

未破裂脳動脈瘤クリッピング術における皮質-脊髄 運動誘発電位モニタリング

山崎貴明、佐々木雄彦、上山憲司、大里俊明
安斉公雄、及川光照、中川原譲二、中村博彦
中村記念病院 脳神経外科

Monitoring of Intraoperative Cortico-Spinal Motor Evoked Potentials (MEPs) during Clipping of Unruptured Aneurysms.

Takaaki YAMAZAKI, M.D., Takehiko SASAKI, M.D., Kenji KAMIYAMA, M.D., Toshiaki OSATO, M.D., Kimio ANZAI, M.D., Mitsuteru OIKAWA, M.D., Jyoji NAKAGAWARA, M.D., and Hirohiko NAKAMURA, M.D.

Department of Neurosurgery, Nakamura Memorial Hospital, Sapporo, Japan

Summary:

Object: We reported our experiences and usefulness of cortico-spinal motor evoked potentials (MEPs) to prevent postoperative motor impairment during surgery of unruptured cerebral aneurysms.

Methods: Seven patients with unruptured cerebral aneurysms underwent MEPs monitoring during surgery because their surgical procedure involved prolonged temporary occlusion of main artery or risks of injury of lenticulostriate or anterior choroidal artery. A wire electrode was inserted into the cervical epidural space before induction of general anesthesia. Subsequently, we performed a standard frontotemporal craniotomy under general anesthesia with inhalation anesthetics and muscle relaxant. After exposure of the aneurysm, central sulcus was identified with the use of somatosensory evoked potential (SEP) phase reversal and a grid electrode strip with 4 electrodes was placed on precentral gyrus. The D response evoked by bipolar stimulation with monophasic squarewave pulse was monitored during manipulation around aneurysms and clipping.

Results: The MEPs were successfully recorded in six of seven patients. In one patient with an ICA-posterior communicating artery aneurysm, MEPs was disappeared after temporary occlusion of proximal ICA, but recovered by immediate release of temporary occlusion after clipping of aneurysm neck. The other patient with an MCA aneurysm, the MEPs amplitude reduced accompanied with brain retraction, but immediately recovered after the brain retraction was released. No permanent postoperative motor impairment was encountered in those patients included in this study.

Conclusion: We concluded that cortico-spinal MEP was useful for monitoring motor function and prevention of motor impairment during aneurysm surgery.

Key words: intraoperative monitoring, motor evoked potential, surgical complications, unruptured cerebral aneurysm, anterior choroidal artery

はじめに

脳動脈瘤クリッピング術における親動脈の一時血行遮断の間の虚血、手術操作による血管の狭窄、閉塞等による術後運動機能障害は重大な合併症の一つであり、確実に回避すべきものである。従来術中脳虚血の電気生理学的手法による術中モニタリングとしては体性感覚誘発電位 (Somatosensory evoked potential: SEP) がSymonらにより有用性が報告されて以来広く行われてきたが、これは視床皮質路を含む大脳白質の広汎な虚血などの障害に鋭敏であるため、頸部頸動脈内幕剥離術などの内頸動脈の血行遮断中の虚血や中大脳動脈の主幹動脈領域の塞栓性の血流障害のモニタリングに適している。しかし、穿通枝障害などの錐体路に局限した虚血をとらえることができず、運動機能の直接的なモニタリングとしては不十分なものであった。

今回われわれは未破裂動脈瘤クリッピング手術時に、大脳皮質運動領野を直接刺激し脊髄硬膜外から下行性の誘発電位を記録する皮質-脊髄運動誘発電位 (cortico-spinal motor evoked potential: MEP) による術中運動機能モニタリングを施行し、その有用性を確認したので報告する。

方法

対象は中大脳動脈瘤、内頸動脈瘤、前大脳動脈瘤の全7症例で、手術操作および長時間の血行遮断により、レンズ核線条体動脈、前脈絡叢動脈が灌流する内包近傍に血流不全を生じる可能性のあるものを対象とした (Table 1)。

中大脳動脈瘤		
外側レンズ核線条体動脈分岐部M1segment		2例
前頭弁蓋枝分岐部M1segment	1例	
内頸動脈瘤		
内頸動脈-後交通動脈分岐部		
前脈絡叢動脈の癒着が予想された最大径 8.1mm		1例
後交通動脈の血管形成を必要としたもの		1例
内頸動脈-前脈絡叢動脈分岐部		1例
前大脳動脈瘤		
内側レンズ核線条体動脈分岐部A1 segment		1例
		7例

Table 1 対象症例

MEP記録電極は5極の硬膜外カテーテル電極 (栃木精工株式会社 IMC-KG-105) を使用。手術室にて全身麻酔導入前に、X線透視下座位にて第6、第7頸椎間より硬膜外針を用いて、経皮的に頸髄硬膜外腔にカテーテル電極先端の位置を第2頸椎を目標に上行させ設置した (Fig. 1)。

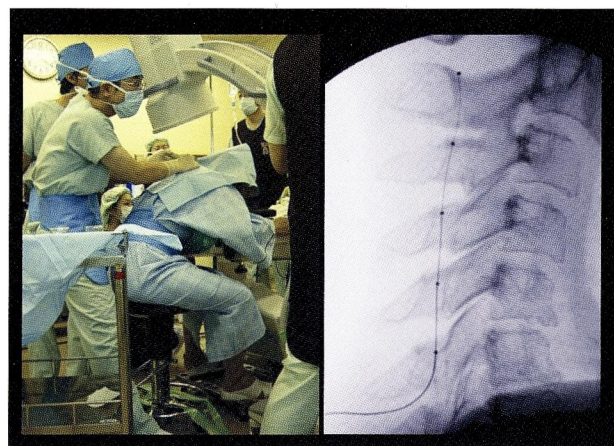


Fig. 1 MEP記録電極の挿入
全身麻酔導入前にX線透視下、座位にて第6、第7頸椎間から頸髄硬膜外腔第2頸椎レベルを上端とし5極の硬膜外カテーテル電極を留置。

全身麻酔はpropofolにて導入、その後吸入麻酔薬 (笑気、sevoflurane)、筋弛緩薬 (vecuronium) にて維持し通常の前頭側頭開頭を行った。脳の変移による電極のずれを防ぐために、まず、動脈瘤近傍までの手術操作を通常通り行い、血行遮断やクリッピングの操作に入る直前に刺激電極の設置を行った。脳動脈瘤の開頭野では中心前回を直視下に確認することは不可能であるので、先ずSEPを導出し位相の逆転 (phase reversal) を利用して中心溝を同定した。SEP刺激電極は対側正中神経手関節部、基準電極は術側耳介後下部、接地電極は術対側前額部にそれぞれ設置した。中心溝の前方に位置する運動領野に沿って4極の帯状電極を挿入し、持続時間0.5msの矩形波で、周波数2Hz、刺激強度15-20mAの条件で双極皮質刺激を行った (Fig. 2)。低周波フィルター: 5Hz、高周波フィルター: 2kHzとし5回加算を行い記録した。刺激および記録には日本光電ニューロパックMEB-2200を使用し、脊髄硬膜外から下行性の誘発電位を記録、最初に得られる陰性波 (D波) を指標にモニタリングを行なった。振幅、潜時に変化を認めた際には術者に報告し速やかに手術操作の確認、原因となる操作を速やかに検討し、その解除を行った。

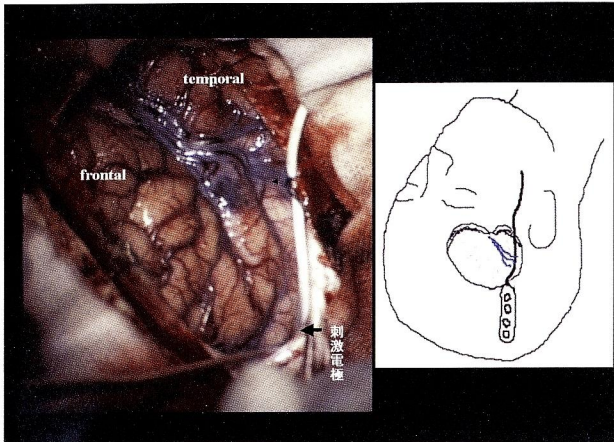


Fig. 2 中心前回に沿って刺激電極を設置
 左:術中写真、右: シェーマ
 刺激:双極矩形波単一刺激、持続0.5ms,2Hz,15-20mA
 記録:双極導出5回加算、フィルター 5Hz~2kHz

結 果

7例中6例で安定したMEPを導出することができた。1例でMEPの導出ができなかったが、この症例は脳底動脈先端部動脈瘤で、動脈瘤周囲の穿通枝の障害が最も危惧された症例である。そのために運動機能のモニタリングと感覚伝導路の機能モニターのためのSEPの併用を計画し、他の症例とは異なりMEPの刺激電極が運動領野に、SEPの記録電極が感覚領野の皮質に配置できるように、中心溝をまたぐように4極電極を配置した。その結果、運動領野の刺激電極の間隔が狭く、十分な刺激が得られなかったことが原因と考えられる。6例中2例でMEPの変化を認めたが、いずれも原因となる手術操作の速やかな解除によりMEPは回復し、術後永続的運動麻痺は認めなかった。この2症例を呈示する。

症例1: 65歳女性、左内頸動脈—後交通動脈動脈瘤

術前の脳血管造影所見より、最大径8.1mmで前脈絡叢動脈が動脈瘤の壁と癒着していることが予想された。前脈絡叢動脈の剥離のために長時間の術中血行遮断が想定され、前脈絡叢動脈および動脈瘤の陰になる後交通動脈の穿通枝の温存が重要であることから軽度低体温下に、術中MEPモニターを施行した (Fig. 3)。MEPは内頸動脈心臓側の一時血行遮断直後より徐々に振幅増大、潜時の延長を認め、動脈瘤裏面の後交通動脈の穿通枝を確認

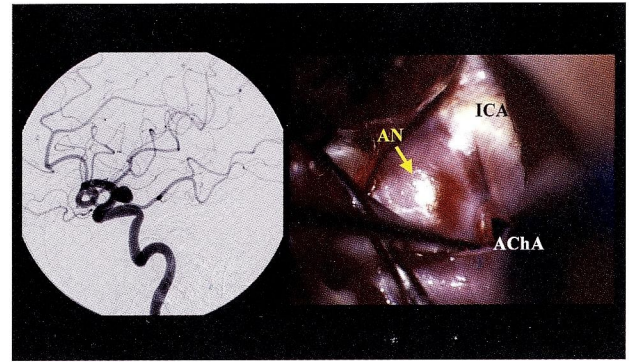


Fig. 3 症例1
 65歳、女性。左内頸動脈—後交通動脈瘤
 左:脳血管造影、右:術中所見

していたところ、血行遮断開始2分後より徐々に振幅は低下、4分後には消失した。そのため速やかにネッククリッピングを行い4分36秒後に血行遮断を解除した。解除直後より潜時の延長した低振幅のD波が出現し、血行遮断解除後4分で、潜時、振幅は元に回復した (Fig. 4)。

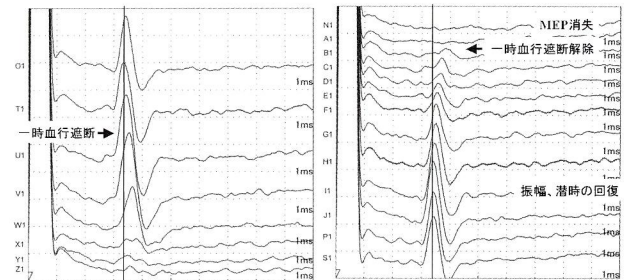


Fig. 4 症例1の術中MEP
 軽度低体温麻酔にて施行 (33°C)。
 内頸動脈心臓側の一時血行遮断直後より振幅増大、潜時の延長。2分後より徐々に振幅は低下、4分後には消失。
 頸部クリッピングを行い、4分36秒後に血行遮断の解除。血行遮断解除後4分後に振幅は回復。

術直後一過性に軽度右片麻痺を認めたが、翌日には完全に回復し永続的運動機能障害は認めなかった。

症例2: 47歳女性、右中大脳動脈瘤

脳血管造影所見では中大脳動脈M1部-レンズ核線条体動脈分岐部に動脈瘤を認め、外側レンズ核線条体動脈の温存を電気生理学的にモニタリングする目的で術中MEPを施行した (Fig. 5)。クリッピング時に前頭葉深部に脳ペラを掛けたところMEPの振幅がわずかに低下し

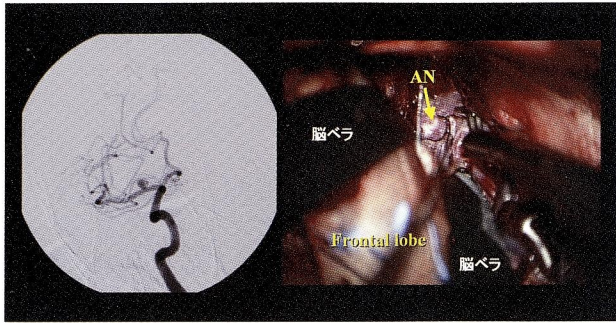


Fig. 5 症例2
47歳、女性。右中大脳動脈瘤。
左: 脳血管造影、右: 術中所見

たが、クリッピング後脳ベラを外すことで速やかにMEPは回復した (Fig. 6)。術後運動麻痺は認めなかった。

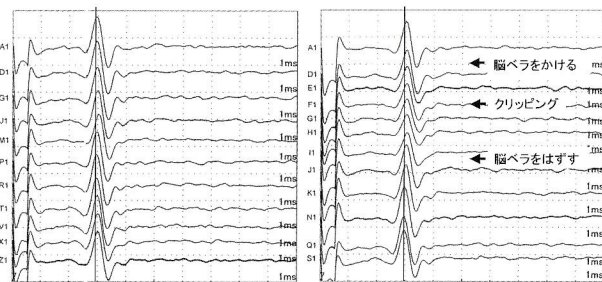


Fig. 6 症例2の術中MEP
クリッピング施行時に脳ベラを前頭葉に掛けたところMEPの振幅は低下したが、脳ベラをはずすことによりMEPの振幅は速やかに回復。

考 察

脳動脈瘤クリッピング術における術後運動麻痺は重大な合併症の一つである。一時血行遮断による術後運動麻痺出現症例の多くは穿通枝領域の梗塞であったとされ¹⁾、Oglivryらは軽度低体温、意図的高血圧下での、一時血行遮断施行後の脳梗塞13例中8例 (61.5%) は穿通枝領域の梗塞であったと報告し、穿通枝領域は虚血に弱く、また術中の動脈瘤の剥離に伴い穿通枝が障害されやすいと推測している⁵⁾。またFriedmanらはクリッピング術を施行した50例51個の前脈絡叢動脈分岐部動脈瘤のうち8例 (16%) に前脈絡叢動脈領域に梗塞を認め術後運動麻痺が出現したと報告している⁶⁾。以上からも、術後運動麻痺を回避するためには、一時血行遮断に伴う穿通枝領域の虚血、動脈瘤近傍の操作やクリッピングによる穿通枝の障害、前脈絡叢動脈近傍の動脈瘤における前脈絡叢動

脈の狭窄、閉塞などを防ぐことが重要であり、そのために、穿通枝や前脈絡叢動脈の灌流領域にあたる錐体路の機能を術中にモニターすることの有用性が推察される。

従来、母血管及び穿通枝温存の確認に術中血管造影、内視鏡支援手術、ドップラー血流計による血流の確認などが行われてきた。術中血管造影はクリッピングによる主幹動脈や分枝の温存と動脈瘤の残存を確認することが主目的で、穿通枝の温存の確認には限界があり、血行遮断中の虚血に関しては評価不能である。内視鏡は穿通枝の温存についても形態的な確認を確実にする有用な方法であるが、穿通枝剥離の際の内膜損傷による閉塞を確認できるとは言えず、血行遮断中の虚血障害についても無力である。ドップラー血流計は血流の有無と方向および半定量的な血流の確認を可能とするが、穿通枝の血流を評価することはほぼ不可能で、これも血行遮断中の虚血の評価には不適である。血行遮断中の虚血の評価の目的で術中脳波やSEPが広く行われているが、これは大脳の皮質、皮質下の比較的広汎な領域の虚血の評価には優れているものの、錐体路に限局した虚血性変化はとらえられないことが多い。過去の報告の中には、実際にSEPの変化がなかったにもかかわらず術後運動麻痺をきたすfalse negativeを問題としたものがいくつか認められる¹⁻⁴⁾。

Cortico-spinal MEPは大脳皮質運動野の皮質脊髓路 (錐体路) ニューロンが直接刺激されて発生したインパルスが、その軸索を伝導していく様子を脊髄で記録するものでKatayamaらにより臨床応用されるようになった^{7,8)}。小さい陽性波に続く大きな陰性波はD波とされ、シナプスを經由しない反応で、通常の麻酔深度では変化しないため全身麻酔下での運動機能モニタリングの指標として適している。脳動脈瘤クリッピング手術時に運動機能モニタリングをすることで、前脈絡叢動脈、レンズ核線条体動脈などの穿通枝により灌流される内包近傍の虚血性変化を捉えることが可能であると考えられる。

的確にMEPを検出するためには、記録、刺激電極の適切な設置、適切な刺激条件と導出が必須である。脊髄硬膜外記録電極の挿入に際しては、術前に頸部X-Pを行い頸椎症などによる脊椎管狭窄などが無いことを確認した上で、透視下で挿入することが、安全かつ確実な設置に重要である。また頸部電極の高さは上肢を支配する運動線維の多くが中位頸椎の高さで脊髄より分岐していくため、電極が下位頸椎にとどまった例では非検出例が多い¹⁰⁾とされており、上位頸椎レベルに電極の先端を設

置ることが安定した導出に必要である。

皮質刺激のための帯状電極の挿入は、両極が接近しているとD波の記録が困難となるため、広く帯状電極が運動領野に接するように挿入する必要があるため、的確に運動領野である中心前回に沿って留置することが求められる。脳動脈瘤クリッピングの場合、運動領野は通常の前頭側頭開頭では十分に露出されないため、皮質刺激電極の挿入は盲目的な操作とならざるをえない。そこでLuedersら⁹⁾の考えによるSEPのphase reversal (位相逆転)を利用し、中心溝の同定を行うことにより、電気生理学的に正確に運動領野上に刺激電極を設置することが可能になった。

脳腫瘍摘出時のCortico-spinal MEPの変化と術後運動麻痺の関連について、山本らはD波の振幅が30%~40%低下すると持続した麻痺が出現するとしており¹¹⁾、本郷らも同様にMEPの変化と術後の運動機能障害には強い関連があるとし、電位がbase lineの1/2に減衰した場合には術後一過性にせよ麻痺が出現するとしている¹⁰⁾。脳動脈瘤クリッピング手術における運動誘発電位の報告には、皮質-筋電図運動誘発電位 (Cortico-muscular MEP)を使用した鈴木らのものがあるが、この報告ではMEPによって脳深部における血流不全、特に前脈絡叢動脈領域の虚血を捉えることが可能であるとしている¹²⁾。今回の症例1は一時血行遮断に伴う穿通枝領域および前脈絡叢動脈領域の虚血性変化、または内頸動脈領域の広汎な血流低下を捉えたものと考えられ、症例2は脳ベラ¹³⁾の圧排によるレンズ核線条体動脈または中大脳動脈皮質枝の虚血性変化、もしくは静脈灌流障害による錐体路への影響を捉えたものと考えられる。いずれの症例も、MEPの変化に対し、速やかな原因操作の解除で、MEPの潜時、振幅の回復を認め、術後永続的な運動機能障害を回避することができたことから、MEPの有用性が確認できた。

一方、電気生理学的モニタリングに常に存在する問題として、可逆的变化と不可逆的变化をどのように判断するかという点がある。前述のSuzukiらのCortico-muscular MEPの使用経験では、術中一過性に電位が消失しても硬膜閉鎖直前までに回復していれば、術後に軽度の麻痺を呈することはあっても2~3日後には完全に回復すると述べているが¹²⁾、この知見も、MEP所見から運動麻痺を回避するための術中の操作への還元¹⁴⁾に役立つとは言えない。我々の症例では、いずれもMEPの変化は徐々に

現れ、速やかに原因と思われる操作を完了することにより、MEPの回復と術後運動麻痺の回避が得られたが、これらのMEP所見の可逆性については不明であると言わざるを得ない。MEP所見の可逆性、非可逆性の判断と、その手術操作への還元については、さらに経験を重ねて検討する必要がある。

最後にcortico-muscular MEP と cortico-spinal MEPの比較についてであるが、cortico-muscular MEPは、脊髄硬膜外への電極の挿入を必要としないために非侵襲的であり、皮質の運動領野における上下肢の各筋支配の局在に応じた電位を導出できる点で、とくに運動領野近傍皮質、皮質下の腫瘍の摘出の際などに有用である。しかし、麻酔薬、筋弛緩薬の影響を受けやすいため、脳動脈瘤クリッピング術のように、術中の非動化の確保が安全な手術に必要である場合には、このような手術に熟練した麻酔科医の協力が必須である。一方、今回報告したcortico-spinal MEPは筋弛緩薬を用いた通常の全身麻酔下での導出が可能であり、筋収縮をおさえて導入した低体温下においても安定した記録が可能である。しかしながら脊髄硬膜外腔への記録電極挿入という侵襲的な操作を要するため、理解、協力が得られる症例に限定され、くも膜下出血症例への使用は行っていない。何れの方法をとるにしても、適切な症例の選択が必要であることは言うまでもない。

結 語

未破裂脳動脈瘤手術にcortico-spinal MEPによる術中運動機能モニタリングを7例に行った。7例中6例で低体温麻酔下も含め安定したモニタリングが可能であった。血行遮断中の虚血、脳ベラによる圧排により各々1例にMEPの変化が捉えられ、操作の解除によりMEPの回復を確認し、術後永続的な運動機能障害は認めなかった。脳動脈瘤クリッピング術施行時の運動機能モニタリングとして本法は有用であると考えられた。

文 献

- 1) Fridman WA, Chadwick GM, Verhoeven FJS, et al: Monitoring of somatosensory evoked potentials during surgery for middle cerebral artery aneurysms. *Neurosurgery* 29: 83-88, 1991

- 2) Kassell NF, Torner JC, Haley Jr EC, et al: The international cooperative study on the timing of aneurysm surgery. Part 1: Overall management results. *J Neurosurg* 73: 18-36, 1990
- 3) Kidooka M, Nakasu Y, Watanabe K, et al: Monitoring of somatosensory-evoked potentials during aneurysm surgery. *Surg Neurol* 27: 69-76, 1987
- 4) Mizoi K, Yoshimoto T: Permissible temporary occlusion time in aneurysm surgery as evaluated by evoked potential monitoring. *Neurosurgery* 33: 434-440, 1993
- 5) Ogilvy CS, Carter BS, Kaplan S, et al: Temporary vessel occlusion for aneurysm surgery: risk factors for stroke in patients protected by induced hypothermia and hypertension and intravenous mannitol administration. *J Neurosurg* 84: 785-791, 1996
- 6) Friedman JA, Pichelmann MA, Piepgras DG, et al: Ischemic complications of surgery for anterior choroidal artery aneurysms. *J Neurosurg* 94: 565-572, 2001
- 7) Katayama Y, Tubokawa T, Sugitani M, et al: Assessment of spinal cord potentials. Part 1. Localization of lesions in experimental spinal cord injury. *Neuro-orthopedics* 1: 30-41, 1986
- 8) Katayama Y, Tubokawa T, Maejima S, et al: Corticospinal direct response in humans: identification of the motor cortex during intracranial surgery under general anesthesia. *J Neurol Neurosurg Psychiat* 51: 50-59, 1988
- 9) Lueders H, Lesser RP, Harn J, et al: Cortical somatosensory evoked potentials in response to hand stimulation. *J Neurosurg* 58: 885-894, 1983
- 10) 堀越徹, 小俣朋浩, 上野武彦, ほか: 運動誘発電位による術中運動野マッピング. *機能的脳神経外科* 38: 12-13, 1999
- 11) 山本隆充, 片山容一: 運動野の腫瘍摘出術. 片山容一, 山本隆充 (編): *脳神経外科手術のための神経モニタリングアトラス*. 医学書院, 東京, 2003, pp23-28
- 12) Suzuki K, Kodama N, Sasaki T, et al: Intraoperative monitoring of blood flow insufficiency in the anterior choroidal artery during aneurysm surgery. *J Neurosurg* 98: 507-514, 2003