

# 脊髄誘発電位の実験研究及び臨床応用

旭川医大 整形外科

竹 光 義 治

## A 目的

近年手術手技及び器機の改善にともない、脊椎、脊髄手術が広く行なわれるようになったが術後に脊髄麻痺を発見しその治療に苦慮する症例の報告が跡を絶たない。そこで脊椎、脊髄手術時に危険状態を客観的に予知(脊髄損傷をごく初期の中にその原因を除去する目的で脊髄モニタリング法の研究を行った。欧米ではNeurolept anesthesia 下で術中に覚醒させ運動麻痺をチェックする wake up test 法が行われ麻痺の予防を試みているが、連続的に脊髄機能をモニター出来ぬ点、脊髄麻痺を初期の中に発見防止困難な点等の欠陥がありこれに代る方法として脊髄誘発電位を測定分析する事により脊髄機能障害を客観的、連続的にモニターする方法を採用した。

脊髄誘発電位(Spinal Cord Evoked Action Potential以後SEAPと略す)は末梢神経刺激によりその神経の所属髄節から記録される所属髄節脊髄誘発電位(Segmental SEAP)と脊髄硬膜内腔或は硬膜外腔から直接脊髄を刺激し刺激部位から遠位で記録される伝導性脊髄誘発電位(Conductive SEAP)の2つに大別する事が出来る。更に前者は所属髄節を超えてより頭側の髄節から伝導性SEAPを記録出来る。後者は刺激部位から頭側で記録する上行性SEAP(Afferent Conductive SEAP)と刺激部より尾側から記録する下行性SEAP(Efferent Conductive SEAP)とに分類することが出来る。所属髄節SEAPと伝導性SEAPとは後述するようにその起源と伝導路を異にし、この2つの脊髄誘発電位を適宜組合せて測定することにより脊髄機能障害を推定し得る。臨床応用として脊椎・脊髄手術時の脊髄機能モニタリングの他に脊髄損傷の予後判定、Myelopathy を起している責任病巣のレベル決定、Cervical Myelopathy の診断などがあげられる。

## B 脊髄誘発電位の測定法

### 1. 電極挿入の手技

a) 脊髄硬膜外刺入法、体位は通常左下側臥位で行うが電極の位置を硬膜外腔正中に挿入したい時には腹臥位で胸の下に厚さ20cmぐらいの枕を入れて頸椎、胸腰椎前屈しイメージ透視下で行っている。電極は硬膜外麻酔手技に基づき loss of resistance 法により Touhy 針を硬膜外腔に刺入後これを通して直径50 $\mu$ の stainless steel wire を封入した2極のカテテル電極を挿入し脊髄の任意の高さで電極を滑め Touhy 針を抜去後固定をしっかりとて刺激或は記録電極とする。もし術中、脊椎管を露出する場合にはそこから電極を挿入すればよいが、手術操作中、電極に触れその位置が容易に移動することがあるので注意を要する。刺入部位の選択には脊椎管の狭小のない事を予めX線撮影により確認の上、通常C<sub>7</sub>/T<sub>1</sub>間及びL<sub>1</sub>/2間から挿入しているが必要に応じてどのレベルでも刺入可能である。

### b) 末梢神経刺激法 Segmental SEAP

末梢神経刺激には主に正中、尺骨、腓骨神経等の神経幹が浅層を走行する部位を選び、予め経皮刺激で挿入部位を皮膚上にマークし、そこに釣斜電極を10mm以上の間隔をあけて刺入し刺激電極としている。これは固定が確実で筋収縮、体動などによる電極の移動が殆んどなく安定した刺激が得られる。記録電極は頸部、腰部膨大部にj)の手技で挿入する。神経刺激装置、増幅器、平均加算器は各々Medelec USC6+IS/C, AA6M, DAV62を内蔵するMS6モジュール式筋電計を使用した。

### 2. 末梢神経刺激法による脊髄誘発電位測定

#### a 刺激及び記録の条件

末梢神経幹の近傍に刺入した釣針型電極からの刺激閾値(threshold)は大体1~2mAであり所属髄節SEAPの早期成分(early com-

ponent) を観察するためであれば、閾値の2倍程度の弱い刺激で充分である。持続時間0.1 - 0.2 msec の矩形波を用い無麻酔下では刺激頻度5 pps が被検者にとって限界である。30 pps 以上の高頻度刺激では早期成分の振幅、持続時間 etc に変化を来すので麻酔下でも20 pps が早期成分観察のためにも限界であった。

記録方法 双極電極を所属髄節上に挿入してあるが通常単極導出とし不関電極は関電極より頭側の棘間靭帯或は眉間中央部(FP<sub>1</sub>とFP<sub>2</sub>との間)にとっている。双極誘導では2ケの電極間の電位差をとる事となり、電極の並ぶ方向脊髄との距離により一定の波形がとりづらい。筋電図その他の雑音成分を除去するには平均加算回数が多い程有効だが潜時に動揺のある現象や低い電位で短い持続時間の現象などは平均化され正しく表現されなくなるので平均加算回数は必要最小限にすべきで通常は32~128回ぐらいである。平均加算機の機種は一掃引時間あたりのアドレス数が1024ある事が望ましい。

#### b 基本波形

性質の異なる2種類の誘発電位があり一つは刺激された末梢神経の所属する数髄節から記録される所属髄節誘発電位(黒川, 1980)で他方は所属髄節より頭側から記録される伝導性脊髄誘発電位である。

##### i) 所属髄節誘発電位

末梢神経による特異性はなく頸部膨大部で基本波形は同一である。即ち後根を伝導してくる陽性波に続く持続時間2 msec. 前後の陰性棘波とそれに続く持続時間4 - 6 msec の緩徐な陰性電位から成る。これらは電極の位置により振幅、持続時間に変化を生ずる。最初の陰性棘波の起源は所属髄節からのみ得られる事、神経根障害時に波形に変化を来す事及び動物実験からの所見で脊髄神経根由来の電位であり、これに続く第2の緩徐な陰性電位は脊髄後角の介在ニューロン由来の電位という説が有力である。この2つの電位は神経障害のない限り安定して観察される。下地らは第1の陰性棘波のあとに続く陽性電位に着目しP<sub>2</sub>(P<sub>2</sub>F, P<sub>2</sub>S)と命名しより上位の中樞を介した電位変化であろうと推察している。

##### ii) 上行性伝導性脊髄誘発電位

後根を経由して来た電位が当該の上行路を順行性に頭側に向い所属髄節から離れるに従い潜時が遅れ持続時間5 - 8 msec. の多相性な緩徐な波形を呈する。

##### iii) 脊髄刺激法による脊髄誘発電位測定

脊髄硬膜外腔に挿入された刺激電極により硬膜を介して脊髄を直接刺激し生じた誘発電位を刺激点より頭側或は、尾側で記録する方法である。前者を上行性、後者を下行性伝導性脊髄誘発電位と呼び両者間の基本波形は殆んど差がない。

##### a 刺激及び記録の条件

持続時間0.1 - 0.2 msec. の矩形波で刺激する。頻度は50 pps. までは殆んど波形の変化は無く、被検者がたとえ覚醒していてもそれ程不快感はないようである。著者は20pps を閉いている。刺激の強さは筋収縮閾値の2倍以上とし、術中モニターには第1及び第2電位の振幅が安定する suprmaximal stimulation を使用している。

正常脊髄では脊髄誘発電位は振幅が大きく平均加算回数は16~64回で充分であり20ppsで刺激すれば約1 - 3秒の分析所要時間である。しかし高度脊髄障害の場合では256 - 512回の加算回数が必要になる場合もあり、この時には50pps の刺激頻度を選択している。

##### b 基本波形

刺激及び記録電極の脊髄に対する位置により個々人で少しづつ波形は異なるものの、基本の波形となるのは潜時の短かい2つの陰性電位である。潜時の最も短かい第1電位は立上りの早い棘波で持続時間も1~2 msec. と短かい。これに続く第2電位は持続時間2~3 msec で振幅は第1電位より低い。記録電極が脊髄円錐部にある時にはこの電位は持続時間も延び多相性となる。伝導速度、脊髄切断実験等から第1電位は脊髄後部側索浅層、第2電位は後索由来の電位とする報告が多い。しかし、第2電位にはシナプスを介した電位が含まれていると考えなければならぬ現象も認められ今後更に検討する余地が残っている。

##### 脊髄誘発電位検査実施上の注意

刺激、記録電極と脊髄との位置関係が電位に

微妙に響くため、それらの位置2方向をX線撮影によりはっきりさせる事が重要である。そして電極の位置移動には充分注意し刺激が一定であるかどうかを監視するモニター電極を使用すべきである。

刺激は通常2~6倍の筋収縮閾値と比較的弱い値なのでその値を必ず記載しておく必要がある。つまり脊髄の如何なる部分をどの程度の強さで刺激し、どの部分から記録した電位であるかを明確にしておく事が脊髄誘発電位の今後の発展のために重要と考えられるからである。

## B 実験的研究

動物実験では脊髄への衝撃や圧迫、牽引等の外力による損傷、虚血等により脊髄誘発電位の振幅の低下、潜時の延長が認められるが損傷の程度によっては分単位で電位の回復が得られ覚醒後機能障害を認めない場合がある。逆にある脊髄障害因子を選び損傷程度を加減することにより脊髄麻痺を可逆的範囲内に留めることが可能である。

筆者は特に脊髄に牽引力が加わり、何らかの障害が生じた場合、脊髄誘発電位に如何なる変化が生ずるか、又、脊髄誘発電位を測定—脊髄モニタリング—すれば牽引により惹起された損傷が可逆的な内にそれを察知し得るかとの2点について動物実験を行い興味ある結論を得たのでその概略について述べる。

## A materials and methods

10 Kg前後の成犬20頭にHalothene麻酔をかけ血圧、EKGモニター下に牽引装置を第1及び第2腰椎椎体に装着後第1、2腰椎椎間を含む脊髄硬膜周囲の組織を輪状に鋭的に切離し牽引力のみが効果的に脊髄に作用するようにした。

下行性伝導性脊髄誘発電位を脊髄モニターの指標にするために刺激電極を第7胸椎硬膜外腔へ、記録電極を第4腰椎硬膜外腔の各々背側正中部に挿入した。電極はカテーテル内に2本の100 $\mu$ のstainless steel wireを封入した電極間距離への15mmのカテーテル電極である。刺激条件は持続時間0.1 msec.の短形波で10 ppsの定電流刺激とした。刺激の強さは伝導性脊髄誘発電位の中第1、第2電位の振幅を指標とし徐々に刺激強度を上げていき肉眼下、2つの電位の振幅が最大になった時の最小の電流値とした。記録は双極誘導で行い脊髄誘発電位

は連続的にFM tape recorderで記録する一方Medelec MS6にて32~64回の平均加算を行った。第1、第2電位の頂点潜時、振幅、積分値、周波数分析等は三菱シグナルプロセッサ7TO7A及び横川・パフカード社製マイクロコンピュータを用いた牽引方法は5mmを一単位とした牽引を10分間持続しwake up testで麻痺の有無を確かめた後に牽引を緩め最初の状態まで戻す。麻痺の無い時には更に一単位の牽引を増し以後は同様操作を繰返し、麻痺が生じた時には牽引を0に戻して30分間観察し、麻痺が回復したら更にもう一単位牽引を増した。脊髄誘発電位は1分間隔で測定した。この方法により脊髄の牽引に対するcritical pointを発見しようとしたわけである。

## B 結果

5mm単位の牽引のためcritical pointを測定し得たのは5頭であったが、80%の犬に牽引中第2電位の振幅の増強(Augmentation)が見られた。100%に頂点潜時の延長が認められたが30分以内に麻痺の回復しなかった10頭の犬では頂点潜時が1 msec.以上の遅延と50%以上の振幅の減少が認められた。

損傷程度が可逆的範囲内にあった5頭のmicroangiogram所見では脊髄白質、灰白質内での出血巣は全く無かった。又病理組織学的所見ではスポンジ様変性と多数の亀裂が認められたが出血巣は認められなかった。

## C 考按

牽引距離の絶対値は犬の個体差、手術手技上から必ずしも脊髄への牽引距離とはならないので動物相互間での絶対値による比較は妥当ではない。しかし全体的傾向として牽引を増すと共に先づ潜時の遅延が生じ次いで第2電位の振幅が増加する時期がある。臨床的には麻痺は認めない。病理組織学的には既に軽いスポンジ変性様所見を認めるが出血は認めない。phase 2であり脊髄内でのischemiaの始まりを示唆している。更に牽引を増量させると、両電位の潜時は著明に遅延し、振幅は50%以上の低下を数分以内に生じる(図1)。wake up testでは完全麻痺を示す。組織病理学的所見ではスポンジ変性様変化、亀裂を示し、血管は周囲組織から剥離され遊離しているが出血巣は無い。(図2、3)

# Correlation between Efferent SEAP and Paraplegia

## Associated with Distraction to the Spinal Cord in a Dog

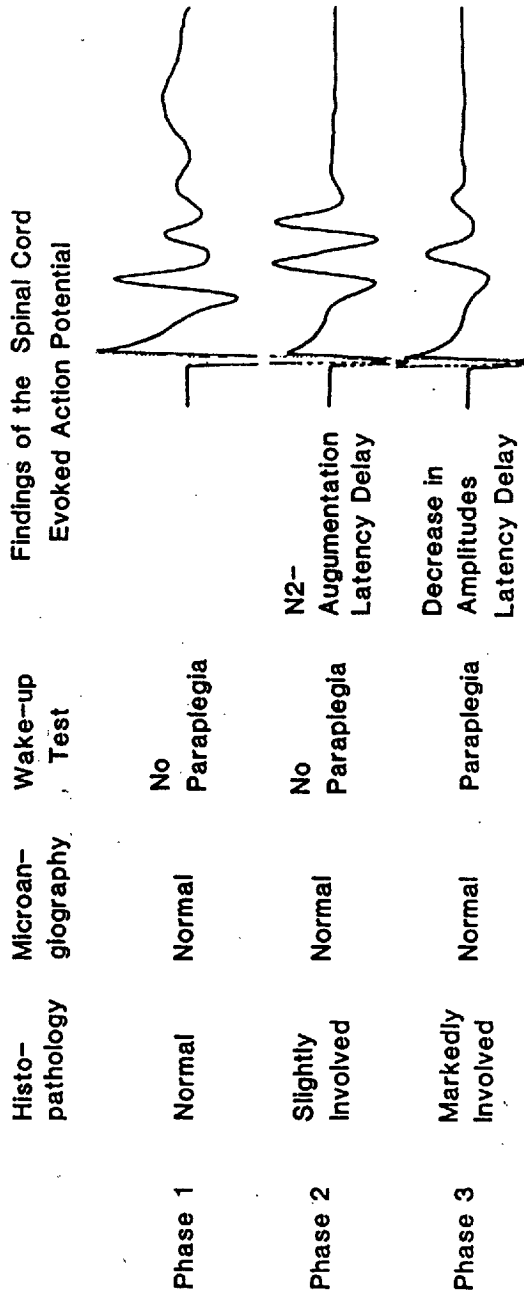


図1 非可逆性麻痺へと移行するCritical PointはPhase 3の両電位の低下を指標とする。

## WAVE-FORM CHANGES

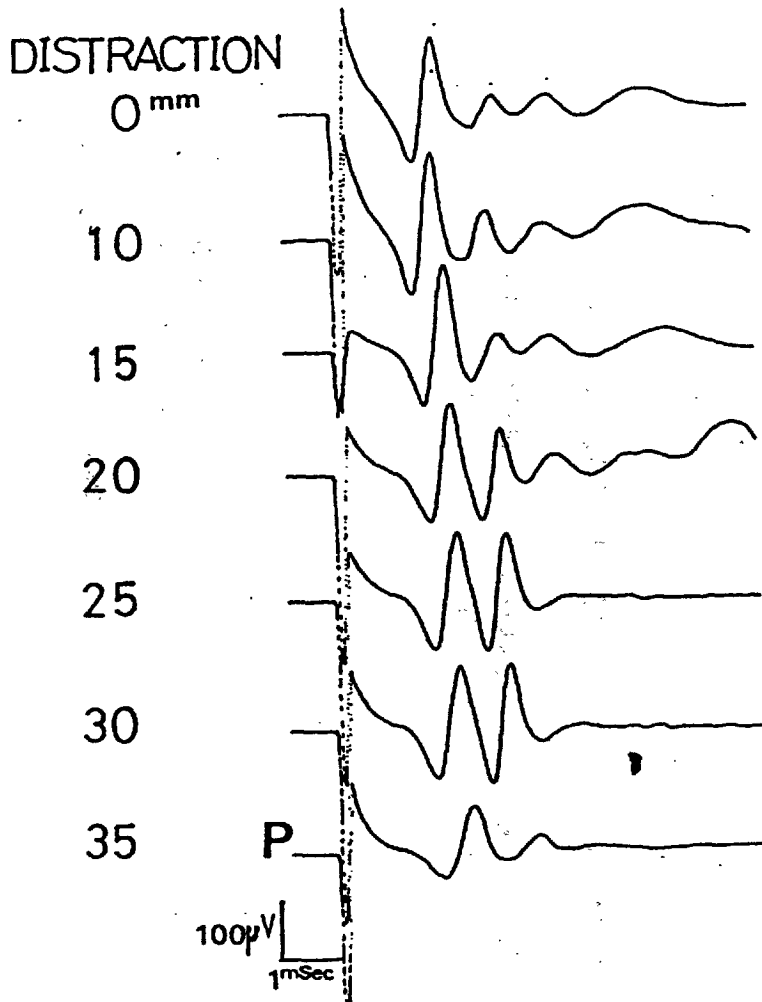


図2 1単位ずつの牽引を加えていった時のSEAPの変化を示す  
 4単位(20mm)牽引で第2電位の上昇がはじまり6単位  
 (30mm)で最大となる。ここまでは麻痺はない。7単位に  
 して1分で両電位の振幅低下、数分で平坦化した。

# TRANSVERSE SECTION AT L1/L2

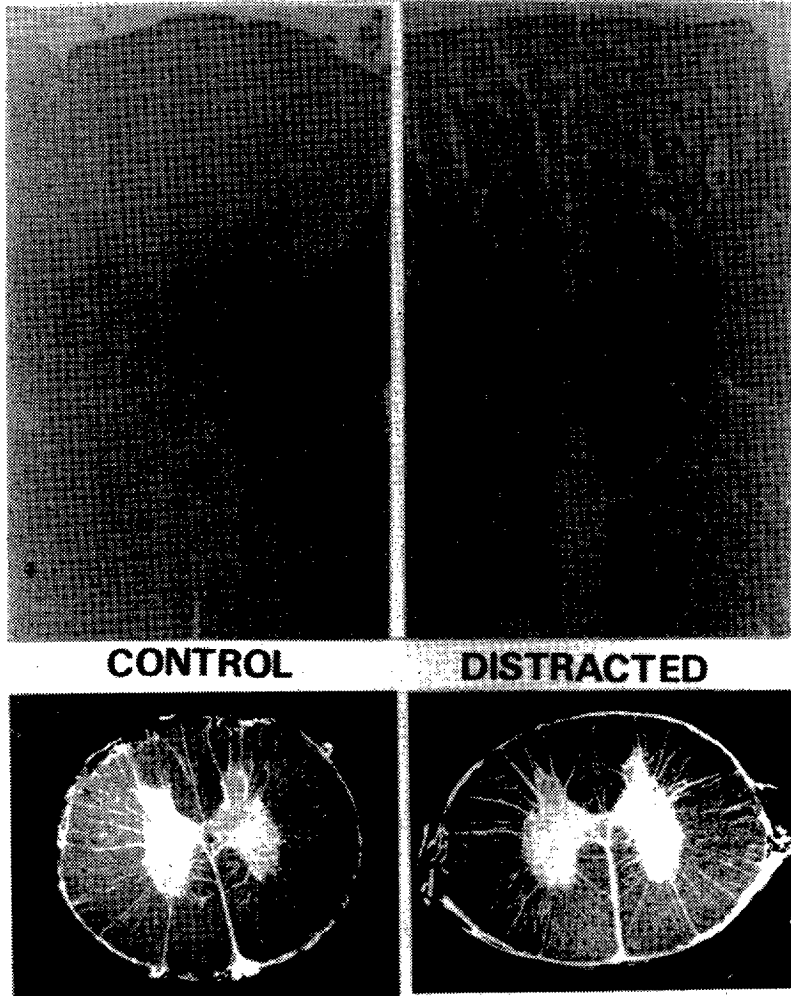


図3 最も牽引力のかかっているL<sub>1</sub>/2間の組織病理学的所見(上段)とMicroangiogram(下段)の所見である。

以上の事から本実験で行った程度の牽引力で生じる麻痺の原因は出血ではなく虚血が主体であろうと推察される。

## D 結語

要約すると脊髄に牽引力が加わり ischemia が起り始めると先づ第2電位が上昇し、更に強

く牽引すると第1, 第2電共に振幅を減じ始めるが, 直ちに牽引を緩めると電位は元に戻り麻痺はない。しかし振幅が低下しても10分間牽引を維持すると振幅は50%を割り遂には電位の消失となり非可逆性麻痺を呈するに到る。可逆性から非可逆性麻痺へ移行するCritical pointは両電位の低下していく数分間にあると推察され, 電位の低下率は50%を指標にしてよいと考える。

### C 脊髄誘発電位の臨床応用

#### 1. 脊髄, 脊髄手術における脊髄機能モニタ

脊髄モニターの条件は検査自体の危険性が無く, 一定の条件下で安定した結果が連続的に得られ, しかも経済的であることがあげられる。

全身麻酔下で行われる手術中に起る脊髄障害は術中脊髄に加えられる外力による障害である。これには変形脊柱を矯正する時に生ずる機械的圧迫と伸展があり, 早期に発見してその原因を取り除かなければ非可逆性麻痺となる。そのためには矯正後麻酔を浅くしてmotor functionを見るwake up test法があるが, 連続的にモニターする事が極めて困難で, 可逆的麻痺が非可逆的になる危険性が高い。この点を補い前掲の条件を満たす方法に電気生理学的手法による脊髄モニターが開発されつつある。電気的に不安定な手術場での測定には色々制約はあるが, 高性能な差動アンプ, 平均加算装置の使用により安定した電位が得られるようになった。現在使用されているのは末梢神経, あるいは脊髄を直接刺激して得られる脊髄誘発電位を測定する方法と末梢神経刺激により誘発脳波を測定する方法である。

変形脊柱矯正手術の場合, 術前に硬膜外に電極を挿入する事が困難なため術中に頸胸椎移行部, および胸腰椎移行部に2本のカテーテル電極を直視下で入れる。変形矯正中に電極が動く可能性が高いので以前はもう1本硬膜外に入れたり, 棘突起内へkirshner鋼線を刺入して術野を挟む2本の電極のモニター電極としていたが, 現在はroutineに四肢末梢神経幹近旁に釣針電極を入れ所属髄節脊髄誘発電位を観察しているので不要となった。

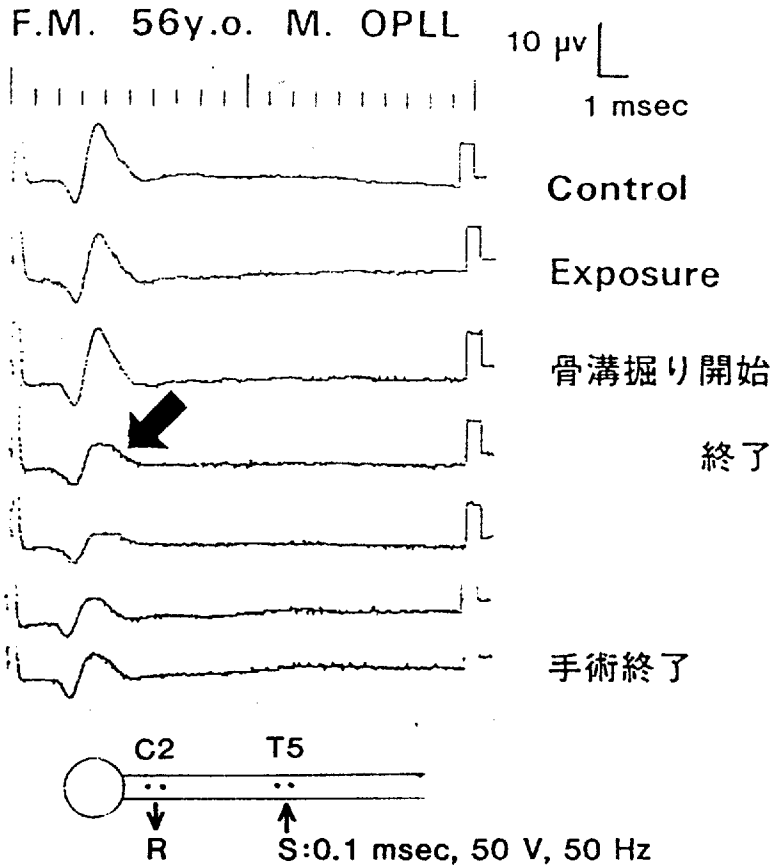
刺激条件は定電流刺激で頻度は20pps, 持続

時間は0.2 msec. 刺激の強さは第1, 第2電位の振幅を指標として上げていき肉眼上最大振幅が得られる最小の電流値とする。通常は15~30 mAで, 矯正前にコントロール波形を記録しておく。オシロスコーブ管面に上行性下向性, 伝導性, 及び刺激電極側の所属髄節脊髄誘発電位を残しておき, 矯正しはじめた時に必要に応じて1~5分間隔ぐらいで測定し第1, 第2電位の振幅, 潜時を比較した。30%の振幅の減少があれば直ちに全身状態と電極の位置移動がないかをチェックし, 他方末梢神経刺激による所属髄節脊髄誘発電位を測定しコントロール電位と比較した。振幅の減少が電極の偶発的な移動が原因でない場合にはそのまま約5分間手術を一時中止して電位が急速に減少しないかどうかを観察し減少しない時, 或は回復した時はそのまま手術を続行した。もし50%を超える減少が認められた場合には手術をそれ以上進めず振幅低下の原因を取り除かなければならない。(玉置, 黒川, 近江)。術中振幅の変化が生ずる原因として主に①脊髄に圧迫, 伸展等の外力が加わった場合, ②電極の移動, ③急激な血圧低下, ④脊髄cooling ⑤脊髄硬膜切開, 等があげられる。

これまで末梢刺激或は脊髄刺激により得られた伝導性脊髄電位の第1及び第2電位の振幅と潜時を指標とした脊髄モニタリングを70例に臨床応用した。その結果30%までの振幅減少を来たした症例が15%にあったが術後long tract signとしての麻痺増悪例は存在しなかった。50%以上の振幅の増減した例はなかった。しかし1例だけがoff conductive SEAPに殆んど変化が認められないにも拘らず一側のC<sub>5</sub> levelのみの障害を術後に発見したので所属髄節脊髄電位を併用し刺激する末梢神経を適宜選択しながら脊髄膨大部の手術を行っている。

症例 参考のため, 他の報告を含め二三の症例を紹介する。

症例 1

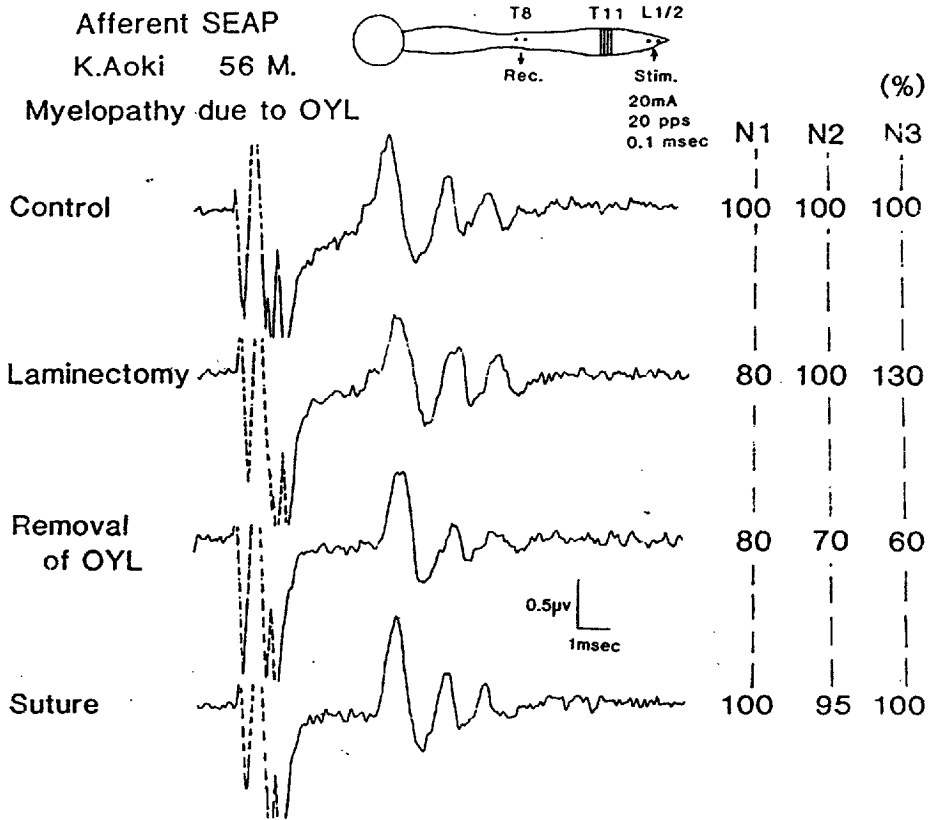


56歳男性，C<sub>2</sub> からC<sub>5</sub> に至る分節性 OPLL による頸髄症でC<sub>3</sub> 以下の不全麻痺を呈した。刺激はT<sub>5</sub>，記録はC<sub>2</sub> 硬膜外腔での SEAP を測定した。脊椎管拡大術による後方除圧をするべく骨溝掘り最中に電位が60%低下したが電極の移動によるものと考え手術を終

了した。終了時の振幅はコントロールの50%であった。術後 tetraplegia を呈したが現在はほぼ術前の状態に戻った。(上向きが陰性)  
(弘前大整形外科 近江先生の御好意により 転載)



症例 2

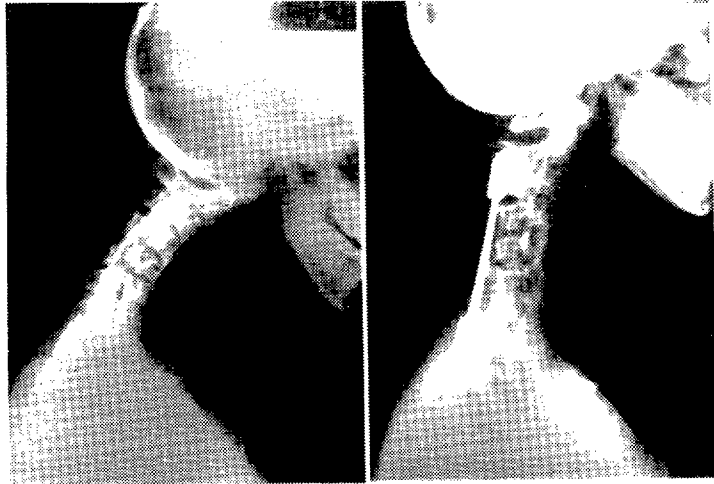


56歳男。T<sub>10</sub>/T<sub>12</sub> OYLによる胸髄症で T<sub>11</sub>, T<sub>12</sub> の椎弓切除を行った時の術中モニタリングである。OYL切除時に第1. 2. 3電位

が各々20, 30, 40%減少したが15分後に電位の回復が得られた。術後、麻痺の増悪はない。

(著者らの自験例) 上向きが陰性

症例 3



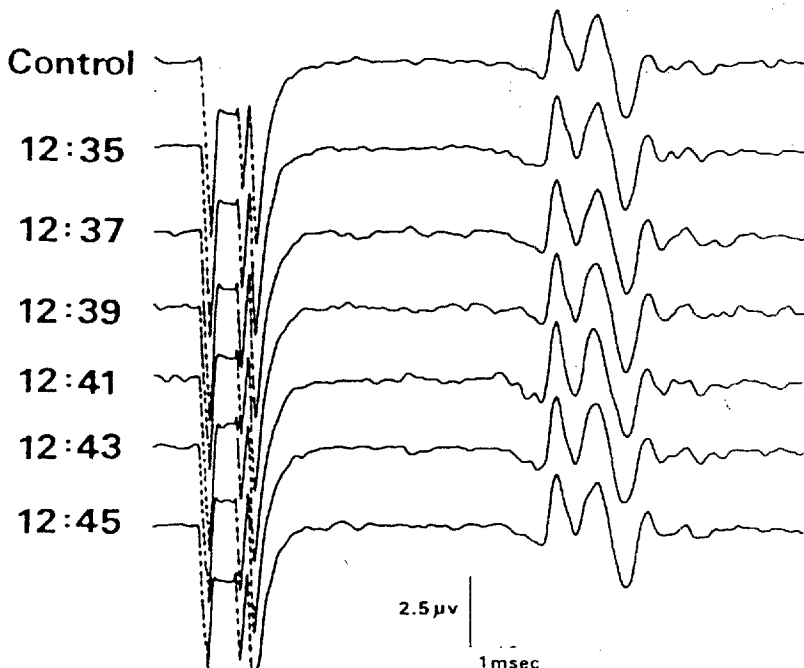
Preop.

Postop.

N.Y. 20 F.

Monitoring in Every Two Minutes during  
Correction of Kyphosis after Circumfer. Ost.

N.Y. 20 F. Stim. rt med. n.  
Record C<sub>2</sub> epidural



20 歳女，頸椎後彎症。前方後方同時侵入による circumferential osteotomy を行い後彎

を矯正した症例。内固定は両側の facet に hook をかけ compression rod を装着した。後彎矯正時には2分間隔で上向き伝導性SEAPを測定した。刺激は右正中神経、記録はC<sub>2</sub> 硬膜外腔で行った。上向きが陰性（著者らの自験例）SEAP に全く異常はみられず麻痺の発生も起っていない。

#### D 脊髄誘発電位と今後の展望

以上、臨床経験及び動物実験をとうして、述べた点は脊髄誘発電位の早期成分をモニターする事により神経根を含めた脊髄の機能障害を脊髄に何ら侵襲なしに、かなりの程度推定可能になったという事である。つまり、脊椎脊髄手術中に偶発する脊髄障害は早期に発見し、その原因を取除かなければ非可逆的麻痺に移行し、医師も患者も不幸になるわけである。その予防には術中に麻酔を浅くし運動機能を check する wake up test があるが、くり返し実施する事が困難であり、更に麻痺を生じない程度の軽い脊髄障害を発見出来ない欠点があった。

動物実験からも判るように非可逆性脊髄麻痺に至る前に critical point があり、この時点では麻痺が無いものの、病理組織学的検査ですでに明瞭な障害を、白質、灰白質に認めこの状態を5 min 以上続けると事実上麻痺が発

生する。これが phase 2 でありSEAP では第2電位が上昇する時点である。この事は、易損性の高い脊髄の慢性障害 — 例えば先天性脊髄障害や脊椎靭帯骨化によるミエロパナーの手術ではこの様な急性脊髄損傷の危険性と背中合わせになっていると言えよう。

第1電位の振幅が、30%減少した時が critical point であるが臨床例では振幅の増減が30%は通常あることでこの程度では手術の麻痺は1例も経験していない。電圧では50%の電位の減少が術後麻痺の critical point であるというのが一般的である。SEAPによる脊髄モニターを行なっているには拘らず術後の麻痺発生の報告が報告されているが — これらの症例を登録し、Data を集め分析する事により本法の欠点を補うべき今後の道が開けてくるものと考え。いつれにしろ脊髄全体の機能のごく一部をかい間みているに過ぎないSEAPの検査は non invasive であり、かつ stable potential が得られる所から将来は更に広く行われる検査法になっていくであろう。



## 検索用テキスト OCR(光学的文字認識)ソフト使用

論文の一部ですが、認識率の関係で誤字が含まれる場合があります



### A 目的

近年手術手技及び器機の改善にともない、脊椎、脊髄手術が広く行なわれるようになったが術後に脊髄麻痺を発見しその治療に苦慮する症例の報告が跡を絶たない。そこで脊椎、脊髄手術時に危険状態を客観的に予知(脊髄損傷をごく初期の中にその原因を除去する目的で脊髄モニタリング法の研究を行った。欧米では Neurolept analgesia 下で術中に覚醒させ運動麻痺をチェックする wake up test 法が行われ麻痺の予防を試みているが、連続的に脊髄機能をモニター出来ぬ点、脊髄麻痺を初期の中に発見防止困難な点等の欠陥がありこれに代る方法として脊髄誘発電位を測定分析する事により脊髄機能障害を客観的、連続的にモニターする方法を採用した。

脊髄誘発電位(Spinal Cord Evoked Action Potential 以後 SEAP と略す)は末梢神経刺激によりその神経の所属髄節から記録される所属髄節脊髄誘発電位(Segmental SEAP)と脊髄硬膜内腔或は硬膜外腔から直接脊髄を刺激し刺激部位から遠位で記録される伝導性脊髄誘発電位(Conductive SEAP)の2つに大別する事が出来を更に前者は所属髄節を超えてより頭側の髄節から伝導性 SEAP を記録出来る。後者は刺激部位から頭側で記録する上行性 SEAP(Afferent Conductive SEAP)と刺激部より尾側から記録する下行性 SEAP(Efferent Conductive SEAP)とに分類することが出来る。所属髄節 SEAP と伝導性 SEAP とは後述するようにその起源と伝導路を異にし、この 2 つの脊髄誘発電位を適宜組合せて測定することにより脊髄機能障害を推定し得る。臨床応用として脊椎・脊髄手術時の脊髄機能モニタリングの他に脊髄損傷の予後判定、Myelopathy を起している責任病巣のレベル決定、Cervical Myelopathy の診断などがあげられる。