

経頭蓋的磁気刺激による脊髄及び筋の運動誘発 電位に対する麻酔薬の影響

新潟大学医学部麻酔学教室（主任：下地恒毅教授）

飛 田 俊 幸

Effects of Anesthetics on Spinal and Muscular Motor Potentials
Evoked by Transcranial Magnetic Stimulation

Toshiyuki TOBITA

*Department of Anesthesiology,
Niigata University School of Medicine
(Director: Prof. Koki SHIMOJI)*

Recently motor evoked potentials (MEP) have been tried for intra-operative monitoring of motor tract function. It might be essential to elucidate the effect of anesthetics on MEP for accurate monitoring of motor function during surgery.

I recorded spinal MEP from the cervical epidural space and muscular MEP from the thenar and tibialis anterior muscles in response to transcranial magnetic stimulation in 17 patients who underwent spinal surgery under general anesthesia. I examined the effects of fentanyl, ketamine, droperidol, nitrous oxide, sevoflurane and isoflurane on the MEPs.

Any of these anesthetics did not change the latency of the MEPs. Fentanyl (4~6 $\mu\text{g}/\text{kg}$) did not significantly change the amplitude of spinal and muscular MEPs. Ketamine (1.5 mg/kg) significantly increased the amplitude of N wave of spinal MEP. Droperidol (0.1~0.2 mg/kg) significantly decreased the amplitude of later components of spinal MEP. Nitrous oxide (60%), sevoflurane (2%) and isoflurane (1%) significantly decreased the amplitudes of spinal as well as muscular MEPs.

Thus, spinal as well as muscular MEPs were differentially affected by anesthetics. Volatile anesthetics should be avoided during monitoring of MEPs because of depressive effects of these drugs on MEPs even at the surgical depth. Both ketamine and fentanyl might be advantageous to be used for monitoring the MEPs.

Key words: motor evoked potentials, transcranial magnetic stimulation, spinal cord evoked potentials, anesthetics

運動誘発電位, 経頭蓋的磁気刺激, 脊髄誘発電位, 麻酔薬

Reprint requests to: Toshiyuki TOBITA,
Department of Anesthesiology, Niigata
University School of Medicine
Niigata City, 951 JAPAN.

別刷請求先: 〒951 新潟市旭町通1番町
新潟大学医学部麻酔学教室

飛田俊幸

結 言

誘発電位を用いた術中脊髄機能モニタリングは、脊椎・脊髄外科中の手術操作による脊髄障害を早期に捉える手段として、日常的に臨床で応用されている。現在広く指標として用いられている電位には、末梢神経刺激による頭皮上導出体性感覚誘発電位と、末梢神経または脊髄刺激による硬膜外導出脊髄誘発電位がある。しかし、体性感覚誘発電位は運動系路の機能を反映しない可能性があり¹⁾²⁾、脊髄刺激による脊髄誘発電位は頸部や頭頸移行部手術での使用に限界がある³⁾。

これらの問題点から、近年、運動下行路の特異的モニタリングとして、電気^{4)~7)}または磁気を用いた経頭蓋的大脑皮質刺激^{8)~12)}により末梢筋・脊髄に誘発される電位、いわゆる motor evoked potential (以下、MEP)を用いた脊髄機能モニタリングが試みられつつある^{5)~8)}。しかし、MEPは、麻酔薬により影響を受けやすいとされており¹⁰⁾¹¹⁾、MEPを術中脊髄機能モニタリングに用いる際、麻酔薬が電位に及ぼす影響を知ることは誘発電位波形を解析する上で極めて重要である。これまでに、経頭蓋的磁気刺激により脊髄に誘発される MEPに及ぼす麻酔薬の影響についてヒトでの報告は見られない。

そこで著者は、脊椎・脊髄外科手術中の脊髄機能モニタリングに、経頭蓋的磁気刺激による脊髄硬膜外導出法による脊髄 MEP (以下、spinal tcmMEP) の臨床応用を試み、筋および脊髄に誘発された tcmMEP に及ぼす各種麻酔薬の影響について検討した。

対象及び方法

対象は、重篤な呼吸・循環系の合併症を有さず、脊椎・脊髄外科手術を予定された患者17名で、その内訳は、男性9名、女性8名、年齢は12~75歳、平均34.1歳であった。手術対象疾患は、頸椎または胸椎に病変を有するものとした (Table 1)。てんかん、精神学的異常の既往、痙攣閾値低下作用を持つ薬剤 (三環系抗うつ薬、phenothiazine 系など) の使用歴を持つものはなかった。

麻酔前投薬には、atropine 0.01 mg/kg を麻酔導入1時間前に筋注した。手術室入室後、心電図、血圧測定用マンシェット、パルスオキシメータを装着し、バイタルサインを観察、末梢静脈ラインを確保し乳酸リンゲル液を適宜点滴静注した。麻酔導入前に、tcmMEP のコントロール波形を得た後、麻酔導入した。麻酔薬には、笑気、ketamine、fentanyl、droperidol、sevoflurane、

Table 1 対象疾患

側弯症	6
脊髄腫瘍	3
後縦靱帯骨化症	3
黄靱帯骨化症	2
環軸椎亜脱臼	2
胸椎圧迫骨折	1

Table 2 麻酔方法

GO+Ketamine+Fentanyl+Sevoflurane		9
GO+Ketamine+Fentanyl+Isoflurane		4
GO+Droperidol+Fentanyl		4
Total		17
Ketamine :	麻酔導入時 麻酔維持	1.5 mg/kg 1~2 mg/kg/hr
Fentanyl :	麻酔導入時	4~6 µg/kg 1~2 µg/kg/hr
Droperidol :	麻酔導入時	0.1~0.2 mg/kg
笑気 (G) :		60%
Sevoflurane :		2%
Isoflurane :		1%

isoflurane を使用した (Table 2)。気管内挿管時には succinylcholine 0.8~1 mg/kg を静脈内投与し、tcmMEP 導出中には筋弛緩薬は使用しなかった。

経頭蓋的磁気刺激には、THE Magstim 社製 Magstim-200[®] とこれに付属した直径 14 cm の単円形コイルを用い、出力 100 % で刺激した。この刺激装置は、高電圧容量蓄積装置で、制御回路を介して刺激コイルに短時間に (100 ms) 大電流 (出力 100 % で 4000 A) を放電し、強い磁場 (出力 100 % で 1.5 T) を発生する。また、一回の 100 % 出力の後、再充電には約 5 秒を要する。刺激部位は、コイルの中心が患者の頭頂となる位置とし、四肢筋電位振幅ができるだけ大きくなるよう刺激コイルの位置を選択し、固定した。刺激コイルの保持・固定の目的で、アクリル製のコイルホルダーを自家作成し使用した。

spinal tcmMEP は、頸及び腰膨大部硬膜外腔に持続硬膜外麻酔と同様の方法で経皮的に挿入留置したカテーテル電極 (ユニークメディカル社製 UKG-100-3PM) から導出した。筋に誘発される tcmMEP (以下、muscular tcmMEP) は、母指丘筋及び前脛骨筋から銀皿電極を用いて導出した。電位の加算・記録には、刺激装置とトリガーケーブルで結んだ NEC 三栄社製 Synax 1100[®]

を用いた。記録時間は50または100 ms、周波数帯域は1 Hz～3 kHz、加算回数1～5回で行った。導出した波形は、記録用紙に印刷すると同時に、フロッピーディスクに保存した (Fig. 1)。

電位への麻酔薬の影響は、電位の振幅及び潜時を薬剤の投与前後で比較し検討した。spinal tcmMEP の潜時は刺激開始時から電位頂点まで、muscular tcmMEP 潜時は刺激開始時から電位の立ち上がりまでの時間を用いた。

統計処理には one way analysis of variance (ANOVA) と Scheffe の Post hoc test を使用し、 $p < 0.05$ を有意と判定した。

結 果

単円形コイルの頭頂付近1回刺激により、四肢筋及び硬膜外腔から同時に tcmMEP の導出が可能であった。頸膨大部硬膜外腔より導出した spinal tcmMEP は、棘波様の多相性棘波 (component ; C1-5) と、これに続く緩徐な陰性波 (N) と陽性波 (P) から成っていた。腰膨大部硬膜外腔より導出した spinal tcmMEP も C1-5 と N, P 波から成っていたが C1-5 はより緩徐であった (Fig. 2)。腰膨大部硬膜外からの電位導出が可能で

あったのは10例中4例であった (7例は腰膨大部が術野だったため硬膜外電極を挿入しなかった)。またこれらの電位は、筋弛緩薬投与後においてもその波形に大きな変化はなかった (Fig. 3)。

覚醒時の各電位の潜時は、Table 3 の通りであった。また、頸部及び腰膨大部硬膜外から導出した C1-5 の潜時の差と電極間距離から計算した C1-5 の脊髄内電導速度は、Table 4 に示した。C1-3 に比べ C4-5 の電導速度が遅い傾向にあったが、いずれの電位成分間にも有意差は認めなかった。

覚醒時コントロール波形の潜時を対照として、各麻酔薬投与後の潜時を%表示した値を Table 5 に示す。各電位の潜時には、麻酔薬投与による有意な変化は認めなかった。

覚醒時コントロール波形の電位振幅を対照として、各麻酔薬投与後の振幅を%表示した値を Table 6 に示す。振幅は、潜時に比べばらつきが大きかった。fentanyl は、spinal tcmMEP の C3-5, N, P および muscular tcmMEP 振幅を低下させる傾向にあったが、有意ではなかった。ketamine は、spinal tcmMEP の N 波振幅を有意に増大させた。droperidol は、spinal tcmMEP の C5, N, P 波振幅を有意に低下させた。60%笑気は、

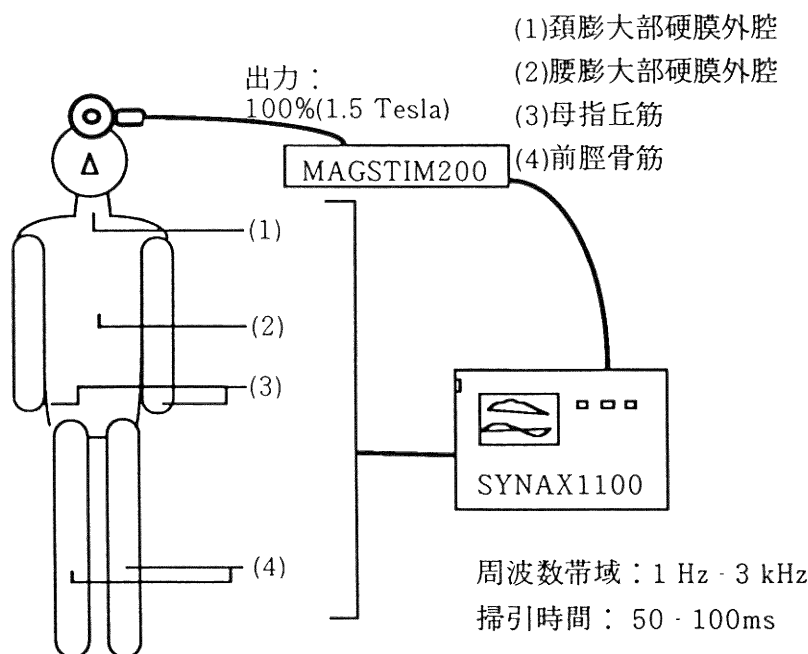


Fig. 1 経頭蓋的磁気刺激による硬膜外導出脊髄誘発電位及び筋電位導出法の模式図

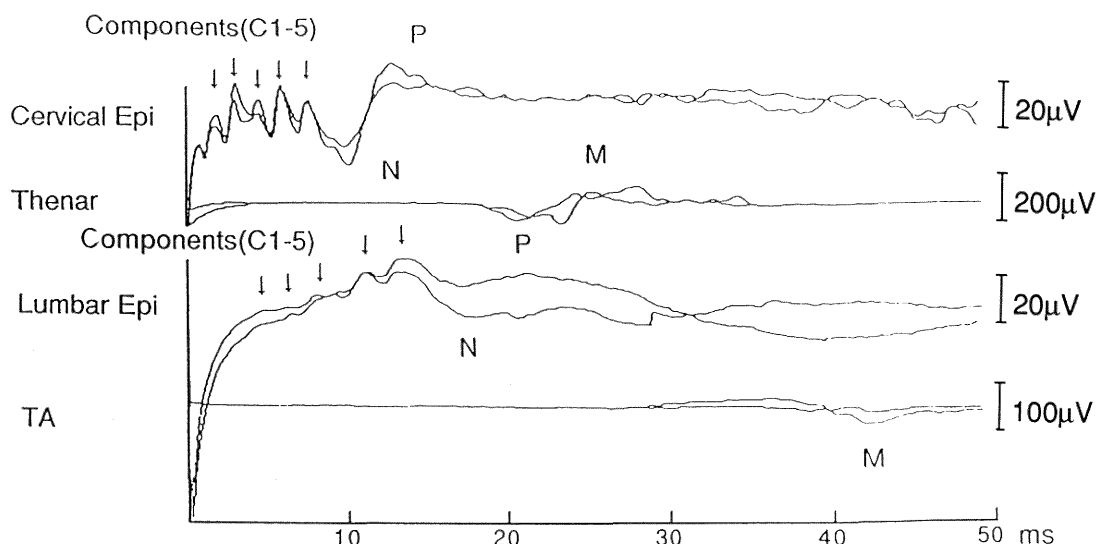


Fig. 2 Spinal 及び muscular tcMMEP 導出波形の1例

頸膨大部硬膜外腔より導出した spinal tcMMEPs は、棘波様の多相性棘波 (C1-5) とこれに続く緩徐な陰性波 (N) と陽性波 (P) から成っていた。腰膨大部硬膜外腔より導出した spinal tcMMEP も C1-5, N, P 波から成っていたが多相性波はより緩徐であった。

(Cervical Epi: 頸膨大部硬膜外腔, Thenar: 母指丘筋, Lumbar Epi: 腰膨大部硬膜外腔, TA: 前脛骨筋。上が陽性を示す。Fig. 3 も同様。)

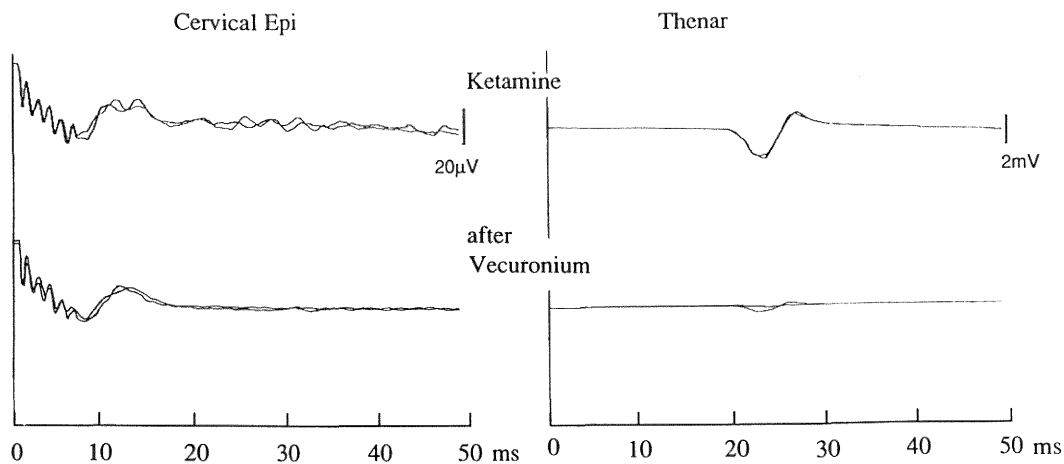


Fig. 3 Spinal 及び muscular tcMMEP 導出波形の筋弛緩薬による変化.

筋弛緩薬投与後、母指丘筋からの muscular tcMMEP 振幅は著明に減少した。一方、spinal tcMMEP 波形では、基線の揺れとして捉えられる筋電位成分は消失したが、C1-5, N, P 波の波形に大きな変化は見られなかった。

Table 3 Spinal 及び Muscular tcmMEP の覚醒時潜時

Spinal	頸膨大部 (n=10)	腰膨大部 (n=4)
C1	3.2±0.1	6.9±0.3
C2	4.8±0.1	8.5±0.2
C3	6.3±0.1	9.9±0.3
C4	7.8±0.2	11.7±0.2
C5	9.4±0.3	13.8±0.1
N	11.7±9.9	—
P	15.3±0.3	—
Muscular	Thenar (n=17)	TA (n=17)
	19.2±0.8	25.2±1.4

(mS) (mean±SE)

Table 4 Spinal tcmMEP 電位成分 C1-5 の頸腰膨大部間伝導速度

Component	伝導速度 (m/S)
C1	75.1±1.9
C2	78.2±4.0
C3	74.9±5.0
C4	70.1±10.3
C5	60.7±9.3

(mean±SE, n=4)

Table 5 麻酔薬投与後の tcmMEP 潜時変化

	Before	Fentanyl (5 min) (%)	Ketamine (5 min) (%)	Droperidol (5 min) (%)	N ₂ O (10 min) (%)	Sevoflurane (5 min) (%)	Isoflurane (10 min) (%)
C1	100.0	102.4±1.3	100.0±1.2	98.6±1.5	101.1±1.1	101.4±1.5	106.4±4.5
C2	100.0	101.6±1.6	97.0±1.9	100.1±1.1	105.0±2.2	95.3±4.4	103.3±4.8
C3	100.0	102.1±0.9	99.9±1.3	99.3±1.2	103.1±1.6	—	—
C4	100.0	101.2±0.5	101.0±0.9	98.7±0.5	—	—	—
C5	100.0	102.0±1.2	102.4±1.6	100.9±1.2	—	—	—
N	100.0	99.5±3.7	105.2±2.1	98.9±6.0	—	—	—
P	100.0	94.0±7.4	101.6±3.0	102.3±5.7	—	—	—
Thenar	100.0	100.3±1.5	103.6±1.3	101.3±1.3	102.6±1.8	104.0±3.2	—
TA	100.0	101.5±0.9	100.7±1.5	98.4±1.8	99.3±0.7	101.7±2.6	—

(—：電位消失により測定不能) (mean±SE)

Table 6 麻酔薬投与後の tcm MEP 振幅変化

	Before	Fentanyl (5 min) (%)	Ketamine (5 min) (%)	Droperidol (5 min) (%)	N ₂ O (10 min) (%)	Sevoflurane (5 min) (%)	Isoflurane (10 min) (%)
C1	100.0	116.2±21.0	88.5±15.2	77.7±25.2	65.2±15.3	21.4±9.6*	38.8±3.6*
C2	100.0	118.8±22.8	93.7±19.8	74.3±19.7	35.7±10.4*	34.2±11.3*	17.9±10.4†
C3	100.0	84.7±10.9	125.2±19.6	77.2±15.9	39.8±8.6*	0.0§	0.0§
C4	100.0	81.7±10.4	128.4±36.2	76.0±34.4	0.0§	0.0§	0.0§
C5	100.0	79.8±16.2	69.0±21.3	40.3±6.6*	0.0§	0.0§	0.0§
N	100.0	62.9±16.1	156.8±15.1*	34.5±9.5*	0.0§	0.0§	0.0§
P	100.0	52.9±21.9	141.3±37.2	5.2±2.1†	0.0§	0.0§	0.0§
Thenar	100.0	67.0±12.4	88.5±14.4	90.9±14.7	73.3±9.6	4.6±4.9†	0.0§
TA	100.0	86.8±12.3	136.0±61.0	63.5±20.9	34.9±4.3*	1.1±3.7†	0.0§

(mean±SE, *p<0.05, †p<0.01, §p<0.001)

spinal tcmMEP の C2-3 と前脛骨筋の muscular tcmMEP 振幅を有意に低下させ、spinal tcmMEP の C4-5, N, P波を消失させた。sevoflurane は、spinal tcmMEP の C1-2 と muscular tcmMEP 振幅を有意に低下させ、spinal tcmMEP の C3-5, N, P波を消失させた。isoflurane は、spinal tcmMEP の C1-2 振幅を有意に低下させ、spinal tcmMEP の C3-5, N, P波および muscular tcmMEP を消失させた。

考 察

本研究の結果から、spinal tcmMEP は、Fig. 2 に示すように初期多相性波 (C1-5) と、これに続く緩徐な陰性波 (N) と陽性波 (P) から成ることが解った。また、Fig. 3 に示すように、これらの電位は筋弛緩薬の作用を受けないことから、筋電位成分を含まない脊髄由来の電位であると考えられる。これまでの他家の報告では、電気刺激による spinal MEP は、刺激がシナプスを介さずに錐体路に伝わり下行すると考えられる大きな陰性波 D (direct) 波と、大脳皮質でシナプスを介して下行が始まる多相性波 I (indirect) 波から成るとされ⁶⁾¹³⁾、D波は麻酔薬に抵抗性、I波は麻酔薬に感受性¹³⁾であるという。一方、磁気刺激では、電気刺激におけるD波のような大きな初期電位は見られず、磁気刺激による脊髄電位にD波に相当するものがあるか否かには両説がある。Day ら¹⁴⁾は、ヒトでの筋電位潜時に関して、経頭蓋的磁気刺激によるものは電気刺激よりも潜時が遅れる (1.8 ms) こと、電気刺激で見られる促通時の筋電位潜時短縮が磁気刺激では見られないことから、磁気では錐体路細胞直接の刺激がなく、脊髄電位はI波のみであろうと示唆している¹⁵⁾。これに対し Berardelli ら¹⁶⁾は、ヒトの経頭蓋的磁気刺激による脊髄電位の最初の電位が3例中2例で電気刺激による脊髄電位のD波と同じ潜時で見られ、これは振幅の小さいD波であろうと報告している。著者の結果からは、C1-5 の脊髄内電導速度に有意差がないことから、これらは同一の下行路おそらくは錐体路を下行する電位で、C1-5 の潜時の差は、皮質での synaptic delay によるものであろう。しかし、C4-5 は有意差こそみられなかったが伝導速度が遅い傾向にあるので、別の皮質脊髄路由来の可能性も考えられる。また、潜時の早い成分 (C1-2) は遅い成分 (C3-5) に比し麻酔薬抵抗性があつた。C1-2 は、双極でとらえられたD波、C3 以下はI波とも考えられるが、その比較は困難である。N, Pの起源については、これまでにこれに言及した報告はない。その潜時と緩徐な波形から、

それぞれ分節性に発生した脊髄前角細胞の興奮の総和および第一次求心性繊維の脱分極 (PAD) を捉えたものではないかとも考えられるが、同時導出した muscular tcmMEP の振幅変化は、N波のみならず C1-5 のそれとも一致しておらず (Table 6)、その起源については解釈が困難である。例えば、笑気では母指丘筋、前脛骨筋の muscular tcmMEP は、それぞれ対照値に比べ約73%、35%と抑制傾向が見られるが筋活動はまだ認められるのに対し、spinal tcmMEP は、N, P波、C4-5 が消失している (Table 6)。この結果は、前角運動ニューロン活動を反映する電位が硬膜外腔背面では捉え難いことを示唆している。事実、脛骨神経刺激による腓骨筋々電位H波と分節性脊髄電位のN波、P波とは薬剤に対する反応が異なっている¹⁷⁾。また、脊髄背面からの導出では、前角ニューロンの同期的興奮活動は陽性電位として捉えられるはずである¹⁸⁾。本研究の結果やこれまでの結果から推測すると、N, P波はむしろ下行性経路によって駆動された。それぞれ後角またはその近傍の介在ニューロン活動とそれらによって誘発された PAD と考えた方が無理がないように思われる。

冒頭にも述べたように、MEP を術中脊髄機能モニタリングに応用する際、麻酔薬が電位に及ぼす影響を知ることが極めて重要で、その重要性は電位の解析上のみならず、MEP 導出時の至適麻酔方法を探る上でも有力な情報をもたらす。これまで、ヒトあるいは実験動物での MEP に対する麻酔薬の作用についていくつかの報告がなされている^{19)~25)}。Kalkman ら¹⁹⁾は、ヒトで、経頭蓋的磁気及び電気刺激による muscular MEP に及ぼす麻酔薬の影響を検討し、鎮静量の midazolam (0.05 mg/kg) と導入量の propofol (2 mg/kg) で電位振幅が有意に抑制され、鎮静量の fentanyl (3 mg/kg) と導入量の etomidate (0.3 mg/kg) では電位振幅抑制が弱くその持続が短かく、またこれらの薬剤では電位の潜時は変化がなかったと報告している。Kalkman ら²⁰⁾は、また、ヒトで、経頭蓋的電気刺激による muscular MEP が、isoflurane (0.2~0.6%) で消失したと報告している。Zentner ら²¹⁾は、ヒト成人で経頭蓋的電気刺激による muscular MEP は、fentanyl (0.2 mg), flunitrazepam (1 mg), thiopental (250 mg) によって有意な振幅低下はみられないが、笑気 (66%) によって著明に振幅が低下したと報告している。Ghaly ら²²⁾は、サルで、muscular tcmMEP に及ぼす ketamine の影響を検討し、総投与量 35~40 mg/kg 以上で潜時の遅延、15~20 mg/kg 以上で振幅の低下が見られたと報告

している。Ghaly ら²³⁾ はまた、サルで、muscular tcmMEP に及ぼす thiamylal の影響を検討し、総投与量 15 mg/kg で振幅の低下が見られたと報告している。Haghighi ら²⁴⁾ は、ラットで、経頭蓋的電気刺激による muscular MEP が、0.5～1.5 % の isoflurane, enflurane, halothane で濃度依存的に立ち上がり潜時の遅延、振幅の低下、電位持続の短縮をもたらすと報告している。

ヒトにおける本研究では、fentanyl は spinal tcmMEP の N, P 波及び muscular tcmMEP にたいし有意ではなかったが抑制傾向が見られ、ketamine は spinal tcmMEP の N 波を有意に増大させ、droperidol は、spinal tcmMEP の C4, C5, N, P 波に対し抑制を示し、笑気, sevoflurane, isoflurane は、全ての成分に対し抑制的作用を有するという結果となった。muscular MEP に対する麻酔薬の影響はこれまでの報告と概して一致しており、経頭蓋的磁気及び電気刺激による muscular MEP への影響は、ほぼ同様であると考えられる。一方、spinal tcmMEP に対する麻酔薬の影響に言及した報告はこれまで見られていないが、今回の結果からは、muscular MEP に対するものとは異なることがわかった。

以上のような MEP に対する麻酔薬の影響の知見から、術中モニタリングの立場から tcmMEP 導出時の至適麻酔法を考察する。吸入麻酔薬は、本研究の結果や他家の報告²⁰⁾²⁴⁾ が示すように、外科的麻酔深度が得られるより低濃度から強く muscular MEP と spinal tcmMEP を抑制するため、術中脊髄機能モニタリング時の麻酔には避けるべきと考えられる。Ghaly ら²³⁾ は、ketamine について、サルで MEP に抑制的としているが、ketamine の総投与量が 10 mg/kg では彼らの結果でも MEP に有意な抑制は見られていない。投与量を制限すれば術中 MEP 導出時の麻酔薬として適当であろう。著者は、脊髄・脊椎外科手術麻酔に ketamine を使用する場合、麻酔導入時 1～2 mg/kg を静脈内投与、麻酔維持時 1～2 mg/kg/時を持続静脈内投与しており、総投与量が 15 mg/kg に達するものはなかった。fentanyl は、MEP に対し抑制傾向が見られたが、その変化は有意ではなかった。従って、これも適していると思われる。また、笑気は、25～50 % では MEP 抑制作用が明らかでないとの報告もあり²⁵⁾、長時間手術となり ketamine 投与量が多くなる様な場合、低濃度笑気の併用によって ketamine 必要量を減少させることも考慮されるべきであろう。以上から、tcmMEP を用いた術中脊髄機能モニタリングを施行する際の麻酔法と

しては、fentanyl または ketamine による麻酔法がより理想的なものと考えられる。

ここまで MEP に対する麻酔薬の影響について述べてきたが、各種麻酔薬が MEP に影響を及ぼす際の作用部位がどこであるかは未だ明らかではない。spinal MEP において考えられる部位としては、1) 皮質錐体路細胞、2) 錐体路細胞に投射する皮質細胞、3) 皮質細胞間シナプス、4) 錐体細胞軸、5) 錐体路-前角運動ニューロン間シナプス、6) 前角運動ニューロンが考えられる。muscular MEP の場合は、さらに、7) 末梢運動神経、8) 神経-筋接合部、9) 筋、が加わる。主たる作用部位がこれらのうちいずれであるか本研究から考察するのは困難で、今後の検索が必要である。

謝 辞

稿を終えるにあたり、終始かわらぬご指導を賜りました恩師下地恒毅教授に深甚なる謝意を表しますとともに、本研究に御助言と御協力を戴きました整形外科科学教室山政二先生、技術的援助を戴いた有馬信男先生、佐藤由紀夫技官に深く感謝致します。

参 考 文 献

- 1) Ginsburg, H.H., Shetter, A.G. and Raudzens, P.A.: Postoperative paraplegia with preserved intraoperative somatosensory evoked potentials, *J. Neurosurg.*, **63**: 296～300, 1985.
- 2) Ben-David, B., Haller, G. and Taylor, P.: Anterior spinal fusion complicated by paraplegia: a case report of a false-negative somatosensory-evoked potential, *Spine*, **12**: 536～539, 1987.
- 3) Kitagawa, H., Itoh, T., Takano, H., Takakuwa, K., Yamamoto, N., Yamada, H. and Tsuji, H.: Motor evoked potential monitoring during upper cervical spine surgery, *Spine*, **14**: 1078～1083, 1989.
- 4) Merton, P.A. and Morton, H.B.: Stimulation of the cerebral cortex in the intact subject, *Nature (Lond)*, **285**: 227, 1980.
- 5) Levy, W.J.: Clinical experience with motor and cerebellar evoked potential monitoring, *Neurosurgery*, **20**: 169～182, 1987.
- 6) Boyd, S.G., Rothwell, J.C., Cowan, J.M.A., et al.: A method of monitoring function in corticospinal pathways during scoliosis surgery

- with a note on motor conduction velocities, *J. Neurol. Neurosurg. Psychiatry.*, **49**: 251~257, 1986.
- 7) **Zentner, J.**: Noninvasive motor evoked potential monitoring during neurosurgical operations on the spinal cord, *Neurosurg.*, **24**: 709~712, 1989.
 - 8) **Edmonds, H., Paloheimo, M.J., Backman, M.H., Johnson, J.R., Holt, R.T. and Shields, C.B.**: Transcranial magnetic motor evoked potentials (tcMMEP) for functional monitoring of motor pathways during scoliosis surgery, *Spine*, **14**: 683~686, 1989.
 - 9) **Barker, A.T. and Jalinous, R.**: Non-invasive magnetic stimulation of human motor cortex, *Lancet*, **1**: 1106~1107, 1985.
 - 10) **Barker, A.T., Freeston, I.L., Jalinous, R. and Jarratt, J.A.**: Magnetic stimulation of the human brain and peripheral nervous system: an introduction and the results of an initial clinical evaluation. *Neurosurg.*, **20**: 100~109, 1987.
 - 11) **Mills, K.R., Murray, N.M.F. and Hess, C.W.**: Magnetic and electrical transcranial brain stimulation: Physiological mechanisms and clinical applications, *Neurosurg.*, **20**: 164~168, 1987.
 - 12) **Murray, N.M.F.**: The clinical usefulness of magnetic cortical stimulation, *Electroencephalogr. Clin. Neurophysiol.*, **85**: 81~85, 1992.
 - 13) **Amassian, V.E., Stewart, M., Quirk, G.J. and Rosenthal, J.L.**: Physiological basis of motor effects of a transient stimulus to cerebral cortex, *Neurosurg.*, **20**: 74~93, 1987.
 - 14) **Day, B.L., Thompson, P.D., Dick, J.P., Nakashima, K. and Marsden, C.D.**: Different sites of action of electrical and magnetic stimulation of the human brain, *Neurosci. Lett.*, **75**: 101~106, 1987.
 - 15) **Day, B.L., Dick, J.P.R., Marsden, C.D. and Thompson, P.D.**: Differences between electrical and magnetic stimulation of the human brain, *J. Physiol.*, **378**: 36P, 1986.
 - 16) **Berardelli, A., Inghilleri, M., Cruccu, G. and Manfredi, M.**: Descending volley after electrical and magnetic transcranial stimulation in man, *Neurosci. Lett.*, **112**: 54~58, 1990.
 - 17) **Shimoji, K., Kano, T., Higashi, H., Morioka, T. and Henschel, E.O.**: Evoked spinal electrograms recorded from epidural space in man, *J. Appl. Physiol.*, **33**: 468~471, 1972.
 - 18) **Shimoji, K., Kano, T., Morioka, T. and Ikezono, E.**: Evoked spinal electrogram in a quadriplegic patient, *Electroenceph. clin. Neurophysiol.*, **33**: 659~662, 1973.
 - 19) **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**: 502~509, 1992.
 - 20) **Kalkman, C.J., Drummond, J.C. and Ribberink, A.A.**: Low concentrations of isoflurane abolish motor evoked responses to transcranial electrical stimulation during nitrous oxide/opioid anesthesia in human, *Anesth. Analg.*, **73**: 410~415, 1991.
 - 21) **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, *Neurosurg.*, **24**: 253~256, 1989.
 - 22) **Ghaley, R.F., Stone, J.L., Aldrete, J.A. and Levy, W.J.**: Effects of incremental ketamine hydrochloride doses on motor evoked potentials (MEPs) following transcranial magnetic stimulation: a primate study, *J. Neurosurg. Anesthesiol.*, **2**: 79~85, 1990.
 - 23) **Ghaley, R.F., Stone, J.L. and Aldrete, J.A.**: Motor evoked potential (MEP) following transcranial magnetic stimulation in monkey anesthetized with nitrous oxide, ketamine, and thiamylal sodium, *Anesthesiol.*, **69**: A606 (Abstract), 1988.
 - 24) **Haghighi, S.S., Madsen, R., Green, M.K., Oro, J.J. and Kracke, G.R.**: Suppression of motor evoked potentials by inhalation anesthetics, *J. Neurosurg. Anesthesiol.*, **2**: 73~78, 1990.
 - 25) **Ghaley, R.F., Aldrete, J.A. and Stone, J.L.**: Effects of nitrous oxide concentration on electromyographic responses following transcranial magnetic stimulation, in man, *Anesthesiol.*, **71**: A585 (Abstract), 1989. (平成6年2月10日受付)