

## 神経モニタリング

徹底分析  
シリーズ脳神経外科と  
神経モニタリング32a ロダンM  
34 H

色80% + スミ90%

佐々木 達也・鷲谷 万葉・遠藤 俊毅 15a 新ジM

36a 新ジB  
37 H  
色80%  
スミ90%

0.1ミリケイ・色ベタ

本文 13a クラギ/明細(2) → ベタ 17w 詰  
22 H運動誘発電位  
motor evoked potential  
(MEP)

現在、MEP は経頭蓋刺激筋電図記録の muscle MEP が主流である。以下、MEP という記載は、注釈がない場合 muscle MEP を意味するものとする。

麻酔はプロポフォルおよびオピオイドを基本とし、筋弛緩薬は麻酔導入時のみの使用とする。吸入麻酔薬でも MEP が記録可能であるという報告は散見されるが、吸入麻酔薬のほうがよいという報告はない<sup>1)</sup>。また、MEP では咬傷が報告されている<sup>2)</sup>ので、挿

管時にはガーゼを丸めたバイトブロックを使用するなどの対策が必要である。 MEP は筋電図であるので、筋弛緩の

モニターは必須である。通常、尺骨神経または正中神経を四連 train-of-four (TOF) 刺激して1発目と4発目の比 (T4/T1) で示される。後に述べる体性感覚誘発電位1 (SEP) で正中神経の刺激電極を設置するので筆者らは正中神経刺激の TOF を用いている。日本麻酔科学会のプラクティカルガイド<sup>3)</sup>では「0.6 以上に回復していることを確認してからベースラインを記録する」と記載されているが、筆者らはさ

11a ロダンDB → ④ H (以下同)

図1 MEPの実験

左: TOF は 2 Hz (0.5 秒ごと) の刺激を4回行い、1回目 (T1) と4回目 (T4) の比 (T4/T1) から TOF を算出する。  
右: スガマデクスにて拮抗した。TOF 0.95 以上でベースラインを取得している。5H  
11a M中G BBB  
14 H (以下同)図中 ネム  
・基本 11a M中G BBB  
(10a 以下は、ロダンM)  
・太くするネム  
11a 新ジB101  
(10a 以下は、ロダンDB)  
(以下同)図版は、0.12ミリケイ  
色ベタが囲む  
(以下同)76 → 135  
(以内)10a クラギ/明細(3)  
SASAKI, Tatsuya・ENDO, Toshiki  
東北医科薬科大学 脳神経外科  
SAGIYA, Kazuha  
東北医科薬科大学病院 臨床工学部

0.5ミリケイ・色ベタ・矢印14ミ

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

色ベタ

11a M中G BBB (以下同)

▼図2 開頭側の閾値変化 (文献6より)

開頭後に有意に低下し、髄液吸引により徐々にしかも有意に上昇する。ここで重要なのは手術開始時にベースラインを取得し+20%で一定にすると一部の症例で偽陽性を生じることになる。開頭後にベースラインを取得し+20%で一定にすると約半数の症例で偽陽性を生じることとなる。

らなる精度向上のために0.95以上に回復してからベースラインを記録している。急いでベースラインを記録する必要があるれば、麻酔科医に依頼してスガマデクスにて拮抗する (図1)。

## 刺激方法

刺激方法は一般的にはC3、C4にコークスクリュー電極を設置し、高頻度単極刺激<sup>3)</sup>で5連発 (five train)、刺激間隔 interstimulus interval (ISI) 2 msec を用いることが多い。刺激幅は一般的に0.2 msec または0.5 msec を用いているが、筆者らは0.2 msec を基本として閾値上昇や波形消失時に0.5 msec を追加する方針としている。記録は上肢では短母指外転筋 abductor pollicis brevis (APB)、下肢では母趾外転筋 abductor hallucis (AH) を基本として、1対の針電極をbelly-tendon法 (筋腹に陰極、腱に陽極) で設置する。脊椎神経手術では必要に応じてモニタリングする筋を増やしている。

## 刺激強度

ここで問題となるのが刺激強度である。2005年にLyonらによりanesthetic fade現象 (AD) が報告された<sup>4)</sup>。これは麻酔時間の経過により、MEPの刺激閾値 (反応が開始する刺激強度の電流値) が上昇し振幅が低下するという現象である。複合筋活動電位 compound muscle action potential (CMAP) 補正によりADを抑制するという報告<sup>5)</sup>はあるが、筆者らの経験ではCMAP補正により振幅低下は有意に抑制するが完全ではなく、補正後も振幅低下は有意で、さらに閾値上昇には関与しないという結果であった。

これまでのMEPの報告では数多くの偽陽性・偽陰性 (×モ) が確認されているが、これは刺激強度の設定ミスによるものが多いと考えられる。

## 偽陰性をなくすための取り組み

基本的に偽陰性の多くは刺激強度が強すぎることが原因で、偽陽性は刺激強度を一定にしているために生じている現象と思われる。筆者らは脳動脈瘤の開頭手術において術中の刺激閾値の変動について初めて報告した (図2)。50例の検討では開頭後に刺激閾値は有意に低下し、その後の髄液吸引による気脳症や脳シフトにより徐々にしかも有意に上昇するというものであった (図3)。そしてその変動幅は開頭側で大きく、非開頭側で小さかった。筆者らは偽陽性をゼロにするための新しいプロトコルを開発した。それは刺激閾値を10分ごとに測定し、閾値+20%の刺激強度での振幅を評価する方法である。これにより偽陽性をゼロにすることが可能になった。すなわち偽陽性

(前後) 67 → 117

×モ

MEPの場合、偽陽性 false positive とは MEP が消失したのに術後に運動麻痺を認めない状況、偽陰性 false negative は MEP が不変なのに術後に運動麻痺が出現する状況である。一方、真陽性 true positive は MEP が消失して術後運動麻痺を認める状況、真陰性 true negative は MEP に変化を認めず術後運動麻痺を認めない状況である。

色・スミ10%



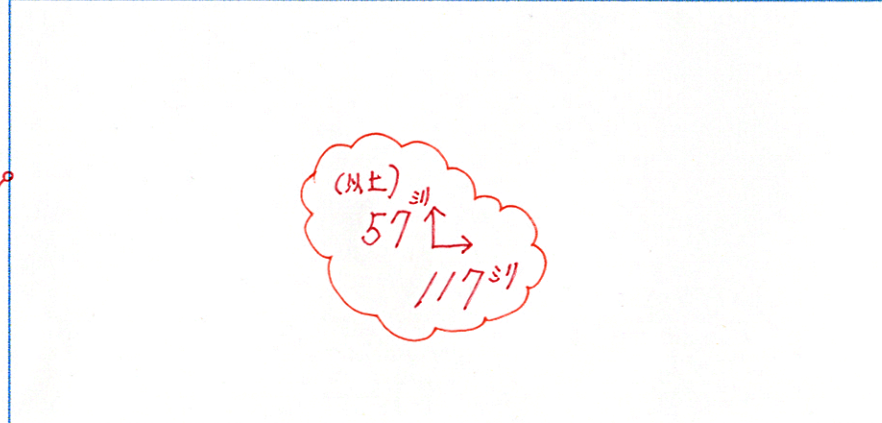
徹底分析  
シリーズ

神経モニタリング

※ 色ベタ + スミ 20% (以下同)

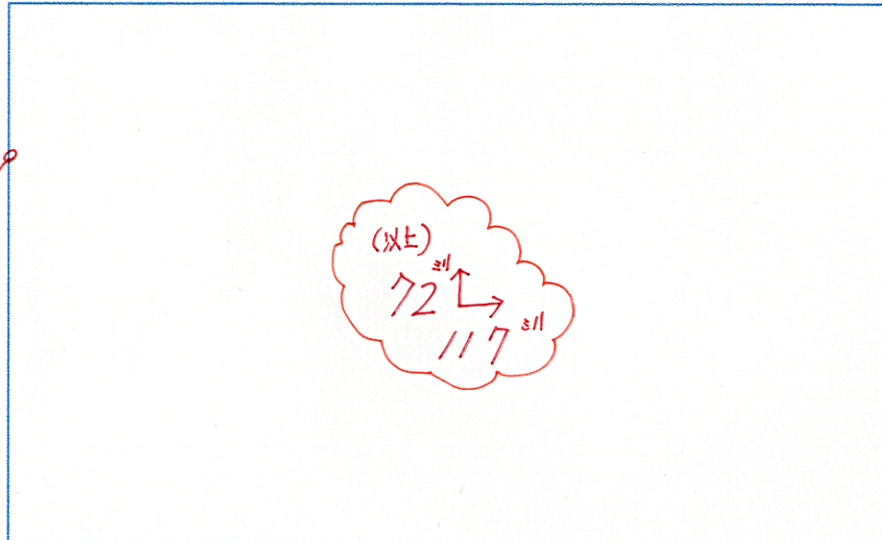
5H> 色ベタ  
▼図3 閾値の術中変化

開頭により頭蓋骨の抵抗が减弱し閾値は低下する。髄液吸引により脳シフトおよび気脳症を生じ、抵抗が上昇し閾値も上昇する。anesthetic fadeにより閾値上昇は助長される。ここで重要なのは刺激閾値が術中に変化していることである。安定したモニタリングのために刺激閾値+20%の刺激強度でフォローすれば偽陽性はゼロとなる。これが新しいプロトコルである。



5H> 色ベタ  
▼図4 経頭蓋MEPの被刺激部位

強すぎる刺激では脳幹部より末梢が刺激されテント上の異常をとらえられない偽陰性を生じる。閾値刺激では振幅が小さくばらつきがあり不安定である。そこで閾値+20%の刺激強度でフォローすることにより安定したモニタリングが可能となった。



載されていた。筆者らが15年前に作成したプロトコルも偶然、閾値+20%であったことはある程度妥当であったと思われる。偽陰性の最も多い原因は強すぎる刺激を用いていることである(図4)。強い刺激では脳幹部よりも末梢が刺激されテント上の異常をとらえることができないからである。筆者らの新しいプロトコルを用いても偽陰性を5例経験した<sup>6)</sup>。MEPは皮質脊髄路のモニタリング法であり、それ以外のいわゆる錐体外路系のモニタリングはできない。幸いなことに錐体外路系障害の片麻痺は一過性で軽度のことが多い。詳細は原著<sup>6)</sup>を参照されたい。

floating baseline の考え方

脳動脈瘤の手術では、クリッピングや親動脈の血流一時遮断の前に閾値を測定して+20%の強度でベースラインを再設定する(floating baseline)。そして、クリッピング後や遮断後には1分に1回の測定に切り替える。クリッピング後は20分間、遮断後は解除するまでモニタリングし、変化がなければその後通常の測定に戻している。現在筆者らは刺激閾値を15分ごとに測定し(四肢SEPも同時に記録しており時間がかかるため)、閾値+20%、閾値+50%、200 mAの刺激強度で振幅を計測し、直ちに表計算ソフト(Excel)に入力するという方法でデータを蓄積中である。

体性感覚誘発電位  
somatosensory evoked potential (SEP)

SEPは一般に上肢では正中神経刺激、下肢では脛骨神経刺激が用いられている。上肢SEPは以前から中大脳動脈領

域の血流不全のモニタリングとして使用され、脳幹や頸髄の手術でも使用されていた。現在その役割はMEPのほうが鋭敏で確実ではないかと考えられ、血流不全のモニタリングとしての使用頻度は低下している。下肢SEPは前大脳動脈領域の血流不全のモニタリングとして使用され、脊髄では胸髄以下のモニタリングとして使用されている。麻酔薬の影響は吸入麻酔薬よりもプロポフォールのほうが少ないとされている。

上肢SEPでは手首部の2本の腱の間を正中神経が走行しているため、日本光電社のNCS電極(シールドタイプ)の「+」を末梢にして設置する。下肢SEPでは内果後方約1 cmの部位を脛骨神経が走行しているため、同部にNCS電極を「+」を末梢にして設置する。「+」を末梢にするのは「+」の直下で伝導ブロックが生じることを避けるためである。それぞれの神経は混合神経なので、指が動くことにより神経が刺激されていることを確認できる。記録電極は上肢CP3、CP4、下肢Cz後方約2 cmのCz'に針電極を刺入しステープラで固定している。基準電極は通常Fzを用いるが、開頭部位によってFzに設置できない場合にはA1、A2に設置する。

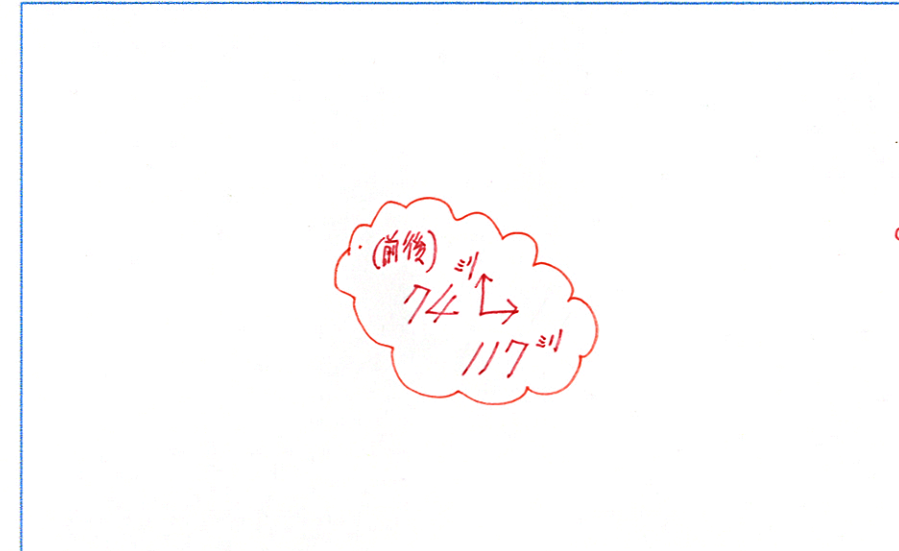
上肢SEPのもう一つの使用方法にN20の逆転を用いた中心溝の同定<sup>8)</sup>がある。この場合、皮質上に直接銀ボール電極やストリップ電極を設置して記録する。

視覚誘発電位  
visual evoked potential (VEP)

以前より最も信頼性が低いモニタリング法の代名詞にされていたが、新しい

5H> 色ベタ  
▼図5 ERGおよびVEPにおける麻酔薬の影響

偶然、関連病院に出張でモニタリングに行った際に経験したものである。手術室に入るとそこでは外科医がセボフルランを用いて麻酔をかけていた。同時にMEPのモニタリングも施行するので、プロポフォールへの切り替えを依頼した。同一患者で手術操作を加えない状況で2回記録し、再現性を確認した。吸入麻酔でもERGおよびVEPは記録できるが、潜時や振幅の再現性が不良であった。プロポフォール麻酔ではERGおよびVEPともに潜時および振幅の再現性がほぼ完全なものとなった。プロポフォール麻酔によりVEPの陰性波の振幅をもって評価することが可能となった。



光刺激装置を用いて、網膜電図 electroretinogram (ERG) の記録を追加し、プロポフォールを用いれば臨床的に有用なモニタリング法であることが報告された<sup>9)</sup>。日本では、薬事承認を取得した光刺激装置がユニークメディカル社から販売されていた。光刺激装置は必ずアイパッチを貼りその上に設置する。直接貼付したことにより低温火傷で水疱を形成した症例が報告されている。ERGは外眼角の皮下に針電極を設置する。VEPの記録は外後頭隆起の5 cm上方、5 cm外側のO1、O2に針電極を設置し、基準電極は同側の耳A1、A2とする。ERGの併用により網膜に光刺激が到達しているかどうか、電気生理学的に確認することができる。頬骨弓を外すような手術では皮弁の翻展が強くなり、ERGもVEPも一時的に消失する。頬骨弓を外した

後に、皮弁を戻せばERGもVEPも回復する。手術操作の妨げにならない範囲で皮弁を戻している。信頼性向上のために一番大きかったのはプロポフォール麻酔である。これは偶然の経験から確認された(図5)。手術終了時に振幅が50%以上保たれていれば、視機能は不変または回復した。50%未満で回復せず手術を終了した症例は程度の差はあるが、全例で視機能が悪化した。視覚路は眼窩より始まり、頭蓋内ではテント上を走行する。眼窩内の視神経から後頭葉までの全経路のモニタリングが可能になった<sup>10)</sup>。

脳幹聴覚誘発電位  
brainstem auditory evoked potential (BAEP)

BAEPは聴性脳幹反応 auditory brainstem response (ABR) と呼ばれていたものと同じである。BAEPは麻酔の

は閾値が術中に変動するのに刺激強度を一定にしていたために生じていた現象と思われる。International Society of Intraoperative Neurophysiology (ISIN) の現会長である Seidel 氏<sup>7)</sup>の2022年の報告が興味深い。「テント上の脳腫瘍における経頭蓋刺激MEPでど

の刺激強度を選択すべきかについての一般的なルールはない。閾値に近い強度では振幅が不安定になり、強度が強すぎると深部白質刺激が生じ、皮質または皮質下損傷の偽陰性結果を引き起こす可能性がある。閾値より20%高く設定するのが妥当な目安である」と記



影響を最も受けにくく、どの麻酔法でも再現性が良好な波形を記録し、モニタリング可能である。刺激は両側のイヤホンを設置し、クリック音を105 dB、15 Hzで刺激する。記録電極は頭蓋冠であればどこでも記録可能であるが、基準電極は同側の耳朶(Ai)とする。通常はV波の潜時と振幅(V波とその後に出現する陰性ピークのV'の間の振幅)を指標とする。BAEPは遠隔電場電位の代表であるが、I波だけは近接電場電位で同側の耳朶(Ai)を基準電極とした場合に記録され、対側の耳朶(Ac)を基準電極とした場合には記録されない。後頭蓋窩手術で聴力温存のためにモニタリングする場合にはV波の潜時の延長を1.0 msec以内にとどめ、振幅は50%以上を保つというのが一般的である。

### モニタリング法選定の 考え方

テント上の脳腫瘍や脳血管障害の症例で、皮質脊髄路や感覚系路近傍またはそれらに影響を及ぼす可能性がある場合、MEPおよびSEPを選択する。中心溝近傍の病変で中心溝の同定が必要な症例では上肢SEPのN20の逆転を用いる。視覚路近傍の場合にはVEPを選択する。VEPは視神経、視交叉、視索、側頭葉、後頭葉病変のいずれの手術でもモニタリングが有用であった<sup>10)</sup>。脳動脈瘤クリッピングの場合、動脈瘤の部位にもよるが、四肢MEPおよび四肢SEPを施行すれば十分である。頸動脈内膜剥離術の場合には四肢MEP、四肢SEPに加えてINVOSTMによる局所酸素飽和度をモニタリングしている。後頭蓋窩病変の場合にはBAEPを

モニタリングすることが多い。顔面神経や三叉神経が関与する機会が多いので筆者らは瞬目反射blink reflex (BR)を追加している。BRは顔面神経が露出しない状況でも顔面神経機能のモニタリングが可能で、神経直接刺激の筋電図よりも感度が高い。脳幹部病変では、病変の種類、部位により適宜モニタリング法を組み合わせることになる。脊髄脊椎の手術では四肢MEP、四肢SEPが基本である。胸髄以下の手術でも上肢のMEP、SEPはコントロールとして有用となる。MEPは必要に応じて多チャンネルモニタリングを行う。また、髄内腫瘍の手術では硬膜外カテテル電極を用いたD-waveのモニタリングを追加する。

神経モニタリングの導入により確実に手術成績は向上した。しかしながらいまだに偽陽性や偽陰性の報告も多い。それぞれのモニタリング法において何が問題なのかを理解し、術前にチームとして準備しておく必要がある。筆者らは、毎週の術前カンファレンスには必ず臨床工学技士(臨床検査技師の施設も多いことと思う)が参加し、何の目的でどういうモニタリングを行うのか、特に追加すべきものはないかを術者とともに吟味している。そして実際の手術では臨床工学技士が2人常在し、脳神経外科医の指導のもとモニタリングの施行と術者への警告を担当し、データを直ちにパソコンに入力するという役割を担っている。術者、モニタリング担当医師、臨床工学技士、麻酔科医すべての協力のもと有意義なモニタリングが施行されるものと確信している。

### 文献 色ペタ

1. 日本麻酔科学会 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](https://anesth.or.jp/files/pdf/mep_monitoring_practical_guide.pdf) (2025 年 10 月 27 日閲覧)
2. Yuta S, Ida M, Shimotsuji H, et al. Bite injuries caused by transcranial electrical stimulation motor-evoked potentials' monitoring: incidence, associated factors, and clinical course. J Anesth 2018 ; 32 : 844-9.
3. Taniguchi M, Cedzich C, Schramm J. Modification of cortical stimulation for motor evoked potentials under general anesthesia : technical description. Neurosurgery 1993 ; 32 : 219-26.
4. Lyon R, Feiner J, Lieberman JA. Progressive suppression of motor evoked potentials during general anesthesia : the phenomenon of "anesthetic fade". J Neurosurg Anesthesiol 2005 ; 17 : 13-9.
5. Tanaka S, Watanabe T, Takanashi J, et al. Effect of compound muscle action potential after peripheral nerve stimulation normalization on anesthetic fade of intraoperative transcranial motor-evoked potential. J Clin Neurophysiol 2021 ; 38 : 306-11.
6. Sasaki T, Murakami K, Saito A, et al. Usefulness of transcranial motor evoked potential in clipping surgery for cerebral aneurysms-introduction of a new protocol for stable monitoring. Neurol Med Chir (Tokyo) 2023 ; 63 : 409-19.
7. Seidel K, Szelényi A, Bello L. Intraoperative mapping and monitoring during brain tumor surgeries. Handb Clin Neuro 2022 ; 186 : 133-49.
8. Dinner DS, Lüders H, Lesser RP, et al. Cortical generators of somatosensory evoked potentials to median nerve stimulation. Neurology 1987 ; 37 : 1141-5.
9. Sasaki T, Itakura T, Suzuki K, et al. Intraoperative monitoring of visual evoked potential : introduction of a clinically useful method. J Neurosurg 2010 ; 112 : 273-84.
10. 佐々木達也, 西島美知春. 術中 VEP モニタリングによる視機能の温存- VEP に変化を来した手術手技の検討から. Neurol Surg 2013 ; 41 : 961-76.