

7. Taniguchi S, Kimura J, Yamada T, Ichikawa H, Hara M, Fujisawa R, et al. Effect of motion imagery to counter: rest-induced suppression of F-wave as a measure of anterior horn cell excitability. *Clin Neurophysiol* 2008;119:1346–1352.
8. Kimura J. Electrical activity in voluntary contracting muscle. *Arch Neurol* 1977;34:85–88.
9. Eisen A, Fisher M. The F wave. *The International Federation of Clinical Neurophysiology. Electroencephalogr Clin Neurophysiol* 1999; 52(suppl):255–57.
10. Puksa L, Stålberg F, Falck B. Reference values of F wave parameters in healthy subjects. *Clin Neurophysiol* 2003;114:1079–1090.
11. Gandevia SC, Rothwell JC. Knowledge of motor commands and the recruitment of human motoneurons. *Brain* 1987;110:1117–1130.
12. Hashimoto R, Rothwell JC. Dynamic changes in corticospinal excitability during motor imagery. *Exp Brain Res* 1999;125:75–81.
13. Kasai T, Kawai S, Kawanishi M, Yahagi S. Evidence for facilitation of motor evoked potentials (MEPs) induced by motor imagery. *Brain Res* 1997;744:147–50.
14. Rossini PM, Rossi S, Pasqualetti P, Tecchio F. Corticospinal excitability modulation to hand muscles during movement imagery. *Cereb Cortex* 1999;9:161–167.
15. Mercuri B, Wassermann EM, Manganotti P, Ikoma K, Samii A, Hallett M. Cortical modulation of spinal excitability: an F wave study. *Electroencephalogr Clin Neurophysiol* 1996;101:16–24.
16. Sohn YH, Dang N, Hallett M. Suppression of corticospinal excitability during negative motor imagery. *J Neurophysiol* 2003;90:2303–2309.
17. Muellbacher W, Facchini S, Boroojerdi B, Hallett M. Changes in motor cortex excitability during ipsilateral hand muscle activation in humans. *Clin Neurophysiol* 2000;111:344–349.
18. Cowley PM, Clark BC, Ploutz-Snyder LL. Kinesthetic motor imagery and spinal excitability: the effect of contraction intensity and spatial localization. *Clin Neurophysiol* 2008;119:1849–1856.
19. Yanagisawa T, Kimura J, Azuma Y, Ogushi M, Taniguchi S. Excitability of the anterior horn cells after volitional inactivity of soleus muscle: H reflex study. *Jpn J Clin Neurophysiol* 2006;34:89–96.
20. Barker AT, Jainous R, Freeston IL. Non-invasive magnetic stimulation of human motor cortex. *Lancet* 1985;8437:1106–1107.
21. Merton PA, Hill DK, Morton HB, Marsden CD. Scope of a technique for electrical stimulation of human brain, spinal cord, and muscle. *Lancet* 1982;8298:597–600.
22. Ravnborg M, Blinkenberg M, Dahl K. Standardization of facilitation of compound muscle action potentials evoked by magnetic stimulation of the cortex. Results in healthy volunteers and in patients with multiple sclerosis. *Electroencephalogr Clin Neurophysiol* 1991;81: 195–201.
23. Day BL, Dressler D, Maertens de Noordhout A, Marsden CD, Nakashima K, Rothwell JC, et al. Electric and magnetic stimulation of human motor cortex: surface EMG and single motor unit responses. *J Physiol* 1989;412:449–473.
24. Henneman E, Somjen G, Carpenter DO. Functional significance of cell size in spinal motoneurons. *J Neurophysiol* 1965;28:560–580.
25. Rothwell JC, Thompson PD, Day BL, Dick JP, Kachi T, Cowan JM, et al. Motor cortex stimulation in intact man. 1. General characteristics of EMG responses in different muscles. *Brain* 1987;110: 1173–1190.
26. Guiloff RJ, Modarres-Sadeghi H. Preferential generation of recurrent responses by groups of motor neurons in man. Conventional and single unit F wave studies. *Brain* 1991;114:1771–1801.
27. Espiritu MG, Lin CS, Burke D. Motoneuron excitability and the F wave. *Muscle Nerve* 2003;27:720–727.
28. Hultborn H, Nielsen JB. Comments: methodological problems of comparing F responses and H reflexes. *Muscle Nerve* 1996;19: 1347–1348.
29. Lin JZ, Floeter MK. Do F-wave measurements detect changes in motor neuron excitability? *Muscle Nerve* 2004;30:289–294.
30. Eisen A, Odusote K. Amplitude of the F wave: a potential means of documenting spasticity. *Neurology* 1979;29:1306–1309.
31. Fox JE, Hitchcock ER. F wave size as a monitor of motor neuron excitability: the effect of deafferentation. *J Neurol Neurosurg Psychiatry* 1987;50:453–459.
32. Fierro B, Raimondo D, Modica A. F-wave study at different stimulation rates. *Electromyogr Clin Neurophysiol* 1991;31:357–360.

▼特▼ 脊髄・馬尾腫瘍の手術
▼集▼ —安全な腫瘍摘出のために

馬尾腫瘍手術における術中モニタリングの活用

川崎元敬* 田所伸朗 葛西雄介
谷口愼一郎 谷 俊一

要旨：術中脊髄モニタリングは、脊髄・馬尾腫瘍の手術において、脊髄・神経の機能障害を最小限にとどめ安全性を確保しながら、手術を遂行し最大限の成果をあげるために必要な手技となっている。当施設では、以前から実施している感覚路モニタリングに加え、運動路モニタリングである経頭蓋刺激¹、または脊髄刺激-筋誘発電位記録 (Br-MsEP, Sp-MsEP) による複合筋活動電位 (CMAP) の測定を組み合わせ実施している。近年、馬尾腫瘍の手術の際には、上記の術中モニタリングを利用して、持続筋電図モニタリング (free-running EMG) も並行して実施することで、よりリアルタイムな神経障害の察知に努めながら、腫瘍摘出の前には、馬尾神経や終糸の電気生理学的な機能評価を実施している。本稿では、当施設での術中モニタリング法を紹介するとともに、実際に術中モニタリングが有用であったと思われる2例の馬尾腫瘍再発例を具体的に呈示した。

はじめに

脊髄腫瘍、特に脊髄髄内腫瘍の手術においては、脊髄自体に必ず侵襲的な手術操作となるため、術後に一過性もしくは持続性の運動や知覚の麻痺を生じる可能性が高く、この危険性を最小限にとどめるために術中脊髄モニタリングの意義は大きい。一方で、硬膜内髄外腫瘍や馬尾腫瘍においては、脊髄や神経に直接の侵襲が加わらず麻痺の危険性も低い²ためか、術中モニタリングの実施率が低い傾向であるのが現状である³。しかし、これらの腫瘍においても再発例では、腫瘍と神経組織

の癒着が強く境界が不明瞭な場合には手術操作により神経組織の障害をきたす可能性も高くなると思われる。

当院では、当初、Sp-SCEP や SSEP を中心とした感覚路モニタリングを施行していたが、術後の運動麻痺を反映しないこともあるため、2008 年以降は運動路モニタリングである経頭蓋刺激-筋誘発電位記録 (Br-MsEP)、または、脊髄刺激-筋誘発電位記録 (Sp-MsEP) による CMAP 測定を組み合わせ術中モニタリングを施行している。

本稿では、運動路モニタリングである Br-MsEP の当施設での手技について紹介するとともに、馬尾腫瘍再発例の手術の際に、神経への圧迫や牽引などによる神経障害を早期に予見し、不可逆的神経障害を回避し得たと思われる2症例を呈示しながら、馬尾腫瘍手術における術中モニタリングの有用性について検討し報告する。

* Motohiro KAWASAKI et al, 高知大学医学部, 整形外科教室

Effectiveness and limitation of intraoperative monitoring for cauda equina tumor

Key words : CMAP (compound muscle action potential), Spinal cord monitoring, Cauda equina tumor

I. 当施設での術中モニタリング法

当施設で施行している CMAP の導出による脊髄運動路モニタリングは、現在、16 channel の multi-channel monitoring を行い、術中に多数の筋誘発電位を同時に観察することが可能となっている。各モニタリングの際には、体性感覚誘発電位記録 (SSEP) や脊髄刺激-脊髄誘発電位記録 (Sp-SCEP) の感覚路モニタリングを併用している。適応としては、脊髄・馬尾に障害をきたす可能性のある手術が必要な疾患としており、側弯症、後縦靭帯骨化症、硬膜管を高度に圧迫する病変(脊椎転移など)をはじめ、脊髄・馬尾腫瘍に対して実施している。

1. 麻酔方法

麻酔条件は脊髄モニタリングに特に重要であり、吸入麻酔薬はシナプス抑制作用があるため、麻酔の導入と維持は、propofol と fentanyl の静脈投与で実施するように麻酔医の協力を得ている。筋弛緩剤は、筋弛緩モニターを行いながら臭化バクロニウムを使用している。また、BIS モニターを用いて麻酔深度の変動がないことを確認している。

2. 刺激方法

刺激装置は、高電圧刺激装置 (Digitimer 社製 Multipulse stimulator D-185) または日本光電社製 Neuromaster に組み込まれている定電流刺激装置を用い、刺激部位は、Cz (国際脳波標準電極配置 10-20 法) から 2 cm 前方、5 cm 側方を刺激点とし、cork screw 電極を頭皮から刺入して頭蓋骨に接するように設置している。刺激の程度は、400~600 V、持続時間 0.5 ms の矩形波の 5 連続 train 刺激を 1 Hz で左右の極性を入れ替えて 5 回ずつ合計 10 回加算平均または 200 mA の電流刺激を biphasic 刺激で 10 回加算し行っている。

3. 測定方法

術前麻酔下に、誘発筋電図の記録電極に針電極を使用して、belly-tendon 法に準じて筋腹の皮下とその腱の皮下にそれぞれ設置している。測定機種は日本光電社製 Neuropak MEB2200 (8-channel)、または、Neuromaster (16-channel) を用い

ている。馬尾腫瘍の手術の際の導出筋として、両側の大腿四頭筋、前脛骨筋 (TA)、母趾外転筋 (AH)、腓腹筋、肛門括約筋を用いており、手術のレベルや麻痺の程度によって導出筋は適宜、変更している。手術が開始された後、手術に支障をきたさないように刺激を行い、運動路、および、感覚路モニタリングのコントロール波形を設定する。その後、術者がモニタリングを必要と判断する手技の際に、適宜、手術を中断して刺激を行い CMAP を記録している。

また、術中に神経組織周囲の操作を行うときには、free-running EMG を CMAP 測定と同じ電極によりモニタリングするようにしている。通常、安静時には基線か、もしくは、不規則な自発放電がみられるだけであるが、脊髄や神経組織に刺激や損傷が加われば、高振幅で短時間持続する放電現象 (abnormal muscle response : AMR) が出現する。これを CMAP 測定の場合と同じ条件で、sensitivity を 200 μ V/div として記録している。AMR が出現し放電が持続するような場合には、一旦手術操作を中止して CMAP の変化がないことを確認しながら手術を進めている。

4. アラームの基準

Br-MsEP のアラームポイントとしては、まだ世界的にコンセンサスの得られた一定の基準はなく、当施設では各手術の際に、振幅の低下 50% 以上をきたした場合に術者に報告している。その時点で、麻酔深度や血圧の変動がないことを確認した後に、刺激強度を上げて振幅が大きくなる場合や、術者が神経組織へ障害が及ぶ操作をしていないと判断した場合は手術操作を継続する。それでもなお振幅の低下を認める場合には、手術操作を一旦休止して 10 分以上待機する。待機の際には、感覚路モニタリングも実施して CMAP の波形の変化の妥当性を検証している。その後、CMAP の振幅の改善が認められた場合には、手術を再開するが、回復が認められない場合には術者の判断にゆだねている。波形が消失する場合や手術再開後に振幅が再度低下してくる場合には手術の中止を検討する。これまで、このアラームによって、波形の消失がなければ、術後一過性の麻痺の増悪は

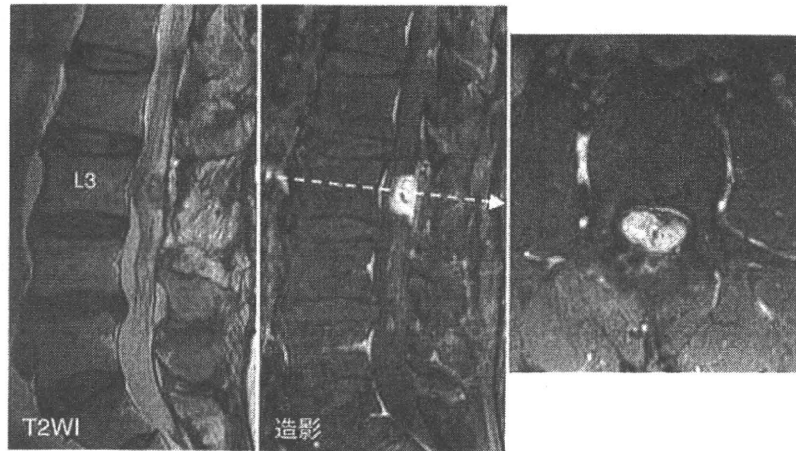


図 1 症例 1 の術前 MRI

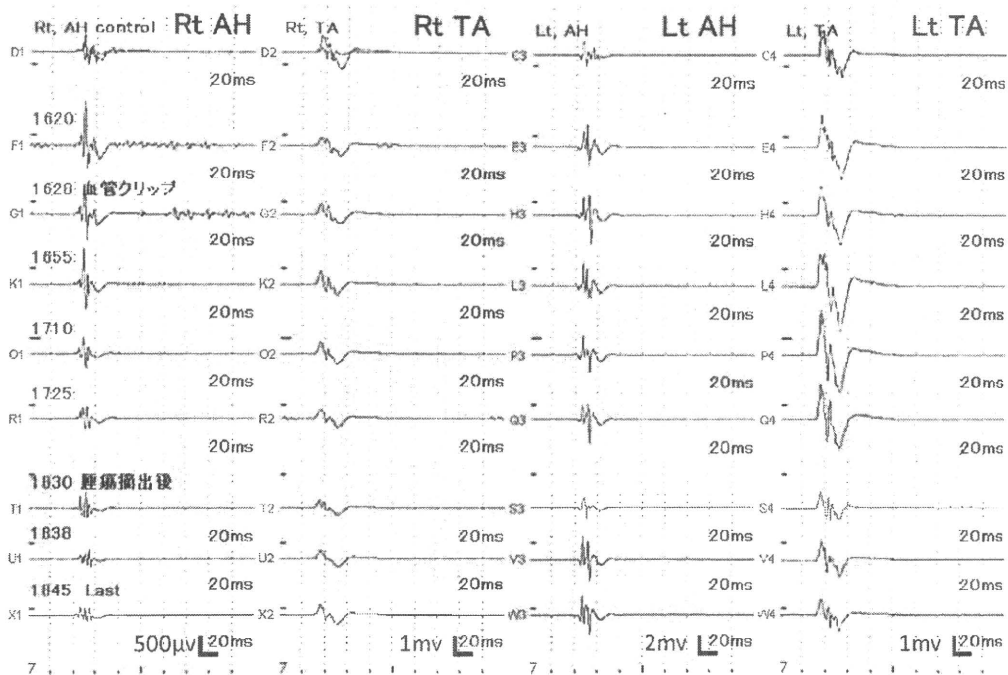


図 2 術中モニタリングの CMAP 波形変化 (症例 1)

あっても徐々に回復している。

II. 症例呈示

〔症例 1〕 50 歳代男性

L3 血管芽腫再発例 (術後 6 年)。他院で部分切

除術を施行され、術後 6 年で当院に紹介された。MRI で、L3 レベルの脊柱管内を充満する腫瘍が馬尾神経を圧迫していた (図 1)。身体所見としては、独歩可能であったが、腰痛や右殿部痛が強く、下腿の感覚障害、残尿も認めた。術中所見では、

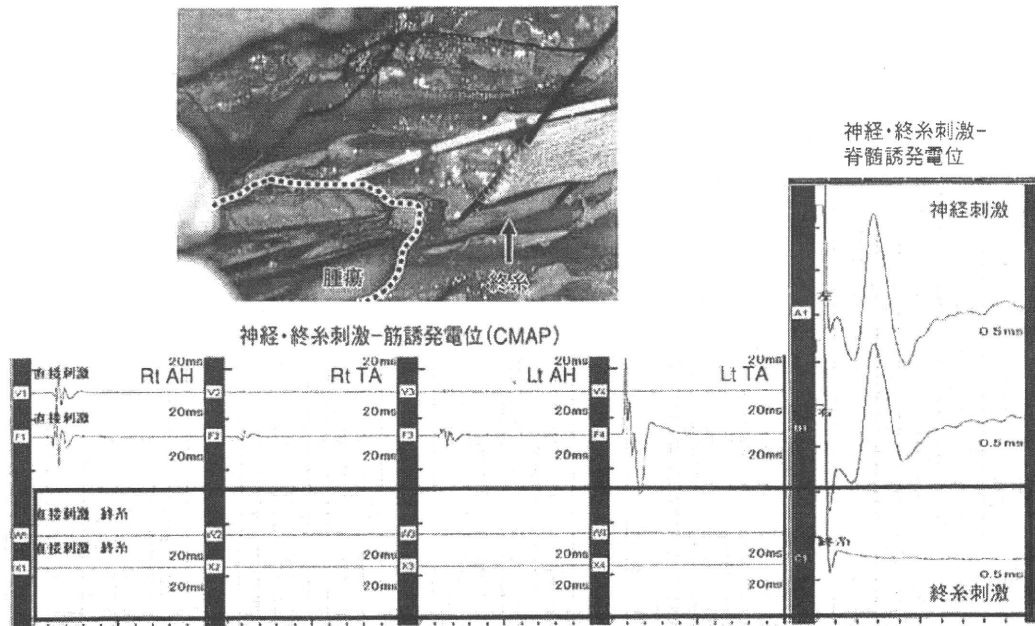


図3 腫瘍切除前(症例1)

腫瘍頭側からの馬尾神経・終糸刺激-複合筋誘発電位と腫瘍尾側からの馬尾神経・終糸刺激-脊髄誘発電位。

硬膜を切開すると、腫瘍周囲には馬尾神経が癒着しており、血管の怒張も認められた。術中、free-running EMGでモニタリングしながら、栄養血管のクリッピング後、馬尾神経を腫瘍から剝離していき、連続している索状物とともに腫瘍を切除した。CMAPは、約10分ごと、もしくは、術中にAMRを認めたときに測定した。腫瘍を摘出し手術終了までのCMAPの変化はなかった(図2)。病理組織診断は血管芽腫であり、連続する索状物は終糸であった。腫瘍切除前に、腫瘍頭側の終糸と馬尾神経の刺激によるCMAP測定と、尾側からの刺激による脊髄誘発電位により、電気生理学的に終糸からの反応がないことを確認した(図3)。術後一過性の膀胱直腸障害をきたし自己導尿を要したが、腰痛、下肢痛は消失した。腰椎JOAスコアでは術前9/29から術後6ヵ月27/29に改善し、自力排尿可能となった。

〔症例2〕60歳代男性

T12-L1 脊髄脂肪腫再発例(術後10年)。他院で骨形成的椎弓切除術と腫瘍部分切除術を施行さ

れ、術後10年で症状再燃して当院に紹介となった。MRIでは、前回術後より軽度の脂肪腫の増大と、腫瘍内腹側に新たな腫瘤が出現していた(図4)。身体所見は、右下肢の痛みと筋力低下、両下肢の感覚鈍麻、アキレス腱反射の亢進や病的反射も認め、尿漏れが出現していた。今回の症状再燃は、新たな腫瘤の増大が主要因と判断し手術を行った。術中、free-running EMGとCMAP、脛骨神経刺激のSSEPでモニタリングした。脊髄脂肪腫を分けて腹側の腫瘤を確認した。頭側尾側に連続する索状物を認めたため、電気刺激による反応がないことを確認して切除した。その際に、AMRが多数の筋から検出されていた(図5)ため、CMAP測定を行いながら慎重に操作を行った。腫瘍摘出後、脂肪腫をCUSAにより部分切除を行った。その際にもAMRが検出され、左腓腹筋のCMAPの振幅が50%以下に低下(図6)した段階で切除を中止し、硬膜形成を行い終了した。その他の筋でCMAPの変化はなかった。術後一過性の膀胱直腸障害を認めたが、左腓腹筋の筋力

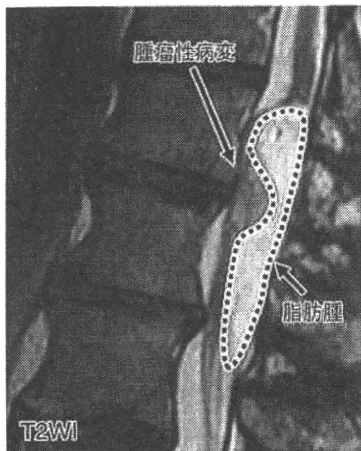


図 4 症例 2 の術前 MRI

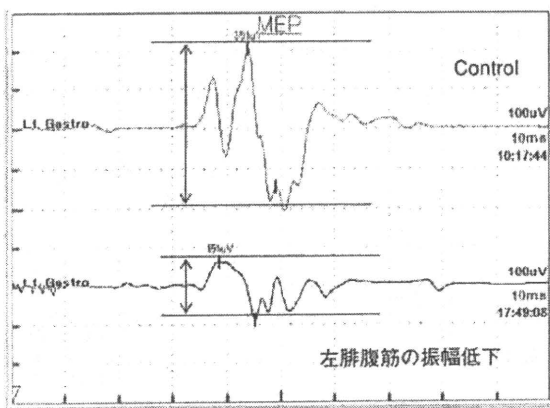


図 6 左腓腹筋の振幅低下 (症例 2)

脊髄脂肪腫を部分切除中に左腓腹筋の波形の振幅がコントロール波形の 43% に低下した。

の低下はなかった。腰椎 JOA スコアでも術前 10/29 から術後 6 カ月で 22/29 に改善した。

Ⅲ. 考 察

2007 年に行われた脊椎脊髄病学会モニタリング委員会による多施設調査によれば、脊髄腫瘍における術中脊髄モニタリングの実施率は 66% であり、側弯症の実施率 84.5% より低い。その理由として、症例の 90% 以上が硬膜内髄外腫瘍であったことを挙げている。また、腰部脊柱管狭窄症に

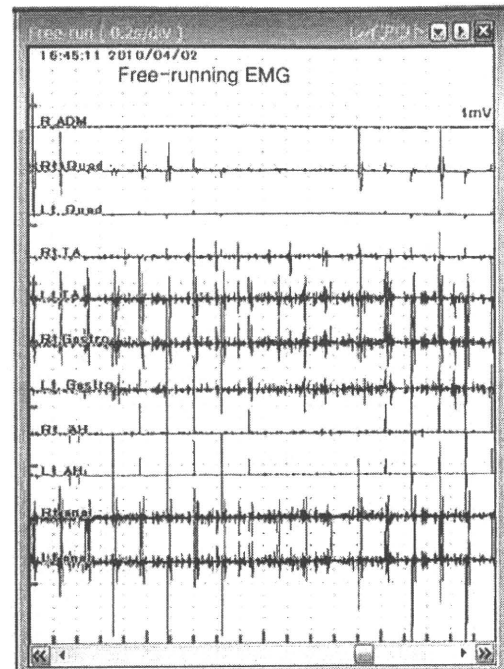


図 5 腫瘍性病変切除中の free-running EMG (症例 2)

おいては 15% の実施率にとどまっていた²⁾。つまり、手術によって麻痺が生じる危険性が少ないと判断される脊椎・脊髄疾患においては、術中モニタリングが実施されない傾向があると思われる。馬尾腫瘍の初回手術例では、さらに低い実施率であることが予想されるが、今回の症例からも馬尾腫瘍再発例においては、腫瘍と神経の癒着が強い例も多く、馬尾神経の不可逆的な機能障害を最小限にとどめるために術中モニタリングの活用は重要と思われた。

Br-MsEP は、多施設調査によれば術中モニタリングを実施している施設のうち 63% で使用されており、運動路のモニタリングとしての信頼性は高い²⁾。馬尾腫瘍手術における Br-MsEP による利点としては、① multi-channel を用いることで、同時に多数の筋からの誘発電位の変化を鋭敏にとらえられること、② 皮膚からの刺激や記録のため低侵襲性で、電極の位置が変化しにくいのでモニタリングが安定していること、③ 腫瘍切除の

際に連続する神経線維や終系の機能評価が可能であること、などが挙げられる。しかし、欠点や限界としては、①麻酔の影響を受けやすいこと、②感覚路障害は反映しにくいこと、③アラームポイントの一定の判定基準が決まってないことや鋭敏すぎるために偽陽性が多いこと、④手術操作中のアラームは得られないこと、などが挙げられ、各施設でこれらの問題を改善する努力がなされていると思われる。

Br-MsEPのアラームポイントとして用いられている判定基準としては、①振幅50%以上の低下、潜時10%以上の遅延³⁾、②波形の消失⁴⁾、③波形の多相性⁵⁾、④振幅80%以上の低下⁶⁾など、様々である。これらはいずれも脊髄障害の判定基準であり、馬尾神経レベルにおける基準の報告はないため、当施設では、振幅50%以上の低下を判定基準の一つの指標として用いている。さらに、手術操作中、リアルタイムに神経障害を監視するために、free-running EMGによるモニタリングを併用しながら、馬尾腫瘍手術の際のcriticalな操作(腫瘍と神経の癒着の剝離、腫瘍摘出など)を行っている。Free-running EMGの有用性はStanley⁷⁾らによって報告され、脊髄腫瘍の際にも使用されている⁸⁾。Abnormal muscle responseは馬尾神経への刺激によって惹起されていると考えているが、どの程度の脊髄や神経への刺激や障害で出現するか、また、どのような波形が神経機能障害のアラームになり得るかは定かではなく、その発生機序の解明や、その事象発生とCMAPや臨床症状の関与についての解析は今後の課題と考えている。それにもかかわらず、AMRの出現を確認することは、術中の操作へのフィードバックだけでなく、CMAP測定タイミングにもなり、また、既に神経障害が生じている部位では反応が顕著な可能性があるために障害部位の推測にも応用できるのではないかと考えて、CMAPと併用して症例を重ねているところである。

当施設では、手術技術の向上や手術機器の改良、安全対策として顕微鏡の使用や術中モニタリングの併用によって、馬尾腫瘍手術は安全に行え、下

肢機能障害は最小限に抑えられている。しかし、馬尾腫瘍の再発例では、今回紹介した2例以外の症例においても、仙神経を温存でき術中モニタリングで肛門括約筋からのCMAPの変化をきたさなかった場合でも、術後に一過性の膀胱直腸障害や軽度の永続的な機能障害をきたす症例が多かった。膀胱直腸機能に関しては、馬尾神経の支配だけでなく交感神経系の腹腔内神経の関与もあるため、現在の術中モニタリングだけでは機能評価は困難であると考えられる。そこで当院では近年、便や尿の排泄障害を診療する専門チーム(骨盤機能センター)による術前術後の膀胱直腸機能の評価と、手術操作や術中モニタリングを併せて総合的に判断しながら、膀胱直腸障害の術中対策や機能障害の予防に努めている。今後、膀胱直腸機能の最適な術中モニタリングや術後の機能障害を予見できるモニタリング手法を検討する必要があると思われる。

文 献

- 1) 松山幸弘ほか: 術中脊髄モニタリングの実際、特に麻痺例を中心に—脊椎脊髄病学会モニタリング委員会による多施設調査。脊髄機能診断学 31: 70-76, 2009
- 2) 松山幸弘ほか: 術中脊髄モニタリングの実態とアラームポイント—脊椎脊髄病学会モニタリング委員会による多施設調査。臨床脳波 51: 286-291, 2009
- 3) Luk KD et al: Evaluation of various evoked potential techniques for spinal cord monitoring during scoliosis surgery. Spine 26: 1772-1777, 2001
- 4) 四宮謙一: 術中脊髄モニタリング。臨床脳波 42: 353-359, 2000
- 5) 松山幸弘ほか: 脊椎脊髄手術を安全に行うための脊髄モニタリング—特に経頭蓋電気刺激による複合筋電位について。整・災外 51: 261-268, 2008
- 6) Langeloo DD et al: Transcranial electrical motor-evoked potential monitoring during surgery for spinal deformity. Spine 28: 1043-1050, 2003
- 7) Stanley A et al: The initial use of free-running electromyography to detect early motor tract injury during resection of intramedullary spinal cord lesions. Neurosurgery 56: 299-314, 2005

