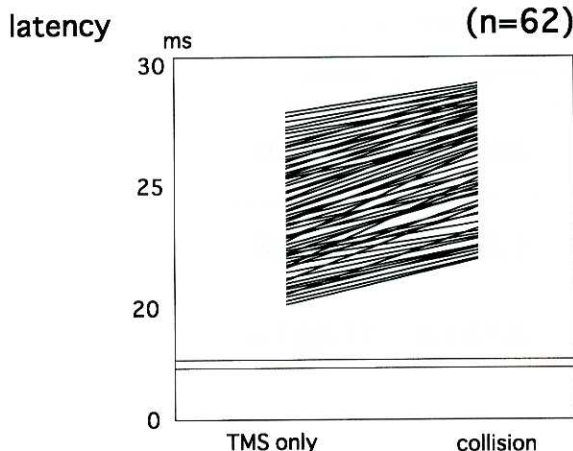


Fig. 5. Comparison of latency in MEPs between TMS only and collision distal to the anterior horn cells

ころ, collision technique を用いた場合の方が有意水準 1% で有意に潜時の延長が認められた (Fig. 5).

次に, ES が先に前角細胞に到達した後に TMS が前角細胞に到達するよう設定した場合の結果を示す。Figure 6 はその一例で, 最上段は TMS のみを加えた波形である。MEP の潜時は 22.0 ms となっていた。2 段目は ES のみを加えた波形で, M 波の潜時が 3.8 ms, F 波の潜時が 23.0 ms であった。3 段目は計算上脊髄前角細胞にて衝突が起これると考えられる delay time を設定した場合で, この被検者では TMS と ES を同時に行うと前角細胞にて衝突が生じるという計算であった。衝突させた場合の MEP の潜時は TMS 後 23.8 ms で, 先程の TMS のみの場合の潜時と比較して延長していた。

4, 5, 6 段目は ES が TMS よりも 10 ms, 31 ms, 101 ms 先発の delay time を設定した場合の波形である。現実には TMS が前角細胞に到達したのも, ES よりも 10 ms, 31 ms, 101 ms 遅かったこととなる。この被検者では, 得られた波形の潜時は, 24.0 ms, 23.3 ms, 23.0 ms となり, 3 つの delay time のすべてにおいて TMS のみの波形に比べて 1 ~ 2 ms の潜時の遅れを認めた。振幅は, 2 mv ~ 4 mv であった。

全例については, delay time が 10 ms の場合, 62 例中 45 例に潜時の遅れ ( $2.1 \pm 0.3$  ms) が認

められた。31 ms の delay では 15 例, 101 ms の delay では 3 例に潜時の遅れが認められた。62 例中 17 例においては, ES が前角細胞に到達後 1 ms で TMS が到達した場合にも延長を認めなかった。

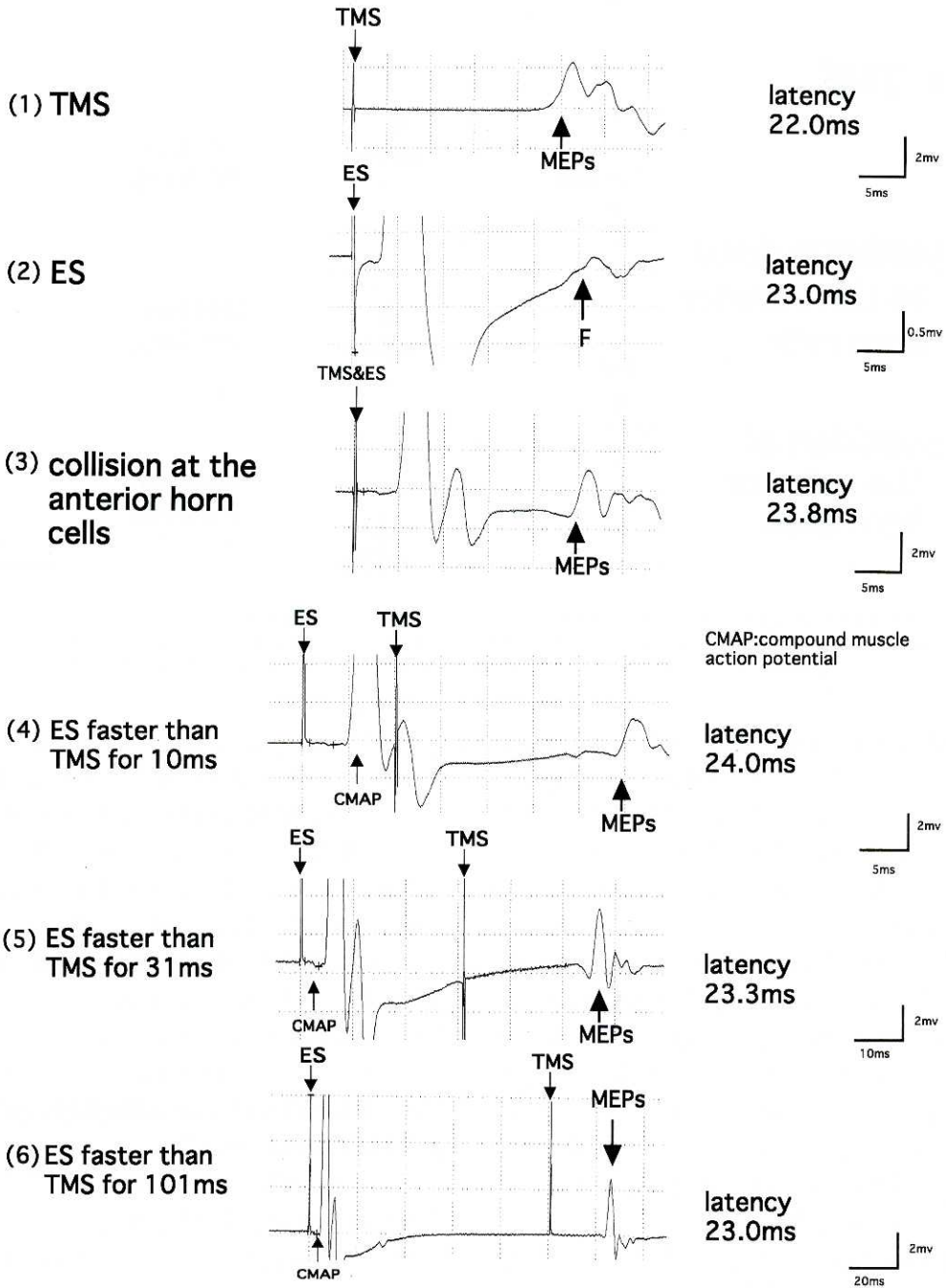
Figure 7 はその一例である。

## 考 察

### (1) 記録電極の違いによる MEP 波形の比較について

TMS によるヒトの MEP の記録は, 1985 年 Barker らにより報告されて以来さまざまな研究がなされているが, これまでの記録は表面電極によるものが大半で針電極による記録は Bert ら<sup>15)</sup>による報告のみである。特に, single fiber 針電極による記録は, これまで報告がなく, 本研究がはじめての報告となる。表面電極による MEP の記録では, volume conduction による影響のため, 電極直下の筋から検出されたかどうか確定することは困難である。この点について木村<sup>16)</sup>は, 活動電位を表面電極で記録する場合には他の筋からの活動電位を併せて記録する可能性があることを報告している。今回, single fiber 針電極による記録を行い, 表面電極と同一部位に振幅の大きな鋭波として記録できた。一般に single fiber EMG では 1 ~ 7 mv の波形と報告され<sup>17)</sup>, この値と同様であったことから, MEP が同筋から出ていることを示している。しかし, その波形が多種で, 第 2 波以降も第 1 波と振幅の違う波形が記録されたことから, 第 2 波以降が同一の筋線維から出ている可能性はある。今回の結果より, TMS 1 回当たり同一筋線維からは 1 回のみ MEP が記録される可能性があるということである。しかし, 電極が小さいため針先の動きによる影響も否定できないため, 今後の検討が必要であろう。

### (2) 前角細胞より遠位での ES と TMS の衝突について



**Fig. 6.** Outcome of collision occurring at the anterior horn cells in a subject with prolonged latency (1) shows waveforms obtained after TMS alone. The MEPs latency was 22.0 ms. (2) shows waveforms obtained after ES alone, and (3) shows the waveforms when collision occurred simultaneously at the anterior horn cells. (4), (5) and (6) show waveforms obtained after TMS following 10, 31, and 101 ms of delay time after ES, respectively.

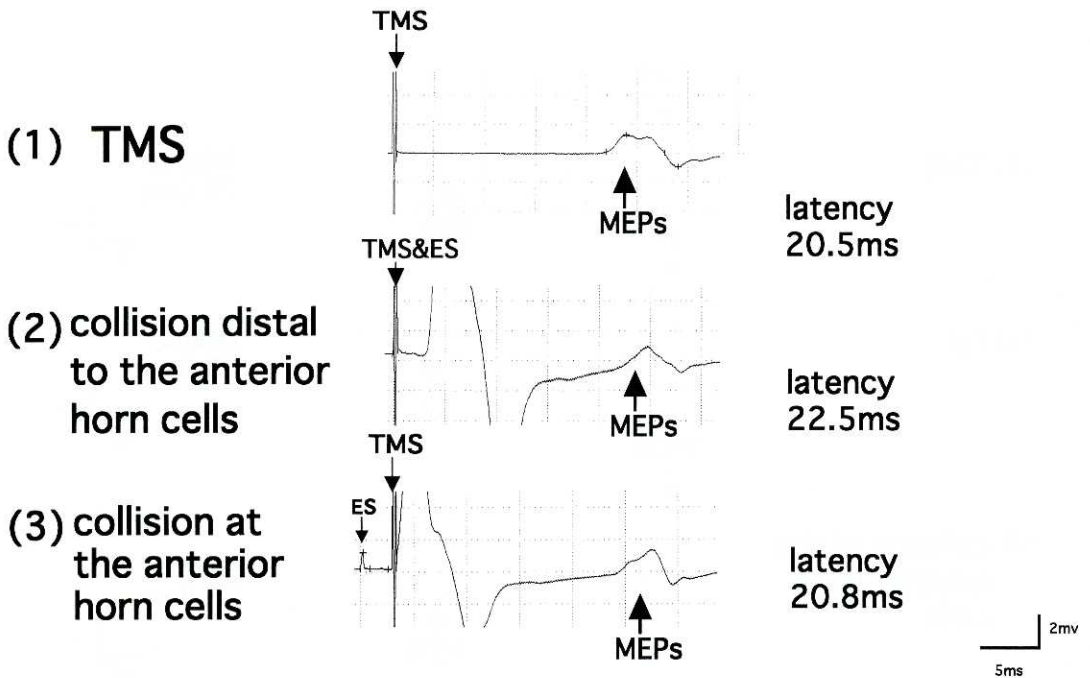


Fig. 7. Outcome of collision occurring at the anterior horn cells in a subject without prolonged latency (1) shows waveforms obtained after TMS alone. (2) shows waveforms when collision distal occurred to the anterior horn cells. (3) shows waveforms when collision occurred at the anterior horn cells. (1 ms after excitation of anterior horn cells by ES.)

TMS と ES を末梢で衝突させた場合、先に示したとおりに62名全員に潜時の延長が認められた。したがって、衝突は確実に生じていると考えられる。しかし、波形は消失せずに残存した。木村らの報告<sup>18)</sup>では、末梢で ES と ES が衝突した場合、波形は全て消失するとされている。これは、末梢では単一の神経のみが、刺激されているためである。今回の実験において、TMS と ES の衝突で波形が残存した理由は2つ考えられる。ひとつは、残存した波形が正中神経を伝わったものではない可能性が挙げられる。つまり、今回は短母指外転筋から記録を行ったが、尺骨神経支配の筋（短母指屈筋など）に MEP が生じ、それが volume conduction として記録された可能性である。通常、尺骨神経の伝導速度のほうが正中神経よりも速いとされているが<sup>19)</sup>、今回電気刺激は最大上刺激で行っており尺骨神経の線維の一部、とくに伝導速度の速い線維が同時に刺激された可能性がある。そのため、伝導速度の遅い尺骨神経線維を下行性に

伝わった TMS による MEP が記録され、潜時の遅れを生じた可能性がある。つぎに、TMS によって、前角細胞が複数回刺激される可能性である。衝突を起こすのは、1発目の興奮による活動電位のみで2発目以降が通過して記録されたとの考え方である。しかし、牟礼ら<sup>20)</sup>や目谷ら<sup>21)</sup>は、MEP を記録する神経と同時に他の神経にも ES を行い、2つの collision によって、全ての波形が消失すると報告している。したがって、二番目の説の可能性は低いと考えられる。

### (3) 末梢神経の ES による前角細胞の興奮に続く TMS の反応について

ES にて前角細胞の興奮がひとたび生じると、その後に TMS による興奮が到達しても、大半の例で潜時の変化を生じることが今回知られた。しかも、30 ms 以上の delay time において潜時の延長を認めた例も4分の1に認められた。このことから、前角細胞が長時間抑制の状態にあることが考えられる。末梢神経での不応期は数十分の1 ms から1 ms と言われており、これと



比較すると抑制時間はかなり長い。前角細胞の興奮抑制のメカニズムとしては、以下の3つが考えられる。1) 末梢神経を逆行して前角細胞が興奮し、それによって抑制される。2) 正中神経を刺激することにより、知覚神経を順行性に伝わって後根から前角細胞へと post synaptic に抑制する。3) 前角細胞の興奮が Rensho 細胞を興奮させ、それによって抑制が生じる。

1) については、synaps を介していないためにシナプス後膜の受容器に変化が生じない。したがって、長時間の興奮抑制が生じる可能性は少ない。また、この現象が存在するならば、F波の記録は事実上あり得ない。2) について鏡原ら<sup>22)~24)</sup>は、下肢における拮抗筋の H-reflex において post synaptic inhibition の影響について報告し、その抑制時間は約40~90 ms と述べている。抑制時間の延長という点で当研究と類似した結果であろうと考える。しかし、本実験のように、同一筋での TMS や ES を用いた前角細胞の抑制時間に関する報告ははまだ認められず、萌芽的研究として意義深い報告であると考えられる。3) については、Renshow 細胞による抑制は、周辺の閾値下の運動神経プールを抑制することで、中心の運動神経の活動を際立たせる働きがあると考えられており、その抑制時間は長いものでは75~100 ms との報告も認められる<sup>25)</sup>が、その抑制メカニズムは明らかとはなっておらず、今後の検討課題といえる。

一般に、1つの運動単位の発火は5~30 c.p.s の頻度で安定していると言われている<sup>26), 27)</sup>。また、筋活動電位の周波数スペクトルについて、正常筋では収縮力を上げると firing rate も上がることが知られているが、随意最大筋収縮時の全ての頂点は100~200 c.p.s<sup>28)</sup>と報告されている。同時に発火する運動単位数が数個増えると1つの運動単位当たりの firing rate は30 c.p.s 程度となる。それは、前角細胞が発火しすぎないように、安全装置としての作用が働いている可能性があるため、今回の実験における抑制時間が被検者によっては30 ms 以上と長かったことは、このこととよく

一致している。これらを裏付ける一因として興味深い結果が得られたと考えられる。

潜時の遅れなかった群については、前角細胞の抑制時間が短かった可能性もその一因と考えられる。一方、潜時の遅れた群でも抑制時間が30 ms 以上と長いものが多かったにもかかわらず、TMS 後に平均2.1 ms の潜時の遅れをもって波形が出現している。同一細胞が抑制されている間に興奮することはあり得ないため、遅れて出現する波形は、同一の前角細胞の興奮によって出現したものではないと考えられる。すなわち、この波形は正中神経以外の神経を支配する前角細胞の興奮によるもので、特に尺骨神経を伝わってその支配筋が発火した活動電位を volume conduction として記録した可能性が高い。このことを確認するには、他の神経を切断して同様の実験を遂行する必要がある。しかし、ヒトでの確認は困難であるため、動物を用いた研究が有用となる。著者は、すでに小動物による MEP の記録について研究を行った<sup>29)</sup>。その結果、ラットや家兎など小動物では麻酔の影響が大きいので、MEP の記録は困難であることが知られた。

今後は、ヒトでの神経ブロックを用いた研究や、volume conduction の影響を受けにくい正中神経以外の神経による研究、多重神経 collision などについて検討する予定である。

## 結 語

今回、ヒトにおいて、末梢神経の ES による前角細胞の興奮に続いて、TMS による再興奮の有無を検討した。その結果 以下のことが新たに知られた。1) 表面電極、同心型針電極および single fiber 針電極を用いて単独で MEP を記録したところ、振幅、潜時ならびに持続時間について、これら3群間に、電極による明らかな差は認めなかった。波形に関しては single fiber 針電極を用いた場合は、表面電極および同心型針電極の場合とは異なり、形の異なる先鋭な2相性ないし3相性波形が多数記録された。

2) TMS のみの波形と前角細胞より末梢で collision を起こさせた波形とを比較したところ, collision technique を用いた場合の方が潜時に延長が認められた。3) ES が先に前角細胞に到達した後に TMS が前角細胞に到達するよう設定した場合には, 62例中45例に潜時の遅れが認められ, 31 ms の delay time では15例に認められた。

前角細胞での抑制時間が10 ms を超える例も認められることより descending volleys の骨格筋からの記録は疑わしいと考えられる。今後 volume conduction の概念も考慮して更なる検討を続けたい。

## 謝 辞

稿を終えるにあたり, ご指導とご校閲を賜りました。

## 文 献

- 1) 菅原憲一, 鶴見隆正, 矢作 晋, 笠井達哉: 肢位変化が運動誘発電位に及ぼす影響. 総合リハ 26: 773-779, 1998
- 2) 出江紳一: 経頭蓋磁気刺激-計測値の意義と問題点およびリハビリテーションへの臨床応用-. 総合リハ 24: 109-121, 1996
- 3) Barker AT, Jalinous R, Freeston IL: N on-invasive magnetic stimulation of the human motor cortex. Lancet 1: 1106-1107, 1985
- 4) Rossini PM, Barker AT, Berardelli A: N on-invasive electrical and magnetic stimulation of the brain, spinal cord and roots; basic principles and procedures for routine clinical application. Report of an IFCN committee. Electroencephalogr Clin Neurophysiol 91: 79-92, 1994
- 5) Betts RP, Johnston DM, Brown BH: Nerve fibre velocity and refractory period distributions in nerve trunks. J Neurol Neurosurg Psychiatry 39: 694-700, 1976
- 6) Buchthal F, Rosenfalck A: Evoked action potentials and conduction velocity in human sensory nerves. Brain Res 3: 1-4, 1966
- 7) Hopf HC, Lowitzsch K, Galland J: Conduction velocity during the supernormal and late subnormal periods in human nerve fibres. J Neurol 211: 293-298, 1976
- 8) Tackmann W, Lehmann HJ: Refractory period in human Sensory nerve fibres. Europ Neurol 12: 277-292, 1974
- 9) Tackmann W, Lehmann HJ: Relative refractory period of median nerve sensory fibres in the carpal tunnel syndrome. Europ Neurol 12: 309-316, 1974
- 10) Patton HD, Amassian VE: Single-and multiple-unit analysis of cortical stage of pyramidal tract activation. J Neurophysiol 17: 345-363, 1954
- 11) Amassian VE, Stewart M, Quirk GJ, Rosebthal JL: Physiological basis of motor effects of a transient stimulus to cerebral cortex. Neurosurgery 20: 74-93, 1987
- 12) Day BL, Dressler D, Maertens de Noordhout A, Marsden CD, Nakashima K, Rothwell JC, Thompson PD: Electric and

川崎医科大学リハビリテーション医学教室 椿原彰夫教授に深謝いたします。また, 始終有益な御助言を頂きました川崎医科大学名誉教授 明石 謙先生ならびに東海大学リハビリテーション学教室 出江紳一助教授, 直接ご指導をいただきました川崎医科大学リハビリテーション医学教室 竹中 晋講師, 実験についてご協力頂いた教室員の諸先生ならびに生理機能センター職員の皆様に深く感謝いたします。

なお, 本論文の要旨の一部は第36回日本リハビリテーション医学会学術集会(1999年5月, 於鹿児島), 第29回日本脳波・筋電図学会学術大会, 第30回日本臨床神経生理学会学術大会(1999年11月, 於東京, 2000年12月, 於京都)において発表した。

- magnetic stimulation of human motor cortex ; surface EMG and single motor unit responses. *J Physiol (Lond)* 412 : 449-473, 1989
- 13) 木村 淳：神経・筋疾患の電気診断学 原理と実際（栢森 良二訳）西村書店。1989, pp 136-142
  - 14) 小林 誠, 兵頭 亮, 上野照剛, 黒川高秀：経頭蓋磁気刺激による運動誘発電位の早期成分は皮質内抑制を受け難い。脳波と筋電図 26 : 137, 1998
  - 15) Bert UK, Joleen HB, Robert O, Peter P, DICK FS : Magnetic stimulation-induced modulations of motor unit firings extracted from multi-channel surface EMG. *Muscle Nerve* 23 : 1005-1015, 2000
  - 16) 木村 淳：神経・筋疾患の電気診断学。原理と実際（栢森 良二訳），西村書店。1989, pp 93-122
  - 17) Ekstedt J : Human single muscle fiber action potentials. *Acta Physiol Scand (suppl 226)* 61 : 1-12, 1964
  - 18) Kimura J : Electrical activity in voluntarily contracting muscle. *Arch Neurol* 34 : 85-88, 1977
  - 19) 木下真男, 高宮清之：筋電図の読み方。新興医学出版社。1998, pp 27-31
  - 20) 牟礼 亨, 平岡 崇, 塚本芳久, 椿原彰夫, 明石 謙：経頭蓋的磁気刺激法による運動誘発電位 (MEP) の針電極による記録 (第3報) Collisionmethod を施行した場合の活動電位の変化。臨床神経生理学 28 : 146, 2000 (抄録)
  - 21) 牟礼 亨, 目谷浩通, 塚本芳久, 椿原彰夫：経頭蓋的磁気刺激法による運動誘発電位 (MEP) の記録 : Collisionmethod における逆行性刺激部位の検討。臨床神経生理学 29 : 154, 2001 (抄録)
  - 22) 鏡原康裕, 正門由久：ヒトの足関節部における皮膚神経刺激による下肢運動ニューロンの興奮性の変化。臨床脳波 38 : 702-706, 1996
  - 23) 鏡原康裕, 林 明人, 中島八十一, 長岡正範, 大熊泰之, 田中勘作：Magladery 式 H 反射回復曲線の再評価 足関節の動きによる影響。臨床脳波 39 : 245-249, 1997
  - 24) 鏡原康裕：運動時における相反性抑制機能の障害。臨床脳波 40 : 73-77, 1998
  - 25) Triggs WJ, Cros D, Macdonell RA, Chiappa KH, Fang J, Day BJ : Cortical and spinal motor excitability during the transcranial magnetic stimulation silent period in humans. *Brain Res* 628 : 39-48, 1993
  - 26) Clamann HP : Activity of single motor units during isometric tension. *Neurology (Minneapolis)* 20 : 254-260, 1970
  - 27) Tanji J, Kato M : Recruitment of motor units in voluntary contraction of a finger muscle in man. *Exp Neurol* 40 : 759-770, 1973
  - 28) Walton JN : The electromyogram in myopathy : Analysis with the audio-frequency spectrometer. *J Neurol Neurosurg Psychiatry* 15 : 219-226, 1952
  - 29) Hiraoka T : Accuracy in the recording of motor evoked potentials (MEP) in rodents : Reaction evoked by transcranial magnetic stimulation (TMS) and electrical stimulation (ES). *Kawasaki Med J* 27(2), 2001 (in Press)