

徹底分析  
シリーズ

## 神経モニタリング

整形外科と  
神経モニタリング信頼性の高い  
MEPモニタリングを目指して

安藤 宗治 15a 新ゴM

近年の医療機器の発達に伴い脊椎神経外科領域においても高難度の手術が行われるようになってきており、術中に神経障害が生じる危険性が高まってきていると考えられる。したがって術中神経モニタリング intraoperative neuromonitoring (IONM) の必要性がますます高まってきているといえる。現在の IONM のゴールドスタンダードは経頭蓋刺激・運動誘発電位 transcranial stimulation motor evoked potential (Tc-MEP) であるが、いくつかのピットフォールがあり理解しておくことが重要である。

13a レキ/明細 (W2) → ベタ  
17w 詰 (22) H  
16a ロギ/B → ベタ  
17H (以下同)

術中に主に錐体路の評価を行うために用いる電位であり、経頭蓋的に電気刺激を加え四肢から複合筋活動電位 compound muscle action potential (CMAP) を記録する。

刺激方法 14a ロギ/B (以下同)  
刺激部位は C3, C4 に設置する方法や、Cz から外側 5 cm 前方 2 cm に左右対称に設置する方法などがあるが、筆者らは後者を用いている。

脊椎神経外科領域では脳外科領域と異なり経頭蓋的に強い刺激を加えたとしても、被刺激部位が病変部を超えることはないため、安定した MEP を記録するためには定電流刺激の場合 200 mA 程度で刺激すること多いが、刺激によって体動が生じるため手術操作中の刺激は控える必要がある (コメント 1)。

刺激電極は、コックスクリュー型電極、針電極、皿電極などがあるが、安定性を考えるとコックスクリュー型電極 (図 1) が最も適している。術中に刺激電極の逸脱が生じると MEP 振幅が低下したり、記録できないといった

ことが生じたりするため、電極の安定した固定性は重要である。

全身麻酔下では脊髄前角細胞の興奮性が低下しているため、前角細胞を発生させるためには経頭蓋的に連発刺激を加えて興奮性シナプス後電位 excitatory postsynaptic potential (EPSP) を加重させる必要がある (図 2)。筆者らは刺激幅 0.5 m の刺激を刺激間隔 interstimulus interval (ISI) 2msec で 5 連発の刺激を加えている。しかしながら、麻痺が強い場合などでは連発刺激ごとの MEP 振幅が安定しないことをしばしば経験する (図 3)。そのような場合には何回か連続して MEP を記録すると振幅が安定することがある。あるいは連発刺激を数回加算すると安定した振幅の評価が可能となることもある。

## 麻酔

日本麻酔科学会の『MEP モニタリング時の麻酔管理のためのプラクティカルガイド』<sup>1)</sup>では、脊椎手術の場合、吸入麻酔で電位が得られれば吸入麻酔の使用でもよいとされているが、経験上、全静脈麻酔 (TIVA) のほうが MEP 振幅は大きく記録できるため全静脈麻酔を用いる場合が多いと考えられる。

筋弛緩薬は多くの場合には執刀開始前には拮抗することが多いが、筋弛緩モニター下に一定した量を持続的に使用する方法もある。

## 記録

手術によって影響を受けることのない筋からも MEP を記録することが必要である。これはコントロール MEP とよび、手術操作以外の、麻酔など全身的な影響で MEP が低下しているかどうかの判断となる。一般の中下位頸椎の手術であれば胸鎖乳突筋や僧帽筋が用いられることが多く、胸椎手術や腰椎手術であれば上肢筋が用いられる。次に、手術操作によって影響を受ける可能性のある筋から MEP を記録する。記録チャンネル数の制限がある場合も多く、手術の内容によって筋を選択する。脊髄前角細胞あるいはその末梢の神経根に障害が生じる可能性のある場合には当該神経支配の筋から MEP を記録する必要がある。また、髄内腫瘍手術以外で長索路 (錐体路) をモニタリングしたい場合には、少なくとも母趾外転筋 abductor hallucis (AH) から MEP を記録する必要がある (コメント 2)。

MEP 記録のタイミングであるが、まずは麻酔が安定した時点での執刀前にベースライン波形を記録する。そして、脊髄に侵襲が生じる可能性のある操作の前後、手術終了時には必ず電位を記録する。それ以外にも定期的に MEP の記録を行う必要がある。何らかの影響で MEP の振幅低下が生じて、長時間気がつかないことがあり得るからである。

徹底分析シリーズ 神経モニタリング 10a 新ゴR  
色ベタ + スミベタ 20% (以下同)

図 2 連発刺激による EPSP (excitatory post synaptic potential, 興奮性シナプス後電位) の加重

全身麻酔下では経頭蓋刺激の単発刺激では EPSP は閾値を超えることができず、脊髄前角細胞は興奮しないが、連発刺激では EPSP が加重された結果、閾値を超え脊髄前角細胞が興奮する。

図中ネーム  
・基本 1/2 M 中 G BB (10a 以下は、ロギ/B)  
・太くするネーム 1/2 B 太 G B101 (10a 以下は、ロギ/B) (以下同)

図版は、0.12 秒 4 回 色ベタ 20% 囲む (以下同)

(前後) 70% → 88%

## 図 3 Tc-MEP の不安定性

Tc-MEP は刺激ごとに振幅が変動することも多く、術中の波形の比較には安定した波形であるかどうかを確認する必要がある。

(以下同) 40% → 117%

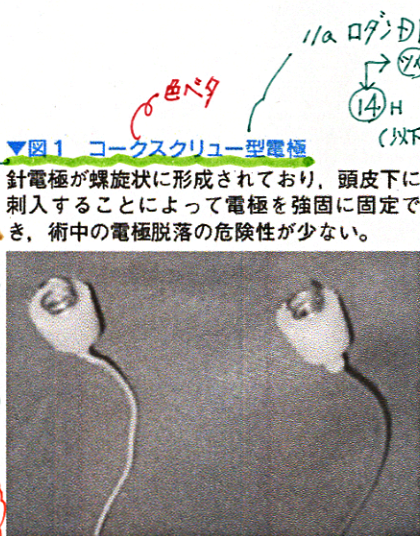
## コメント 1 最大上刺激

経頭蓋刺激においてしばしば最大上刺激という表現が用いられることがある。神経生理学的には、一般に末梢神経を刺激する際に、神経に含まれる軸索全体を興奮させ、それ以上刺激を強めても誘発電位の振幅が大きくなり刺激を最大刺激とよび、最大刺激以上の強さのものを最大上刺激とよ

ぶ。経頭蓋刺激においては刺激装置の最大出力で刺激した場合においても、錐体路をすべて興奮させているかどうかを確認することは現実的にはほぼ不可能であり、経頭蓋刺激で最大上刺激という言葉を用いることは不適切と考える。

## アラームレベル

Tc-MEP のアラームレベルに関しては多数の報告があり、一致した見解はないが、日本脊椎神経学会モニタリング委員会ではベースラインの振幅の 70% 以上の低下をアラームレベルに



ANDO, Muneharu 関西医科大学 整形外科 0.5 秒 4 回 色ベタ 20% 天地 4 回



徹底分析  
シリーズ

## 神経モニタリング

▼図4 術中 Tc-MEP の変化 (文献4より, 改変)

術中ロッドを仮固定した際に上肢の電位に変化はなく下肢の電位が消失したために術中障害が生じたと判断し、ロッドをいったん除去した。  
椎弓切除範囲を拡大しロッドを再固定した際には下肢の電位振幅は正常に回復していた。

(以上) 78% ↑ 117%

## コメント2

- ①短母趾外転筋 abductor pollicis brevis (APB) は主に T1 支配のため、胸椎手術でも上位胸椎の場合にはコントロール MEP にはならない。
- ②母趾外転筋 (AH) は大腿四頭筋や前脛骨筋に比べて安定して記録できることが多いので、錐体路のモニタリングには AH から MEP を記録することが望ましい。髄内腫瘍の手術では錐体路の中でも部分的に障害される場合もあり得るので、錐体路のモニタリングもできるだけ多チャンネルにすることが推奨される。

設定している<sup>3)</sup>。除圧操作などの手術操作の最中に MEP 振幅が低下した場合にはその操作を中断し、振幅が回復した後に手術操作を再開する必要がある。またインプラントを挿入した後や脊柱配列を矯正した後に振幅が低下した場合は、インプラントを抜去したり矯正した脊柱配列を元に戻したりといった操作を行い、振幅が回復するか確認する。振幅が回復すれば振幅に変化がないかを確認しつつ、手術操作を再開する<sup>4)</sup> (図4)。

問題点1:  
fade 現象

Tc-MEP における最大の問題点は fade 現象が生じるという点である。fade 現象とは、麻酔が安定していても手術時間が長くなるにつれて MEP の振幅が低下したり、刺激閾値が上昇したりする現象で、特にともともとと脊髄障害を有するとその程度は高くなる。fade

現象の原因として、脊髄前角細胞の興奮性の低下が指摘されている<sup>5)</sup>。術中に MEP 振幅が低下した際には技術的な問題であるのか、麻酔薬など全身的な影響であるのか、神経障害であるのかあるいは fade 現象が生じているのかの鑑別が即座に必要な。

## 対策

fade 現象の対策として現時点では、刺激方法を工夫したり、ほかのモダリティを併用したりする方法が考えられている。

## ◎ post tetanic MEP

末梢神経に高頻度刺激を加えた後 Tc-MEP を記録する方法である。Hayashi ら<sup>6)</sup>は四肢の末梢神経幹に 50 mA, 50 Hz, 5 秒間の刺激を加えた 1 秒後に経頭蓋刺激を加えて MEP を記録したところ、MEP の振幅増大現象が確認できたと報告している。さらに脊柱側弯症矯正手術において通常の Tc-MEP の振幅が矯正中に低下したものの、post tetanic MEP の振幅は低下しなかった症例を提示している。通常の Tc-MEP で fade 現象が生じたものの post tetanic MEP では fade 現象が生じなかった可能性がある。

## ◎ multitrain 刺激法

通常の Tc-MEP の刺激方法は先にも述べたように、ISI を 2 msec として 5 連発刺激を加えることが多いが、multitrain 刺激法はこの 5 連発刺激を 200 msec あけて数回繰り返して刺激する方法である<sup>7,8)</sup> (図5)。本法でも、通常の Tc-MEP より振幅は増大するため fade 現象に対して有効である可能性がある (図6)。

## ◎ 定電圧刺激による Tc-MEP

通常、定電流刺激による Tc-MEP を記録することが多いが、定電圧刺激による Tc-MEP を記録することも可能である。Tanaka ら<sup>9)</sup>は、定電圧刺激では定電流刺激よりも fade 現象が少なかったと報告している。その機序については現時点では不明確ではあるが、定電圧刺激の場合には、定電流刺激の場合よりも脳の深部が刺激されるとの報告があり、このことが関与している可能性もある<sup>10,11)</sup>。

## ◎ 経頭蓋刺激・脊髄誘発電位

## transcranial stimulation spinal cord evoked potential (Tc-SCEP)

経頭蓋刺激を加えて脊髄から記録した誘発電位である。実際には手術操作を行う部位よりも末梢の硬膜外腔にカテーテル電極を挿入して電位を記録する。D wave と呼称されることがあるが、本来 D wave は大脳皮質運動野を直接刺激して脊髄から誘発電位を記録したものであり、経頭蓋刺激の刺激強度を強くすると D wave とは異なった成分が含まれる可能性もある。本電位は主に錐体路を下行する電位と考えられており、Tc-MEP とは異なりシナプスを經由することがないため、麻酔の影響を受けにくく安定して電位が記録できる。Shigematsu ら<sup>12)</sup>は Tc-MEP と Tc-SCEP を併用した IONM では Tc-MEP 単独よりも偽陰性が少なかったと報告している。このことは筆者らも経験しており、Tc-MEP で出現した fade 現象が Tc-SCEP では出現しなかった可能性が考えられる (図7)。

Tc-SCEP の問題点としては、電位の振幅が小さいため、脊髄障害が高度な場合にはベースラインの電位が記録できない場合がある。また脊髄に障害

▼図5 Tc-MEP の multitrain 刺激法  
トレイン刺激を 200 msec の間隔をあけて数回刺激を繰り返す。

(以上) 27% ↑ 117%

▼図6 multitrain 刺激法を施行した術中 MEP モニタリング

83 歳女性の頸椎骨折に対する C2-T2 後方固定術において multitrain 刺激法による Tc-MEP を記録した。左母趾外転筋は手術終了時に通常の Tc-MEP の振幅はベースラインに比べて著しく低下したものの、multitrain 刺激では変化は見られなかった。術後新たな神経症状の出現は認めなかった。

(以上) 90% ↑ 117%

を認めない症例においても電位の時間的分散のため遠位に行くに従って振幅がより小さくなるため、もともとの脊髄障害の程度にもよるが下位胸椎高位では電位が記録しにくくなることもある (図8)。

## ◎ 脊髄刺激・運動誘発電位

## spinal cord stimulation motor evoked potential (Sp-MEP)

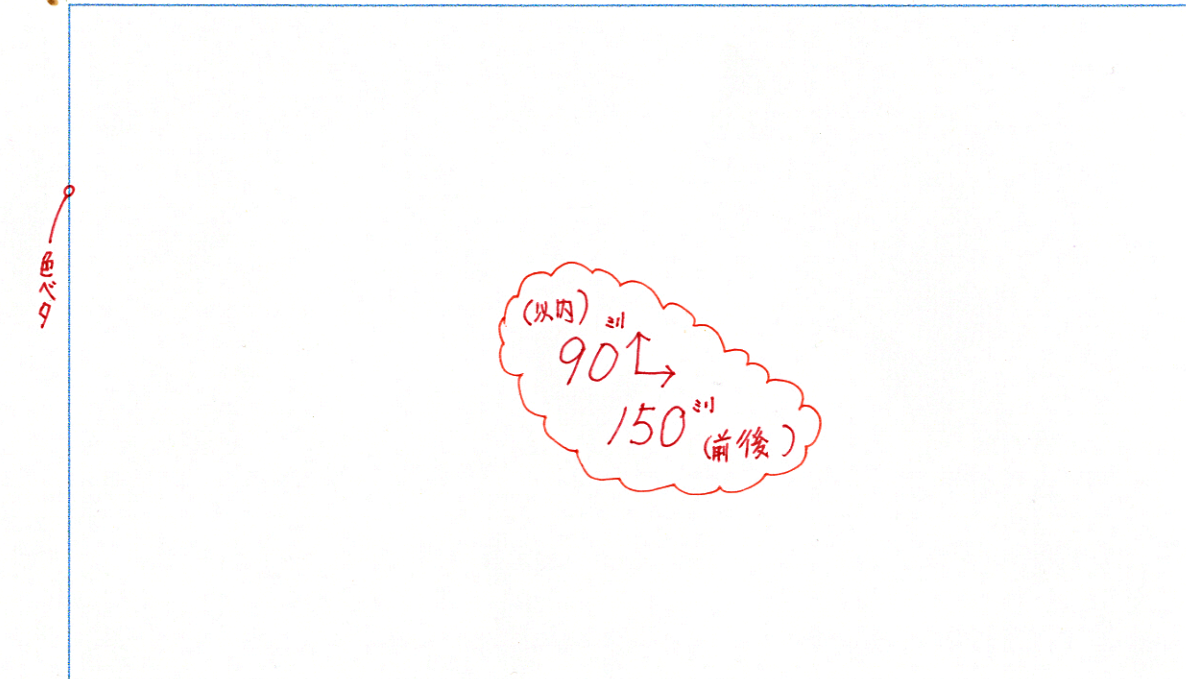
手術操作部位より頭側の硬膜外腔へカテーテル電極を挿入して刺激を行い、CMAP を記録する。本電位の経路には脊髄前角細胞の部位でシナプスを經由することから Tc-MEP と同様に連

発刺激が必要である。刺激強度は経頭蓋刺激ほどは強くなく 10 ~ 30 mA 程度である (図9)。本電位は運動路のみではなく脊髄後索を經由した電位であるとの意見もあった<sup>13)</sup>が、筆者らの臨床研究で、本電位が運動路のみを經由する電位であることを示した<sup>14)</sup>。また、本電位は経食道刺激による MEP とほぼ同一の電位と考えられる<sup>15)</sup>。本電位は胸椎高位の手術に用いることが多く Tc-MEP よりも振幅は大きい。その理由としては脊髄に近接した硬膜外電極により脊髄内の皮質脊髄路をより強く刺激できる可能性がある



▼図7 術中 Tc-MEPと Tc-SCEPの比較

Tc-MEPは手術終了時に下肢で著しく電位振幅が出たが、Tc-SCEPでは変化は見られなかった(矢印)。術後、新たな下肢運動麻痺は出現せず、Tc-MEPのfade現象に対してTc-SCEPは有効であったと考えられる。



ことと、経頭蓋刺激に比べ刺激部位がより記録部位に近いため脊髄を下行する multiple descending volley の時間的分散が小さく経頭蓋刺激に比べ脊髄前角細胞レベルで EPSP の加重が生じやすいこと、さらに皮質脊髄路のみならず錐体外路も容易に刺激できるため、脊髄前角細胞への入力量が経頭蓋刺激よりも多いことなどが考えられる。したがって、Tc-MEP よりも振幅の大きい Sp-MEP では fade 現象が小さくなる可能性が考えられる (図10)。

## 問題点2: 単根障害を検知できない可能性

Tc-MEPでは1本の神経根を障害した場合には MEP 振幅の低下が生じない場合があると報告されている<sup>16,17)</sup>。この理由として、筋は複数の神経根から支配されていることや、ある筋から記録する Tc-MEP はその筋を支配している末梢神経を刺激した際の CMAP

よりもかなり振幅が小さいことが関与している可能性がある。したがって単根障害が生じる危険性が高い場合には、その神経が支配している筋から、神経への侵襲が生じた際に自発筋電図を記録できるように監視したり、腰椎神経根スクリューを挿入する場合には、スクリューが椎弓根から逸脱して神経根に接触していると、スクリューを電気刺激した際に神経が刺激され CMAP が記録できることから (triggered EMG)、CMAP の刺激閾値を計測して神経根とスクリューが近接していないかどうか評価する方法がある。

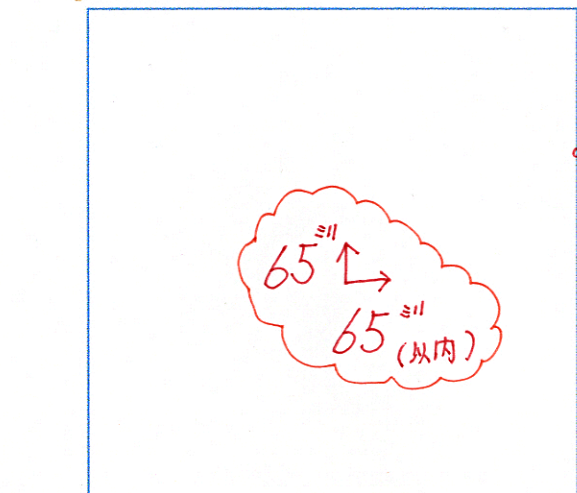
## 問題点3: 合併症

経頭蓋電気刺激による合併症の中で、口腔内損傷に最も注意する必要があると報告されている<sup>18)</sup>。これは、電気刺激によって咬筋が強く収縮することにより、舌や口腔内粘膜に咬傷が生じ

たり、歯牙損傷を引き起こしたりするためである。これらの損傷を確実に防ぐために、必ずガーゼなどの柔らかい素材で作られたバイトブロックを用いる必要がある。また、バイトブロックを使用している、気管チューブが損傷したとの報告があるため、細心の注意を払うべきである。なお、仰臥位での手術においても同様に口腔内保護の配慮が求められる。

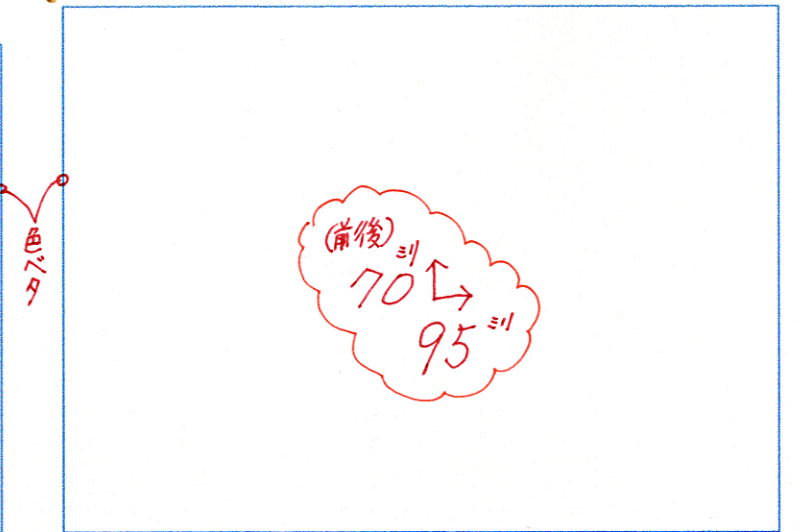
信頼できる IONM を施行するにあたっては、手術に関係する多職種間で情報を共有しコミュニケーションを密にする必要がある、この点が疎かになると思われ事態が生じ得る (図11)。現在、Tc-MEP が最も頻繁に IONM に用いられているが、その特徴とピットフォールをよく理解したうえで、ほかのモダリティの併用や刺激方法を調整することにより信頼できる IONM を行うことが可能になる。

▼図8 57歳男性、C<sub>6</sub>神経根症(脊髄症は認めず)における各脊椎高位でのTc-SCEPの振幅の変化



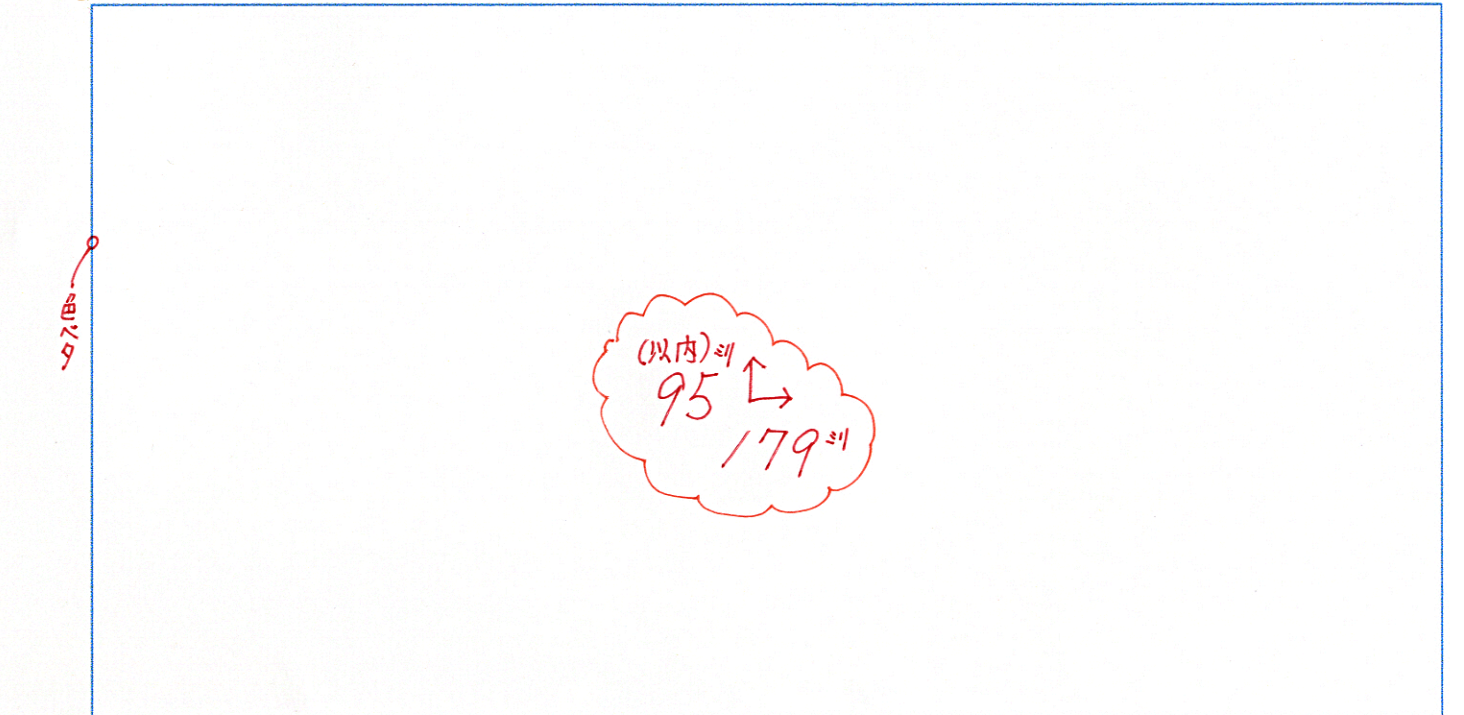
▼図9 Sp-MEPの脊髄刺激方法

カテーテル電極を手術操作部位の頭側硬膜外腔に挿入し連発刺激を加える。刺激幅は0.2 msec, ISIは経頭蓋刺激と同様の2 msec, 刺激強度は10~40 mAとする。



▼図10 術中Tc-MEPとSp-MEPの比較

手術終了時にはTc-MEPで下肢の電位が消失したり振幅が著しく低下したりしたが、Sp-MEPの電位には変化が見られなかった。術後に新たな下肢の運動機能障害は出現せず、Tc-MEPのfade現象に対してSp-MEPが有効であったと考えられる。



## 文献

1. 日本麻酔学会 安全委員会 MEP モニタリングガイドライン作成 WG. MEP モニタリング時の麻酔管理のためのプラクティカルガイド. 2018年11月. (https://anesth.or.jp/files/pdf/mep\_monitoring\_practical\_guide.pdf) (2025年●月●日閲覧)
2. Kobayashi K, Ando K, Nakashima H, et al. Poor derivation of Tc-MEP baseline waveforms in surgery for ventral thoracic intradural extramedullary tumor: efficacy of use of the abductor hallucis in cases with a preoperative non-ambulatory status. J Clin Neurosci 2021; 84: 60-5.
3. Kobayashi S, Matsuyama Y, Shinomiya K, et al. A new alarm point of transcranial electrical stimulation motor evoked potentials for intraoperative spinal cord monitoring: a prospective multicenter study from the Spinal Cord Monitoring Working Group of the Japanese Society for Spine Surgery and



# 徹底分析 シリーズ 神経モニタリング

## 5H 色ベタ 術中誘発電位の変化

術中に術者ならびにIONM施行者に報告なく麻酔薬がプロポフォールからセボフルランに変更されてしまっていた。吸入麻酔薬に変更となったことで脊髄前角細胞の活動性が低下し、Tc-MEPの振幅が著しく低下した。幸いTc-MEPを記録していたため、本電位を指標として手術を継続することができた。本症例は手術を依頼されて出張先の病院で施行した手術であり、各職種間に緊密な連携が取れていなかったことが原因と考えられる。

(以内) 98%  
138%  
(以内)

22  
9

- Related Research. J Neurosurg Spine 2014 ; 20 : 102-7.
- 安藤宗治. 術中脊髄モニタリングの歴史と現在のスタンダード. 整・災外 2025 ; 68 : 741-50.
- MacDonald DB, Skinner S, Shils J, et al. Intraoperative motor evoked potential monitoring - a position statement by the American Society of Neurophysiological Monitoring. Clin Neurophysiol 2013 ; 124 : 2291-316.
- Hayashi H, Kawaguchi M, Yamamoto Y, et al. Evaluation of reliability of post-tetanic motor-evoked potential monitoring during spinal surgery under general anesthesia. Spine (Phila Pa 1976) 2008 ; 33 : E994-E1000.
- 齋藤貴徳, 串田剛俊, 石原幸ほか. 術中モニタリングに用いる経頭蓋電気刺激筋記録運動誘発電位の刺激法の工夫による振幅増大効果. 脊髄機能診断 2011 ; 32 : 126-30.
- Tsutsui S, Yamada H, Hashizume H, et al. Quantification of the proportion of motor neurons recruited by transcranial electrical stimulation during intraoperative motor evoked potential monitoring. J Clin Monit Comput 2013 ; 27 : 633-7.
- Tanaka M, Shigematsu H, Kawaguchi M, et al. Muscle-evoked potentials after electrical stimulation to the brain in patients undergoing spinal surgery are less affected by anesthetic fade with constant-voltage stimulation than with constant-current stimulation. Spine (Phila Pa 1976) 2019 ; 44 : 1492-8.
- Tsubokawa T, Yamamoto T, Hirayama T, et al. Clinical application of cortico-spinal evoked potentials as a monitoring of pyramidal function. Nihon Univ J Med 1986 ; 28 : 27-37.
- Ando M, Tamaki T, Yoshida M, et al. Intraoperative spinal cord monitoring using combined motor and sensory evoked potentials recorded from the spinal cord during surgery for intramedullary spinal cord tumor. Clin Neurol Neurosurg 2015 ; 133 : 18-23.
- Shigematsu H, Ando M, Kobayashi K, et al. Efficacy of D-wave monitoring combined with the transcranial motor-evoked potentials in high-risk spinal surgery : a retrospective multicenter study of the monitoring committee of the Japanese Society for Spine Surgery and Related Research. Global Spine J 2023 ; 13 : 2387-95.
- Deletis V, Seidel K, Sala F, et al. Intraoperative identification of the cortico-spinal tract and dorsal column of the spinal cord by electrical stimulation. J Neurol Neurosurg Psychiatry 2018 ; 89 : 754-61.
- Ando M, Tamaki T, Maio K, et al. The muscle evoked potential after epidural electrical stimulation of the spinal cord as a monitor for the corticospinal tract : studies by collision technique and double train stimulation. J Clin Monit Comput 2022 ; 36 : 1053-67.
- Kurita T, Kawashima S, Khaleelullah MMSI, et al. Transesophageal motor-evoked potentials, a novel method induced by transesophageal spinal cord stimulation, are less sensitive to anesthetics than transcranial motor-evoked potentials. J Anesth 2025 ; 39 : 198-204.
- Iwasaki H, Tamaki T, Yoshida M, et al. Efficacy and limitations of current methods of intraoperative spinal cord monitoring. J Orthop Sci 2003 ; 8 : 635-42.
- Tsutsui S, Tamaki T, Yamada H, et al. Relationships between the changes in compound muscle action potentials and selective injuries to the spinal cord and spinal nerve roots. Clin Neurophysiol 2003 ; 114 : 1431-6.
- Yoshida G, Imagama S, Kawabata S, et al. Adverse events related to transcranial electric stimulation for motor-evoked potential monitoring in high-risk spinal surgery. Spine (Phila Pa 1976) 2019 ; 44 : 1435-40.