

神経モニタリング

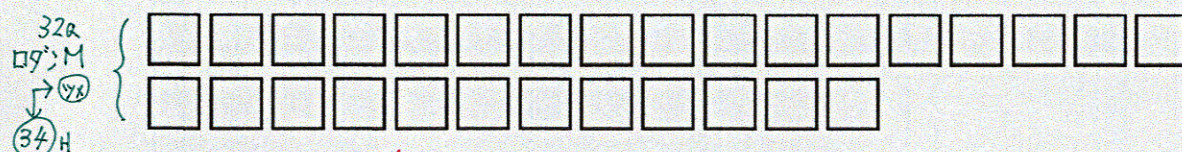
徹底分析
シリーズ

大血管手術と誘発電位

色80%+スミ30%

36a新3B

0.1=リキイ・色ベタ



吉谷 健司

色80%+スミ30%

12a
ロダシDB
14H 18w誌

胸部下行大動脈瘤や胸腹部大動脈瘤 thoracoabdominal aortic aneurysm (TAAA) 手術における脊髄虚血による下肢麻痺は、外科手術、脊髄保護戦略の進歩により減少したが、依然として重篤な合併症である。近年のメタ解析¹⁾では累積発症率は開腹修復で約5~6%、血管内修復 (TEVAR) で約4%、胸腹部置換では7%前後と報告されている。全身麻酔下では患者の意識がなく運動麻痺の確認ができないため脊髄機能のモニタリングで確認することになる。

13a
17w誌

16a
ロダシDB
14H (以下同)

運動誘発電位 (MEP) に影響するもの

脊髄機能モニタリングとしては、刺激により運動機能をみる運動誘発電位 motor evoked potentials (MEP) と、感覚機能をみる体性感覚誘発電位 somatosensory evoked potential (SEP) がある。大血管手術では運動機能障害が合併症であるので MEP を用いることが多い。SEP は全身麻酔下でもモニタリングが可能なので以前から行われていたが、MEP は麻酔薬の影響を受けやすく誘発が困難であった。短時間で連続刺激を行うことで加算する5連続刺激や筋収縮に影響を与えにくい静脈麻酔薬が開発されたことにより全身麻酔下

でも実施することが可能になった。しかし、MEP は筋電図であるため、体温、筋弛緩薬、麻酔薬の影響を受けやすいことは常に念頭に置く必要がある。

MEP は、脳外科手術、整形外科手術や脊髄機能に影響がある手術で用いられることが多かったが、大血管手術ではそれらの手術と根本的に異なる点がある。人工心肺を用いるため体温、希釈による薬物動態の変化などが誘発電位に影響を与える。したがって、人工心肺による影響を加味したうえで誘発される電位を解釈する必要がある。こういった大血管手術による特殊性を踏まえたうえで、大血管手術の誘発電位について述べていくことにする。

10a
ロダシDB
14H (以下同)

図中 ネーム
・基本 11a M中 BBB
(10a 以下は、ロダシM)
・太くするネーム
11a 太く B101
(10a 以下は、ロダシDB)
(以下同)

図版は、0.12=リキイ
色ベタ+スミ
(以下同)

60%
125%
(前後)

10a
ロダシDB
14H (以下同)

YOSHITANI, Kenji
国立循環器病研究センター
麻酔科・輸血管理部

なぜ虚血が起こるのか？
脊髄虚血とモニタリングの意義

脊髄は前脊髄動脈を中心とした血流により維持される。図1に示すように、大動脈からは脊髄を栄養する血管が分枝する。その中で比較的太い血管を大前根動脈 [Adamkiewicz 動脈 (AKA)] と呼ぶ。左鎖骨下動脈、脊髄分節動脈、腰動脈、内腸骨動脈大動脈遮断時にはこれらの動脈の血流が遮断される。さらに人工血管に大動脈を置換すればこれらの栄養血管は左鎖骨下動脈を除いては犠牲になり、置換後の血流は遮断される。

これを避けるために、あらかじめ脊髄の栄養血管を3D-CTで確認しておき、血流が確認されている肋間動脈は人工血管で大動脈を置換するグラフトに吻合して再建するという術式も行われる場合がある。特に AKA に関しては再建する施設も多い。

それでは、肋間動脈を再建しなければ人工血管置換後は、脊髄への血流はすべてなくなるのであろうか？ 必ず脊髄は虚血になるのであろうか？ 胸部大動脈ステントグラフト内挿術 thoracic endovascular aortic repair (TEVAR) の場合は肋間動脈を再建できないため脊髄虚血は必ず起こるのであろうか？ 現実にはそうではないことは周知の事実である。脊髄には多くの側副血行路が存在する^{2,3)}。それらの側副血行路の血流を含めて脊髄機能を評価することが重要になる。側副血行路があるため、大動脈遮断中、人工血管置換後も昇圧することで脊髄の血流を回復することができる。

術中は脊髄の栄養血管の循環はさま

徹底分析シリーズ 神経モニタリング 10a
色ベタ+スミ30%
(以下同)

MEPの電極位置

下行大動脈手術、胸腹部大動脈手術の場合は人工心肺の送血管を大腿動脈に挿入する。この図は右大腿動脈に送血管が入る場合を想定。電極は以下の筋肉に針電極を刺入する。

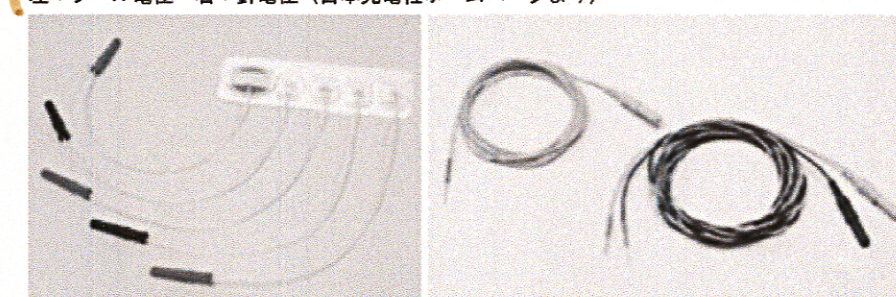
- ①右左手 短母指外転筋 正中神経
- ②非送血側 大腿四頭筋 L2-4
- ③非送血側 前脛骨筋 L4,5
- ④非送血側 母趾外転筋 S1
- ⑤送血側 大腿四頭筋 L2-4
- ⑥送血側 前脛骨筋 L4,5
- ⑦送血管側 母趾外転筋 S1,2

11a
M中 BBB
14H
(以下同)

(以上)
80%
60%

針電極とシール電極、正弦波ノイズ

左：シール電極 右：針電極 (日本光電社ホームページより)



52%

64%

ざまな要因で変化する。この変化を鋭敏にとらえることができるのが MEP である。血流低下により虚血が起これば遮断後5~10分で運動ニューロン活動が抑制され、MEP 振幅が低下する。したがって MEP は、皮質脊髄路を含む運動経路全体の機能を反映する直接的な虚血指標である。

MEPモニタリングの
実際

MEPのセッティング

国立循環器病研究センターでは、胸部・胸腹部大動脈置換術で8点導出法を

採用している (図2)。両上肢：短母指外転筋 (C6 支配)、下肢：送血側/非送血側それぞれの大腿四頭筋 (L2-4)、前脛骨筋 (L4-5)、母趾外転筋 (S1-2) から導出する。

針電極を基本とし、シール電極 (図3) に比べノイズが少なく安定した波形を得られる。手術室、特に人工心肺を用いる場合は、ノイズ源が多くあり (人工心肺、熱交換器など) 通常のシール電極では正弦波ノイズを拾うケースが多い (図4中央と右)。MEP の電位が小さく低振幅である場合は、ノイズと導出された MEP 波形の区別が付きに

徹底分析
シリーズ

神経モニタリング

流用
色ベタ → 20% (以下同)
色ベタ → 10% (以下同)

図4 正弦波ノイズが混入した MEP 波形 (シール電極)
中央、右の MEP 波形にノイズが混入している。

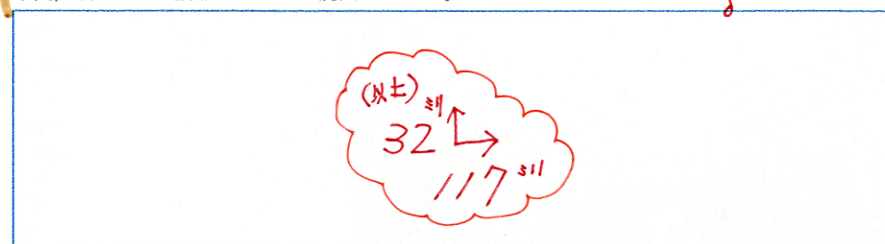
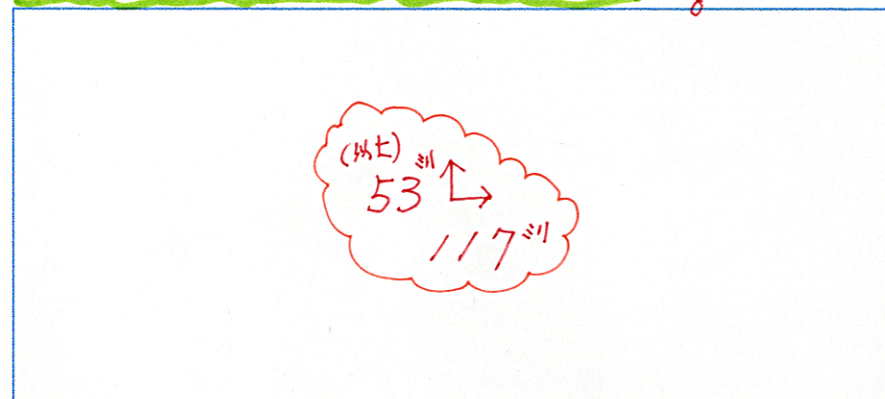


図5 正弦波ノイズが混入した MEP 波形 (シール電極)
中央、右の MEP 波形にノイズが混入している。



くくなる場合があり、極力ノイズの混入は避けるべきである。

MEP を実施するタイミング

◎麻酔導入直後 ~ 13a ロゲンB (以下同)
MEP が全誘導で導出できるかの確認を行う。ノイズが入っていないか、電極が剥がれていないかを確認する。

◎側臥位になった時点

大血管手術の場合、側臥位に体位変換するが、その際に電極が剥がれる場合もあり、体位変換後、必ず MEP の導出の有無を確認する。覆布がかかると電極の剥がれに対応するのはかなり困難になる。

◎手術開始後

麻酔深度も安定しており、この段階をベースラインとする。

◎人工心肺開始前 (ヘパリン投与直後)

人工心肺に向けてすでに体温は自然に低下していることが多い。この段階で MEP を導出しておく。

◎人工心肺開始 5 分後

人工心肺が開始されると、MEP の電位が麻酔深度の変化により変化するのので必ず導出しておく。ここでベースラインを再定義する。

◎人工心肺開始後体温 28℃前後

体温変化による MEP の振幅変化を把握する。ベースラインを再定義する。

◎大動脈遮断前

大動脈を遮断すると脊髄灌流圧が変化するため脊髄虚血の可能性があるので事前に MEP を行う。

◎大動脈遮断 5 分後

ここからは、いつ脊髄虚血が起こってもおかしくないので MEP を定期的 (5 ~ 10 分おき) に行う。

◎大動脈遮断解除後

ここでも血流が大きく変化するので MEP を実施する。anesthetic fade が起こる可能性があり、経時変化をとらえるために定期的 (15 ~ 20 分おき) に MEP を実施する。

MEP の低下はベースラインから何%低下したか (50%または75%低下) で判断する。ベースラインは状態が変化すると取り直す必要がある。以下のタイミングで MEP を測定することが望ましい (図5)。さらに虚血の起こりやすい手術中のタイミングがあり以下のタイミングでも実施することが望ましい。

- 大動脈瘤切開時：肋間動脈、腹部分枝などからの逆流により脊髄灌流圧が低下する。
- 肋間動脈再建中：肋間動脈のクランプにより脊髄灌流圧が低下する。
- 大動脈遠位端吻合終了時：下半身への血流が回復し、相対的に肋間動脈、脊髄栄養血管の灌流圧が低下する。
- 人工血管吻合後：出血により脊髄灌流圧が低下する。

人工心肺の影響

大血管手術の場合、下半身と上半身の血流は分離される部分体外循環を用いることが多い。人工心肺は内部コーティングされた回路とポンプにより血液を送るが、回路内は水分で満たされるためそれが人体に接続されると必然的に血液希釈が起こる。静脈麻酔を行っている場合は麻酔薬の濃度が変化し麻酔深度が深くなると虚血とは関係

なく減弱するため注意が必要である。吸入麻酔薬は MEP の振幅に影響を与えるので MEP を行う手術ではプロポフォルが用いられることが多い。人工心肺のプロポフォルに対する影響を以下に述べる。

プロポフォルの濃度変化

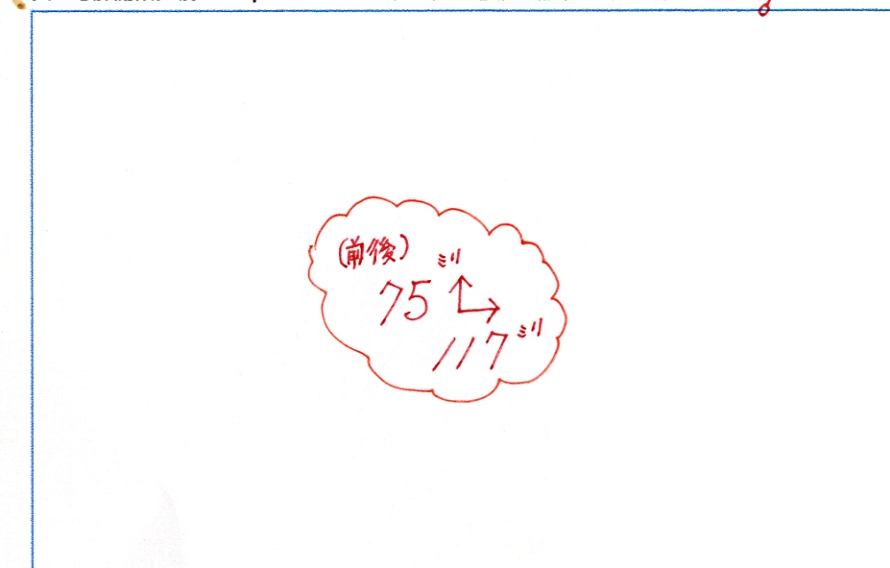
プロポフォルは血中では99%がアルブミンに結合しており、残りの1%が薬理作用をもっている。人工心肺が開始されるとアルブミンの血中濃度は半減する。したがってアルブミンに結合できるプロポフォルの割合が減少し、フリーのプロポフォル濃度が増加するため麻酔深度が深くなるという現象が起こる。これにより MEP の振幅が低下する可能性がある。

◎上半身の血流と

プロポフォルの代謝

下行大動脈置換術における部分体外循環 (特に下行大動脈遮断時) では、上半身の血流が脱血管の位置によっては肝臓を通過しないため、プロポフォルの血中濃度は上昇する。つまり、脱血管が左房内から下大静脈にかけて留置されると、上半身の血液はかなりの部分がそのまま肺に流入し、頭部を通過して上大静脈から右房に戻る。その際、また上半身に送られて肝臓を通過しない。実際、遮断部位より近位 (上半身側、例：橈骨動脈) で測定したプロポフォル濃度は、遮断前や遠位 (下半身側、例：大腿動脈) よりも有意に高くなる。これは、肝臓での初回通過効果および代謝が遮断されるため、上半身循環におけるプロポフォルのクリアランスが急激に低下することが主因である (図6)。

図6 人工心肺開始直後の麻酔深度モニターの変化 (文献5より)
人工心肺開始直後に Bispectral Index (BIS) が急激に低下している。



体温の影響

MEP は筋電図であるため体温の影響を強く受ける。通常、脊髄保護の目的で体温は中等度低体温 (28 ~ 32℃) か、超低体温循環停止 (18℃) を用いることが多い。中等度低体温の場合、MEP は導出可能であるが、超低体温になると MEP の導出は困難になる。中等度低体温の場合も温度が低下していく際にいったん電位は大きくなり、そこからまた小さくなっていく。この現象に留意する必要がある。復温時には逆の現象が起こり、MEP の振幅が低下している場合が多い。

麻酔薬、筋弛緩薬と MEP

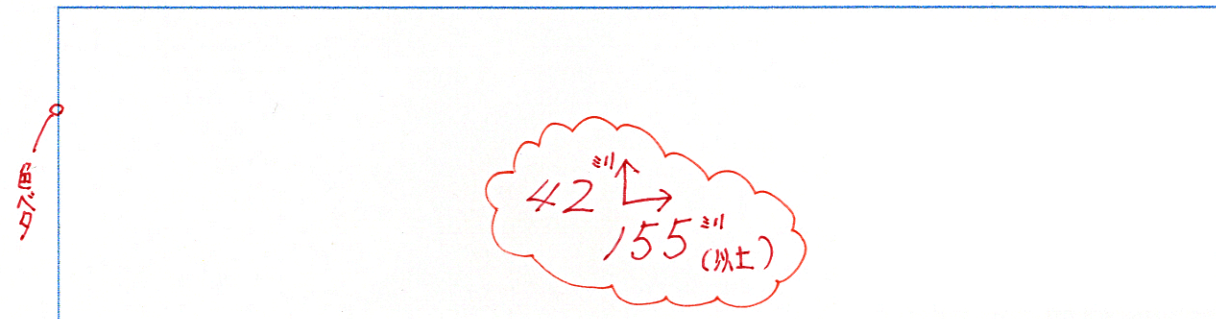
麻酔薬、筋弛緩薬自体の MEP への影響

MEP は筋電図であるため、筋弛緩効果のある吸入麻酔薬を用いると電位が低下する。デスフルランでは0.5

MAC でベースラインより58.4%低下し、セボフルランでは0.3 MAC でも66.2%まで低下していた。したがって静脈麻酔薬が用いられることが多い。また、筋弛緩薬もモニタリングを行いながら使用する必要がある。筋弛緩薬を用いずに高濃度のレミフェンタニルを用いる方法もあるが、体動が大きくなり合併症を起こす可能性がある。脳外科手術では筋弛緩薬を投与しつつ、MEP を導出する場合は TOF 比が0.5以上を推奨している。また、筋弛緩モニターの四連刺激で40%の TOF 比でもテタヌス刺激などの MEP 増強手段を用いると MEP を導出可能であるとされている。Marfan 症候群の場合、若年で下行置換と胸腹部置換を行う場合があるが、筋弛緩薬を投与せずに高濃度レミフェンタニルで麻酔を行うと、横隔膜の痙攣が起こり術野の妨げになる場合がある。このような場合も筋弛緩薬を MEP が導出できる投与量を滴定する必要がある。

徹底分析
シリーズ 神経モニタリング

▼図7 手術終了間際(手術時間8時間)のMEP
手の短母指外転筋の MEP は導出できているが下肢の誘導は消失しているか、かなりの低電位である。
AP: 短母指外転筋, QF: 大腿四頭筋, TA: 前脛骨筋, AH: 母趾外転筋



麻酔薬の長時間作用

大血管手術の場合、手術時間が長くなる症例が多いが、長時間になると MEP の振幅が徐々に低下する anesthetic fade が報告されている¹²⁾。プロポフォールによって前角細胞の興奮性が徐々に低下し、それにより MEP の振幅が減弱するといわれている。この現象にも注意する必要がある(図7)。特に下肢で減弱しやすいとされている¹³⁾。

MEPの電位が低下したときにどう判断するか?

MEP が低下したときにどうするかについては日本麻酔科学会のプラクティカルガイド[★]にまとめられている(図8)。

大血管手術では、上肢の MEP は手術の虚血とは関係しないため対照電極として利用する。上肢の MEP が導出されていれば、MEP の装置自体や導出に問題はないと考える。上肢の MEP が出ていると、麻酔薬、筋弛緩薬、装置の異常などを考える必要がある。大血管手術で大腿動脈から送血を行っている場合は、送血側の血流が低下するので MEP は減弱する。問題は、両下肢で振幅が低下するケースである。先にも示したように、anes-

thetic fade でも上肢の MEP が残る場合があり判断が難しい。5～10 分ごとに MEP を導出して経時的に観察する必要がある。

MEPは大血管手術の運動麻痺を予防するのに有効であるのか?

MEP は大血管手術で脊髄機能が保たれているかを調べるために行われている。この脊髄機能モニタリングは果たして術後の運動麻痺予防に本当に有効なものであろうか。術中の脊髄虚血はとらえられるかもしれないが、脊髄虚血に関する有効な介入方法がないと虚血を改善するには至らない。

脊髄虚血を改善するには肋間動脈の再建、脊髄灌流圧の上昇(昇圧、脳脊髄液圧の減少)、貧血の改善などが挙げられる。これらの介入の中では脳脊髄液ドレナージがガイドラインでは I A とされ推奨度が高い¹⁴⁾。しかし、無作為化比較試験が1件のみで推奨度に関してはさらなる研究が必要とされている。したがって、現時点では決定的な介入法は確立していない。

MEP の有無により運動麻痺の発症率に差があるかを調べた無作為化比較試験はこれまでに行われていない。後

ろ向き多施設観察研究では、MEP は運動麻痺の発生率を下げることはできなかった¹⁵⁾。これも、決定的に有効な介入がないということを示しているのかもしれない。

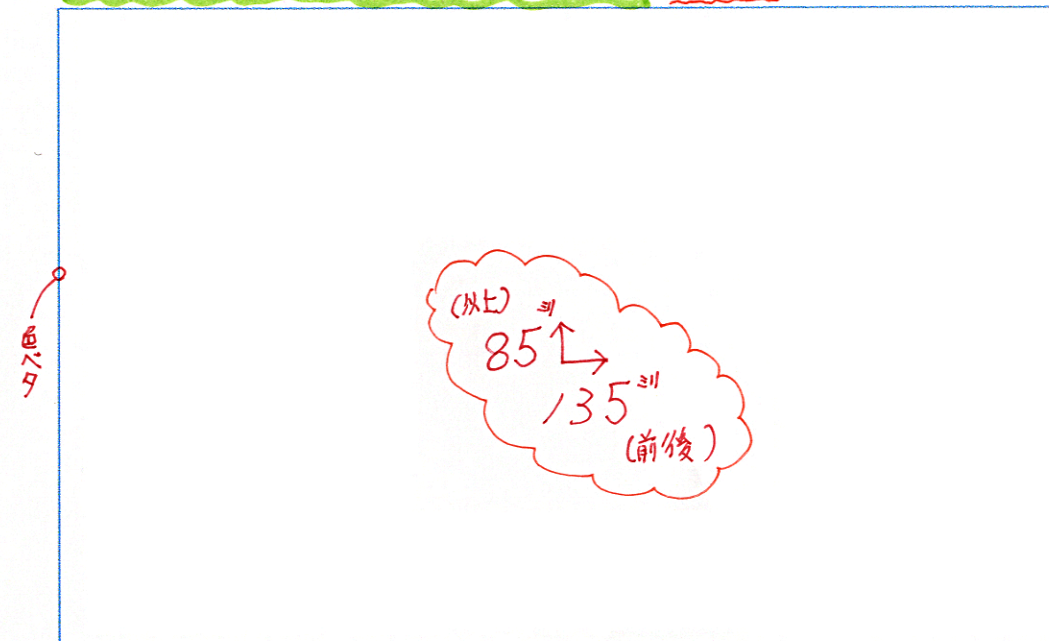
大血管手術における脊髄虚血は重大な合併症であり、MEP はその早期検出に有用である。ただし MEP は麻酔、体温、血行動態の影響を受けるため、多因子の評価が必要である。チームで波形変化を共有し、麻酔管理・外科操作・灌流条件を一体的に調整することが重要である。

13a 見出し MB31

文献

1. Tanaka H, Ogino H, Minatoya K, et al. The impact of preoperative identification of the Adamkiewicz artery on descending and thoracoabdominal aortic repair. J Thorac Cardiovasc Surg 2016 ; 151 : 122-8.
2. Etz CD, Kari FA, Mueller CS, et al. The collateral network concept : a reassessment of the anatomy of spinal cord perfusion. J Thorac Cardiovasc Surg 2011 ; 141 : 1020-8.
3. Heber UM, Mayrhofer M, Gottardi R, et al. The intraspinal arterial collateral network : a new anatomical basis for understanding and preventing paraplegia during aortic repair. Eur J Cardiothorac Surg 2021 ; 59 : 137-44.

▼図8 大血管手術時の MEP 振幅低下時の対応フローチャート (文献★より)



4. Takizawa E, Hiraoka H, Takizawa D, et al. Changes in the effect of propofol in response to altered plasma protein binding during normothermic cardiopulmonary bypass. Br J Anaesth 2006 ; 96 : 179-85.
5. Kakinohana M, Nakamura S, Fuchigami T, et al. Influence of the descending thoracic aortic cross clamping on bispectral index value and plasma propofol concentration in humans. Anesthesiology 2006 ; 104 : 939-43.
6. Shinzawa M, Yoshitani K, Minatoya K, et al. Changes of motor evoked potentials during descending thoracic and thoracoabdominal aortic surgery with deep hypothermic circulatory arrest. J Anesth 2012 ; 26 : 160-7.
7. Meylaerts SA, De Haan P, Kalkman CJ, et al. 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.
8. Kanemaru E, Yoshitani K, Kato S, et al. Reappearance of motor-evoked potentials during the rewarming phase after deep hypothermic circulatory arrest. J Cardiothorac Vasc Anesth 2018 ; 32 : 709-14.
9. Chong CT, Manninen P, Sivanaser V, et al. Direct comparison of the effect of desflurane and sevoflurane on intraoperative motor-evoked potentials monitoring. J Neurosurg Anesthesiol 2014 ; 26 : 306-12.
10. Kim WH, Lee JJ, Lee SM, et al. 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.
11. Oi A, Hayashi H, Uemura K, et al. Evaluation of post-tetanic motor evoked potential as an augmentation technique under partial neuromuscular blockade during craniotomy. Clin Neurophysiol 2025 ; 170 : 22-8.
12. 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.
13. 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.
14. Isselbacher EM, Preventza O, Hamilton Black J 3rd, et al. 2022 ACC/AHA Guideline for the Diagnosis and Management of Aortic Disease : a report of the American Heart Association/American College of Cardiology Joint Committee on Clinical Practice Guidelines. Circulation 2022 ; 146 : e334-482.
15. Yoshitani K, Masui K, Kawaguchi M, et al. Clinical utility of intraoperative motor-evoked potential monitoring to prevent postoperative spinal cord injury in thoracic and thoracoabdominal aneurysm repair : An audit of the Japanese Association of Spinal Cord Protection in Aortic Surgery Database. Anesth Analg 2018 ; 126 : 763-8.

★. 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) (2025 年 9 月 7 日閲覧)