

# 術中運動機能モニタリングと麻酔

奈良県立医科大学麻酔科学教室

川口昌彦, 堀内俊孝, 山本百合  
林浩伸, 井上聡己, 古家仁

## ANESTHESIA FOR INTRAOPERATIVE MOTOR FUNCTION MONITORING

MASAHIKO KAWAGUCHI, TOSHINORI HORIUCHI, YURI YAMAMOTO,  
HIRONOBU HAYASHI, SATOKI INOUE and HITOSHI FURUYA

*Department of Anesthesiology, Nara Medical University*

Received September 28, 2007

**Abstract** : 胸腹部大動脈手術, 脊髄脊椎手術, 開頭手術などは術後運動機能障害発生リスクが高いため, 術中の運動機能モニタリングが必要となる. 近年, 運動野刺激装置の進歩により全身麻酔下でも運動誘発電位を記録できるようになってきたが, 未だ麻酔薬や筋弛緩薬の影響が残るため厳重な麻酔管理と, 運動機能モニタリング法の改善が必要とされている. これまで我々は術中運動機能モニタリングのための麻酔管理に関する検討と共に, 全身麻酔中の運動誘発電位増幅法について検討してきた. 特に運動野刺激の直前に末梢神経をテタヌス刺激する post-tetanic motor evoked potentials は全身麻酔下での運動誘発電位増幅法としては有用である. 近年の術中運動機能モニタリング法とその麻酔管理法について概説する.

**Key words** : motor evoked potential, monitoring, anesthesia, spinal cord

手術後の運動機能障害発生は患者の機能的予後に重大な影響を及ぼすため, その回避に努めなければならない. 特に, 胸腹部大動脈手術, 脊髄脊椎手術, 開頭手術などは術後運動機能障害発生リスクが高い<sup>1-6)</sup>. 運動機能を全身麻酔下でモニタリングすることが困難であったため, その代用として感覚誘発電位 (somatosensory evoked potentials; SEPs) モニタリングや術中に患者を覚醒させる wake-up test などが施行されていた. しかし, SEP はあくまで感覚路のモニターであるため, 運動機能の評価のためには偽陽性・偽陰性などの結果がみとめられるため, 問題とされていた<sup>8,11)</sup>. また, 術中での患者の覚醒 (wake-up test) は患者に多大なる負担をかけるとともに, 安全性の面でも多くの問題を有していた. 近年, 運動野刺激装置の改良や麻酔法の変化により全身麻酔下でも術中に運動機能モニタリングが可能となりその臨床使用が盛んにおこなわれつつある<sup>1)</sup>. 本論分では運動機能モニタリング法である運動誘発電位 (motor evoked potentials; MEPs) とその麻酔管理法について概説する.

### 1. 運動誘発電位モニタリングとは?

人間の随意運動をつかさどる錐体路は, 大脳運動野 (中心前回), 内包, 中脳大脳脚, 延髄錐体交差, 脊髄側索又は前索, 脊髄前角細胞,  $\alpha$  運動神経, 筋肉へと至る下行性の経路である. この経路のいずれかで傷害が発生した場合に, 運動機能が障害され, 麻痺が発生する可能性がある. MEP とは, 運動路の傷害が予想される部分よりも上部で刺激し, 下部で電位を記録するものである. 刺激部位は主に運動野で, 記録部位は脊髄硬膜外や筋肉である場合が多い (図 1). 運動野刺激には経頭蓋刺激と運動野直接刺激がある. 経頭蓋刺激には高電圧刺激と磁気刺激がある. 覚醒した患者では, 刺激に伴う痛みが少ないため, 磁気刺激が選択される. 全身麻酔中は, 磁気刺激コイルの固定がしにくいこと, 磁気刺激による MEP が電気刺激による MEP よりも麻酔の影響を受けやすいことなどから, 電気刺激が選択される<sup>12, 13)</sup>. 硬膜外から記録する場合を spinal MEP, 筋肉から記録する場合を

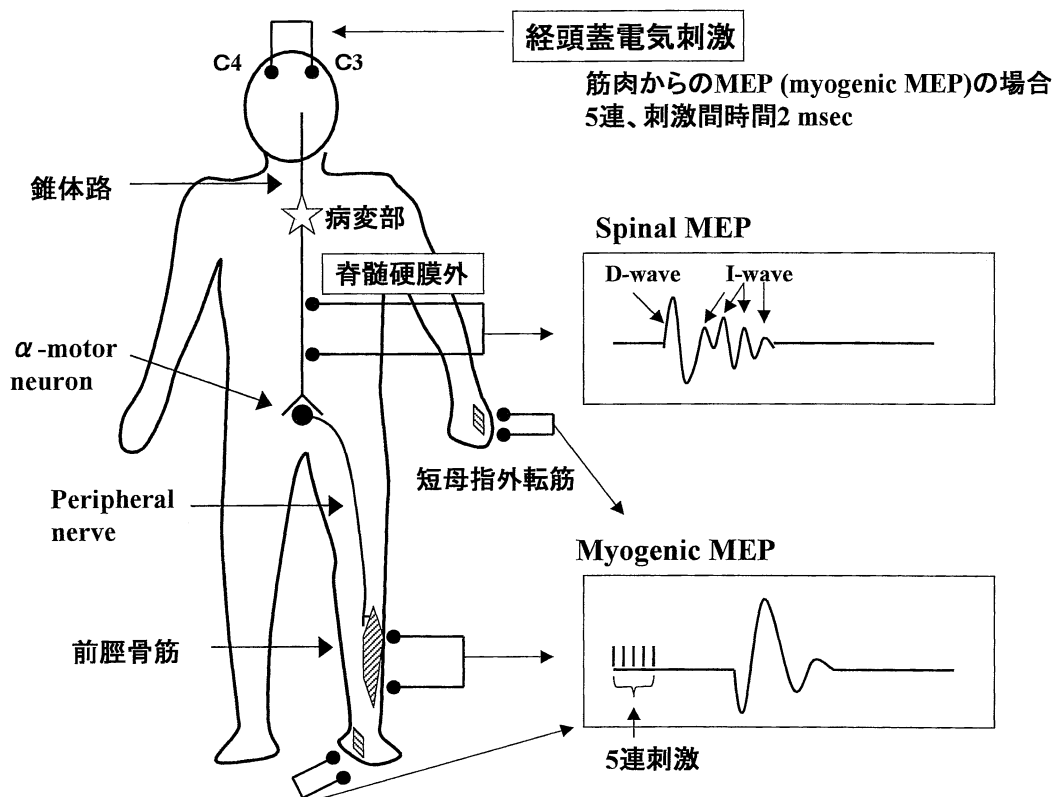


図1. 運動誘発電位 (motor evoked potential; MEP) の模式図. 運動誘発電位には脊髄硬膜外で記録する spinal MEP と筋肉から記録する myogenic MEP がある.

myogenic MEP (muscle MEP)と読んでいる. 全身麻酔中は, 手術開始時の MEP を記録し, 術中操作により MEP が変化しないかをモニターする. 振幅の低下などが見られた場合に, その原因を追究し, 外科的操作が原因と考えられる場合は, 外科医に警告を出すことで, 永続的な運動障害の発生を予防するものである. ただし, MEP 施行にあたっては, MEP が全身麻酔薬の影響を著明に受けることを考慮し, 施行法や麻酔管理法, 術中 MEP 所見の解釈などをおこなわなければならない. また, MEP モニタリングの施行にあたっては, 外科医, 麻酔科医, モニタリング担当医(技師)の協力関係が必須となる.

## 2. 運動誘発電位の施行法

### 1) 運動野刺激法

MEP は麻酔薬によって著明に影響されるため, 全身麻酔下での記録は困難であった. これは運動野を単発刺激した場合に, 得られる MEP が麻酔薬により著明に抑制

されてしまうからである. 1993年に Taniguchi ら<sup>14)</sup>は開頭手術で 300-500Hz でのトレインパルスを用い, 脳表から運動野を直接電気刺激し, 全身麻酔下で myogenic MEP が記録できることを報告している. これは, 興奮性シナプス後電位 (EPSPs) の持続時間が 7-10msec であるので, この持続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電位が蓄積 (temporal summation) し, 発火閾値に到達できるというものである. Kawaguchi ら<sup>15)</sup>もイソフルラン及びセボフルラン麻酔下開頭手術での直接脳表刺激では, 500Hz でのトレインパルスを用いれば MEP が記録できることを報告している. 脳表の直接刺激では通常の電気刺激装置が可能であるが, 経頭蓋的に刺激する場合は, 頭蓋骨の高い抵抗に対して電流を流すため高電圧刺激装置が必要である. 経頭蓋高電圧刺激装置は単発刺激のみが可能であったため全身麻酔下での MEP の記録には限界があった. Kalkman ら<sup>16)</sup>は刺激間時間が 2-3msec の経頭蓋 2 連刺激

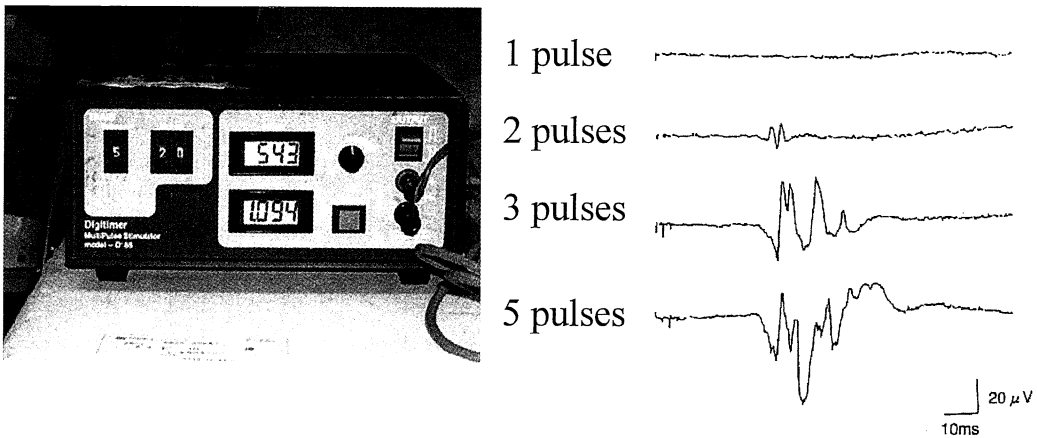


図2. 経頭蓋電気刺激装置(Digitimer 社製 Multipulse D-185)(左)とトレインパルス使用時の運動誘発電位(右).  
トレインパルスにて運動野を刺激することで全身麻酔(プロポフォール/フェンタニル)下でも myogenic  
MEP の記録が可能となる.

で MEP の振幅が増大することを報告している. Kawaguchi ら<sup>17)</sup>も低濃度セボフルラン麻酔下で MEP の振幅が増加することを報告しているが, 2 連刺激では安定した術中 MEP モニタリングは困難であった. 近年, 高頻度のトレインパルスを使用した経頭蓋高電圧刺激装置(Digitimer 社製 Multipulse D-185)が開発され, 術中の MEP 記録が飛躍的に進歩した(図 2). 経頭蓋の電気刺激の場合は, 頭皮上 Cz-Fz 又は C3-C4(国際 10-20 法)などを 400-500V 程度で刺激する. Cz-Fz は主に下肢の領域を刺激するもので, C3-C4 で刺激した場合, 上肢・下肢ともに刺激される場合が多い. 我々は術中の下肢 MEP に対するコントロールとして, 上肢 MEP も記録しているので, 刺激法としては主に C3-C4 を, 500Hz, 5 連の刺激条件で用いている.

## 2) 記録法

記録法としては, 筋肉から複合筋活動電位を記録する myogenic MEP と, 脊髄硬膜外にカテーテルを挿入して記録する spinal MEP がある(図 1). その選択は施設や疾患により異なるが, 我々の施設ではより非侵襲的な myogenic MEP を第一選択としている. 前述した C3-C4 刺激では, 前腕や母指球筋などの上肢からの MEP の記録と同時に, 前脛骨筋, 母趾外転筋などの下肢の筋肉からも myogenic MEP が記録できる. 筋肉からの電位は体性感覚誘発電位などの感覚電位に比して振幅が大きいため加算を必要としない. ただし, 振幅のばらつきが大きいので注意が必要である. 術中に myogenic MEP を記録する場合は, 後述する筋弛緩のモニタリングとその調節投与が必要となる.

脊髄硬膜外から記録する spinal MEP では, 筋弛緩薬に使用の制限はなく, 麻酔の影響も myogenic MEP よりも少ない. 麻酔の影響を受けにくいとされる D-wave に続き, 数個の I-wave が記録できる. I-wave は麻酔薬により抑制されやすい<sup>18)</sup>. 硬膜外カテーテル電極の挿入が必要となるため, myogenic MEP よりは侵襲が大きくなる. 一般には経皮的に硬膜外電極を挿入するが, 脊髄脊椎疾患などでは術野から挿入できるので簡便で, 選択される場合も多くなる. Myogenic MEP と異なり電位が小さくなるので加算が必要となる. 主に, 運動に関連した側索をモニターしていることになるので, 脊髄虚血に弱いとされる脊髄前角細胞の機能は反映しない. 側索が傷害される脊髄脊椎疾患では使用されるが, 脊髄虚血が問題となる大血管手術ではあまり好ましくない. 脊髄虚血に対しては, myogenic MEP よりも抵抗性を示し, 変化が現れるまでの時間が長く(10 分以上), 鋭敏度が myogenic MEP に劣る<sup>19)</sup>.

## 3. 運動誘発電位に対する麻酔薬や体温の影響

### 1) 麻酔薬

我々の施設では主に myogenic MEP を使用しているため, この方法における麻酔薬の MEP への影響について述べる. 主な麻酔薬の MEP への影響を表 1 に示す<sup>1)</sup>. MEP はイソフルランやセボフルランなどの吸入麻酔薬, バルビツレイトなどの大部分の麻酔薬により著明に抑制される<sup>20-28)</sup>. 最も影響の少ない麻酔薬はケタミンで, フェンタニルやレミフェンタニルなどの麻薬鎮痛薬も比較的影響は少ない<sup>29-33)</sup>. 静脈麻酔薬であるプロポフォール

表 1. MEP に対する麻薬の影響

吸入麻酔薬	イソフルラン	↓ ↓ ↓
	セボフルラン	↓ ↓ ↓
	亜酸化窒素	↓ ↓
静脈麻酔薬	バルビツレイト	↓ ↓ ↓
	ベンゾジアゼピン	↓ ↓
	プロポフォール	↓ ↓
	フェンタニル	— or ↓
	レミフェンタニル	— or ↓
	ケタミン	—

は吸入麻酔薬に比較すると影響は少なく、第一選択と考えられているが、高濃度では抑制効果は著明となる<sup>34,37)</sup>。亜酸化窒素も抑制効果があるため、その使用は50%以下にすべきとされている<sup>38,44)</sup>。近年、麻薬鎮痛薬のレミフェンタニルの導入により、安定した麻酔と鎮静薬の必要量が低下してきたため、術前からの運動障害がない場合はセボフルランでも MEP の記録も可能となりつつある。Reinacher ら<sup>45)</sup>はレミフェンタニル併用下で、1000Hz の4連刺激を用いれば、セボフルラン 1MAC まで MEP の記録が可能であったと報告している。ただし、高濃度でセボフルランを使用した場合や、術前より神経傷害が強い患者では、MEP が記録できない可能性も高いため、注意が必要である。

## 2) 筋弛緩薬

Myogenic MEP は筋弛緩薬の使用により抑制されてしまう。麻酔導入時に超短時間作用性の脱分極性筋弛緩薬であるサクシニルコリンを使用し、以後は筋弛緩薬を投与せずに行う場合もあるが<sup>46, 47)</sup>、経頭蓋電気刺激時は体動が多く、問題となる。我々は、非脱分極性筋弛緩薬であるベキユロニウムを持続調節投与している。筋弛緩度が変化した場合、MEP の振幅も変化するため、運動機能の評価が困難となる場合がある。筋弛緩のモニターとしては、正中神経を電気刺激し、短母指外転筋から M-response を記録し、単収縮反応の振幅 T1 を麻酔導入前の 25-50% 程度に調節している。麻酔前のコントロールがない場合は、T1 の振幅を 2.5~5 mV 程度に調節している。ただし、この筋弛緩レベルでも経頭蓋電気刺激を行う場合は体動があり、手術を一時中断する必要がある。顕微

鏡下手術を施行するには T1 の振幅を 1mV 程度に維持する必要があるため、後述する post-tetanic MEP の使用が必要になってくる<sup>48)</sup>。

## 3) 低体温

誘発電位モニタリングに体温低下が影響を及ぼすことは知られている。MEP の潜時については体温の低下とともに延長する。振幅については、MEP への直接作用としては 28℃ 程度までは影響が少ないと考えられている。Sakamoto ら<sup>49)</sup>のウサギを用いた実験でも、単発刺激では体温の低下とともに MEP の振幅が低下するが、トレインパルスを用いて刺激した場合は、28℃ までは有意な低下を認めなかったと報告している。Meylaerts ら<sup>50)</sup>も、ブタを用いた硬膜下冷却の研究で、MEP の振幅は 28℃ で最大となり、その後は低下し 14℃ ではコントロールの 25% 以下になったと報告している。一般に全身冷却にすると、28℃ 以下になると温度依存性に MEP が記録できなくなる可能性が高くなる。MEP が一度消失すると、復温しても記録できるようになるまで長い時間を必要とする場合が多い。低体温は電位への直接作用以外に、薬物代謝に影響を及ぼすため、プロポフォールや筋弛緩薬の血中濃度が容易に変化する<sup>51)</sup>。この麻酔薬の血中濃度の変化が、間接的に MEP に影響するため、低体温時には麻酔薬や筋弛緩薬の投与量を適宜調節しなければならない。ただし、その的確な調節は困難なため、低体温の場合は蓄積しても MEP に影響を及ぼしにくいケタミンやフェンタニルを中心とした麻酔管理が望ましい。

#### 4. 各疾患での MEP モニタリングの実際

##### 1) 脊髄脊椎手術での運動誘発電位とその管理法

脊髄脊椎手術では脊髄を直接的に圧迫または損傷することにより術後に運動障害を発生させる可能性がある。側湾症の矯正固定時、脊髄腫瘍摘出時などに術後運動障害の可能性が高くなり、術中のモニタリングが必要となる。脊髄脊椎手術では様々な病変や手術アプローチがあるため、病変や術式に従い、MEPのみならずSEPや脊髄誘発電位のモニタリングなどの multimodal approach が主流となっている。脊髄腫瘍の場合、後方から脊髄を切開する時点はSEP、脊髄内で腫瘍を切除する場合はmyogenic MEP と spinal MEP をモニターするなど報告されているが、麻酔法としては最も影響を受けやすい myogenic MEP に準じたものとなる。側湾症では術前に運動障害を伴わない症例でも myogenic MEP を記録しにくい場合が多く、麻酔法や MEP の施行法については未だ改善すべき点も多い。

脊髄脊椎手術で myogenic MEP をモニターする場合の麻酔法としては、プロポフォールとフェンタニル(又はレミフェンタニル)による静脈麻酔が一般的である。基本的に吸入麻酔薬は使用しないが、50%程度の亜酸化窒素

は使用可能である。ただし、プロポフォール、亜酸化窒素とも濃度依存性に MEP を抑制するため、注意して使用する。Bispectral index (BIS) などの麻酔深度モニターを使用し、BIS 値を 50 程度に維持することが望ましい。筋弛緩薬は、ベキユロニウム 0.1mg/kg で麻酔導入した後、0.04 mg/kg/h 程度の持続投与をおこない、T1 の振幅を 2.5~5mV 程度になるように調節する。術前より運動機能が正常である場合は、上記の方法で問題なく MEP が記録できる。MEP の振幅がコントロールの 25% 以下に低下した場合に、術者に警告する。通常、MEP の振幅が低下しても、MEP を記録できている場合は術後に運動麻痺をきたす場合は少ないが、MEP が消失した場合には運動障害の発生を考慮しなければならない。ただし、麻酔薬や筋弛緩薬の影響や電極不良などにより MEP を記録できなくなる偽陽性の可能性もあるので、慎重に対応する。

術前より運動障害がある場合は、麻酔による影響を受けやすく、MEP を記録できない場合が多い。この点が、今後の解決すべき問題点である。我々は術中の MEP 記録が困難な場合は、1 mg/kg/h 程度のケタミンを持続静注し、プロポフォールの使用量を 1-2 mg/kg/h と最小限にとどめている。また、MEP の振幅が小さい場合の増

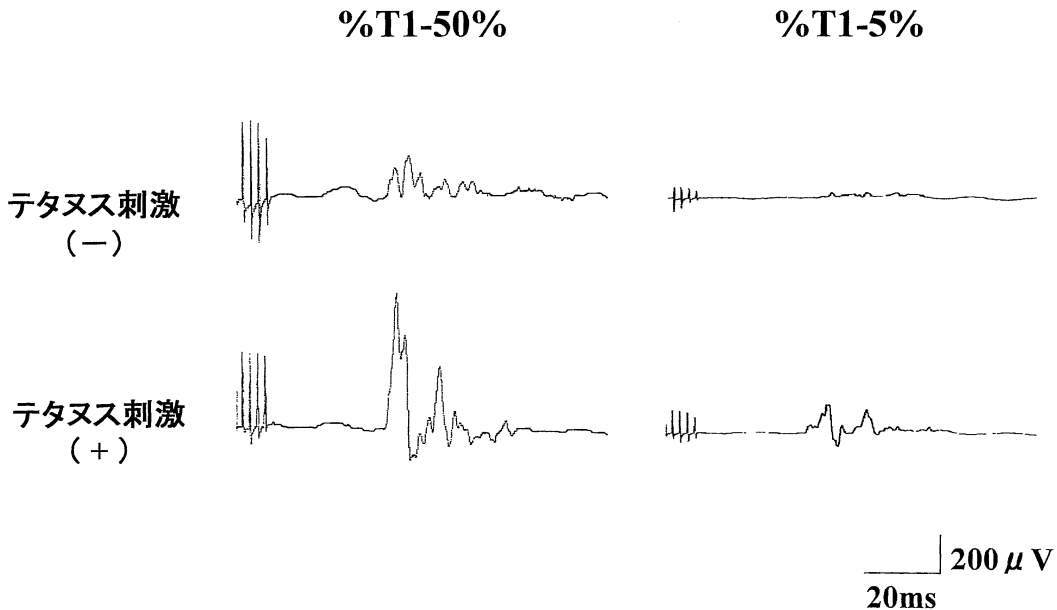


図3. Post-tetanic MEP. 後脛骨神経を 50Hz で 5 秒間テタヌス刺激した 1 秒後に経頭蓋電気刺激を行なうと、母趾外転筋からの MEP が増幅しているのがわかる。この増幅効果は筋弛緩レベル(T1)にかかわらず認められる。

幅法として、post-tetanic MEP を用いている<sup>40)</sup>。これは経頭蓋的に運動野を刺激する1-2秒前に、標的の筋を支配している神経に3-5秒間のテタヌス刺激を50Hz、50mAで行うものである。MEPの記録が母指外転筋の場合は、正中神経を、母趾外転筋の場合は後脛骨神経を刺激する。後脛骨神経をテタヌス刺激した場合の母趾外転筋からのMEPの増幅例を図3に示す。筋弛緩レベルにかかわらずMEPが増幅される。メカニズムとしては、神経筋接合部での増幅が主と考えられるが、脊髄や脳における中枢性の増幅作用も考えられている。実際、一側の後脛骨神経をテタヌス刺激しただけで、対側の下肢や上肢のMEPも増幅する場合が多い。Post-tetanic MEPを使用することで、術中にMEPを記録することが困難な症例でも容易に記録できるようになる場合が多い。

2)開頭手術での運動誘発電位とその管理法

運動野近傍に脳腫瘍がある場合は、術中に運動野と腫瘍との位置関係を確認したり、腫瘍切除中に運動機能をモニタリングする必要がある。また、皮質脊髄路は前脈絡叢動脈、レンズ核線条体動脈、中大脳動脈皮質枝などにより支配されているが、脳動脈瘤クリッピング術などで、これらの血管の血流を障害していないかをモニター

することで、術後の運動障害発生を予防しなければならない。

脳腫瘍などで中心溝が不明瞭になっている場合は、対側の正中神経を刺激し脳表のグリッド電極でSEPを記録する。中心溝をはさんで後ろに感覚野が前に運動野があるため、SEPの波形は正負逆転する phase reversal という現象が発生する。これにより中心溝を同定し、その直前にある運動野を同定することができる。運動野を同定したあと、運動野をグリッド電極にて直接電気刺激し対側上肢より複合筋活動電位を記録する。通常、母指外転筋または母指球筋、前腕二頭筋などから記録する。刺激は500Hzの5連刺激で、運動野を陽極(anode)とし、Fpz(国際10-20法)を陰極(cathode)として記録する。刺激強度は10mAから20-30mA程度まで上げていき、低い刺激強度でMEPが誘発される部位を同定する。

脳動脈瘤などで開頭範囲に運動野がない場合は、術野からグリッド電極を滑り込ませ、運動野の直上に設置する必要がある。正しく設置されなければMEPは記録できない。術野で覆布がかかるとオリエンテーションが困難な場合があるので、覆布がかかる前に開頭部位と運動野との関係をマーキングしておく。我々のとこ

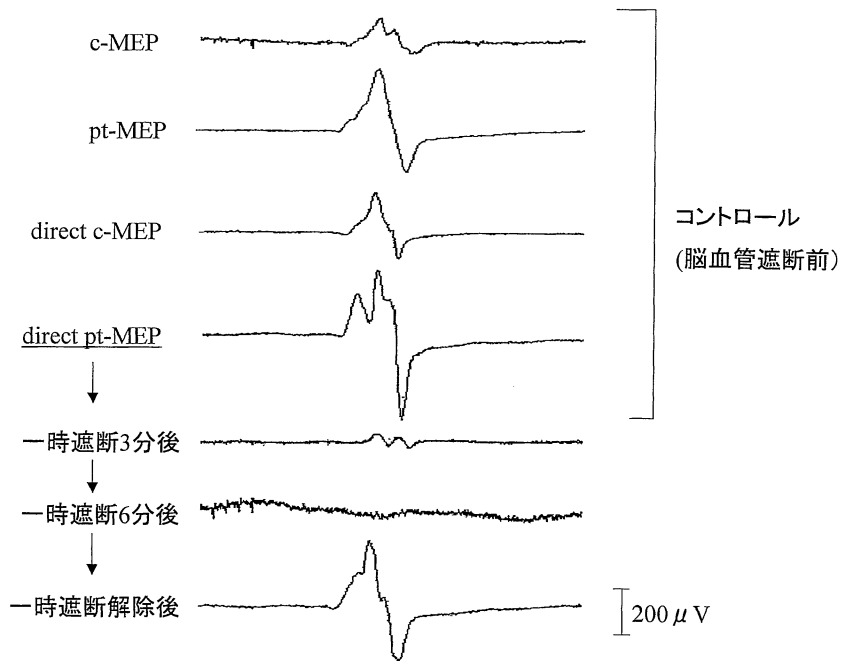


図4. 中大脳動脈瘤クリッピング時のMEPモニタリング例。脳血管遮断前、経頭蓋刺激(c-MEP)でも脳表刺激(direct-c-MEP)でもテタヌス刺激によりMEPの振幅増大が認められている(pt-MEP, direct-pt-MEP)。脳血管の一時遮断により、モニターしていたdirect-pt-MEPの振幅が低下し、遮断解除により回復しているのがわかる。

ろでは Cz から 6-7cm 外側のところに覆布上からでも触知できるマーキングを設置し、それを目標に 4×4 のグリッド電極を挿入している。挿入後は切り替えスイッチを利用し、最も低い閾値で明瞭な MEP 波形が得られる部位を同定する。

開頭手術での MEP の麻酔は基本的には脊髄脊椎手術と同様で、プロポフォールを用いた静脈麻酔が一般的である。プロポフォールにフェンタニルまたはレミフェンタニルを併用する。筋弛緩薬もベキユロニウム 0.04 mg/kg/h 程度で持続投与し、T1 の振幅を 2.5~5mV 程度になるように調節している。ただし、直接脳表刺激の場合は、比較的麻酔薬の抑制効果が小さいことや、運動野刺激による体動が経頭蓋刺激に比較して少ないことから、その他の麻酔法の選択も可能である。近年は、筋弛緩薬の投与をせずに、1-2% 程度のセボフルランとレミフェンタニルの併用でも MEP モニタリングを施行している施設も増加してきている。基本的に振幅が 25% 以下まで低下した場合に術者に警告を出す。その結果、腫瘍切除の中断や、クリッピングのかけ直しにより MEP が回復する場合も多い。図 4 に脳血管一時遮断により MEP が低

下した症例を示す。遮断解除により MEP が回復している。脳表刺激の MEP でも刺激前にテタヌス刺激を施行することで振幅の増大が認められるため、術中の MEP 増幅の一手段として使用可能である。

### 3) 胸腹部大動脈手術での運動誘発電位とその管理法

胸腹部大動脈瘤手術では 5-15% 程度に術後に対麻痺が発生する可能性があるため、術中の運動機能モニタリングは特に重要となる<sup>52-54)</sup>。これは脊髄の血流は肋間動脈や腰動脈から分枝する前根動脈から流入しているが、特に下部胸椎から上部腰椎の高さにある大前根動脈 (Adamkiewicz 動脈) は脊髄血流維持にとって重要であり、この血流が途絶すると対麻痺が発生してしまうからである。術前から動脈造影検査や画像診断などでこの Adamkiewicz 動脈を同定し、再建する計画などをたてるが、脊髄血流は必ずしも Adamkiewicz 動脈のみで支配されているわけではなく、特に胸腹部大動脈患者では Adamkiewicz 動脈の閉塞などもあり、実際はより遠位の腰動脈などを介した側副血行にて支配されている場合が多く、複雑である。実際に手術で大動脈を遮断したときにどれだけの脊髄血流が保たれるのか、脊髄機能が保たれ

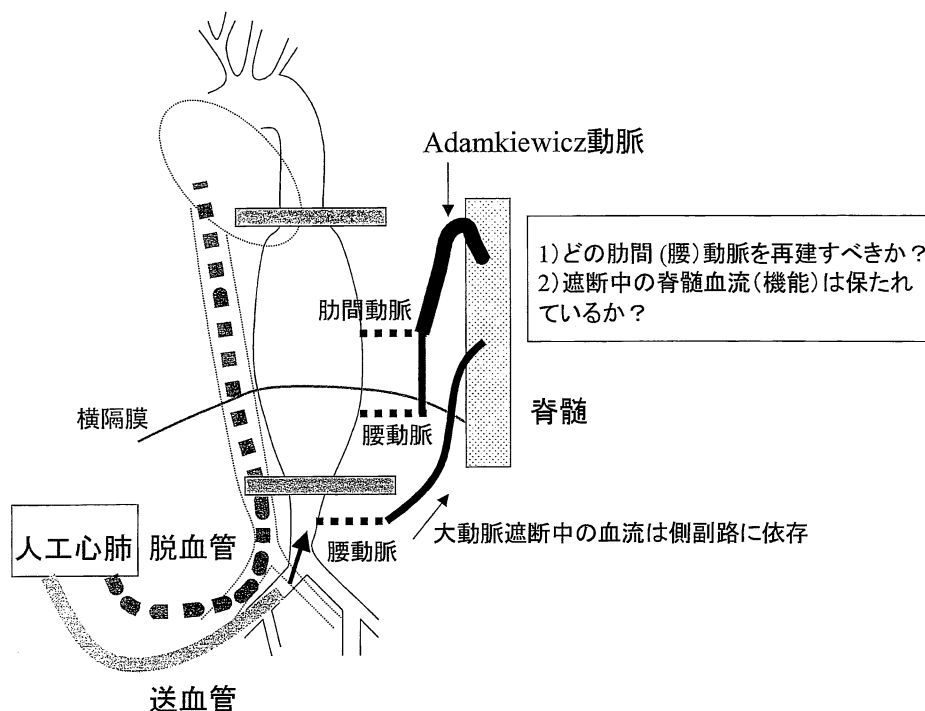


図 5. 当院における胸腹部大動脈瘤手術の模式図。脊髄血流は Adamkiewicz 動脈だけでなく、遮断部より遠位からの側副血行路によっても供給されているため、その部での血圧の維持が重要となる。

ているのか、等のモニターなしでは大動脈の再建プランは立てることができない。分節的遮断テストでMEPの振幅が低下すれば、遮断部分の血管が脊髄血流にとって重要であることがわかり、その血管を再建する必要性が明らかになる。また、脊髄血流は大血管の遮断部分より遠位の腰動脈などを介した側副血行に依存している場合も多いので、遮断中の血圧が脊髄血流を維持するのに十分であるかの判断にも利用できる。遮断テストでMEPに変化がなかったが、その後の血圧低下によりMEPの振幅が低下した場合、側副血行を介した脊髄血流が不十分になったことを示唆する。

胸腹部大動脈瘤手術での血管再建術は、通常部分体外循環を用いて行われる。我々の施設では、大腿静脈から右心房内に挿入した脱血管からの脱血と、大腿動脈に挿入した送血管からの送血により大動脈遮断部遠位部の灌流 (distal aortic perfusion) を行っている (図5)。大動脈遮断部近位部は自己の心拍出により血流を維持している。体温は常温から軽度低体温としている。大腿動脈に挿入した送血管が原因で下肢の末梢性の虚血が発生し、MEPを消失させる場合も出てくる。

胸腹部大動脈手術でMEPをモニターする場合の実際

の麻酔法は、麻酔導入薬としてケタミン(1-2 mg/kg)、フェンタニル(1-4  $\mu$  g/kg)と少量のプロポフォールを用い、ベキユロニウムは0.1 mg/kgを使用する。麻酔維持はケタミン(1-2 mg/kg/h)、プロポフォール(1-2 mg/kg/h)で行い、フェンタニルを必要に応じて適宜追加投与する。筋弛緩薬は、ベキユロニウムを0.04 mg/kg/hで開始し、その後に適宜調節する。亜酸化窒素は基本的には使用しない。麻酔深度が不十分な場合は、ケタミンの増量やフェンタニルで対処する。吸入麻酔薬は使用しない。手術前日に術後鎮痛のために硬膜外麻酔のチューブを挿入するが、モルヒネが脊髄虚血以後の傷害を悪化させる可能性が指摘されているため<sup>55, 56)</sup>、基本的には局所麻酔薬のみを使用している。少量投与であれば硬膜外への局所麻酔薬の投与によるMEPへの影響は小さいため、局所麻酔薬の術中の使用も可能である。

胸腹部大動脈瘤手術で、特に注意が必要なのは大動脈遮断、部分体外循環、低体温の導入などにより、麻酔深度が変化し、MEPが記録できなくなる場合があることである。これは、大動脈遮断による肝血流の低下、体外循環によるクリアランスの変化や低アルブミン血症による薬剤の蛋白結合率の変化、低体温による代謝率の変化な

### 大血管手術時のMEP評価法

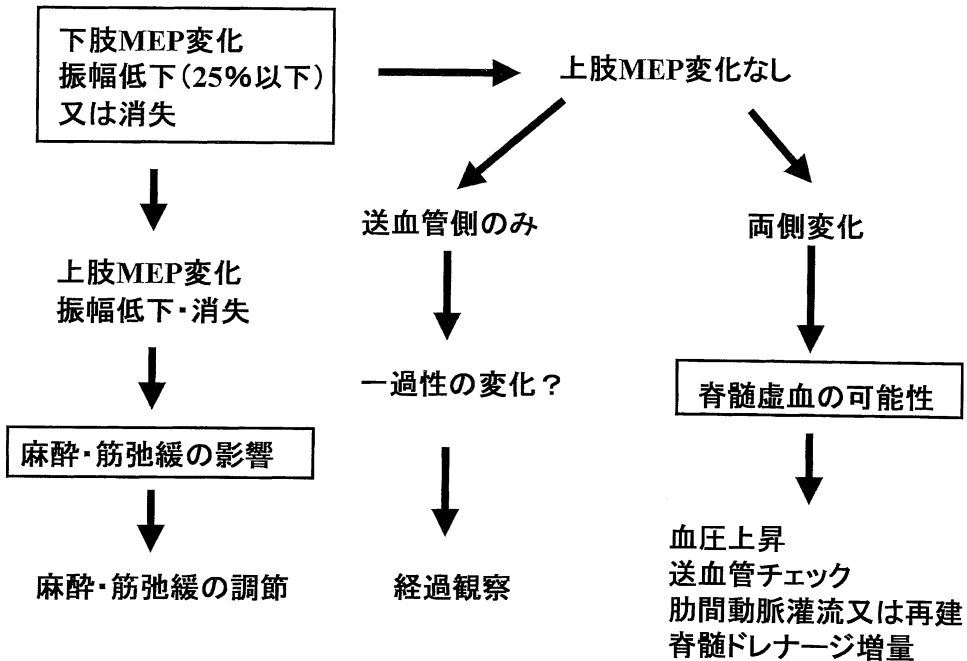


図6. 胸腹部大動脈瘤手術における下肢MEP低下時の対応



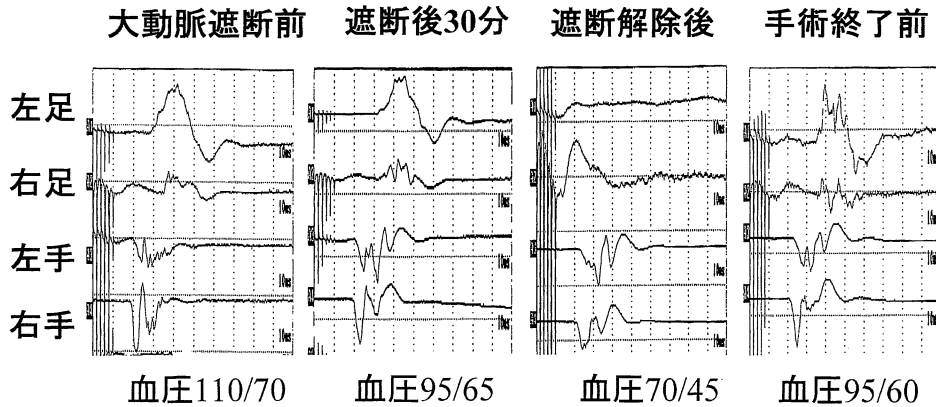


図7. 胸腹部大動脈瘤手術で血圧低下に伴い下肢 MEP が消失した一症例. 血圧の回復と共に MEP の改善が認められる.

ど、予測できない血中濃度や効果の変動が発生する。Kakinohana ら<sup>57)</sup>の報告では、大動脈遮断、部分体外循環の導入により、プロポフォールの血中濃度は有意に上昇し、BIS 値の有意な低下が認められたと報告している。我々の施設では、これらの操作までにプロポフォールや筋弛緩薬の量を最小限にとどめておく。ケタミンを中心とした麻酔であれば、たとえ血中濃度が変化しても MEP への影響は少ない。

術中 MEP の変化は振幅が 25% 以下になった時点で警告する。これはこの時点で何らかの対応をすることにより MEP の消失や術後対麻痺の発生予防に貢献できる可能性があるからである。テスト遮断で MEP に変化がない場合は、基本的には再建はしない。術中の下肢 MEP 低下時の対応を図 6 に示す。下肢 MEP が低下した場合、下肢 MEP の変化が脊髄傷害によるものか、全身の麻酔薬などによる影響かは、上肢 MEP の変化を見ることで鑑別できる。上肢 MEP も低下していれば、麻酔薬や筋弛緩などの全身性因子による可能性が高いため、麻酔薬や筋弛緩薬の量を調節する。上肢 MEP に変化がなく、下肢 MEP のみ変化した場合は、脊髄虚血の可能性を考慮する。脊髄虚血になった場合は、myogenic MEP は 2 分程度で変化するため、非常に鋭敏な運動機能モニターとして使用できる。ただし、大腿動脈に入れた送血管側のみの変化であれば、下肢の末梢性の一時的な変化の可能性が高い。両側性の MEP 低下が認められた場合には、脊髄血流を維持すべく、血圧の維持、送血不良などの有無の確認、肋間動脈の選択的灌流や再建、脊髄ドレナージ量の増大などを行う。図 7 に血圧の改善により MEP が回復した 1 症例を示す。これらによっても MEP が回

復しない場合は、内膜剥離などを行い隠れた肋間動脈を同定し、再建することが重要であると報告されている。

## ま と め

術中の運動機能モニタリングとしての MEP の意義と方法、及び MEP 施行時の麻酔管理法について概説した。近年の画像診断技術の進歩により、早期に手術を施行できるようになり、術後に麻痺などの機能的障害をおこさないための治療戦略は極めて重要となってきた。そのためにも、MEP などの術中モニタリングを外科医、麻酔科医、神経生理モニター担当医で連携し、行っていくことは極めて必要である。しかしながら、術中の MEP モニタリングについては未だ多くの問題点を有している。更なる MEP 技術の改善により、患者の機能的予後が改善されることを期待する。

## 謝 辞

奈良県立医科大学麻酔科における運動誘発電位に関する研究は、奈良県立医科大学 脳神経外科学教室 榊寿右教授、中瀬裕之准教授、整形外科科学教室 高倉義典教授、植田百合人先生、胸部心臓血管外科学教室 谷口繁樹教授、田林伸起先生ほか関連の先生方との共同でなされたものであり、心より感謝申し上げます。

## 文 献

- 1) Kawaguchi, M and Furuya H. : Intraoperative spinal cord monitoring of motor function with myogenic motor evoked potentials: a consideration in anesthesia. J. Anesthesia. 18 : 18-28,2004.

- 2) Svensson, L. G., Crawford, E. S., Hess, K. R., Coselli, J. S. and Safi, H. J. : Experience with 1509 patients undergoing thoracoabdominal aortic operations. *J. Vasc. Surg.* **17** : 357-370,1993.
- 3) Wan, I. Y. P., Angelini, G. D., Bryan, A. J., Ryder, I. and Underwood, M. J. : Prevention of spinal cord ischaemia during descending thoracic and thoracoabdominal aortic surgery. *Eur. J. Cardio. Thorac. Surg.* **19** : 203-213,2001.
- 4) Coselli, J. S., LeMaire, S. A., Conklin, L. D., Koksoy, C. and Schmittling, ZC. : Morbidity and mortality after extent II thoracoabdominal aortic aneurysm repair. *Ann. Thorac. Surg.* **73** : 1107-1116,2002.
- 5) Derrow, A. E., Seeger, J. M., Dame, D. A., Carter, R. L., Ozaki, C. K., Flynn, T. C. and Huber, T. S. : The outcome in the United States after thoracoabdominal aortic aneurysm repair, renal artery bypass, and mesenteric revascularization. *J. Vasc. Surg.* **34** : 54-61,2001.
- 6) Crawford, E. S., Crawford, J. L., Safi, H. J., Coselli, J. S., Hess, K. R., Brooks, B., Norton, H. J. and Glaeser, D. H. : Thoracoabdominal aortic aneurysms: Preoperative and intraoperative factors determining immediate- and long-term results of operations in 605 patients. *J. Vasc. Surg.* **3** : 389-404,1986.
- 7) de Haan, P., Kalkman, C. J. : Spinal cord monitoring:somatosensory- and motor-evoked potentials. *Anesthesiology Clinics of North America* **19**(4) : 923-945,2001.
- 8) Dawson, E. G., Sherman, J. E., Kanim, L. E., Nuwer, M. R. : Spinal cord monitoring: Results of the Scoliosis Research Society and the European Spinal Deformity Society survey. *Spine* **16**(suppl) : 361-364,1991.
- 9) Nuwer, M. R., Dawson, E. G., Carlson, L. G., Kanim, L. E. A. and Sherman, J. E. : Somatosensory-evoked potential spinal cord monitoring reduces neurologic deficits after scoliosis surgery: Results of a large, multicenter survey. *Electroencephalogr. Clin. Neurophysiol.* **96** : 6-11,1995.
- 10) Nagle, K. J., Emerson, R. G., Adams, D. C., Heyer, E. J., Roye, D. P., Schwab, F. J., Weidenbaum, M., McCormick, P., Pile-Spellman, J., Stein, B. M., Farcy, J. P., Gallo E. J., Dowling, K. C. and Turner, C. A. : Intraoperative monitoring of motor evoked potentials: a review of 116 cases. *Neurology* **47**(4) : 999-1004,1996.
- 11) MacDonald, D. B., Al, Zayed, Z., Khoudeir, I. and Stigsby, B. : Monitoring scoliosis surgery with combined multiple pulse transcranial electric motor and cortical somatosensory-evoked potentials from the lower and upper extremities. *Spine* **28**(2) : 194-203,2003.
- 12) Ubags, L. H., Kalkman, C. J., Been, H. D., Koelman, J. H. and Ongerboer, de Visser, B. W. : A comparison of myogenic motor evoked responses to electrical and magnetic transcranial stimulation during nitrous oxide/opioid anesthesia. *Anesth. Analg.* **88**(3) : 568-72,1999.
- 13) Kalkman, C. J., Drummond, J. C., Ribberink, A. A., Patel, P. M., Sano, T. and Bickford, R. G. : Effects of propofol, etomidate, midazolam, and fentanyl on motor evoked responses to transcranial electrical or magnetic stimulation in humans. *Anesthesiology* **76**(4) : 502-9,1992.
- 14) Taniguchi, M., Cedzich, C. and Schramm, J. : Modification of cortical stimulation for motor evoked potentials under general anesthesia: technical description. *Neurosurgery* **32**(2) : 219-26,1993.
- 15) Kawaguchi, M., Sakamoto, T., Ohnishi, H., Shimizu, K., Karasawa, J. and Furuya, H. : Intraoperative myogenic motor evoked potentials induced by direct electrical stimulation of the exposed motor cortex under isoflurane and sevoflurane. *Anesth. Analg.* **82**(3) : 593-9,1996.
- 16) Kalkman, C. J., Ubags, L. H., Been, H. D., Swaan, A. and Drummond, J. C. : Improved amplitude of myogenic motor evoked responses after paired transcranial electrical stimulation during sufentanil/nitrous oxide anesthesia. *Anesthesiology* **83**(2) : 270-6,1995.
- 17) Kawaguchi, M., Inoue, S., Kakimoto, M., Kitaguchi, K., Furuya, H., Morimoto, T. and 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.* **10**(3) : 131-6,1998.
- 18) **Deletis, V., Isgum, V. and Amassian, V. E.** : Neurophysiological mechanisms underlying motor evoked potentials in anesthetized humans. Part 1. Recovery time of corticospinal tract direct waves elicited by pairs of transcranial electrical stimuli. *Clin. Neurophysiol.* **112**(3) : 438-44,2001.
- 19) **de Haan, P., Kalkman, C. J., Ubags, L. H., Jacobs, M. J. H. M. and Drummond, J. C.** : A comparison of the sensitivity of epidural and myogenic transcranial motor-evoked responses in the detection of acute spinal cord ischemia in the rabbit. *Anesth. Analg.* **83** : 1022-1027,1996.
- 20) **Kawaguchi, M., Shimizu, K., Furuya, H., Sakamoto, T., Ohnishi, H. and Karasawa, J.** : Effect of isoflurane on motor-evoked potentials induced by direct electrical stimulation of the exposed motor cortex with single, double, and triple stimuli in rats. *Anesthesiology* **85**(5) : 1176-83,1996.
- 21) **Ubags, L. H., Kalkman, C. J. and Been, H. D.** : Influence of isoflurane on myogenic motor evoked potentials to single and multiple transcranial stimuli during nitrous oxide/opioid anesthesia. *Neurosurgery* **43**(1) : 90-4,1998.
- 22) **Kawaguchi, M., Sakamoto, T., Shimizu, K., Ohnishi, H. and Karasawa, J.** : Effect of thiopentone on motor evoked potentials induced by transcranial magnetic stimulation in humans. *Br. J. Anaesth.* **71** : 849-853,1993.
- 23) **Calancie, B., Klose, K. J., Baier, S. nad Green, B. A.** : Isoflurane-induced attenuation of motor evoked potentials caused by electrical motor cortex stimulation during surgery. *J. Neurosurg.* **74**(6) : 897-904,1991.
- 24) **Haghighi, S. S., Green, K. D., Oro J. J., Drake, R. K. and Kracke, G. R.** : Depressive effect of isoflurane anesthesia on motor evoked potentials. *Neurosurgery* **26**(6) : 993-7,1990.
- 25) **Zentner, J., Albrecht, T. and Heuser, D.** : Influence of halothane, enflurane, and isoflurane on motor evoked potentials. *Neurosurgery* **31**(2) : 298-305,1992.
- 26) **Haghighi, S. S., Sirintrapun, S. J., Keller, B. P., Oro, J. J. and Madsen, R.** : Effect of desflurane anesthesia on transcortical motor-evoked potentials. *J. Neurosurg. Anesthesiol.* **8** : 47-51,1996.
- 27) **Yamamoto, Y., Kawaguchi, M., Kakimoto, M., Takahashi, M., Inoue, S., Goto, T. and Furuya, H.** : The effects of xenon on myogenic motor evoked potentials in rabbits: a comparison with propofol and isoflurane. *Anesth. Analg.* **102**(6) : 1715-21,2006.
- 28) **Yamamoto, Y., Kawaguchi, M., Kakimoto, M., Inoue, S. and Furuya, H.** : The effects of dexmedetomidine on myogenic motor evoked potentials in rabbits. *Anesth. Analg.* **104**(6) : 1488-92,2007.
- 29) **Kawaguchi, M., Sakamoto, T., Inoue, S., Kakimoto, M., Furuya, H., Morimoto, T. and Sakaki, T.** : Low dose propofol as a supplement to ketamine-based anesthesia during intraoperative monitoring of motor-evoked potentials. *Spine* **25**(8) : 974-9,2000.
- 30) **Ubags, L. H., Kalkman, C. J., Been, H. D., Porsius, M. and Drummond, J. C.** : The use of ketamine or etomidate to supplement sufentanil/N<sub>2</sub>O anesthesia does not disrupt monitoring of myogenic transcranial motor evoked responses. *J. Neurosurg. Anesthesiol.* **9**(3) : 228-33,1997.
- 31) **Kalkman, C. J., Drummond, J. C., Patel, P. M., Sano, T. and Chesnut, R. M.** : Effects of droperidol, pentobarbital, and ketamine on myogenic transcranial magnetic motor-evoked responses in humans. *Neurosurgery* **35** : 1066-1071,1994.
- 32) **Ghaly, R. F., Stone, J. L., Aldrete, J. A. and Levy, W. L.** : Effects of incremental ketamine hydrochloride dose on motor evoked potentials (MEPs) following transcranial magnetic stimulation: A primate study. *J. Neurosurg. Anesthesiol.* **2** : 79-85,1990.
- 33) **Inoue, S., Kawaguchi, M., Kakimoto, M., Sakamoto, T., Kitaguchi, K., Furuya, H.,**

- Morimoto, T. and Sakaki, T. : Amplitudes and inpatient variability of myogenic motor evoked potentials to transcranial electrical stimulation during ketamine/N<sub>2</sub>O- and propofol/N<sub>2</sub>O-based anesthesia. *J. Neurosurg. Anesthesiol.* **14**(3) : 213-7,2002.
- 34) Taniguchi, M., Nadstawek, J., Langenbach, U., Bremer, F. and Schramm, J. : Effects of four intravenous anesthetic agents on motor evoked potentials elicited by magnetic transcranial stimulation. *Neurosurgery* **33**(3) : 407-15,1993.
- 35) Jellinek, D., Jewkes, D. and Symon, L. : Noninvasive intraoperative monitoring of motor evoked potentials under propofol anesthesia: effects of spinal surgery on the amplitude and latency of motor evoked potentials. *Neurosurgery* **29**(4) : 551-7,1991.
- 36) Keller, B. P., Haghghi, S. S., Oro, J. J. and Eggers, G. W. Jr. : The effects of propofol anesthesia on transcortical electric evoked potentials in the rat. *Neurosurgery* **30**(4) : 557-60,1992.
- 37) Pechstein, U., Nadstawek, J., Zentner, J. and Schramm, J. : Isoflurane plus nitrous oxide versus propofol for recording of motor evoked potentials after high frequency repetitive electrical stimulation. *Electroencephalogr Clin. Neurophysiol.* **108**(2) : 175-81,1998.
- 38) Woodforth, I. J., Hicks, R. G., Crawford, M. R., Stephen, J. P. and Burke, D. J. : Variability of motor-evoked potentials recorded during nitrous oxide anesthesia from the tibialis anterior muscle after transcranial electrical stimulation. *Anesth. Analg.* **82**(4) : 744-9,1996.
- 39) Zentner, J., Kiss, I. and Ebner, A. : Influence of anesthetics-nitrous oxide in particular on electromyographic response evoked by transcranial electrical stimulation of the cortex. *Neurosurgery* **24** : 253-256,1989.
- 40) Jellinek, D., Platt, M., Jewkes, D. and Symon, L. : Effects of nitrous oxide on motor evoked potentials recorded from skeletal muscle in patients under total anesthesia with intravenously administered propofol. *Neurosurgery* **29**(4) : 558-62,1991.
- 41) van Dongen, E. P., ter Beek, H. T., Schepens, M. A., Morshuis, W. J., de Boer, A., Aarts, L. P. and Boezeman, E. H. : Effects of nitrous oxide on myogenic motor potentials evoked by a six pulse train of transcranial electrical stimuli: a possible monitor for aortic surgery. *Br. J. Anaesth.* **82** : 323-328,1999.
- 42) Sakamoto, T., Kawaguchi, M., Inoue, S. and Furuya, H. : Suppressive effect of nitrous oxide on motor evoked potentials can be reversed by train stimulation in rabbits under ketamine/fentanyl anaesthesia, but not with additional propofol. *Br. J. Anaesth.* **86** : 395-402,2001.
- 43) Kakimoto, M., Kawaguchi, M., Sakamoto, T., Inoue, S., Takahashi, M. and Furuya, H. : Effect of nitrous oxide on myogenic motor evoked potentials during hypothermia in rabbits anaesthetized with ketamine/fentanyl/propofol. *Br. J. Anaesth.* **88** : 836-840,2000.
- 44) van Dongen, E. P., ter Beek, H. T., Schepens, M. A., Morshuis, W. J., Langemeijer, H. J., Kalkman, C. J. and Boezeman, E. H. : The influence of nitrous oxide to supplement fentanyl/low-dose propofol anesthesia on transcranial myogenic motor-evoked potentials during thoracic aortic surgery. *J. Cardiovasc. Anesth.* **13** : 30-34,1999.
- 45) Reinacher, P. C., Priebe, H. J., Blumrich, W., Zentner, J. and Scheufler, K. M. : The effects of stimulation pattern and sevoflurane concentration on intraoperative motor-evoked potentials. *Anesth. Analg.* **102**(3) : 888-95,2006.
- 46) Adams, D. C., Emerson, R. G., Heyer, E. J., McCormick, P. C., Carmel, P. W., Stein, B. M., Farcy, J. P. and Gallo, E. J. : Monitoring of intraoperative motor-evoked potentials under conditions of controlled neuromuscular blockade. *Anesth. Analg.* **77**(5) : 913-8,1993.
- 47) van Dongen, E. P., ter Beek, H. T., Schepens, M. A., Morshuis, W. J., Langemeijer, H. J., de Boer, A. and Boezeman, E. H. : Within-patient variability of myogenic motor-evoked potentials to multipulse transcranial electrical stimulation during two levels of partial neuromuscular blockade in aortic surgery. *Anesth. Analg.*

- 88(1) : 22-7,1999.
- 48) Kakimoto, M., Kawaguchi, M., Yamamoto, Y., Inoue, S., Horiuchi, T., Nakase, H., Sakaki, T. and Furuya, H. : Tetanic stimulation of the peripheral nerve before transcranial electrical stimulation can enlarge amplitudes of myogenic motor evoked potentials during general anesthesia with neuromuscular blockade. *Anesthesiology* **102**(4) : 733-8,2005.
- 49) Sakamoto, T., Kawaguchi, M., Kakimoto, M., Inoue, S., Takahashi, M., Furuya, H. : The effect of hypothermia on myogenic motor-evoked potentials to electrical stimulation with a single pulse and a train of pulses under propofol/ketamine/fentanyl anesthesia in rabbits. *Anesth. Analg.* **96**(6) : 1692-7,2003.
- 50) Meylaerts, S. A., de Haan, P., Kalkman, C. J., Lips, J., De Mol, B. A., Jacobs, M. J. : 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.* **118** : 1038-1045,1999.
- 51) Leslie, K., Sessler, D. I., Bjorksten, A. R., Moayeri, A. : Mild hypothermia alters propofol pharmacokinetics and increases the duration of action of atracurium. *Anesth. Analg.* **80** : 1007-14,1995.
- 52) 堀内俊孝、川口昌彦、古家 仁：大動脈手術時の脊髄モニタリング。臨床麻酔 **31** : 17-30,2007.
- 53) 川口昌彦、古家 仁：周術期神経モニタリングの進歩：運動誘発電位。麻酔 **55** : 294-301,2006.
- 54) 福田 悟、川口昌彦、垣花 学、松本美志也：胸腹部大動脈瘤手術時の脊髄保護。麻酔 **53** : 1106-1129,2004.
- 55) Kakinohana, M., Marsala, M., Carter, C., Davison, J. K. and Yaksh, T. L. : Neuraxial morphine may trigger transient motor dysfunction after a noninjurious interval of spinal cord ischemia: a clinical and experimental study. *Anesthesiology* **98**(4) : 862-70,2003.
- 56) Kakinohana, M., Nakamura, S., Fuchigami, T., Davison, K. J., Marsala, M. and Sugahara, K. : Mu and delta, but not kappa, opioid agonists induce spastic paraparesis after a short period of spinal cord ischaemia in rats. *Br. J. Anaesth.* **96**(1) : 88-94,2006.
- 57) Kakinohana, M., Nakamura, S., Fuchigami, T., Miyata, Y. and Sugahara, K. : Influence of the descending thoracic aortic cross clamping on bispectral index value and plasma propofol concentration in humans. *Anesthesiology* **104**(5) : 939-43,2006.