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

作成：公益社団法人 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

WG 長：川口昌彦
WG 委員：飯田宏樹、垣花　学、吉谷健司、田中　聡、福岡尚和、林　浩伸、和泉俊輔

作成日 2018 年 11 月

目　次

1. 基本理念と概要 3

1.1 目的 3
1.2 対象 3
1.3 利用にあたっての注意点 3
1.4 対象となる患者 3
1.5 内容 4
1.6 作成グループ 4
1.7 資金および協力組織 4
1.8 利益相反 4

2. エビデンスレベル・推奨度について 5

3. MEP の基礎知識 6

3.1 MEP の概要 6
3.2 刺激方法 6
3.2.1 経頭蓋刺激 6
3.2.1.1 刺激電極の種類 6
3.2.1.2 刺激電極の配置 6
3.2.1.3 刺激条件の設定 7
3.2.2 皮質刺激 7
3.2.2.1 刺激電極の種類 7
3.2.2.2 刺激電極の配置 7
3.2.2.3 刺激条件の設定 7
3.3 記録方法 8
3.3.1 muscle MEP 8
3.3.1.1 記録電極の種類 8
3.3.1.2 記録電極の設置 8
3.3.2 D-wave 9
3.3.2.1 記録電極の種類 9
3.3.2.2 記録電極の設置 9
3.3.3 振幅の測定 9

4. 麻酔管理法 11

4.1 基本指針 11
4.2 術前評価 12
4.3 モニター 12
4.4 成人における麻酔法 14
4.4.1 脊椎・脊髄手術 14
4.4.1.1 麻酔法 14
4.4.1.2 ベースライン波形記録時の留意点 15
4.4.1.3 MEP 変化時の対応 16
4.4.2 脳外科手術 18
4.4.2.1 麻酔法 18
4.4.2.2 ベースライン波形記録時の留意点 18
4.4.2.3 MEP 変化時の対応 20
4.4.3 大血管手術 21
4.4.3.1 麻酔法 21
4.4.3.2 脳脊髄液ドレナージの管理 23
4.4.3.3 ベースライン波形記録時の留意点 24
4.4.3.4 MEP 変化時の対応 25
4.5 小児における麻酔法 28
4.5.1 小児における麻酔薬 28
4.5.2 小児における麻酔深度の評価 29
4.6 有害事象とその予防 29

参考文献 32

1. 基本理念と概要

1.1 目　的

本プラクティカルガイド（以下、ガイドライン）は、術中運動誘発電位（motor evoked potentials：MEP）モニタリングを安全かつ適切に実施するため、麻酔管理についてのエビデンスを収集・解釈し、その適切な臨床上の判断を行うための情報を提供することを目的とする。

1.2 対　象

主には全身麻酔下でMEPモニタリングを行う場合の麻酔科医を対象とした麻酔管理のガイドラインである。ただし、MEPモニタリングは整形外科医、脳神経外科医、心臓血管外科医、麻酔科医、看護師、臨床検査技師、臨床工学技士などのチームで実施する場合が多いため、そのチームでの共有知識としても使用可能である。

1.3 利用にあたっての注意点

本ガイドラインはMEPモニタリング中の麻酔管理に関して、安全かつ適切に実施するための情報を提供するものである。推奨についても記載したが、十分なエビデンスがないものが多く、多くは専門家の意見として述べられている。臨床現場における医療従事者の意思決定を支援するために推奨を提供するものであり、提示された推奨に必ず従うよう強要するものではない。実際の判断には、本ガイドラインの推奨のみならず、患者の状態、術式、医療現場の状況などを考慮し、決定する必要がある。推奨を参考に臨床現場で医療行為に関する判断を行ったことで生じた結果に対して、本ガイドライン作成委員会は一切の責任を負うものではない。また、本ガイドラインは、医療裁判の証拠として利用されることを想定していない。あくまで臨床現場での一般的な診療についての推奨を提示するものである。したがって、医療事故が起こった際に、本ガイドラインに示す推奨のとおりに診療が行われなかったという理由で過失があったと判断するのは不適切である。

1.4 対象となる患者

対象となる患者は全身麻酔下でMEPモニタリングを施行される患者である。脊椎・脊髄手術、開頭手術、頚動脈手術、大血管手術（胸腹部大動脈瘤など）などが対象となる。手術に加え、血管内治療も対象とした。

1.5 内　容

本ガイドラインはMEPモニタリング実施時の麻酔管理についての情報を提供するものである。MEPを安全かつ適切に記録し、その変化を評価できるための麻酔法やモニターを示した。また、MEPに変化があった場合に、麻酔科医として対応すべき内容についても示した。

1.6 作成グループ

MEPガイドラインは以下のメンバーが作成した。

公益社団法人 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

WG長：　川口昌彦（奈良県立医科大学　麻酔科学教室/教授）

WG委員：飯田宏樹（岐阜大学大学院医学系研究科　麻酔・疼痛制御学分野/教授）

垣花　学（琉球大学大学院医学研究科　麻酔科学講座/教授）

吉谷健司（国立循環器病研究センター　手術室/医長）

田中　聡（信州大学医学部　麻酔蘇生学教室/准教授）

福岡尚和（岐阜大学医学部附属病院　麻酔科疼痛治療科/併任講師）

林　浩伸（奈良県立医科大学　麻酔科学教室/講師）

和泉俊輔（琉球大学医学部附属病院　麻酔科学講座/助教）

1.7 資金および協力組織

本ガイドラインは日本麻酔科学会の資金を得て、MEPモニタリングガイドライン作成ワーキングを開催し作成した。完成したガイドラインはPDF版を日本麻酔科学会学会サイトにおいて無償公開することとしている。英語版としてpeer review英文誌であるJournal of Anesthesiaに掲載する予定である。

1.8 利益相反

「MEPモニタリングガイドライン」作成ワーキング（日本麻酔科学会所属）のCOI関連事項を示す（COIの詳細については、日本麻酔科学会ホームページに指針・書式などを掲載している）。

1）研究助成金などに関する受け入れ状況（研究費、奨学寄附金、寄附講座など）。

川口昌彦、林　浩伸：エドワーズライフサイエンス株式会社　計200万円

飯田宏樹、福岡尚和：シオノギ製薬株式会社　計200万円

ファイザー株式会社　計200万円

2）講演料・原稿料などの受け入れ状況については開示基準に該当するものはなかった。

3）個人的収入に関する受け入れ状況については開示基準に該当するものはなかった。

2. エビデンスレベル・推奨度について

使用指針の推奨の強さ、およびエビデンスの強さを「Minds 診療ガイドライン作成の手引き 2014」「診療ガイドラインのための GRADE システム―治療介入―」を参照し、以下の基準で表現した。

推奨の強さは、1：強く推奨する、2：推奨する、の 2 通りで提示し、アウトカム全般のエビデンスの強さについては、以下の A、B、C、D を併記した。

A（強）：効果の推定値に強く確信がある
B（中）：効果の推定値に中程度の確信がある
C（弱）：効果の推定値に対する確信は限定的である
D（とても弱い）：効果の推定値がほとんど確信できない

エビデンスレベルの参考とした研究デザインは、

A：適切に実施された複数の無作為化比較試験から得られた一貫性のある結果；無作為化比較試験のメタアナリシス；バイアスのない複数の観察研究から得られた非常に強固な結果
B：重要な限界を有する無作為化比較試験；非無作為化比較試験；一致した結果の複数のバイアスのない観察研究
C：複数の観察研究；重大な欠陥もしくは非直線的な無作為化比較試験
D：単独の観察研究；非系統的な臨床観察；症例報告；専門家の意見；基礎研究

なお、推奨の強さおよびエビデンスの強さが示されていない多くの記述については、エビデンスがないか、あるいはあっても著しく欠乏しているものであり、その記述は専門家としての意見にとどまるものとした。

3. MEP の基礎知識

3.1 MEP の概要

術後に運動機能障害が発生するリスクのある手術として、脊椎・脊髄手術、脳外科手術、大血管手術などがある。これらの手術では、術中から運動機能をモニタリングすることで患者の術後の生活の質（quality of life：QOL）と直結する運動機能を温存することが重要である。MEP モニタリングは、運動野を刺激することで下行性運動経路の機能を術中に評価できる術中神経生理学的モニタリングの一つとして臨床使用されている。1980 年に Merton と Morton[1] が、覚醒下のヒトを対象に高電圧経頭蓋電気刺激（単発刺激）を用いて運動野を刺激し脊髄運動ニューロンを興奮させて末梢筋から誘発筋電図を記録したのが始まりである。しかし、全身麻酔下では興奮性シナプス後電位（excitatory postsynaptic potential：EPSP）が抑制されるため単発刺激では誘発筋電図を記録できなかった。1993 年に Taniguchi ら[2] が、3–5 連のトレインパルスによる電気刺激を用いることによって全身麻酔下でも MEP の安定した記録に成功した。これによって術中 MEP モニタリングが普及する契機となった。全身麻酔下での MEP モニタリングに使用される電気刺激は、経頭蓋刺激または皮質刺激で行われ、硬膜外腔または硬膜下腔から直接的に D-wave、あるいは末梢の筋から muscle MEP として複合筋活動電位（compound muscle action potentials：CMAP）が記録される。

3.2 刺激方法

運動野の電気刺激は、経頭蓋刺激または皮質刺激によって行われる。経頭蓋刺激では頭皮や頭蓋骨を通して運動野を刺激するため高電圧または高電流を用いる必要がある。

3.2.1 経頭蓋刺激

3.2.1.1 刺激電極の種類

刺激電極には一対（陽極と陰極）の皿電極、コークスクリュー電極、皮下針電極が用いられる。皿電極は大口径（15 mm 程度）のものを電極ペーストによって頭皮に接着させるため非侵襲的であるが、接触抵抗を下げる必要がある。一方、コークスクリュー電極や皮下針電極は固定性が良く電気抵抗を少なくすることができる。大口径皿電極は、より広範囲の刺激となる。

3.2.1.2 刺激電極の配置

刺激電極の設置位置は国際 10–20 法に従って、C3/C4 とするのが一般的であるが、C3/C4 の 2 cm 前方なども使用されている（図 1）。より内側の C1/C2 の使用も可能である。刺激を与えたい半球上の電極を陽極とする。電極間距離が広い C3/C4 での刺激は、より深部（尾側）まで刺激電流が到達する。

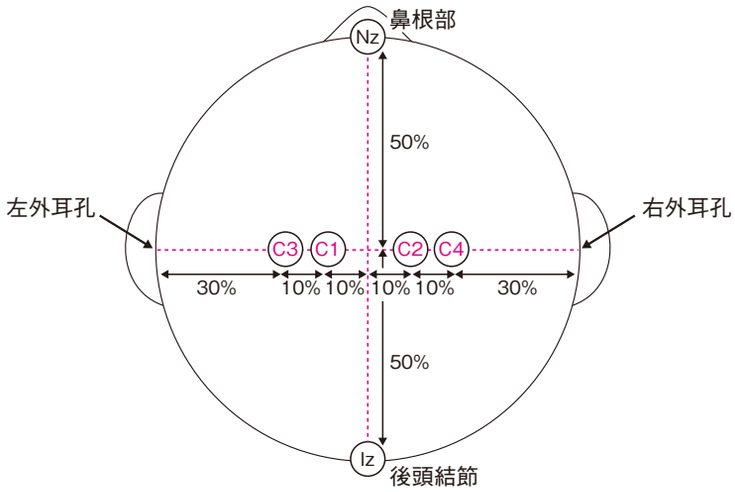


図 1　経頭蓋刺激のための刺激電極の位置
経頭蓋刺激のための刺激電極は国際 10–20 法に従って C1/C2、または C3/C4 に設置する。C3/C4 の 2 cm 前方も使用されている。

3.2.1.3　刺激条件の設定

麻酔下では EPSP が抑制されるため単発刺激では MEP を記録できない。EPSP の持続時間が 7–10 ms であるので、この時間よりも短い速さで次の刺激を与えた場合、麻酔薬によって抑制された EPSP が蓄積し、運動ニューロンが発火閾値に到達する。通常、全身麻酔下で MEP モニタリングを行う場合は、2–5 ms の刺激間間隔（interstimulus interval：ISI）で 4–6 連のトレインパルスを使用する。刺激強度は、通常では定電圧刺激で 500 V または定電流刺激で 200 mA を超えないようにする。パルス幅（pulse duration）は、定電圧刺激の場合では 0.05 ms、定電流刺激の場合は 0.2–0.5 ms に設定する。

3.2.2　皮質刺激

3.2.2.1　刺激電極の種類

帯状または格子状の硬膜下電極を使用することが多い。

3.2.2.2　刺激電極の配置

硬膜下電極を直接的に運動野上に設置する。手の運動野は直接脳表体性感覚誘発電位（somatosensory evoked potential：SEP）の分布（N20 の位相反転）によって確認できる。硬膜下電極は術中に移動することがあるので注意を要する。

3.2.2.3　刺激条件の設定

経頭蓋刺激における刺激条件と同様に、2–5 ms の ISI で 4–6 連のトレインパルスを用いる。一般的には、定電流刺激を用いて閾値上刺激または閾値刺激を行い、パスル幅は 0.2–0.5 ms に設定する。刺激強度は、5 mA から 1 mA ずつ上げていき刺激側と反対側に設置された記録電極から MEP が導出されるように調節する。通常、刺激強度は 15–25 mA までで設定されることになる。陽極を脳表、陰極を頭皮上として陽極刺激する。単極刺激は脳表を広く（深く）刺激するため、硬膜下電極の 2 つの電極を陽極と陰極として刺激する双極刺激のほうが限局した刺激を行える。

［用語説明］

●定電圧刺激と定電流刺激

定電圧刺激は電圧が常に一定になるように刺激が出力され、定電流刺激は電流が常に一定になるように刺激が出力される。神経の興奮は軸索に電流を流すことで誘発されるので、直接的に神経を電気刺激するなら定電流刺激を選択するのが基本である。ただし、定電圧であっても刺激電流により神経の発火閾値を超えれば興奮は生じるので、定電圧刺激と定電流刺激のどちらでも神経の興奮を誘発できる。

●単相性刺激（monophasic）と二相性刺激（biphasic）

陽極側の運動半球が刺激され下行性皮質脊髄路を経由して、対側の記録筋から MEP が記録される。従来から用いられてきた刺激装置は単相性刺激であり、両側の下行性運動経路をモニタリングするためには極性を替えて MEP 記録を行う必要があった。近年、自動的に極性が入れ替わる（二相性刺激）ことによって 1 回のトレイン刺激で両側から MEP が記録できる刺激装置も普及しつつある。二相性刺激は脊椎・脊髄手術、大血管手術で使用される。

●閾値上刺激（suprathreshold stimulation）と最大上刺激（supramaximal stimulation）

閾値上刺激とは、視認可能な MEP 波形（20–50 μV 以上の振幅）が得られる最小の刺激強度（閾値）から 10–20％程度強い刺激強度で刺激することをいう。閾値上刺激は脳外科手術で用いられ、刺激範囲を限局させて術野よりも遠位が刺激されないようにする。

最大上刺激とは、最大 MEP 振幅が得られる刺激強度である。刺激強度を上げても、それ以上に MEP の振幅増加が見られない刺激強度で刺激することを最大上刺激という。強い刺激を用いることで得られる MEP 振幅の変動を小さくすることができる。ただし、記録する筋肉が複数の場合、筋肉により最大上刺激となる強度が異なるため、最大上刺激という用語の使用にあたっては注意が必要である。

3.3 記録方法

MEP は、硬膜外腔または硬膜下腔、あるいは末梢の筋から記録される。末梢の筋からは muscle MEP が記録され、硬膜外腔または硬膜下腔から D-wave が記録される。

3.3.1 muscle MEP

3.3.1.1 記録電極の種類

記録電極には一対（探査電極と基準電極）の表面電極（皿電極、電極型ディスポーザブル電極）または皮下針電極が用いられる。表面電極は皮下針電極と比較して接触インピーダンスが高い。表面電極を使用する場合、探査電極と基準電極の接触インピーダンスの差を小さくするために前処置が必要になる。表面電極は皮膚抵抗を 5 kΩ 以下にすることが望ましい。

3.3.1.2 記録電極の設置

belly–tendon 法：探査電極（陰極）を筋腹（belly）、基準電極（陽極）を比較的不活性な近接部である腱（tendon）に設置する。

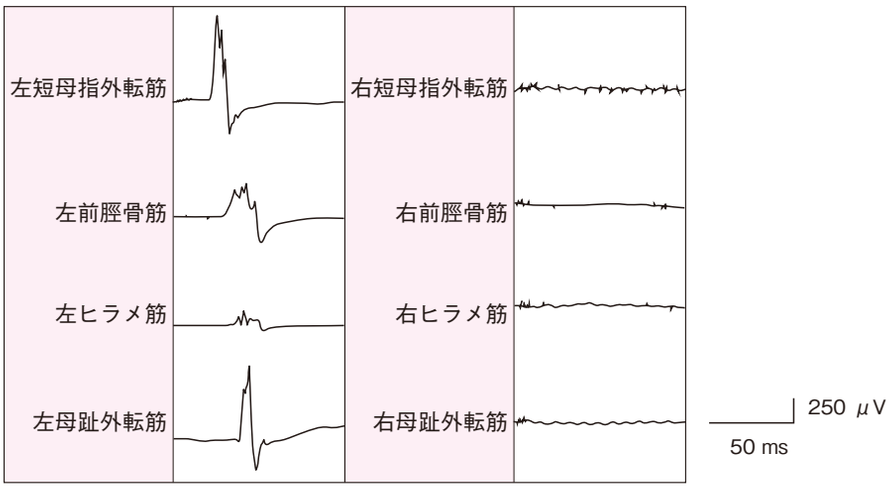


図 2　経頭蓋刺激による muscle MEP の波形
国際 10–20 法に基づく C3/C4 からの経頭蓋刺激によって上下肢から記録された MEP である。陽極を C4（右半球）とした閾値上刺激（165 mA）のため左上下肢から優位に波形が記録されている。

上肢の記録筋：短母指外転筋（または小指外転筋）、頚椎疾患では前腕、上腕二頭筋、三角筋などが用いられる。

下肢の記録筋：母趾外転筋、前脛骨筋、腓腹筋などが用いられる。

3.3.2　D-wave

3.3.2.1　記録電極の種類

硬膜外カテーテルの先端から 1.5 cm 間隔に 2、3 個の電極が付いたものが使用される。

3.3.2.2　記録電極の設置

一般的に、脊髄が露出する脊髄腫瘍手術時において視認下で記録電極を硬膜外腔または硬膜下腔に留置するが、脊髄が露出しない手術でも経皮的に記録電極を挿入することは可能である。記録電極は、術野より尾側で脊髄の中心部に設置される。

3.3.3　振幅の測定

各記録筋から得られた muscle MEP または D-wave の波形の最大陰性ピークと最大陽性ピークの間の距離（peak to bottom）で計測する。muscle MEP の典型例を図 2 に示す。

《麻酔薬と muscle MEP、D-wave の関係》

muscle MEP と D-wave では、麻酔薬から受ける影響が大きく異なる。D-wave は、シナプスを介していないため麻酔薬の影響はほとんど受けず、筋弛緩薬の影響も受けない。一方、muscle MEP は麻酔薬や筋弛緩薬によって容易に抑制される。

[用語説明]

●ベースラインの MEP 測定（図 3）

MEP は術操作による運動経路の障害だけでなく、麻酔薬、血圧や体温などの生理学的因子によっても影響を受ける。麻酔導入後に MEP 波形が導出できることを確認する初回ベースライン

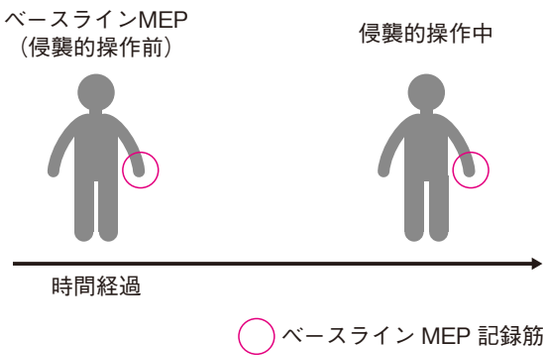


図 3　ベースライン MEP の定義
ベースライン MEP は、侵襲的操作前に術側で記録された基準となる MEP 波形である。侵襲的操作中における MEP 変化の有無は、同じ記録筋のベースライン MEP と比較することで判断される。

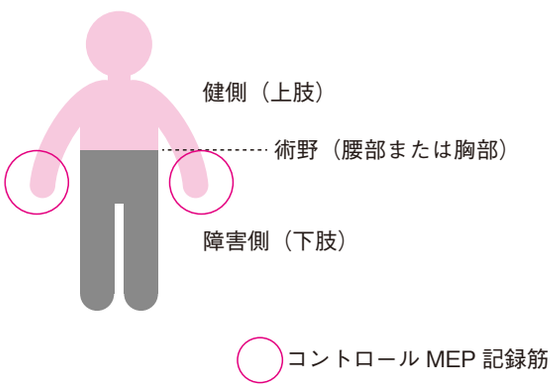


図 4　胸椎または腰椎レベルの脊椎・脊髄手術時におけるコントロール MEP の定義
術野が胸椎または腰椎レベルの場合、運動障害による MEP 変化は下肢に現れる。この場合、コントロール MEP は上肢で記録される。コントロール MEP は、同一時刻に健側で記録される。

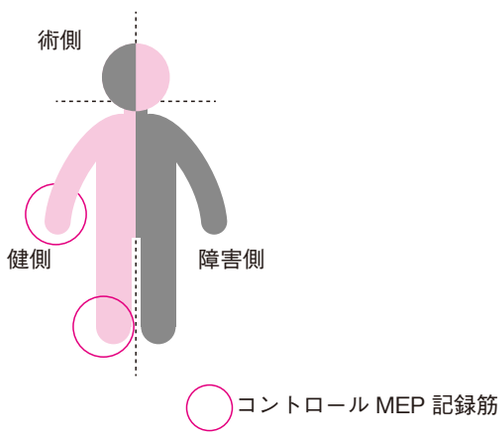


図 5　脳外科手術におけるコントロール MEP の定義
右側脳動脈瘤クリッピング術の場合、運動障害による MEP 変化は左側上下肢に現れる。この場合、コントロール MEP は右側で記録される。コントロール MEP は、同一時刻に健側で記録される。

（initial baseline）を記録するが、運動経路障害リスクのある操作が計画されている場合、その直前にベースラインを再度記録する必要がある（floating baseline）。

●健側での MEP 測定の必要性（コントロール MEP：図 4、図 5）

健側から記録される MEP は、術操作による影響が反映されない。健側 MEP が変化した場合、通常その原因は麻酔薬や生理学的変化（主に血圧と体温）と考えられる。麻酔薬や生理学的変化は全身性のものであるため健側と術側の両方の MEP に影響を与える。したがって、MEP 変化が真陽性であるかどうかを判断するには麻酔薬や生理学的変化による MEP 変化を除外する必要があり、健側においても MEP を記録する。具体的には、腰部脊椎・脊髄手術では上肢から健側 MEP、脳腫瘍や脳動脈クリッピング術では術野の同側から健側 MEP を同時に記録する。

4. 麻酔管理法

4.1 基本指針

〈Summary statement〉

- 術後運動機能障害の予防のためには、外科医、麻酔科医、臨床検査技師、臨床工学技士などの多職種で連携・協力し、適切な MEP モニタリングを実施することが重要である。[1D]
- MEP のベースラインおよびコントロール波形が記録できる麻酔法とし、波形が得られない場合は、患者の安全を優先したうえで、麻酔薬投与量の変更や麻酔法の変更を検討する。[1D]
- MEP モニタリング中は麻酔深度や筋弛緩レベルを一定にし、MEP の変化を迅速にとらえられる麻酔管理とする。[1C]
- 術中に MEP の変化が見られた場合、関連する多職種で情報を共有したうえで、原因検索とともに MEP 正常化に向けた対応に当たる。[1C]
- MEP に関連する有害事象発生の可能性を考慮し、その予防に当たる。[1C]
- インフォームドコンセントは、MEP 測定の目的や測定方法だけでなく、MEP に関連する有害事象についても行う。[1C]

解　説

適切な MEP モニタリングの実施のため、MEP のベースラインおよびコントロール波形を記録する必要がある。各種麻酔薬の MEP 抑制作用が報告されており、各患者の術前状態や術式に応じて MEP のベースラインおよびコントロール波形が記録できる麻酔環境を提供することが必須である。また、術中の MEP の変化を迅速に検出するため、麻酔深度や筋弛緩レベルを一定にしておく必要がある。麻酔深度や筋弛緩レベルを一定にするための客観的指標も必須である。麻酔深度や筋弛緩レベルが変化しない状態で、MEP の変化を迅速に検知し、神経機能障害の非可逆的変化を予防することが重要である。MEP の変化時は、外科医、麻酔科医、臨床検査技師、臨床工学技士などの多職種で情報を共有し、迅速に原因を検索するとともに MEP 正常化に向けた対応に当たる。また、MEP 実施中は麻酔深度の低下による術中覚醒、運動野刺激に伴う体動や咬傷など、関連する合併症も発生しうる。麻酔管理にあたっては有害事象の発生の可能性を念頭に置き、その予防に当たることが重要である。また、MEP 測定の目的や測定方法だけでなく、MEP に関連する有害事象についてもインフォームドコンセントを行う必要がある。

なお、本ガイドラインでは、muscle MEP をモニターする場合の麻酔管理について記載する。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。

4.2 術前評価

〈Summary Statement〉

- 患者の神経学的評価を行う。[1D]
- 口腔内の評価を行う。[1D]
- 植え込み型ペースメーカ、植え込み型除細動器、人工内耳など体内に電子機器や脳動脈瘤クリップなどが留置されていないかチェックする。[1D]
- インフォームドコンセントは、MEP 測定の目的や測定方法だけでなく、MEP に関連する有害事象についても行う。[1C]

解　説

術前診察では運動系の神経学的評価を行う。特に被検筋の筋力テストを行っておくことが望ましい。術前から被検筋の筋力低下がある場合、MEP の振幅が小さく、導出が困難なことがある。

MEP モニタリング時の合併症に咬傷による舌裂傷、口唇裂傷、口腔軟膜裂傷、歯牙損傷などがある。術前に歯牙の動揺性、歯折、残存歯の有無について口腔評価を行うことが勧められる。また、歯列矯正中の患者の場合、矯正装置の安全性は確立されていないため取り外しておくことが望ましい。

ペースメーカ、植え込み型除細動器、人工内耳留置患者では安全性が確立されていないこと、電気刺激が機器に影響を及ぼすおそれがあるため MEP モニタリングは相対禁忌である。また、頭蓋骨プレート、脳動脈瘤クリップやシャントチューブ留置中の患者についても同様に安全性が確立されていない。リスクとベネフィットを考慮して MEP モニタリングの適用を考えなければならない。

術前に患者あるいはその家族に、合併症を含め MEP モニタリングについてのインフォームドコンセントを行うことが必要である[3]。

4.3 モニター

〈Summary statement〉

- 全身麻酔を実施するための基本的な生体モニターは、日本麻酔科学会の指針を遵守する。[1D]
- 麻酔薬は用量依存性に MEP を減衰させるため、脳波を用いた麻酔深度モニターや呼気麻酔薬濃度により麻酔深度を評価し、適切なレベルで一定に保つ。[1C]
- 筋弛緩薬は MEP を容易に減衰させるため、筋弛緩モニターを使用し、筋弛緩レベルを評価し、適切なレベルで一定に保つ。[1C]

解　説

全身麻酔を実施するための基本的な生体モニターは、日本麻酔科学会の指針を遵守する。

正確なMEPモニタリングの実施という観点から、必要なモニターについて説明する。MEPを減弱させる可能性のある因子として、麻酔薬の投与、神経筋遮断状態、低体温、低血圧、低酸素血症、貧血、脳圧上昇、電解質異常、血糖値異常が挙げられる[4]。これらの因子をモニターし、適切な範囲内にコントロールすることでMEPモニタリングを最適化できる。

吸入麻酔薬、プロポフォールはMEPを用量依存性に減弱させるため[5]-[10]、全身麻酔下手術において正確なMEPモニタリングを実施するためにはその効果部位濃度調節が重要である。麻酔深度を調節するためには、吸入麻酔薬を使用している場合は呼気終末濃度モニターが有用である。プロポフォールを用いた静脈麻酔下では脳波をもとに麻酔深度を数値で表示する種々の麻酔深度モニターが使用されているが、どれも設置が容易、非侵襲的、解釈に習熟が不要という理由から広く普及している[11]。麻酔深度モニターで麻酔レベルを調節することは、麻酔薬によるMEP変化を回避するためには有用である[12]。だたし、それらの脳波モニターで表示される数値は測定値ではなく特有のアルゴリズムから算出される推定値であることを知っておく必要がある。実際の臨床では、麻酔深度モニターを用いる場合は表示される数値だけでなく、脳波波形も観察し、そのほかの生体パラメーターも同時に考慮に入れた総合的判断で麻酔深度を評価する必要がある。

筋弛緩薬はMEPを容易に減衰・消失させるため、MEPモニタリングを行う場合には筋弛緩モニターによって筋弛緩薬の効果を定量的に評価しなければならない[4]。MEPモニタリングを行う手術では、麻酔維持に筋弛緩薬を使用しない傾向にあるが、その場合でも麻酔導入で投与された筋弛緩薬の効果が十分に消失したことを筋弛緩モニターで確認したのちにベースラインMEPを記録する。一方、少量の筋弛緩薬を持続投与することで部分神経筋遮断状態を一定に維持しながらMEPモニタリングを行うことも可能であるが、筋弛緩モニターによる継続的な評価によって厳格な筋弛緩薬の投与量調整が必須になり、麻酔管理がやや煩雑になる。部分神経筋遮断は、脊椎・脊髄手術での術野の展開を容易にするためやMEP刺激に伴う体動を軽減するために用いられる。ただし、筋弛緩薬不使用状態と比較すると部分神経筋遮断状態では導出されるMEP波形が小さくなるため、術前の運動神経障害が原因でベースラインMEP波形の導出困難が予想される患者では部分神経筋遮断は推奨しない。また、刺激強度をできるだけ小さくすることで刺激範囲を限局させて術野よりも遠位が刺激されないようにする脳外科手術でも、部分神経筋遮断は推奨しない。

筋弛緩モニターの方法には、T1 twitch height %またはtrain-of-four（TOF）テストがある。TOFテストは麻酔導入前にコントロール記録をする必要がないため実施が容易である。筋弛緩モニターによる筋収縮反応の評価は、視認や触診による主観的評価では正確な筋収縮反応を評価できないため、加速度モニターや筋電図モニターなどの定量的な客観的評価をすることが推奨されている[13]。麻酔維持に筋弛緩薬を使用しない場合は、少なくとも第1収縮反応（T1）に対する第4収縮反応（T4）の比（T4/T1）が0.6以上に回復していることを確認してからMEPモニタリングを開始する[14]。非脱分極性筋弛緩薬が残存している場合は、スガマデクスやネオスチグミン（コリンエステラーゼ阻害薬）の使用を考慮する[15]。ただし、筋弛緩拮抗薬使用後に予期せぬ患者体動などで筋弛緩薬の再投与が必要になった場合に、筋弛緩薬の投与量の調節が難しくなる

ので筋弛緩拮抗薬の使用は議論の分かれるところである[16]-[20]。部分神経筋遮断状態を維持する場合は、T1 twitch height %を 5-50%、または TOF テストで四連刺激に対して 2 回の筋収縮が視認できる程度に維持したとする報告がある[4][21]。

4.4 成人における麻酔法

4.4.1 脊椎・脊髄手術

4.4.1.1 麻酔法

〈Summary Statement〉

- 麻酔深度と筋弛緩レベルは一定に保つ。[1D]
- 鎮静薬はプロポフォールによる静脈麻酔を第一選択とするが、初回ベースライン MEP が記録できるのであれば吸入麻酔薬（セボフルランまたはデスフルラン）を用いてもよい。[1C]
- 麻酔薬は濃度依存性に MEP を減衰させるため、麻酔深度モニターや呼気麻酔薬濃度によって麻酔深度を一定に保つ。[1C]
- 筋弛緩薬は MEP を容易に減衰させるため、筋弛緩モニターを使用し、筋弛緩レベルを一定に保つ。[1C]

解　説

麻酔導入時には MEP の測定を行わないため、短時間作用型の薬剤であれば基本的にどの鎮静薬、筋弛緩薬、鎮痛薬も投与可能である。循環変動を抑制し、気道確保を妨げない麻酔導入方法の選択を優先する。

MEP モニタリングにおいて第一選択となる麻酔維持方法はプロポフォールとオピオイド（レミフェンタニル、フェンタニル）による静脈麻酔である[22]が、再現性の高い初回ベースライン MEP が導出できるのであれば吸入麻酔薬（セボフルランまたはデスフルラン）を用いてもよい。吸入麻酔薬は MEP の刺激閾値がプロポフォールよりも高いことから、MEP モニタリングに関しては静脈麻酔よりは劣る。セボフルランとデスフルランで MEP モニタリング可能であったという報告[23]や、デスフルランとプロポフォール麻酔とで MEP の振幅を比較した報告[24]があるが、吸入麻酔薬が静脈麻酔薬に比べて優れているという報告はない。ただし、術中 wake-up test を行う場合には、吸入麻酔薬のほうが静脈麻酔薬よりも患者の覚醒が早いという利点を有する[25][26]。最終的に麻酔科医として患者の全身状態と MEP が実際に導出できるかを考慮して麻酔法を決定する。

全身麻酔薬は D-wave にほとんど影響を与えないが、濃度依存性に MEP を抑制するため、麻酔深度は可能なかぎり一定に保つ必要がある。麻酔深度を一定に保つためには，麻酔深度モニターの併用や呼気麻酔薬濃度を一定にすることが重要である。目標濃度調節静注（target controlled infusion：TCI）インフューザーポンプを用いてプロポフォールを投与する際も、年齢、体脂肪などの影響を受けやすいこと、すべての患者に薬物動態パラメーターが当てはまるわけではないことから麻酔深度が一定とならないことがあるため[27]、麻酔深度モニターは必要である。

筋弛緩薬はMEPを容易に減衰させる。MEPモニタリング時に筋弛緩薬の投与を可能なかぎり控えることは波形解釈にとっては好ましいことから、挿管時にのみ筋弛緩薬を投与し、その後は筋弛緩薬の追加投与を行わない施設や、麻酔導入し体位変換直後に筋弛緩薬を拮抗する施設もある。一方、予期せぬ体動などの合併症予防の目的で筋弛緩薬の持続投与を行っている施設もある[22]。いずれにせよ、筋弛緩モニターを用いて筋弛緩レベルは可能なかぎり一定に保つことが重要である。現在、本邦ではロクロニウム、ベクロニウム、スキサメトニウムが臨床使用されているが筋弛緩薬の選択に制限はない。

ケタミンはレミフェンタニル、フェンタニルと同様にほとんどMEPに影響を与えないことから、ベースラインMEPが導出困難な場合においてモニタリング時に使用している施設がある。ケタミンは麻酔から覚醒する際に浮遊感覚、鮮明な夢（悪夢など）、幻覚、せん妄状態などの有害作用が出現する可能性や、麻酔深度モニターによる麻酔深度の評価が行いにくい面も有しており、適用については症例によって熟慮する必要がある。

MEP導出を優先しすぎるあまりに、術中覚醒やバッキングなどを惹起することは脊椎・脊髄手術には重大な合併症を引き起こす可能性があるため、麻酔科医として絶対に回避しなければならない。

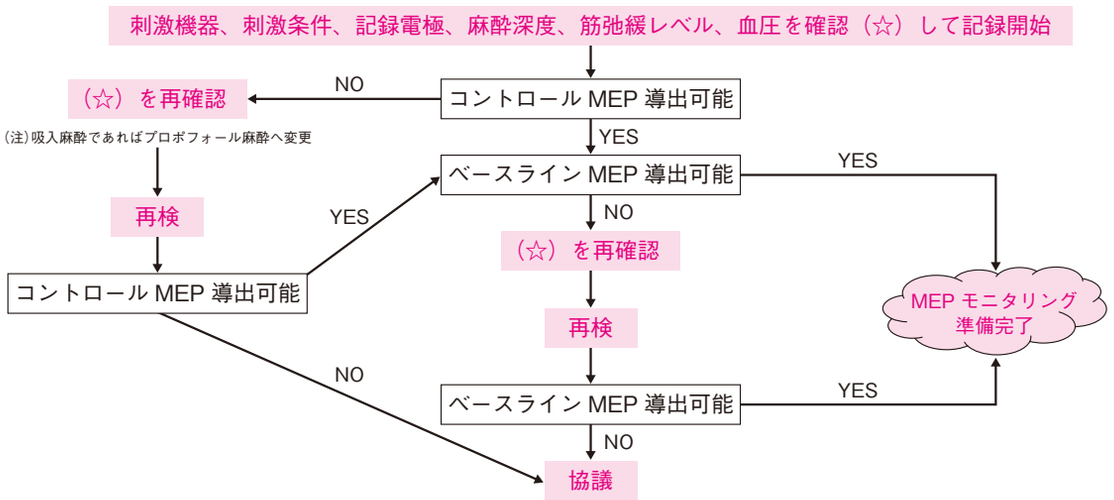
4.4.1.2　ベースライン波形記録時の留意点

〈Summary Statement〉

- 麻酔深度モニター、筋弛緩モニターを用いて、それぞれのレベルを一定にし、再現性の高いベースラインMEPを被検筋から記録する。[1C]
- 吸入麻酔薬で初回ベースラインMEPが導出できない場合は静脈麻酔に変更する。[1D]
- 神経障害を起こす可能性のある手術操作（椎弓切除、スクリュー挿入、脊椎の矯正、硬膜切開など）の直前にベースライン（floating baseline）MEPを記録する。[1D]

解　説

ベースライン波形記録時のアルゴリズムのシェーマを**図6**に示す。全身麻酔導入直後は導入薬の影響により初回ベースラインのMEPが得られるまでに時間を要することがある。導入後に筋弛緩薬を拮抗するのもよいが、麻酔深度モニターと筋弛緩モニターを用いてベースラインのMEPが得られた麻酔深度を可能なかぎり一定に保ち、再現性の高いMEPを四肢の被検筋から記録する。低血圧はベースラインMEPが導出しにくい原因の一つとなるので避ける。吸入麻酔薬で初回ベースラインのMEPが導出できない場合はコントロールMEPが導出できるかどうかを確認し、コントロール波形導出が不可能であれば、速やかに静脈麻酔に変更する。術前から運動障害を有する場合や、小児の場合は初回ベースラインMEPが得られないことがあり、スタッフ間でこのまま手術を行うかどうかを協議する必要がある。胸腰椎レベルの手術では手術の影響がない上肢をコントロールMEPに設定することができるが、頚椎手術ではそれが困難となるため、僧帽筋をコントロールMEPの被検筋としたり、顔面神経MEPを併用したりしているが、確立した方法はない。神経障害を起こす可能性のある手術操作（椎弓切除、スクリュー挿入、脊椎の矯



協議事項
・術前より麻痺があれば MEP 導出困難な場合があるためスタッフ間で手術を開始するか協議する
・小児では MEP 導出困難な場合がありスタッフ間で手術を開始するか協議する

ベースライン MEP：手術の影響あり（主に下肢）
コントロール MEP：手術の影響なし（主に上肢）

図 6　脊椎・脊髄手術時のベースライン MEP 波形記録のためのフローチャート

正、硬膜切開）の前にベースライン（floating baseline）MEP を記録する。

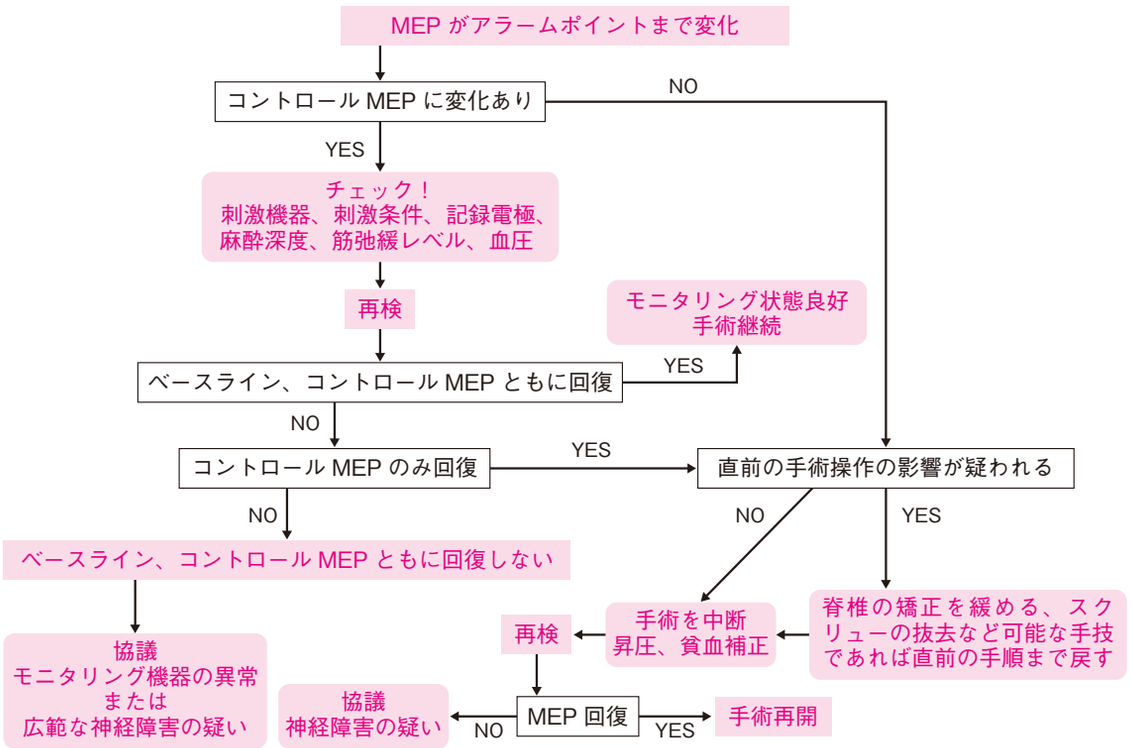
4.4.1.3　MEP 変化時の対応

〈Summary Statement〉

- アラームポイントについて施設内で基準を設けておくことが望ましい。[2D]
- 刺激機器、刺激条件、麻酔深度と筋弛緩レベル、血圧をチェックする。[1D]
- コントロール MEP に変化がないか確認する。[1D]
- 明らかに手術操作が原因と疑われる場合は脊椎の矯正を緩める、スクリューの抜去など可能であれば MEP 変化前の状態まで戻し手術を一時中断する。[1D]
- 手術操作をやり直しても MEP が回復せず、神経障害が強く疑われる場合は手術を中止するか、継続するか、術者と協議し適切な対策を講じる。[1D]

解　説

MEP 変化時の対応アルゴリズムのシェーマを図 7 に示す。アラームポイントは施設内で基準を設けておくことが望ましい。これは施設によってアラームポイントを神経障害が起こった可能性が高いクリティカルなレベルとするか、ここから注意してモニタリングを行っていくという警告的なレベルなのかでとらえ方が異なり、結論が得られていないためである。脊椎・脊髄外科手術での MEP のクリティカルなアラームポイントは振幅の不可逆的な 50–90％以上の低下あるいは波形の消失[28]–[32] とするなどさまざまで統一されておらず、ほかに、振幅以外の波形変化[33][34] などがあるが、手術・手術部位ごとにアラームポイントを設けるべきだという意見[3] もあり結論が



ベースライン MEP：手術の影響あり（主に下肢）
コントロール MEP：手術の影響なし（主に上肢）

図 7　脊椎・脊髄手術時の MEP 変化時の対応フローチャート

得られていない。このため MEP の変化だけでアラームを出すのではなく、SEP などほかの神経モニタリングを併用し、アラームを出すための補助とすることも良い方法である。アラームポイントのカットオフ値（振幅が何％低下したか）を小さくすれば偽陽性となりやすく、反対に大きくすれば偽陰性となりやすく運動神経障害を起こす可能性が高まる。これらのことを踏まえたうえで施設ごとにアラームポイントを決めておくことが重要である。

MEP がアラームポイントまで変化した場合、まず術者にアラームを発する。コントロール MEP に変化がなく直前の手術操作の影響が明らかに疑われる場合、脊椎の矯正を緩めたり、スクリューの抜去など、可能であれば MEP 変化前の操作まで手術手技を戻し手術を一時中断する。その後、再度 MEP 導出を試み、振幅が回復すれば手術を再開する。MEP の振幅が回復しない場合は神経障害を強く疑い、手術をこのまま継続するか中止するかなどを協議し適切な対策を講じる。一方、コントロール MEP に変化がある場合は、麻酔深度、筋弛緩レベル、血圧が直前の MEP 導出時と変化していないか確認し、変化があれば調整して MEP を再検する。すべての MEP が回復すれば手術を再開する。コントロール MEP しか回復しない場合、脊椎の矯正を緩めたり、スクリューの抜去など可能であれば MEP 変化前の操作まで手術手技を戻し手術を一時中断する。MEP が回復しない場合は、なんらかのモニタリング機器の異常の可能性があり、電極の外れなどがないか再度確認したのち、術者と協議して適切な対策を講じる。熟練した施設であれば wake-up test を行ってもよい。

4.4.2　脳外科手術

4.4.2.1　麻酔法

〈Summary statement〉

- 麻酔深度と筋弛緩レベルは一定に保つ。[1D]
- 鎮静薬はプロポフォールによる静脈麻酔を第一選択とする。[1C]
- 麻酔薬は濃度依存性に MEP を減衰させるため、麻酔深度モニターや呼気麻酔薬濃度により麻酔深度を評価する。[1C]
- 筋弛緩薬は MEP を容易に減衰させるため、筋弛緩モニターを使用し、筋弛緩レベルを評価する。[1C]

解　説

麻酔の基本的内容は脊椎・脊髄外科手術と同様である。吸入麻酔薬（セボフルランまたはデスフルラン）を用いてもよいが、プロポフォール麻酔と比べて偽陰性を来す可能性が高いので注意が必要である。脳外科手術では刺激強度が高くなるとモニタリングしたい錐体路の大脳皮質、内包よりも遠位の頭蓋底にまで刺激が到達することが原因で生じる偽陰性を回避するため基本的に刺激強度をできるだけ小さくすることが必要なのが理由である。吸入麻酔薬は MEP の刺激閾値がプロポフォールよりも高いことから MEP モニタリングに関しては静脈麻酔が中心となる。内頚動脈内膜剝離術においてデスフルランで MEP モニタリング可能であったという報告[35] や、脳幹部手術でセボフルランとプロポフォール麻酔とで MEP の振幅を比較した報告[36] がある。吸入麻酔薬の使用については限定的である。最終的に麻酔科医として手術部位と患者の全身状態を考慮して麻酔法を決定する。術野と重なるために麻酔深度モニターの併用は難しい場合もあるが、特にプロポフォール麻酔の際にはシール電極位置を工夫して対応する必要がある。それでもシール電極の貼付が術中不可能と判断される場合、手術開始まで、許容時間内での貼付を術者に要請し、プロポフォールの投与量の調節を行う。このとき、麻酔深度モニターに加えて TCI インフューザーポンプを併用するのもよい。

MEP 導出を優先しすぎるあまりに、術中覚醒やバッキングなどを惹起することは脳神経外科手術中には重大な合併症を引き起こす可能性があるため、麻酔科医として絶対に回避しなければならない。

4.4.2.2　ベースライン波形記録時の留意点

〈Summary statement〉

- 麻酔深度モニター、筋弛緩モニターを用いて、それぞれのレベルを一定にし、再現性の高いベースライン MEP を被検筋から記録する。[1C]
- 吸入麻酔薬で初回ベースライン MEP が導出できない場合はプロポフォール麻酔に変更する。[1D]
- 神経障害を起こす可能性のある手術操作（クリップ留置、血管遮断、開頭、閉頭など）の直前にベースライン（floating baseline）MEP を記録する。[1D]

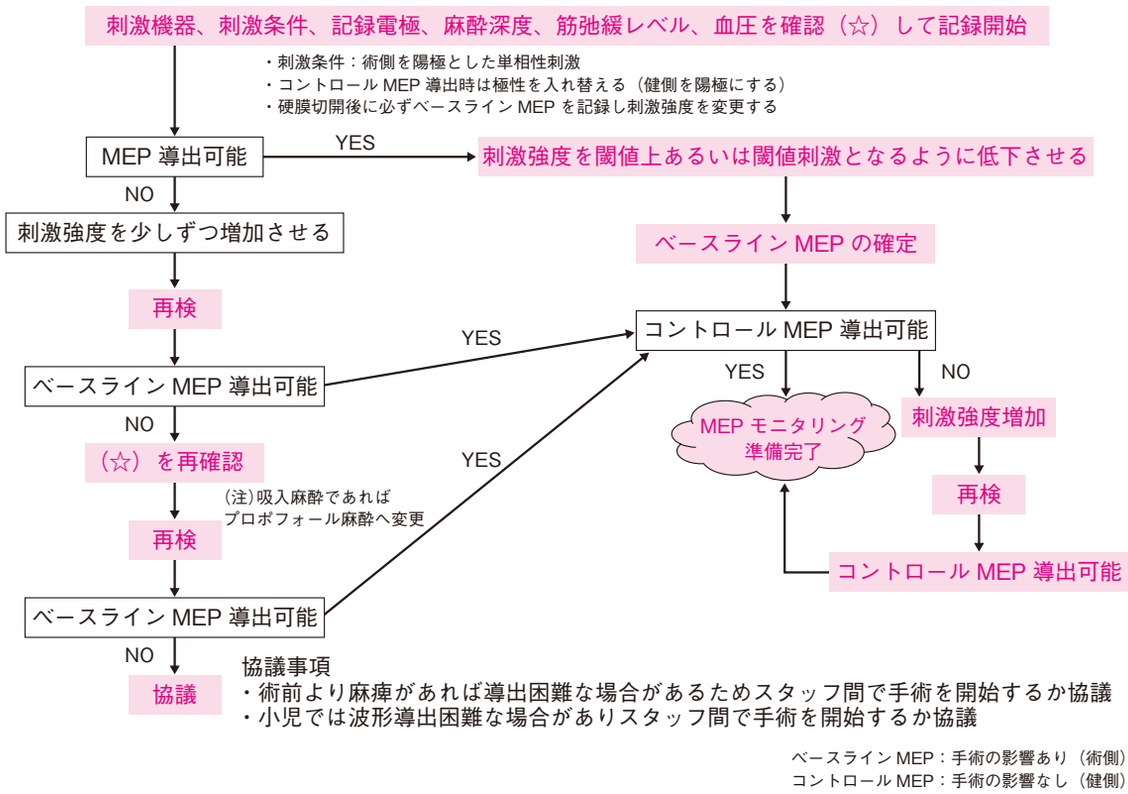


図 8　脳外科手術時のベースライン MEP 波形記録のためのフローチャート

・極性を入れ替え、手術の影響がないとされる健側のコントロール MEP が導出されることを確認する。[1D]

解　説

ベースライン波形記録時のアルゴリズムのシェーマを図 8 に示す。全身麻酔導入直後は導入薬の影響により初回ベースライン MEP が得られるまでに時間を要することがある。導入後に筋弛緩薬を拮抗するのもよいが、麻酔深度モニターと筋弛緩モニターを用いてベースラインの MEP が得られた麻酔深度を可能なかぎり一定に保ち再現性の高い MEP を被検筋から記録する。刺激法は偽陰性を回避するため術側を陽極とした単相性刺激とし、刺激強度は閾値上刺激あるいは閾値刺激とする。脳外科手術では極性を入れ替えて手術の影響がないとされる健側のコントロール MEP が導出されることを確認しておく。ベースライン MEP が導出可能でコントロール MEP が導出できないことはまれであるが、この場合、刺激強度を増加させてコントロール MEP を導出する。注意しなければならない点はベースライン MEP を導出するときは刺激強度をもとの強さに戻す必要があることである。低血圧はベースライン MEP が導出しにくい原因の一つとなるので避ける。吸入麻酔薬で初回ベースライン MEP が導出できない場合はプロポフォール麻酔に変更する。術前より麻痺を有する場合や、小児の場合は初回ベースライン MEP が得られないことがあり、スタッフ間でこのまま手術を行うかどうかを協議する必要がある。ベースライン（float-

ing baseline）MEP は神経障害を起こす可能性のある手術操作（クリップ留置、血管遮断、開頭、閉頭など）の直前に記録する。特に脳外科手術では開頭、硬膜切開により脳脊髄液が流出して電気抵抗が変化するため、このときベースライン MEP 波形を必ず記録して刺激強度を変更させる必要がある。

4.4.2.3　MEP 変化時の対応

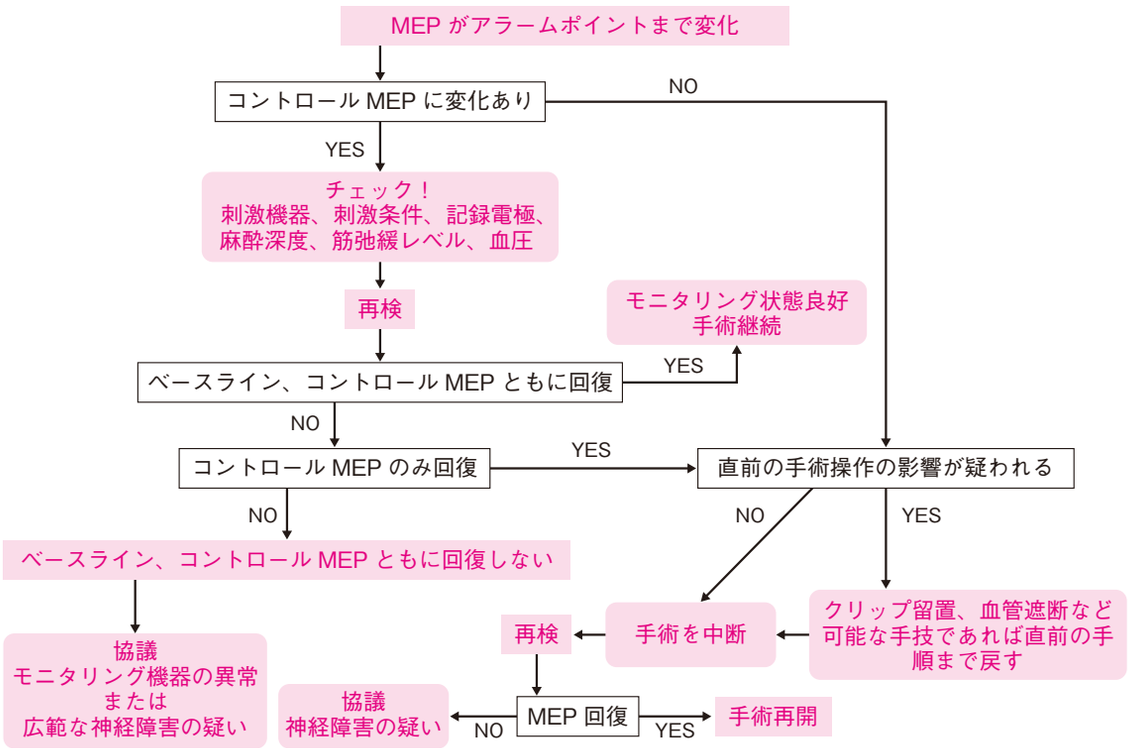
〈Summary statement〉

- アラームポイントについて施設内で基準を設けておくことが望ましい。[2D]
- 刺激機器、刺激条件、麻酔深度と筋弛緩レベル、血圧をチェックする。[1D]
- 極性を入れ替えて、健側のコントロール MEP が導出できるか確認する。[1D]
- 明らかに手術操作が原因と疑われる場合はクリップ解除、血管遮断解除など可能であれば MEP 変化前の状態まで戻し手術を一時中断する。[1D]
- 手術操作をやり直しても MEP が回復せず、神経障害が強く疑われる場合は手術を中止するか継続するか、術者と協議し適切な対策を講じる。[1D]

解　説

MEP 変化時の対応アルゴリズムのシェーマを図 9 に示す。脊椎・脊髄手術と同様にアラームポイントは施設内で基準を設けておくことが望ましい。脳外科手術での MEP のクリティカルなアラームポイントは振幅の不可逆的な 50–80％以上の低下あるいは波形の消失とするなどさまざまで統一されていない[3][37–41]。アラームポイントがさまざまである理由の一つに、障害を受ける部位の違いが考えられている。錐体路において大脳皮質や皮質直下はそれより遠位の内包や脊髄と比べて相対的に体積が大きいため、術中に障害を受けてもその運動障害の程度は部分的となりやすく、MEP の変化は振幅低下までにとどまり、反対に内包など相対的に体積が小さい部位が同等の大きさの障害を受けた場合は運動障害の程度は大きくなり、MEP が消失しやすくなると推測されている[37]。このことから手術・手術部位ごとにアラームポイントを設けるべきであるという意見[3] もあり結論が得られていない。これらのことを踏まえたうえで、施設ごとにアラームポイントを決めておくことが重要である。

MEP がアラームポイントまで変化した場合、まず術者にアラームを発する。ついでコントロール MEP を導出し、変化がなく直前の手術操作の影響が明らかに疑われる場合、クリップ解除や血管遮断解除など、可能であれば MEP 変化前の操作まで手術手技を戻し手術を一時中断する。その後、再度 MEP 導出を試み、振幅が回復すれば手術を再開する。MEP の振幅が回復しない場合は神経障害を強く疑い、手術をこのまま継続するか中止するかなど協議し適切な対策を講じる。一方、手術の影響がないとされる健側のコントロール MEP に変化がある場合は、麻酔深度、筋弛緩レベル、血圧が直前の MEP 導出時と変化していないか確認し、変化があれば調整してコントロール MEP を再検する。コントロール MEP が回復すれば、再度 MEP 導出を試み回復すれば手術を再開し、振幅が回復しない場合は神経障害を強く疑う。すべての MEP が回復しない場合はなんらかのモニタリング機器の異常が考えられる。電極の外れなどがないか再度確認したの



ベースライン MEP：手術の影響あり（術側）
コントロール MEP：手術の影響なし（健側）

図 9　脳外科手術時の MEP 変化時の対応フローチャート

ち、術者と協議し適切な対策を講じる。

4.4.3　大血管手術

4.4.3.1　麻酔法

〈Summary statement〉

- 鎮静薬はプロポフォールによる静脈麻酔薬を第一選択とする。[1C]
- 麻酔深度は麻酔深度モニターを用いて、一定に保つ。[1D]
- 筋弛緩薬は MEP を容易に減衰させるため、筋弛緩モニタリングを行い、筋弛緩レベルを一定に保つ。[1C]
- レミフェンタニルとフェンタニルの MEP に対する抑制は軽微であるため、いずれも投与可能である。[1D]
- 部分体外循環や大動脈遮断による血行動態変化のため、麻酔深度が変化し MEP モニタリングが影響を受けることがある。[1D]

解　説

1）麻酔導入

麻酔導入時には MEP の測定を行わないため、短時間作用型の薬剤であれば基本的にどの鎮静薬、筋弛緩薬、鎮痛薬も投与可能である。循環変動を抑制し、気道確保を妨げない麻酔導入方法

の選択を優先する。

2）麻酔維持

安定して十分な振幅を有する MEP を四肢で記録できるのであれば、基本的にどの麻酔薬を使用してもよい。MEP は鎮静薬、筋弛緩薬、鎮痛薬の影響を受けるが、薬剤の種類や投与量によりその程度が異なる[42]。十分な鎮静と鎮痛を図りながら、MEP モニタリングを大きく妨げない麻酔管理が求められる。

❶ 鎮静薬

セボフルランやデスフルランなどの吸入麻酔薬と静脈麻酔薬として頻用されるプロポフォールは用量依存性に MEP を抑制するので、麻酔深度モニターを指標にしながら一定の麻酔深度を維持する。大血管手術時の MEP モニタリングの際には、吸入麻酔薬と比較して、MEP に対する抑制効果が小さいプロポフォールが広く用いられている（日本麻酔科学会アンケート調査）。Bispectral index（BIS）値 50 の鎮静度において、セボフルラン麻酔下での MEP の振幅と比較し、プロポフォール麻酔下では 2 倍振幅が大きい MEP を記録できる[36]。デスフルラン麻酔時の前脛骨筋の MEP の振幅と比較しても、プロポフォール麻酔時には 2 倍以上の振幅の MEP を記録できる[43]。吸入麻酔薬を用いたときに、十分な振幅を有する MEP を記録できない場合には、プロポフォール麻酔への切り替えを検討する。

プロポフォール麻酔下で MEP を記録できない場合には、ケタミンによる麻酔が選択肢になる。プロポフォールと比較して、ケタミン麻酔下ではさらに振幅の大きな MEP を記録できる[44]。プロポフォール投与量を減量しケタミンを少量持続投与して鎮静度を維持しつつ、MEP モニタリングを行う方法がある[45]。ケタミン使用時は麻酔深度モニターを指標とした鎮静度評価が困難になるといった欠点があるものの、大血管手術の MEP モニタリングの際には選択肢の一つである。

❷ 筋弛緩薬

筋弛緩薬は、MEP を用量依存性に抑制する[14][46]。大きな振幅を有する MEP を記録するためには、筋弛緩効果を拮抗することが望ましい。しかし、開胸・開腹を伴う術式の場合には、術中も筋弛緩状態を求められることがある。筋弛緩薬投与下でも MEP を記録することは可能であるが、筋弛緩モニターを用いて筋弛緩薬の効果を一定にする必要がある。四連刺激に対する 2 番目（T2）の振幅が十分な大きさであれば、MEP を誘発できる[47]。

❸ 鎮痛薬

術中の鎮痛薬として多用されるレミフェンタニルの、臨床使用濃度における MEP に対する影響は軽微である。動物実験ではフェンタニル 15 μg/kg の大量ボーラス投与により、MEP の振幅が約半分にまで一過性に低下する[10]。MEP モニタリング中は、フェンタニルの大量投与は慎重に行う。

❹ 体外循環と大動脈遮断による麻酔深度変化

部分体外循環中に大動脈を遮断した場合、遮断近位側と遠位側の麻酔薬の血中濃度が著明に変化し、MEP 振幅に変化が生じることがある[48]。体外循環開始時や大動脈遮断の前後では、麻酔深度モニターを指標としながら、鎮静薬の投与量を調節し麻酔深度を一定に保つ。

4.4.3.2　脳脊髄液ドレナージの管理

〈Summary statement〉

- 脳脊髄液ドレナージは合併症が重篤なことから、リスクとベネフィットについてインフォームドコンセントを行う。[1D]
- 脳脊髄液ドレナージの禁忌がないか確認する。[1C]
- 脳脊髄液ドレナージのカテーテル挿入は標準予防策を遵守する。[1C]
- 頭蓋内出血予防のため過剰な脳脊髄液ドレナージは回避する。[1C]

解　説

脊髄潅流圧は“平均動脈圧－脳脊髄液圧”で表される。脳脊髄液圧のコントロールは脊髄潅流圧を維持するために重要である。脳脊髄液ドレナージは前向き無作為化臨床試験で術後早期の脊髄障害の相対危険度を 80%低下させることが報告された[49]。ただし、脳脊髄液ドレナージは合併症が重篤なことから、リスクとベネフィットについてインフォームドコンセントを行う。

1）挿入について

脳脊髄液ドレナージのためのカテーテル留置に伴う合併症として髄膜炎、硬膜外出血、硬膜下出血、脊髄穿刺に伴う脊髄損傷などの報告がある[50]。脊髄虚血の予防のために、術中からの脳脊髄液ドレナージを行うには、術前に脳脊髄液ドレナージのカテーテル留置を行う。穿刺時の血管損傷や術中のヘパリンによる抗凝固療法を考慮すると、術前日に留置を行うことが望ましい[51]。

脊髄虚血の治療のために、術後に脳脊髄液ドレナージのカテーテル留置を行うこともある。カテーテル留置前の血小板、凝固機能の確認を行い、臨床的な出血傾向の有無も確認する。また、抗血小板薬や抗凝固薬の内服の有無を確認し、カテーテル留置の禁忌がないかを確認する。カテーテル留置に関連した感染症の予防のため標準予防策（standard precautions）を遵守する。中心静脈カテーテル留置の高度無菌遮断予防策（maximal sterile barrier precautions）に準じて、標準予防策として手洗い、マスク、キャップ、清潔グローブ、清潔ガウンを着用し、広めの清潔ドレープを使用する。脳脊髄液ドレナージに関連した感染症は重篤であり、髄膜炎が発症した場合の死亡率は 50%と報告がある[52]。

2）管理について

術中・術後の管理目標には以下のような報告がある。術中の管理目標として MEP の低下がなければ脳脊髄液ドレナージは自然滴下とし脳脊髄液圧を 10–15 mmHg（14–20 cmH_2O）に維持する。MEP が低下したときは脳脊髄液圧を 10 mmHg（14 cmH_2O）以下に管理する。脳脊髄液ドレナージは 10 ml 刻みで廃液し脳脊髄液圧を再評価する。術後の管理目標として神経障害がなく脳脊髄液圧が 10 mmHg（14 cmH_2O）以上の場合は 1 時間あたり 15 ml 以下の脳脊髄液ドレナージを行う[52]。脳脊髄液ドレナージの施行は 48–72 時間とする[52][53]。最近の報告として術後に神経障害が発生した場合は脳脊髄液圧を 5 mmHg（7 cmH_2O）となるように脳脊髄液ドレナージを 7 日間継続し Hb 10 g/dl と収縮期血圧 140 mmHg を維持するという方法がある[54]。しかし脳脊髄液ドレナージには重篤な合併症も報告されており、その管理には注意が必要である[51]。過剰なド

レナージによる頭蓋内出血は重篤な合併症である。髄液が血性に変化したときはドレナージを中断し神経学的所見を評価し、必要があれば頭蓋内病変の検索を行う。胸部ステントグラフト内挿術の脳脊髄液ドレナージに関するメタアナリシスでは選択的・予防的ドレナージの効果は明確ではないため[55]、リスクとベネフィットを考慮して行う。

4.4.3.3　ベースライン波形記録時の留意点

〈Summary statement〉

- 麻酔関連薬剤の効果を一定に調節したのちに、初回ベースライン MEP を上下肢で記録する。[1C]
- 脊髄虚血を来す可能性のある手術操作や体外循環が始まる前に、ベースライン MEP を記録する。[1D]
- 大腿動脈に送血管を挿入する側の下肢 MEP は術中に測定できなくなることがあるため、両下肢で MEP を記録する。[1C]
- 上肢 MEP はコントロール MEP とする。[1C]

解　説

脊髄虚血が生じた場合には、下肢の MEP の振幅が著明に低下、あるいは消失する。術中の MEP 波形の振幅を、脊髄虚血が生じる前のベースラインと比較することにより評価する。術中に生じた脊髄虚血を、MEP の変化から検出するためには、再現性が高いベースラインとなる MEP 記録が求められる。

MEP は脊髄虚血だけなく、麻酔関連薬剤、循環動態、体温の影響を受ける。麻酔導入後には、それらが安定した状態で、脊髄虚血が生じうる手術操作が始まる前に、ベースラインとなる MEP を記録する。鎮静薬の効果は麻酔深度モニターを指標に、筋弛緩薬の効果は筋弛緩モニターを指標としながら一定に維持する。下肢 MEP の振幅低下が脊髄虚血によるものか、あるいはほかの要因によるものかを判別するために、コントロールとして上肢 MEP のモニタリングを行う。

上肢 MEP に比べて、下肢 MEP を誘発するためには強い刺激強度が要求される。全静脈麻酔下では、パルス幅 0.2 ms、トレインパルス数 5 回の設定で、母趾外転筋で MEP が誘発される刺激閾値は 97 mA と報告されている[56]。麻酔方法、患者要因、刺激条件により閾値は異なるが、100 mA あるいは 200 V から刺激を開始し、刺激強度を徐々に上げていく。電流刺激であれば 200 mA を、電圧刺激であれば 500 V を刺激強度上限の目安とする。単相性刺激と二相性刺激のいずれでもよいが、単相性刺激の場合には極性を変えて刺激を行う。再現性のある MEP を下肢の筋から導出できる刺激強度を求め、術中はできるだけ定電流・定電圧刺激を行う。術前から運動麻痺があると MEP の記録は困難である[57]。

大腿動脈に送血管が留置されている側の下肢では、組織の虚血により MEP の振幅が低下、または消失する可能性がある[58]。したがって、術中の脊髄虚血の発生を検出するためには、非送血側の下肢 MEP を評価する。MEP はさまざまな要因により影響を受けるため、長時間に及ぶ手術の場合には初回ベースライン MEP 波形だけでなく、頻回にベースラインとなる MEP 波形を記録

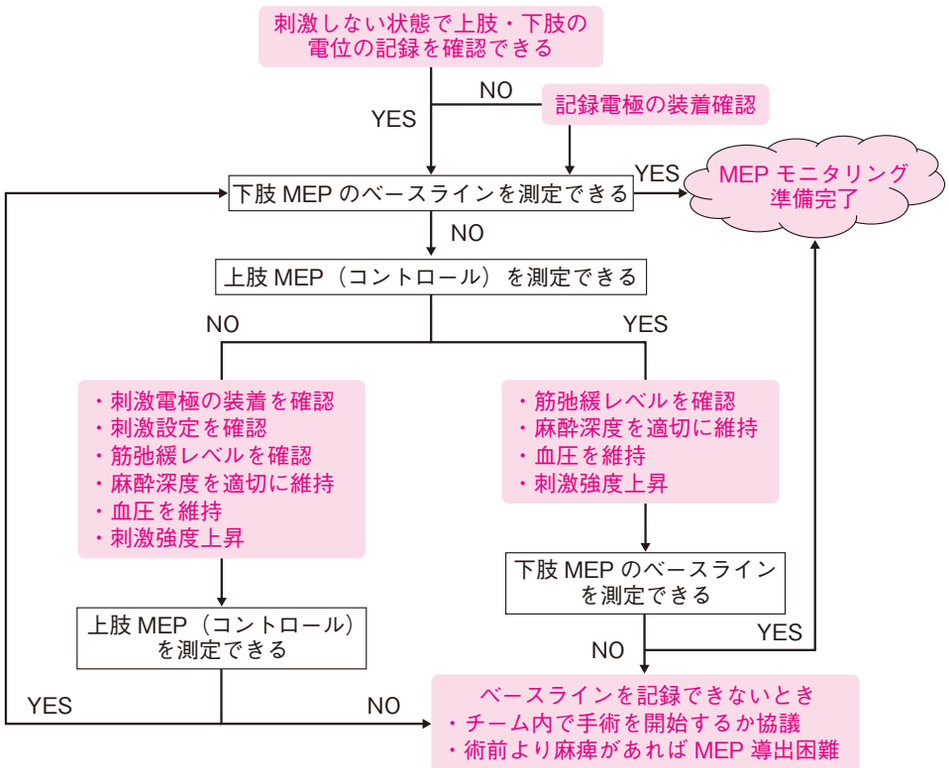


図 10　大血管手術時のベースライン MEP 波形記録のためのフローチャート

する。ベースライン MEP 波形を記録する際のフローチャートを図 10 に示す。

4.4.3.4　MEP 変化時の対応

〈Summary statement〉

- 両側下肢の MEP の振幅が著明に低下あるいは消失し、かつ上肢の MEP は不変である場合に脊髄虚血を疑う。[1C]
- 脊髄虚血が疑われる場合には、血圧を上昇させ貧血を補正する。[1C]
- 脊髄虚血が疑われる場合には、肋間動脈再建や脳脊髄液ドレナージの実施を考慮する。[2C]
- 上肢と下肢で MEP の振幅が著明に低下、あるいは消失した場合には、脊髄虚血以外の原因を検索する。[1C]

解　説

1）アラームポイント

両側下肢の MEP の振幅が著明に低下あるいは消失し、かつ上肢の MEP が不変である場合に脊髄虚血を疑う。近年のメタアナリシスは、大血管手術における下肢 MEP の振幅変化のアラームポイントは、波形の消失であることを示唆している[59]。大血管手術は、脊椎・脊髄手術や脳外科手術と比較して、循環変動が大きく、低体温・体外循環といった MEP 波形に影響を与える要因も加わる。脊髄虚血以外の原因によって MEP の波形が変化する可能性が高く、それらが中等度

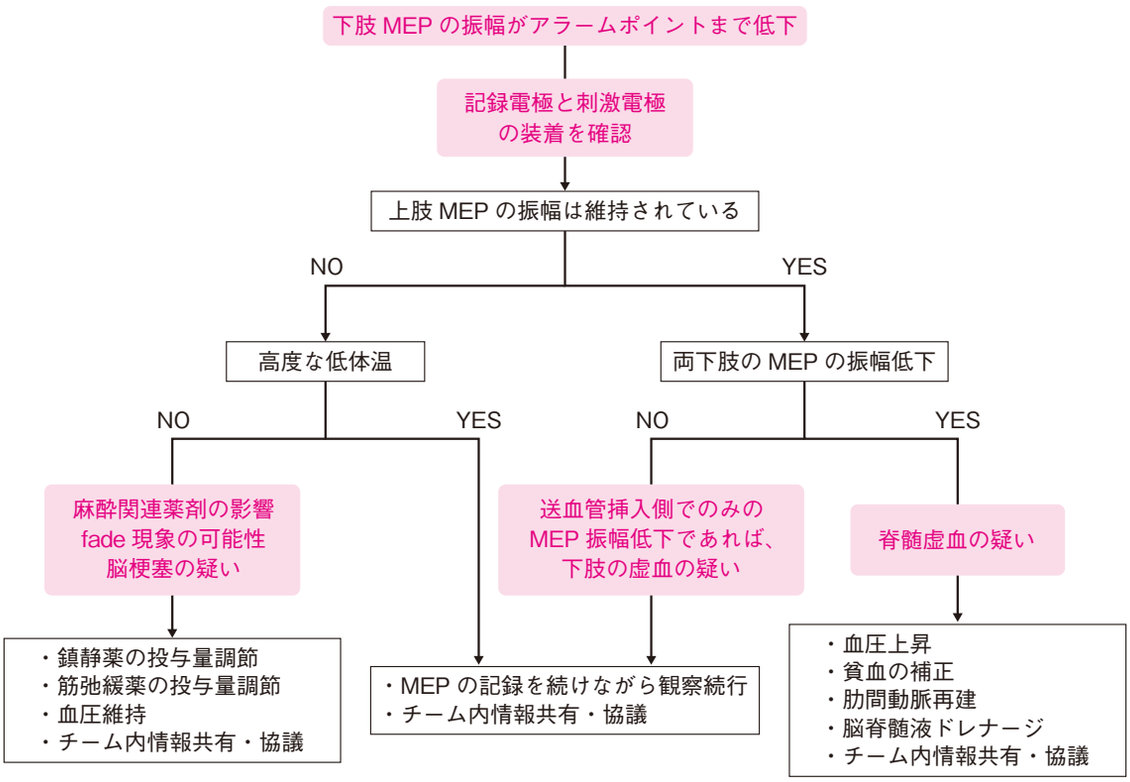


図 11　大血管手術時の MEP 振幅低下時の対応フローチャート

の MEP の振幅低下をアラームポイントとして設定することを困難にしている。

脊髄虚血が生じる可能性がある手術操作中に、急激な MEP 振幅の低下が生じた場合には、それをチーム内に報告し、その後の変化をとらえるため頻回に測定し、MEP 振幅低下のみなのか、あるいは消失に至るのかを確認する。2017 年に日本麻酔科学会が実施したアンケート調査によると、半数の施設でアラームポイントが設定されていない。下肢 MEP の振幅が低下し、脊髄虚血の可能性を否定できない場合には脊髄保護の治療を開始する。MEP の振幅低下時の対応フローチャートを図 11 に示す。

2）脊髄虚血が疑われる場合の対応

❶ 血圧上昇

脊髄への血流を維持するために平均血圧を上昇させる。肋間動脈、腰動脈から分岐して前脊髄動脈につながる動脈のうちヘアピンターンを描くもっとも太い動脈をアダムキーヴィッツ動脈と呼ぶ。アダムキーヴィッツ動脈は第 8 胸椎から第 12 胸椎レベルに 89.7％が分布している[60]。アダムキーヴィッツ動脈から脊髄運動路への血流が低下すると対麻痺の危険性が増加するが、必ずしも対麻痺が生じるということではない。ほかにも脊髄循環の重要な血管として、鎖骨下動脈や内腸骨動脈があり、脊柱管内外に脊髄を栄養する小動脈ネットワーク内での血流の増加や減少があることがコラテラルネットワークコンセプトとして報告されている[61]。脊髄潅流圧は“平均動脈圧－脳脊髄液圧”で表されるため、平均動脈圧を上昇させることで側副血行路からの脊髄への血

流を維持する。脊髄虚血が疑われた場合に、理想的には術前の平均血圧を保つことが目標となるが、少なくとも 80 mmHg を維持することが、専門家の意見として推奨されている[62]。術前の血圧や、血圧上昇に対する出血量増加のリスクを考慮した周術期管理が求められる。

❷ 体外循環の確認

大血管手術における大動脈遮断遠位側の血圧は、部分体外循環による人工心肺に依存するため、管理目標を確認しながら血圧の管理を行う。大動脈遮断近位側の血圧は心臓からの心拍出量に依存するので血圧の管理を行う。具体的な管理目標として、近位側血圧は平均 80 mmHg 以上、遠位側血圧は平均 60–80 mmHg 以上が推奨されている[63]。

❸ 肋間動脈の再建

MEP モニタリングの結果、脊髄虚血と診断した場合の外科的治療として、肋間動脈の再建術がある。805 症例の後方視的な研究では、肋間動脈の再建は脊髄障害の頻度を減少させなかったという報告がある[64]。一方で、術前に同定したアダムキーヴィッツ動脈の術中選択的潅流を行い再建することで術後神経学的合併症を予防した症例報告[65] もある。

❹ 脳脊髄液ドレナージ

術中に脊髄虚血が疑われた場合には、脳脊髄液ドレナージのカテーテルが挿入されていれば、上記のプロトコールに従って行う（4.4.3.2　脳脊髄液ドレナージの管理）。

❺ 貧血の補正

脊髄虚血が酸素需要に対する酸素供給の低下であることから、酸素運搬能を増加させることは脊髄虚血の改善に有用と考えられる。しかし脊髄障害時の貧血のみに焦点を当てた研究は少ない。胸部大動脈ステントグラフト内挿術において、酸素運搬能を最適化するため積極的な輸血や、平均血圧管理、脳脊髄液ドレナージを組み合わせた 204 症例での研究がある[66]。この研究では Hb 10 g/dl 以上を目標としており、これらの組み合わせを行うと脊髄虚血の発生率は 14% から 1.2% と有意差をもって減少している。

3）MEP を抑制する脊髄虚血以外の要因

上肢と下肢で MEP の振幅が著明に低下、あるいは消失した際には、脊髄虚血以外の原因を検索する。下記にその原因を述べる。

❶ 麻酔薬の影響

ケタミンを除き本邦で使用される多くの鎮静薬は、MEP の振幅を低下させる。また、筋弛緩薬も用量依存性に MEP を抑制する。急激な MEP の振幅低下が生じた場合には、麻酔関連薬剤のボーラス投与の有無を確認する。加えて、麻酔深度モニターで鎮静薬の影響と、筋弛緩モニターを用いて筋弛緩薬の効果を確認する。

❷ fade 現象

一般的に MEP の振幅は、モニタリング開始時から漸減することが知られており、これを fade 現象という[3]。手術が長時間に及ぶ場合には、脊髄虚血が生じる可能性が低い時間帯であっても、一定時間ごとに MEP を記録し、fade 現象の傾向を把握しておくことが、MEP 波形のベースライン設定に役立つ。

❸ 筋血流低下

部分体外循環のための送血管、あるいは血管内ステント治療の際のアクセス部位として大腿動脈が用いられることがある。その場合、その末梢側である下肢の血流が著しく低下し MEP 導出筋が虚血状態になるため、MEP の振幅が低下し平坦化する。このような状況では、対側下肢から導出される MEP 波形の変化で脊髄虚血の発生を判断することになる。

❹ 体温低下

胸部下行・胸腹部大動脈瘤人工血管置換術時には体外循環を用い、体温を低下させることが多い。低体温は、虚血性脊髄障害を防止することを目的としている。動物研究では、脊髄を局所的に冷却した場合に、30℃までは MEP の振幅が増大し、それ以上の低下は MEP 振幅が低下する[67]。臨床研究では、中枢温 28℃の中等度低体温では MEP の振幅に大きな変化はないが、その後は体温低下に応じて MEP の振幅は徐々に低下し、中枢温 18℃の超低体温で消失する。一方、復温してもすぐには、ベースラインの振幅までは回復しない[68]。すなわち、脊髄虚血がなくても超低体温から復温後の MEP の振幅は小さい。上半身と下半身の復温開始の時期が異なることも念頭に置いた MEP の振幅の評価が求められる。

❺ 体外循環と大動脈遮断の影響

部分体外循環中に大動脈を遮断した場合、遮断近位側と遠位側が“split circulation”となり静脈麻酔薬の体内分布が著明に変化し、深麻酔状態になり、脊髄虚血になっていない状況でも MEP の振幅が低下することがある[48]。体外循環開始時や大動脈遮断の前後では、麻酔深度モニターを指標としながら、鎮静薬の投与量を調節し麻酔深度を一定に保つ。

4.5 小児における麻酔法

〈Summary statement〉

- 麻酔導入は、セボフルランによる緩徐導入またはプロポフォールなどの静脈麻酔による急速導入で行う。[1D]
- 麻酔維持は、プロポフォールまたは吸入麻酔薬（セボフルランまたはデスフルラン）で行う。ただし、用量依存性に MEP は減弱・消失するので慎重な投与量の設定が必要である。[1B]
- 低用量のプロポフォールに低濃度の吸入麻酔薬を併用することも可能である。[2D]
- レミフェンタニルを併用して鎮静薬の投与量を減らす。[1C]
- 麻酔深度モニターによる麻酔深度の評価は低年齢であるほど正確性が低い。[1B]

4.5.1 小児における麻酔薬

MEP モニタリングは小児でも臨床使用されているが、低年齢になるほど報告数が少ないためエビデンスは限定的である。したがって、正確な MEP モニタリングを実施するための最適な麻酔方法は確立されていない。小児では、個体間で薬物動態学的多様性と薬力学的多様性が大きいため適切な麻酔深度の調節が難しく、さらに軸索線維が未成熟であることも正確な MEP モニタリングを困難にさせる[69][70]。小児で MEP モニタリングを行う場合の麻酔計画は、より慎重に考

慮されなければならない。

小児に対する前投薬として使用されるベンゾジアゼピン、クロニジン（本邦では保険適用外）は、臨床使用量で MEP を著しく抑制し、その持続時間も長い[7][71]。そのため、これらの前投薬の使用を避けることが望ましい。

麻酔導入は、セボフルランによる緩徐導入またはプロポフォールなどの静脈麻酔による急速導入で行う[72]。麻薬（フェンタニル、レミフェンタニル）は、通常の臨床使用では MEP にほとんど影響がない。麻酔維持は、プロポフォールまたは吸入麻酔薬（セボフルラン、デスフルラン）で行う[73]。小児でも、成人の場合と同様で吸入麻酔薬よりもプロポフォールのほうが MEP の抑制効果が少ないが、用量依存性に MEP を減弱させる。レミフェンタニルを併用してプロポフォールや吸入麻酔薬の投与量を減らすことは、薬剤性の MEP 減衰を回避するのに有効である。新生児ではクリアランスが著しく減少し個体差も大きく、3 カ月から 1 歳まで肝酵素が未熟でクリアランスは低いままであるため、プロポフォールが蓄積されやすい[74][75]。そのため小児における麻酔維持として、呼気濃度を指標に調節された吸入麻酔薬の使用も考慮される。また、小児では低用量のプロポフォールに低濃度の吸入麻酔薬（0.5 MAC 以下）を併用することで、プロポフォールの蓄積を回避できるかもしれない[24][76][77]。小児におけるプロポフォール使用上で留意すべきは、致死的合併症であるプロポフォール注入症候群（PRIS）である。集中治療室でのプロポフォール使用方針として 4 mg/kg/h 以下かつ 48 時間以内の使用に制限するべきという報告が多い[78][79] が、手術室内での麻酔時間はそこまで長くなることはない。術中のプロポフォール使用は、レミフェンタニルを併用して投与量を抑えるべきであり、2–4 時間までなら 9 mg/kg/h までに制限すべきという報告もある[79]。

4.5.2　小児における麻酔深度の評価

吸入麻酔薬、静脈麻酔薬は用量依存性に MEP を減弱させる。正確な MEP モニタリングを実施するために、麻酔深度の評価は重要である。しかし、小児では麻酔深度モニターの正確性が低下する[80]–[84]。特に乳児では、麻酔深度モニターの正確性はより低くなるため用いることを勧めない[80][81]。1 歳を超える小児でも、麻酔深度モニターは補助的なものとして扱う。

吸入麻酔薬を使用している場合は、呼気麻酔薬濃度を指標にして麻酔深度を調節する。一方、プロポフォールを用いる場合は、低年齢であるほど、特に乳児での基準となる投与方法が確立されていないので、MEP モニタリングを妨げない投与量に調節することが難しい。術野からの影響を受けない健側 MEP を一定に維持するように、麻酔深度を調節することも可能である[85]。

4.6　有害事象とその予防

〈Summary statement〉

- MEP 測定の目的や測定方法だけでなく、MEP に関連する有害事象についてもインフォームドコンセントを行う。[1C]
- 経頭蓋刺激時の筋収縮に伴う有害事象は頻度が高い。柔らかいバイトブロックなどを使い、定

期的に観察することにより舌・口唇裂傷、歯牙損傷を防止する。[1C]

- 電極刺入に伴う有害事象として、感染と出血がある。電極刺入部位の消毒と止血の確認を行う。[1D]
- 過剰な電気量による傷害として、痙攣や熱・化学損傷がある。必要以上に過剰な刺激強度による経頭蓋刺激を避ける。[1C]
- チーム内に経頭蓋刺激を行うことを周知し、刺激に伴う体動が手術操作を妨げないように留意する。[1D]

解　説

MEP モニタリングの安全性は高いものの、合併症の発生に注意を要する。MEP 測定の目的や測定方法だけでなく、有害事象についても十分にインフォームドコンセントを行う。てんかん、頭蓋骨欠損、脳血管クリップ、ペースメーカ、そのほかの植え込み型電気機器を有する患者は MEP 測定の相対的禁忌と考えられてきたが、合併症は非常にまれである。これらの相対的禁忌のある患者に対しては、MEP 測定の合併症と神経障害のリスクを勘案しながら MEP 測定の実施を検討する[3]。

1）電極設置による出血と感染

大血管手術中は抗凝固管理を行うため、針電極刺入部位に出血が生じる可能性がある。また感染のリスクもある。刺入する場合には、ディスポーザブル電極を用い、刺入部の消毒と止血確認を行う。

2）電気刺激による神経細胞の損傷

動物研究では過剰な電流により、神経細胞が損傷することが知られている[3]。下肢で MEP を誘発するための経頭蓋刺激は比較的高い電気量を必要とするが、硬膜外に達する電気量は 1/20 である。MEP モニタリングを目的とした経頭蓋刺激の設定は、神経損傷を生じる電気量と比較して大幅に低いため、神経細胞損傷が生じたという報告はなく、電気刺激に伴う神経損傷の可能性は非常に低いと考えられている[86]。しかし、組織学的な検証はされていないため、不必要に高い強度の電気刺激は避ける。

3）痙攣

MEP のための経頭蓋刺激の電気量は、痙攣を生じさせることを目的とした電気痙攣療法の 1/100 以下である[86]。経頭蓋刺激により痙攣が生じる頻度は 0.03–0.8％であり、非常にまれな事象である[86][87]。開頭術で痙攣が生じることが多く、また皮質刺激で痙攣が生じやすい[87][88]。大血管手術時の MEP 測定に伴う痙攣はまれであるが、痙攣が持続する場合には、刺激を中断し速やかに痙攣を止める処置を行う。

4）電気化学的傷害

電気化学的傷害は刺激電極が接する組織表面で生じ、経頭蓋刺激より皮質刺激で留意すべき有害事象である。電気化学的傷害は、刺激のパルス幅が 1 ms を超える場合や、単相性刺激を繰り返す場合に生じることがある。電気刺激に伴う皮膚の熱損傷を避けるために、熱エネルギーは 50

mJ 以下であることが推奨されている[3]。パルス幅 0.2 ms、刺激電流 200 mA、抵抗が 1 kΩ である場合、発生する熱エネルギーは 8 mJ となる。皿電極を介して刺激を行う場合には、繰り返し刺激や長時間経過することで電解質ペーストが乾くことがある。抵抗が変化すると発生する熱エネルギーも変化するため、定期的に刺激電極の接触状態の確認を行う。

5）不整脈

15,000 件を調査した研究では、MEP 測定に伴う不整脈が 5 症例生じたことが報告されている[87]。頻度が非常に低いため、MEP の経頭蓋刺激と不整脈の因果関係は明らかになっていない[3]。

6）咬傷

経頭蓋電気刺激によって顎筋が収縮し、硬い歯による組織損傷が生じる頻度は 0.2% と報告されている[87]。日本麻酔科学会が実施したアンケート調査では 3-4% の施設で咬傷の経験ありと回答している。舌、口唇、頬粘膜、歯牙などの損傷や、非常にまれではあるが下顎骨骨折の報告もある。経頭蓋電気刺激後の顎筋収縮は、皮質延髄路を介して、あるいは頭蓋外滑走電流により生じると考えられている。硬いバイトブロックを口腔内に留置した場合に、その部位に咬合力が集中するため、歯牙損傷や舌・口唇損傷が生じる。組織損傷を防止するために、柔らかいバイトブロックや円柱状に丸めたガーゼを挿入するといった予防策が必要である[89]。

7）気管チューブの破損

経頭蓋刺激による強力な顎筋収縮により、歯牙が気管チューブを破損することもある[90]。Duma ら[91]の報告では、円柱状のガーゼをバイトブロックとして使用していたにもかかわらず、らせん入り気管チューブが破損した。ガーゼによるバイトブロックは一定の効果があると考えられるが、チューブの破損を完全には防ぐことができない。必要以上に経頭蓋刺激強度を上げず、刺激時の気管チューブの状態（変形や圧迫の有無）を定期的に観察する。

8）体動による手術操作の妨げ

経頭蓋刺激は体動を伴う。経頭蓋刺激を行う際には、チーム内でコミュニケーションを取り、刺激に伴う体動が手術操作を妨げないようにする。

参考文献

1] Merton PA, Morton HB. Stimulation of the cerebral cortex in the intact human subject. Nature 1980；285：227.

2] Taniguchi M, Cedzich C, Schramm J. Modification of cortical stimulation for motor evoked potentials under general anesthesia：technical description. Neurosurgery 1993；32：219-26.

3] Macdonald DB, Skinner S, Shils J, Yingling C；American Society of Neurophysiological Monitoring. Intraoperative motor evoked potential monitoring— a position statement by the American Society of Neurophysiological Monitoring. Clin Neurophysiol 2013；124：2291-316.

4] Sloan TB, Heyer EJ. Anesthesia for intraoperative neurophysiologic monitoring of the spinal cord. J Clin Neurophysiol 2002；19：430-43.

5] Haghighi SS, Green KD, Oro JJ, Drake RK, Kracke GR. Depressive effect of isoflurane anesthesia on motor evoked potentials. Neurosurgery 1990；26：993-7.

6] Haghighi SS, Sirintrapun SJ, Keller BP, Oro JJ, Madsen R. Effect of desflurane anesthesia on transcortical motor evoked potentials. J Neurosurg Anesthesiol 1996；8：47-51.

7] Kalkman CJ, Drummond JC, Ribberink AA, Patel PM, Sano T, Bickford RG. Effects of propofol, etomidate, midazolam, and fentanyl on motor evoked responses to transcranial electrical or magnetic stimulation in humans. Anesthesiology 1992；76：502-9.

8] Kawaguchi M, Inoue S, Kakimoto M, Kitaguchi K, Furuya H, Morimoto T, Sakaki T. The effect of sevoflurane on myogenic motor-evoked potentials induced by single and paired transcranial electrical stimulation of the motor cortex during nitrous oxide/ketamine/fentanyl anesthesia. J Neurosurg Anesthesiol 1998；10：131-6.

9] Nathan N, Tabaraud F, Lacroix F, Mouliès D, Viviand X, Lansade A, Terrier G, Feiss P. Influence of propofol concentrations on multipulse transcranial motor evoked potentials. Br J Anaesth 2003；91：493-7.

10] Scheufler KM, Zentner J. Total intravenous anesthesia for intraoperative monitoring of the motor pathways：an integral view combining clinical and experimental data. J Neurosurg 2002；96：571-9.

11] Fahy BG, Chau DF. The technology of processed electroencephalogram monitoring devices for assessment of depth of anesthesia. Anesth Analg 2018；126：111-7.

12] Ohtaki S, Akiyama Y, Kanno A, Noshiro S, Hayase T, Yamakage M, Mikuni N. The influence of depth of anesthesia on motor evoked potential response during awake craniotomy. J Neurosurg 2017；126：260-5.

13] Naguib M, Brull SJ, Kopman AF, Hunter JM, Fülesdi B, Arkes HR, Elstein A, Todd MM, Johnson KB. Consensus statement on perioperative use of neuromuscular monitoring. Anesth Analg 2018；127：71-80.

14] Sloan TB. Muscle relaxant use during intraoperative neurophysiologic monitoring. J Clin Monit Comput 2013；27：35-46.

15] Pavoni V, Gianesello L, De Scisciolo G, Provvedi E, Horton D, Barbagli R, Conti P, Conti R, Glunta F. Reversal of profound and "deep" residual rocuronium-induced neuromuscular blockade by sugammadex：a neurophysiological study. Minerva Anestesiol 2012；78：542-9.

16] Cammu G, de Kam PJ, De Graeve K, van den Heuvel M, Suy K, Morias K, Foubert L, Grobara P, Peeters P. Repeat dosing of rocuronium 1.2 mg kg-1 after reversal of neuromuscular block by sugammadex 4.0 mg kg-1 in anaesthetized healthy volunteers：a modelling-based pilot study. Br J Anaesth 2010；105：487-92.

17] Askin T, Unver S, Oguz D, Kutay K. Case report：neuromuscular block induced by rocuronium following sugammadex administration. J Clin Anesth 2017；37：166-7.

18] Iwasaki H, Sasakawa T, Takahoko K, Takagi S, Nakatsuka H, Suzuki T, Iwasaki H. A case series of re-establishment of neuromuscular block with rocuronium after sugammadex reversal. J Anesth 2016；30：534-7.

19] Fabregat-López J, Veiga-Ruiz G, Dominguez-Serrano N, García-Martinez MR. Re-establishment of neuromuscular block by rocuronium after sugammadex administration. Can J Anaesth 2011；58：658-9.

20] Matsuki G, Takahata O, Iwasaki H. Repeat dosing of rocuronium after reversal of neuromuscular block by sugammadex. Can J Anaesth 2011；58：769-70.

21] Kalkman CJ, Drummond JC, Kennelly NA, Patel PM, Partridge BL. Intraoperative monitoring of tibialis anterior muscle motor evoked responses to transcranial electrical stimulation during partial neuromuscular blockade. Anesth Analg 1992；75：584-9.

22] Legatt AD, Emerson RG, Epstein CM, MacDonald DB, Deletis V, Bravo RJ, López JR. ACNS Guideline：transcranial electrical stimulation motor evoked potential monitoring. J Clin Neurophysiol 2016；33：42-50.
23] Chong CT, Manninen P, Sivanaser V, Subramanyam R, Lu N, Venkatraghavan L. Direct comparison of the effect of desflurane and sevoflurane on intraoperative motor-evoked potentials monitoring. J Neurosurg Anesthesiol 2014；26：306-12.
24] Sloan TB, Toleikis JR, Toleikis SC, Koht A. Intraoperative neurophysiological monitoring during spine surgery with total intravenous anesthesia or balanced anesthesia with 3% desflurane. J Clin Monit Comput 2015；29：77-85.
25] Martin DP, Bhalla T, Thung A, Rice J, Beebe A, Samora W, Klamar J, Tobias JD. A preliminary study of volatile agents or total intravenous anesthesia for neurophysiological monitoring during posterior spinal fusion in adolescents with idiopathic scoliosis. Spine（Phila Pa 1976）2014；39：E1318-24.
26] Grottke O, Dietrich PJ, Wiegels S, Wappler F. Intraoperative wake-up test and postoperative emergence in patients undergoing spinal surgery：a comparison of intravenous and inhaled anesthetic techniques using short-acting anesthetics. Anesth Analg 2004；99：1521-7.
27] Rigouzzo A, Girault L, Louvet N, Servin F, De-Smet T, Piat V, Seeman R, Murat I, Constant I. The relationship between bispectral index and propofol during target-controlled infusion anesthesia：a comparative study between children and young adults. Anesth Analg 2008；106：1109-16.
28] Zuccaro M, Zuccaro J, Samdani AF, Pahys JM, Hwang SW. Intraoperative neuromonitoring alerts in a pediatric deformity center. Neurosurg Focus 2017；43：E8.
29] Kobayashi S, Matsuyama Y, Shinomiya K, Kawabata S, Ando M, Kanchiku T, Saito T, Takahashi M, Ito Z, Muramoto A, Fujiwara Y, Kida K, Yamada K, Wada K, Yamamoto N, Satomi K, Tani T. 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 Related Research. J Neurosurg Spine 2014；20：102-7.
30] Thirumala PD, Crammond DJ, Loke YK, Cheng HL, Huang J, Balzer JR. Diagnostic accuracy of motor evoked potentials to detect neurological deficit during idiopathic scoliosis correction：a systematic review. J Neurosurg Spine 2017；26：374-83.
31] Tamkus AA, Rice KS, Kim HL. Differential rates of false-positive findings in transcranial electric motor evoked potential monitoring when using inhalational anesthesia versus total intravenous anesthesia during spine surgeries. Spine J 2014；14：1440-6.
32] Langeloo DD, Journée HL, de Kleuver M, Grotenhuis JA. Criteria for transcranial electrical motor evoked potential monitoring during spinal deformity surgery：a review and discussion of the literature. Neurophysiol Clin 2007；37：431-9.
33] Quiñones-Hinojosa A, Lyon R, Zada G, Lamborn KR, Gupta N, Parsa AT, McDermott MW, Weinstein PR. Changes in transcranial motor evoked potentials during intramedullary spinal cord tumor resection correlate with postoperative motor function. Neurosurgery 2005；56：982-93.
34] Ito Z, Imagama S, Sakai Y, Katayama Y, Wakao N, Ando K, Hirano K, Tauchi R, Muramoto A, El Zahlawy H, Matsuyama Y, Ishiguro N. A new criterion for the alarm point for compound muscle action potentials. J Neurosurg Spine 2012；17：348-56.
35] Malcharek MJ, Loeffler S, Schiefer D, Manceur MA, Sablotzki A, Gille J, Pilge S, Schneider G. Transcranial motor evoked potentials during anesthesia with desflurane versus propofol—a prospective randomized trial. Clin Neurophysiol 2015；126：1825-32.
36] Hernández-Palazón J, Izura V, Fuentes-García D, Piqueras-Pérez C, Doménech-Asensi P, Falcón-Araña L. Comparison of the effects of propofol and sevoflurane combined with remifentanil on transcranial electric motor-evoked and somatosensory-evoked potential monitoring during brainstem surgery. J Neurosurg Anesthesiol 2015；27：282-8.
37] Szelényi A, Hattingen E, Weidauer S, Seifert V, Ziemann U. Intraoperative motor evoked potential alteration in intracranial tumor surgery and its relation to signal alteration in postoperative magnetic resonance imaging. Neurosurgery 2010；67：302-13.

38] Zhou HH, Kelly PJ. Transcranial electrical motor evoked potential monitoring for brain tumor resection. Neurosurgery 2001；48：1075-80；discussion 1080-1.
39] Kombos T, Suess O, Ciklatekerlio O, Brock M. Monitoring of intraoperative motor evoked potentials to increase the safety of surgery in and around the motor cortex. J Neurosurg 2001；95：608-14.
40] Guo L, Gelb AW. The use of motor evoked potential monitoring during cerebral aneurysm surgery to predict pure motor deficits due to subcortical ischemia. Clin Neurophysiol 2011；122：648-55.
41] Neuloh G, Pechstein U, Cedzich C, Schramm J. Motor evoked potential monitoring with supratentorial surgery. Neurosurgery 2004；54：1061-70；discussion 1070-2.
42] Seubert CN, Mahla ME. Neurologic monitoring. In：Miller RD, editor. Miller's Anesthesia. 8th ed. Philadelphia：Elsevier；2014. p.1487-523.
43] Lo YL, Dan YF, Tan YE, Nurjannah S, Tan SB, Tan CT, Raman S. Intraoperative motor-evoked potential monitoring in scoliosis surgery：comparison of desflurane/nitrous oxide with propofol total intravenous anesthetic regimens. J Neurosurg Anesthesiol 2006；18：211-4.
44] Inoue S, Kawaguchi M, Kakimoto M, Sakamoto T, Kitaguchi K, Furuya H, Morimoto T, Sakaki T. Amplitudes and intrapatient variability of myogenic motor evoked potentials to transcranial electrical stimulation during ketamine/N_2O- and propofol/N_2O-based anesthesia. J Neurosurg Anesthesiol 2002；14：213-7.
45] Kawaguchi M, Sakamoto T, Inoue S, Kakimoto M, Furuya H, Morimoto T, Sakaki T. Low dose propofol as a supplement to ketamine-based anesthesia during intraoperative monitoring of motor-evoked potentials. Spine（Phila Pa 1976）2000；25：974-9.
46] Yamamoto Y, Kawaguchi M, Hayashi H, Horiuchi T, Inoue S, Nakase H, Sakaki T, Furuya H. The effects of the neuromuscular blockade levels on amplitudes of posttetanic motor-evoked potentials and movement in response to transcranial stimulation in patients receiving propofol and fentanyl anesthesia. Anesth Analg 2008；106：930-4.
47] Kim WH, Lee JJ, Lee SM, Park MN, Park SK, Seo DW, Chung IS. Comparison of motor-evoked potentials monitoring in response to transcranial electrical stimulation in subjects undergoing neurosurgery with partial vs no neuromuscular block. Br J Anaesth 2013；110：567-76.
48] Kakinohana M, Nakamura S, Fuchigami T, Miyata Y, Sugahara K. Influence of the descending thoracic aortic cross clamping on bispectral index value and plasma propofol concentration in humans. Anesthesiology 2006；104：939-43.
49] Coselli JS, LeMaire SA, Köksoy C, Schmittling ZC, Curling PE. Cerebrospinal fluid drainage reduces paraplegia after thoracoabdominal aortic aneurysm repair：results of a randomized clinical trial. J Vasc Surg 2002；35：631-9.
50] Mehmedagic I, Resch T, Acosta S. Complications to cerebrospinal fluid drainage and predictors of spinal cord ischemia in patients with aortic disease undergoing advanced endovascular therapy. Vasc Endovascular Surg 2013；47：415-22.
51] Fedorow CA, Moon MC, Mutch WA, Grocott HP. Lumbar cerebrospinal fluid drainage for thoracoabdominal aortic surgery：rationale and practical considerations for management. Anesth Analg 2010；111：46-58.
52] Estrera AL, Sheinbaum R, Miller CC, Azizzadeh A, Walkes JC, Lee TY, Kaiser L, Safi HJ. Cerebrospinal fluid drainage during thoracic aortic repair：safety and current management. Ann Thorac Surg 2009；88：9-15.
53] Etz CD, Zoli S, Bischoff MS, Bodian C, Di Luozzo G, Griepp RB. Measuring the collateral network pressure to minimize paraplegia risk in thoracoabdominal aneurysm resection. J Thorac Cardiovasc Surg 2010；140（6 Suppl）：S125-30.
54] Tanaka A, Safi HJ, Estrera AL. Current strategies of spinal cord protection during thoracoabdominal aortic surgery. Gen Thorac Cardiovasc Surg 2018；66：307-14.
55] Wong CS, Healy D, Canning C, Coffey JC, Boyle JR, Walsh SR. A systematic review of spinal cord injury and cerebrospinal fluid drainage after thoracic aortic endografting. J Vasc Surg 2012；56：1438-47.
56] Szelényi A, Kothbauer KF, Deletis V. Transcranial electric stimulation for intraoperative motor evoked potential monitoring：stimulation parameters and electrode montages. Clin Neurophysiol 2007；118：1586-95.
57] Macdonald DB, Al Zayed Z, Al Saddigi A. Four-limb muscle motor evoked potential and optimized somatosensory

evoked potential monitoring with decussation assessment：results in 206 thoracolumbar spine surgeries. Eur Spine J 2007；16 Suppl 2：S171-87.
58] Jafarzadeh F, Bashir M, Yan T, Harrington D, Field ML, Kuduvalli M, Oo A, Desmond M. Setting up and utilizing a service for measuring perioperative transcranial motor evoked potentials during thoracoabdominal aortic surgery and thoracic endovascular repair. Interact Cardiovasc Thorac Surg 2014；18：748-56.
59] Tanaka Y, Kawaguchi M, Noguchi Y, Yoshitani K, Kawamata M, Masui K, Nakayama T, Yamada Y. Systematic review of motor evoked potentials monitoring during thoracic and thoracoabdominal aortic aneurysm open repair surgery：a diagnostic meta-analysis. J Anesth 2016；30：1037-50.
60] Tanaka H, Ogino H, Minatoya K, Matsui Y, Higami T, Okabayashi H, Saiki Y, Aomi S, Shiiya N, Sawa Y, Okita Y, Sueda T, Akashi H, Kuniyoshi Y, Katsumata T；Japanese Study of Spinal Cord Protection in Descending and Thoracoabdominal Aortic Repair investigators. The impact of preoperative identification of the Adamkiewicz artery on descending and thoracoabdominal aortic repair. J Thorac Cardiovasc Surg 2016；151：122-8.
61] Griepp RB, Griepp EB. Spinal cord perfusion and protection during descending thoracic and thoracoabdominal aortic surgery：the collateral network concept. Ann Thorac Surg 2007；83：S865-9.
62] Etz CD, Weigang E, Hartert M, Lonn L, Mestres CA, Di Bartolomeo R, Bachet JE, Carrel TP, Grabenwöger M, Schepens MA, Czerny M. Contemporary spinal cord protection during thoracic and thoracoabdominal aortic surgery and endovascular aortic repair：a position paper of the vascular domain of the European Association for Cardio-Thoracic Surgery. Eur J Cardiothorac Surg 2015；47：943-57.
63] Etz CD, Halstead JC, Spielvogel D, Shahani R, Lazala R, Homann TM, Weisz DJ, Plestis K, Griepp RB. Thoracic and thoracoabdominal aneurysm repair：is reimplantation of spinal cord arteries a waste of time? Ann Thorac Surg 2006；82：1670-7.
64] Wynn M, Acher C, Marks E, Acher CW. The effect of intercostal artery reimplantation on spinal cord injury in thoracoabdominal aortic aneurysm surgery. J Vasc Surg 2016；64：289-96.
65] Ohtsubo S, Itoh T, Okazaki Y, Matsumoto K, Kato A. Selective perfusion of preoperatively identified artery of Adamkiewicz during repair of thoracoabdominal aortic aneurysm. J Thorac Cardiovasc Surg 2004；127：272-4.
66] Maurel B, Delclaux N, Sobocinski J, Hertault A, Martin-Gonzalez T, Moussa M, Spear R, Le Roux M, Azzaoui R, Tyrrell M, Haulon S. The impact of early pelvic and lower limb reperfusion and attentive peri-operative management on the incidence of spinal cord ischemia during thoracoabdominal aortic aneurysm endovascular repair. Eur J Vasc Endovasc Surg 2015；49：248-54.
67] Meylaerts SA, De Haan P, Kalkman CJ, Lips J, De Mol BA, Jacobs MJ. The influence of regional spinal cord hypothermia on transcranial myogenic motor-evoked potential monitoring and the efficacy of spinal cord ischemia detection. J Thorac Cardiovasc Surg 1999；118：1038-45.
68] Shinzawa M, Yoshitani K, Minatoya K, Irie T, Ogino H, Ohnishi Y. Changes of motor evoked potentials during descending thoracic and thoracoabdominal aortic surgery with deep hypothermic circulatory arrest. J Anesth 2012；26：160-7.
69] Lieberman JA, Lyon R, Feiner J, Diab M, Gregory GA. The effect of age on motor evoked potentials in children under propofol/isoflurane anesthesia. Anesth Analg 2006；103：316-21.
70] Fulkerson DH, Satyan KB, Wilder LM, Riviello JJ, Stayer SA, Whitehead WE, Curry DJ, Dauser RC, Luerssen TG, Jea A. Intraoperative monitoring of motor evoked potentials in very young children. J Neurosurg Pediatr 2011；7：331-7.
71] Calderón P, Deltenre P, Stany I, Kaleeta Maalu JP, Stevens M, Lamoureux J, Bellemans M, Dujardin S, Van der Linden P, Dachy B. Clonidine administration during intraoperative monitoring for pediatric scoliosis surgery：effects on central and peripheral motor responses. Neurophysiol Clin 2018；48：93-102.
72] Sloan T. Anesthesia and intraoperative neurophysiological monitoring in children. Childs Nerv Syst 2010；26：227-35.
73] Holdefer RN, Anderson C, Furman M, Sangare Y, Slimp JC. A comparison of the effects of desflurane versus propofol on transcranial motor-evoked potentials in pediatric patients. Childs Nerv Syst 2014；30：2103-8.
74] Allegaert K, Peeters MY, Verbesselt R, Tibboel D, Naulaers G, de Hoon JN, Knibbe CA. Inter-individual variability in propofol pharmacokinetics in preterm and term neonates. Br J Anaesth 2007；99：864-70.

75] Steur RJ, Perez RS, De Lange JJ. Dosage scheme for propofol in children under 3 years of age. Paediatr Anaesth 2004；14：462-7.
76] Yang J, Huang Z, Shu H, Chen Y, Sun X, Liu W, Dou Y, Xie C, Lin X, Hu Y. Improving successful rate of transcranial electrical motor-evoked potentials monitoring during spinal surgery in young children. Eur Spine J 2012；21：980-4.
77] Cheng JS, Ivan ME, Stapleton CJ, Quinones-Hinojosa A, Gupta N, Auguste KI. Intraoperative changes in transcranial motor evoked potentials and somatosensory evoked potentials predicting outcome in children with intramedullary spinal cord tumors. J Neurosurg Pediatr 2014；13：591-9.
78] Bray RJ. Propofol infusion syndrome in children. Paediatr Anaesth 1998；8：491-9.
79] Fudickar A, Bein B. Propofol infusion syndrome：update of clinical manifestation and pathophysiology. Minerva Anestesiol 2009；75：339-44.
80] Sciusco A, Standing JF, Sheng Y, Raimondo P, Cinnella G, Dambrosio M. Effect of age on the performance of bispectral and entropy indices during sevoflurane pediatric anesthesia：a pharmacometric study. Paediatr Anaesth 2017；27：399-408.
81] Tirel O, Wodey E, Harris R, Bansard JY, Ecoffey C, Senhadji L. Variation of bispectral index under TIVA with propofol in a paediatric population. Br J Anaesth 2008；100：82-7.
82] Jeleazcov C, Schmidt J, Schmitz B, Becke K, Albrecht S. EEG variables as measures of arousal during propofol anaesthesia for general surgery in children：rational selection and age dependence. Br J Anaesth 2007；99：845-54.
83] Tirel O, Wodey E, Harris R, Bansard JY, Ecoffey C, Senhadji L. The impact of age on bispectral index values and EEG bispectrum during anaesthesia with desflurane and halothane in children. Br J Anaesth 2006；96：480-5.
84] In：Davis P, Cladis F, editors. Smith's Anesthesia for Infants and Children. 8th ed. Philadelphia：Elsevier Mosby；2011.
85] Shinjo T, Hayashi H, Takatani T, Boku E, Nakase H, Kawaguchi M. Intraoperative feasibility of bulbocavernosus reflex monitoring during untethering surgery in infants and children. J Clin Monit Comput 2018 Mar 8. doi：10.1007/s10877-018-0127-2.
86] Yuen TG, Agnew WF, Bullara LA, Jacques S, McCreery DB. Histological evaluation of neural damage from electrical stimulation：considerations for the selection of parameters for clinical application. Neurosurgery 1981；9：292-9.
87] MacDonald DB. Safety of intraoperative transcranial electrical stimulation motor evoked potential monitoring. J Clin Neurophysiol 2002；19：416-29.
88] Ulkatan S, Jaramillo AM, Téllez MJ, Kim J, Deletis V, Seidel K. Incidence of intraoperative seizures during motor evoked potential monitoring in a large cohort of patients undergoing different surgical procedures. J Neurosurg 2017；126：1296-302.
89] Szelényi A, Kothbauer K, de Camargo AB, Langer D, Flamm ES, Deletis V. Motor evoked potential monitoring during cerebral aneurysm surgery：technical aspects and comparison of transcranial and direct cortical stimulation. Neurosurgery 2005；57（4 Suppl）：331-8.
90] Negus B. Gauze bite block. Anaesth Intensive Care 1997；25：589.
91] Duma A, Novak K, Schramm W. Tube-in-tube emergency airway management after a bitten endotracheal tube caused by repetitive transcranial electrical stimulation during spinal cord surgery. Anesthesiology 2009；111：1155-7.