原 著

後脛骨神経刺激体性感覚誘発電位を用いた 前交通動脈瘤・前大脳動脈瘤手術時の術中モニタリング

佐久間 潤, 宗像 良二, 紺野 豊, 鈴木 恭一
松本 正人, 佐々木達也, 板倉 毅, 児玉南海雄

Monitoring of Posterior Tibial Nerve Somatosensory Evoked Potentials During Anterior Communicating or Anterior Cerebral Artery Aneurysm Surgery

Jun SAKUMA, M.D., Ph.D., Ryoji MUNAKATA, M.D., Yutaka KONNO, M.D., Ph.D.,
Kyouichi SUZUKI, M.D., Masato MATSUMOTO, M.D., Tatsuya SASAKI, M.D.,
Takeshi ITAKURA, B.S., and Namio KODAMA, M.D., Ph.D.

Department of Neurosurgery, Fukushima Medical University, Fukushima, Japan

Summary: We investigated the usefulness of the posterior tibial nerve somatosensory evoked potentials (PTN-SEP) for detecting the cerebral blood flow insufficiency of the anterior cerebral artery (ACA) during anterior communicating (Acom) or distal ACA aneurysm surgery. PTN-SEP monitoring was employed in 112 patients of Acom and 23 patients of distal ACA aneurysm. After dural incision, control data were recorded, and a decrease of more than 50% in the amplitude of P37-N45 was defined as significant. We evaluated the intraoperative PTN-SEP findings, causes of PTN-SEP change, and motor outcomes in the lower extremities. PTN-SEP changes were observed in 21 patients.

The causes of SEP change were thought to be attributable to blood flow insufficiency with aneurysmal bleeding, with or without temporary occlusion on the ACA in 10 patients. In the other 10 patients, the cause was intensive temporary occlusion. In the last patient, inappropriate clipping on the parent artery was the cause of SEP change. No obvious difference was observed between bilateral and unilateral ACA occlusion. Following the release of the occlusion and repositioning of the clip, PTN-SEP was recovered to the control value in all but 1 patient. Of these 21 patients, 11 did not show any postoperative motor paresis of the lower extremity; transient motor paresis was recognized in 10 patients.

Despite the large variability of territories of the ACA and collateral circulation via the leptomeninges, intraoperative PTN-SEP monitoring was helpful in the operative maneuver, such as ACA occlusion.

Key words:

- somatosensory evoked potential
- posterior tibial nerve
- intraoperative monitoring
- cerebral aneurysm
- anterior cerebral artery

Surg Cereb Stroke

(Jpn) 36: 168-174, 2008

はじめに

内頸動脈瘤や中大脳動脈瘤の手術では正中神経電気刺激による体性感覚誘発電位 (somatosensory evoked potential: SEP)¹⁾²⁾⁶⁻⁹⁾¹²⁾¹⁵⁾や、脳表直接電気刺激や経頭蓋電気刺激による運動誘発電位 (motor evoked potential: MEP)³⁾¹³⁾¹⁷⁾の術中モニタリングが行われ、脳血流不全の探知および脳虚血合併症の回避に有用であることが報告されている。しかし前交通動脈瘤や前大脳動脈瘤の手術における前大脳動脈の血流不全の術中モニタリングに関する報告は少ない¹¹⁾¹⁴⁾。

われわれは前交通動脈瘤や前大脳動脈瘤の手術時に後脛骨神経刺激による体性感覚誘発電位 (posterior tibial nerve SEP: 以下、下肢SEP)を記録し、下肢SEPに変化をきたした術中操作、特に血流一時遮断の影響について検討したので報告する。

対象および方法

1992年2月から2006年6月までに下肢SEPをモニタリングしながら手術を施行したのは142例であった。このうち再現性のあるデータが記録できなかった7例を除く135例を対象とし、retrospectiveに検討した。再現性のあるデータが記録できなかった7例の原因は、アルコール性感覚障害と考えられたものが1例、内踝部の火傷痕のため有効な刺激ができなかったものが1例、重度の慢性関節リウマチが1例で、noiseが多く種々の工夫を試みても評価が不能であったものが4例であった。動脈瘤の部位は前交通動脈瘤が112例(破裂82例、未破裂30例)、前大脳動脈遠位部動脈瘤が23例(破裂15例、未破裂8例)であった。

下肢SEPはSynax1100(NEC社製)、またはNeuropack

MEB2208(日本光電社製)を用いて記録した。後脛骨神経の電気刺激は、内踝後方に小児用心電図電極を貼付して双極で行った。記録電極は針電極を用いて頭頂部正中線上のCzから2cm後方のCz'に刺入し、基準電極は両側の乳様突起もしくは刺激対側の中心部(C)と頭頂部(P)の中間の位置(CPc)に設置した(Fig. 1)。

刺激は0.2 msec幅の矩形波パルスを用い、刺激強度7-30 mA、刺激頻度1.5-3.5 Hzで行った。Bandpass filterは80-1500 Hzに設定し、加算回数は100-200回、分析時間は150 msecとした。なお術中は下肢を足先まで毛布で被い、表面温度の低下を予防するとともに体温もほぼ一定となるように配慮した。

麻酔は1999年6月まではisofluraneによる吸入麻酔で、それ以後は原則としてpropofolを用いた完全静脈麻酔を用いた。

下肢SEPでは、大脳皮質第一感覚野の下肢の領域が起源とされる潜時が37 msec前後の陽性波(P37)と46 msec前後の陰性波(N46)が記録される⁴⁾⁵⁾²⁰⁾。このP37-N46頂点間振幅を指標とし、これがコントロールの50%未満に低下または消失例を「変化あり」と定義した。硬膜切開直後に原則として一側ずつのalternative stimulationを行い、両側の下肢SEPを記録してコントロールとし、手術中は連続的に下肢SEPを記録してモニタリングを行った。1) 下肢SEPの術中変化の頻度と原因について、2) 下肢SEPの変化と術後の下肢運動麻痺出現の有無について検討した。

結 果

前交通動脈瘤112例中、血流一時遮断を施行したのは破裂動脈瘤82例中58例、未破裂動脈瘤30例中6例であった。

Fig. 1 Schematic diagram of stimulation and recording arrangement.

破裂動脈瘤症例において、血流一時遮断を施行する率が高かった。遮断回数は1回が44例、2回が11例、3回以上が3例であった。これら延べ78回の血流一時遮断の遮断部位はapproach sideまたはdominant sideのA1部が60例、両側のA1が18例であった。一方、遠位部前大脳動脈瘤23例中、親動脈の血流一時遮断を施行したのは破裂動脈瘤の8例のみで、遮断回数は1回が6例、2回が2例であった(**Table 1**)。

Table 1 Summary of cases

	No. of	Temporary occlusion				SEP change	
	cases	—	1	2	3 <	—	+
<i>Acom</i>							
ruptured	82	24	44	11	3	65	17
unruptured	30	24	6	0	0	29	1
<i>Distal AC</i>							
ruptured	15	7	6	2	0	12	3
unruptured	8	8	0	0	0	8	0
total	135	63	56	13	3	114	21

1. 下肢 SEP の術中変化の頻度と原因について

手術経過中に下肢 SEP の変化がなかったのは135例中114例(84.4%)であった。これらの症例の中には意図的遮断中に下肢 SEP が低下傾向を示したために遮断を解除し、SEP が回復した症例も含まれている。下肢 SEP が50%未満にまで低下したのは21例(15.5%)で、いずれも一過性の低下であった(**Table 2**)。

下肢 SEP が低下した21例のSEP低下の原因は、術中出血もしくはそのコントロールを目的とした血流一時遮断によるものが10例、動脈瘤周囲の剥離目的に親動脈を意図的に遮断したものが10例、初回クリッピングによって前大脳動脈の狭窄をきたしていたものが1例であった。術中出血に関連して下肢 SEP が低下した10例中9例では、出血直後に親動脈の血流遮断が行われており、出血のために SEP 振幅が低下したのか、血流遮断によって低下したのかを明確に区別することは困難であった。これらの症例ではクリッピングやクリップのかけ直し、血流一時遮断の解除、などにより SEP 振幅は回復した。術中出血をきたした1例では SEP 振幅が低下したが血流遮断を行わずにクリッピングすることで振幅が回復した。親動脈の意図的遮断では、SEP 低下の警告により、術者が遮断を解除する

Table 2 Profile of the 21 patients whose PTN-SEP decrease during surgery

Case No.	Age (yrs) / Sex	Aneurysm location	PTN-SEP findings	Cause of SEP changes Place & time of TO	Infarction on postop CT	Postoperative motor paresis in lower extremity (duration)
1	64/F	Acom	70% DC	TO (Lt. A1 26 min)	ND	ND
2	69/F	Acom	65% DC	TO (Lt. A1 33 min)	ND	ND
3	51/M	Acom	87% DC	TO (Lt. A1 31 min)	ND	ND
4	47/F	Acom	54% DC	TO (Blt. A1 6 min)	ND	ND
5	51/F	Acom	50% DC	TO (Lt. A1 3.5 min)	ND	ND
6	50/F	Acom	82% DC	Rupture & TO (Lt. A1 9 min)	ND	ND
7	42/F	Acom	94% DC	Rupture & TO (Blt. A1 12 min)	ND	ND
8	65/F	Lt. distal AC	83% DC	A2 stenosis by clip	ND	ND
9	65/F	Rt. distal AC	52% DC	TO (Rt. A2 6 min)	Lt. caudate head	ND
10	73/F	Acom	60% DC	Rupture & TO (Rt. A1 30 min)	Lt. frontal	ND
11	78/M	Acom	80% DC	Rupture	Rt. frontal	Lt. hemiparesis 3/5*
12	48/M	Acom	70% DC	TO (Lt. A1 20 min)	ND	Transient 3/5 (6 hr)
13	73/M	Acom	65% DC	TO (Lt. A1 9 min)	ND	Transient 3/5 (6 hr)
14	61/M	Acom	70% DC	TO (Blt. A1 36 min)	ND	Transient 2/5 (6 hr)
15	52/M	Acom	64% DC	TO (Lt. A1 16 min)	Rt. frontal	Transient 2/5 (9 hr)
16	52/F	Acom	50% DC	Rupture & TO (Lt. A1 16 min)	Lt. caudate head	Transient 3/5 (6 hr)
17	68/F	Acom	74% DC	Rupture & TO (Lt. A1 13 min)	ND	Transient 3/5 (7 hr)
18	56/F	Lt. distal AC	72% DC	Rupture & TO (Lt. A2 13 min)	ND	Transient 3/5 (8 hr)
19	68/F	Acom	50% DC	Rupture & TO (Lt. A1 29 min)	Rt. caudate head	Transient 2/5 (5 days)
20	73/F	Acom	DA	Rupture & TO (Blt. A1 4.5 min)	Rt. frontal	Transient 2/5 (6 hr)
21	73/F	Acom	DA	Rupture & TO (Lt. A2 + Rt. A1 32 min)	Rt. caudate head	Transient 3/5 (6 hr)

PTN-SEP: posterior tibial nerve somatosensory evoked potentials, TO: temporary occlusion, MMT: manual mission test, AC: anterior cerebral artery, Acom: anterior communicating artery, DC: decreased, DA: disappeared, ND: not discernible

* Lt. hemiparesis existed preoperatively because of old rt. thalamic hemorrhage; the paresis was did not change postoperatively.

Fig. 2 Temporary clips were placed on bilateral A1 for dissecting around the neck of the aneurysm. The PTN-SEP revealed no change during temporary occlusion. Neck clipping was accomplished and the temporary clips were removed 5 minutes 30 seconds after temporary occlusion.

Fig. 3 The PTN-SEP almost disappeared just after bleeding from the aneurysm. Neck clipping was accomplished without temporary occlusion of the ACA. The amplitudes recovered immediately after clipping.

ことによって全例ですみやかにSEP振幅が回復した。クリップによる前大脳動脈の狭窄をきたした1例では、クリップをかけ直すことによりSEP振幅が回復した。

2. 下肢SEPの変化と術後の下肢運動麻痺出現の有無について

下肢SEPに変化を認めなかった113例では術後新たに下肢運動麻痺をきたした症例はなかったが、下肢SEPが一過性に低下した21例中10例で一過性の軽度の運動麻痺

を認めた。

以下に代表症例を提示する。

〈症例〉72歳、女性。破裂前交通動脈瘤。

動脈瘤周囲を剥離するために両側A1を一時遮断した(5分30秒)。右刺激下肢SEPの振幅には変化がなく、左刺激下肢SEPの振幅はやや低下傾向を示したが、そのままクリッピングを行った。血流遮断を解除するとSEPの振幅はすみやかに回復した(Fig. 2)。術後に新たな神経脱落症状は出現しなかった。

Fig. 4 The PTN-SEP disappeared immediately after aneurysmal bleeding. To control the bleeding, temporary clips were applied on bilateral A1. Five minutes after the release of temporary occlusion, SEP recovered.

Fig. 5 The PTN-SEP decreased after left A2 occlusion. To avoid ischemic damage of the brain, the intermittent temporary occlusion technique was used. After clipping the aneurysm, SEP recovered.

〈症例〉78歳，男性．破裂前交通動脈瘤．

術中出血により下肢SEPの振幅はコントロールの20%まで低下したが，サクションによる出血コントロールを行って，血流遮断を行わずにクリッピングした．クリッピング後に下肢SEPの振幅はすみやかに回復した(Fig. 3)．術後に右前頭葉に梗塞巣が出現したが，新たな神経脱落症状は出現しなかった．

〈症例〉73歳，女性．破裂前交通動脈瘤．

動脈瘤頸部を剥離中に出血をきたし，両側のA1を遮断したところ，直後に下肢SEPが消失した．クリッピング

および遮断(4分)の解除によって下肢SEPの振幅が回復した(Fig. 4)．術後に3/5の右下肢運動麻痺が出現したが，8時間後に回復した．

〈症例〉56歳，男性．破裂左前大脳動脈遠位部動脈瘤．

術中出血をきたし左A2の血流を遮断直後に下肢SEPが低下した．2回の血流遮断(13分，2分)を行ってクリッピングした(Fig. 5)．クリッピング後のDoppler装置を用いた血流音検査ではdistal側のpericallosal arteryの血流音が減弱していたが下肢SEPが再現性よく記録されていたことから手術を終了した．術後一過性に下肢運動麻痺が出

現したが翌日には消失し、頭部CTでも脳梗塞の出現は認めなかった。術後の脳血管撮影にて前大脳動脈遠位部の血流は後大脳動脈から逆行性に流れていることが判明した。

考 察

脳主幹動脈の血流一時遮断は、脳動脈瘤手術において術中破裂を予防したり安全にネッククリッピングを行うためにしばしば施行される有用な手技である¹⁹⁾。しかし血流一時遮断により脳血流が高度に低下する症例では、術後に脳梗塞が発症する危険がある⁹⁾。術後の虚血合併症の発生を回避する目的で、内頸動脈瘤や中大脳動脈瘤の手術では正中神経刺激SEPやMEPを組み合わせた術中モニタリングが有用である³⁾¹⁰⁾。しかし正中神経刺激SEPでは、前交通動脈瘤や前大脳動脈瘤などの前大脳動脈系の虚血を感知することは難しい²⁾。下肢の運動麻痺の発生を回避するためには皮質脊髄路機能を直接評価しうるMEPによるモニタリングが望ましい¹⁰⁾¹⁸⁾が、大脳半球間裂に入り込むように存在している下肢の運動野を直接刺激することは困難であり、モニタリングのために新たな開頭を追加することも現実的ではない。そこでわれわれは前大脳動脈が下肢の体性感覚野に血流を供給していることに着目し、後脛骨神経刺激による下肢SEPの術中モニタリングを行ってきた。

今回の検討から、下肢SEPは術中出血や前大脳動脈の血流一時遮断によって低下し、逆に前大脳動脈の血流一時遮断を施行しなければ低下しなかった。したがって下肢SEPの変化は前大脳動脈の血流低下に伴う下肢の感覚野の機能低下を反映しているものと考えられた。一方、遮断部位、下肢SEP最大低下率、遮断時間をみると、両側遮断と一側遮断で明らかな相関はみられなかった。両側遮断でもほとんど下肢SEPが低下しない症例がある反面、一側遮断でもコントロールの50%未満に低下する症例があった。下肢SEPが変化しなかった理由としては前大脳動脈の灌流領域に個体差が大きいこと、血流遮断時の中大脳動脈、後大脳動脈からの側副血行の程度によると考えられた。Van der Zwanらは剖検脳の各主幹動脈に色素注入を行った観察から、各主幹動脈の灌流領域は従来述べられているよりも豊富なvariationがあることを報告している²¹⁾。特に前大脳動脈では灌流領域の個体差が大きく、20を越えるvariationがあるという結果であった。中心溝よりも近位側までしか灌流していなかった個体も50半球中6半球に認めており、このような灌流領域の症例では前大脳動脈の血流不全が生じても下肢SEPの変化として探知できないものと考えられた。一方、動脈瘤の術中破裂や血流遮断による前大脳動脈の血流不全をきたした場合にも、中大脳動脈や後大脳動脈からleptomeningeal anastomosisを介

した側副血行がある程度期待できるが、その存在を術前に予測することは不可能である。われわれの経験でも術中破裂や血流一時遮断により下肢SEPが低下しても、徐々に回復してくる症例を認めた。このような症例では、前大脳動脈からの血流が低下したことに伴い側副血行からの血流が増加して下肢の感覚野を灌流するようになったのかもしれない。いずれにしても術中に下肢SEPの振幅低下がなければ、下肢の感覚野の機能を維持するために必要十分な血流が供給されていると考えられる。しかし、下肢SEPでは近位側の前頭葉の虚血病変を感知しえないことに注意する必要がある。われわれの検討でも、下肢SEPがコントロールにまで回復したにもかかわらず、尾状核頭部やfronto-polar artery領域に脳梗塞をきたした症例を経験した。Sakoらは下肢SEPをモニタリングしながら前大脳動脈の血流遮断を行った15例中2例で一過性の記憶力障害を認め、1例で永続する前頭葉症状を認めたことを報告している¹¹⁾。くも膜下出血による神経症状であった可能性もあると考察されているが、少なくともこれらの症状をSEP所見の変化として探知できなかったことには変わりはない。また前交通動脈近傍から分岐するhypothalamic arteryの血流不全は下肢SEPで感知しえない。近年われわれは、fluorescenを用いた術中蛍光脳血管撮影によりhypothalamic arteryの血流温存を確認できたことを報告した¹⁶⁾が、形態学的モニタリングのみならず機能的モニタリングの開発が望まれる。

下肢の感覚野が順行性の前大脳動脈の血流によって灌流されているとすれば、前大脳動脈の血流不全によって近位側に存在する下肢の運動野の血流不全が生じるのではないかと考え、本来は感覚のモニタリングである下肢SEPと術後の下肢運動機能の相関を検討した。下肢SEPが低下した21例中10例で一過性の下肢運動麻痺を認めた。9例では術後数時間後には下肢の運動機能の左右差は消失し、残る1例でも術後5日目には運動麻痺は消失した。下肢SEPの低下の程度と下肢運動麻痺には明らかな相関はなかったが、下肢SEPが消失した2例ではいずれも一過性の運動麻痺を認め、下肢の感覚野のみならず運動野にも強い虚血負荷が加わったものと推測された。

経頭蓋電気刺激を用いたMEPは、脳表直接刺激の問題点をクリアできる方法であるが、刺激による興奮発生部位が特定できないという問題点がある。最近脳表に近いレベルを刺激する工夫もなされている¹⁰⁾が、今後は下肢SEPと経頭蓋刺激による下肢MEPとの相関に関する検討が必要と考えている。

結 語

前交通動脈瘤、前大脳動脈遠位部動脈瘤手術において下

肢 SEP の術中モニタリングを施行した。術中出血や血流一時遮断・動脈狭窄などによって前大脳動脈の血流不全が生じ、下肢の感覚野の血流不全をきたすと下肢 SEP の低下として評価できると考えられた。一方、術中に下肢 SEP が低下しなければ、たとえ前大脳動脈の近位部の血流を遮断しても前大脳動脈灌流領域の個体差や側副血行の発達によって下肢の感覚野の血流が保たれていることが推測された。下肢 SEP は感覚誘発電位であるが、下肢の感覚野に近接する下肢の運動野の機能もある程度反映することが示唆され、術後の下肢運動麻痺の出現を回避するうえで有用な術中モニタリングと考えられた。

文 献

- 1) Friedman WA, Chadwick GM, Verhoeven FJ, *et al*: Monitoring of somatosensory evoked potentials during surgery for middle cerebral artery aneurysms. *Neurosurgery* 29: 83-88, 1991
- 2) Friedman WA, Kaplan BL, Day AL, *et al*: Evoked potential monitoring during aneurysm operation: observations after fifty cases. *Neurosurgery* 20: 678-687, 1987
- 3) Horiuchi K, Suzuki K, Sasaki T, *et al*: Intraoperative monitoring of blood flow insufficiency during surgery of middle cerebral artery aneurysms. *J Neurosurg* 103: 275-283, 2005
- 4) Kakigi R, Jones SJ: Influence of concurrent tactile stimulation on somatosensory evoked potentials following posterior tibial nerve stimulation in man. *Electroencephalogr Clin Neurophysiol* 65: 118-129, 1986
- 5) 柿木隆介：下肢末梢神経刺激による脊髄・大脳誘発電位。神経進歩 32: 110-122, 1988
- 6) Mizoi K, Yoshimoto T: Intraoperative monitoring of the somatosensory evoked potentials and cerebral blood flow during aneurysm surgery--safety evaluation for temporary vascular occlusion. *Neurol Med Chir (Tokyo)* 31: 318-325, 1991
- 7) Mizoi K, Yoshimoto T: Permissible temporary occlusion time in aneurysm surgery as evaluated by evoked potential monitoring. *Neurosurgery* 33: 434-440; discussion 440, 1993
- 8) Mooij JJ, Buchthal A, Belopavlovic M: Somatosensory evoked potential monitoring of temporary middle cerebral artery occlusion during aneurysm operation. *Neurosurgery* 21: 492-496, 1987
- 9) 中井啓文, 佐古和廣, 川田佳克, ほか：脳動脈瘤手術における temporary clip の安全性と問題点—術中 SEP モニタリング結果との対比—。脳卒中の外科 26: 318-325, 1998
- 10) Neuloh G, Schramm J: Monitoring of motor evoked potentials compared with somatosensory evoked potentials and microvascular Doppler ultrasonography in cerebral aneurysm surgery. *J Neurosurg* 100: 389-399, 2004
- 11) Sako K, Nakai H, Kawata Y, *et al*: Temporary arterial occlusion during anterior communicating or anterior cerebral artery aneurysm operation under tibial nerve somatosensory evoked potential monitoring. *Surg Neurol* 49: 316-322; discussion 322-313, 1998
- 12) 佐古和廣, 中井啓文, 滝澤克己, ほか：SEP モニター下での temporary occlusion を用いた脳動脈瘤手術。脳神経外科 23: 35-41, 1995
- 13) Sakuma J, Suzuki K, Sasaki T, *et al*: Monitoring and preventing blood flow insufficiency due to clip rotation after the treatment of internal carotid artery aneurysms. *J Neurosurg* 100: 960-962, 2004
- 14) 佐久間 潤, 高萩周作, 板倉 毅, ほか：後脛骨神経刺激体性感覚誘発電位を用いた前大脳動脈血流一時遮断時の術中モニタリング。脳卒中の外科 22: 355-361, 1994
- 15) Schramm J, Koht A, Schmidt G, *et al*: Surgical and electrophysiological observations during clipping of 134 aneurysms with evoked potential monitoring. *Neurosurgery* 26: 61-70, 1990
- 16) Suzuki K, Kodama N, Sasaki T, *et al*: Confirmation of blood flow in perforating arteries using fluorescein cerebral angiography during aneurysm surgery. *J Neurosurg* 107: 68-73, 2007
- 17) 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
- 18) 鈴木恭一, 佐々木達也, 松本正人, ほか：運動誘発電位モニタリングを用いた脳動脈瘤手術。脳卒中の外科 34: 101-108, 2006
- 19) Taylor CL, Selman WR, Kiefer SP, *et al*: Temporary vessel occlusion during intracranial aneurysm repair. *Neurosurgery* 39: 893-905; discussion 905-896, 1996
- 20) 浦崎永一郎, 松角康彦, 和田伸一, ほか：後脛骨神経刺激による体性感覚誘発電位の早期成分の起源の解明。脳神経 37: 945-955, 1985
- 21) van der Zwan A, Hillen B, Tulleken CA, *et al*: Variability of the territories of the major cerebral arteries. *J Neurosurg* 77: 927-940, 1992