

ギー効率の改善¹⁰⁾，冠循環における血管内皮機能の改善¹¹⁾などが考えられるが，不明なところも多い．最近，筆者らは，迷走神経の末端から放出されるアセチルコリンが心筋細胞に与える影響について調べたところ，アセチルコリンがムスカリン受容体を介して，低酸素誘導因子 HIF-1 α の発現を促進し，不全心でみられるアポトーシスを防止する可能性があることを報告した¹²⁾．また，末期心不全における致死性不整脈との関連が示唆されているギャップ結合の機能低下を迷走神経刺激が防止する可能性があることを示した¹³⁾．おもしろいことに，これらの迷走神経あるいはアセチルコリンの心筋細胞に与える効果は，徐脈効果とは独立した機序である可能性がある．

脊髄交感神経刺激による術中血圧の自動制御

動脈圧受容器反射は短期血圧調節にきわめて重要な役割を果たしているが^{14,15)}，多くの麻酔薬が

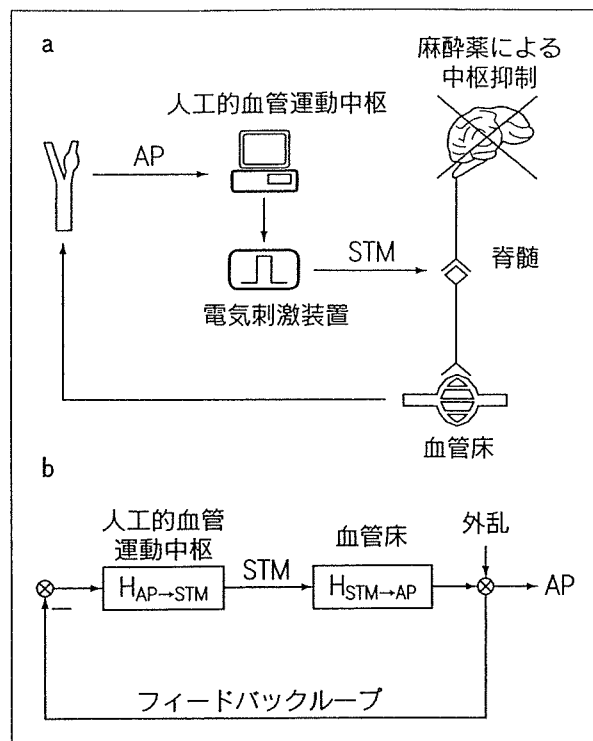


図3 バイオニック圧反射装置
バイオニック圧反射装置の概要 (a) とブロック線図 (b)．
AP と STM はそれぞれ血圧と電気刺激を示す．

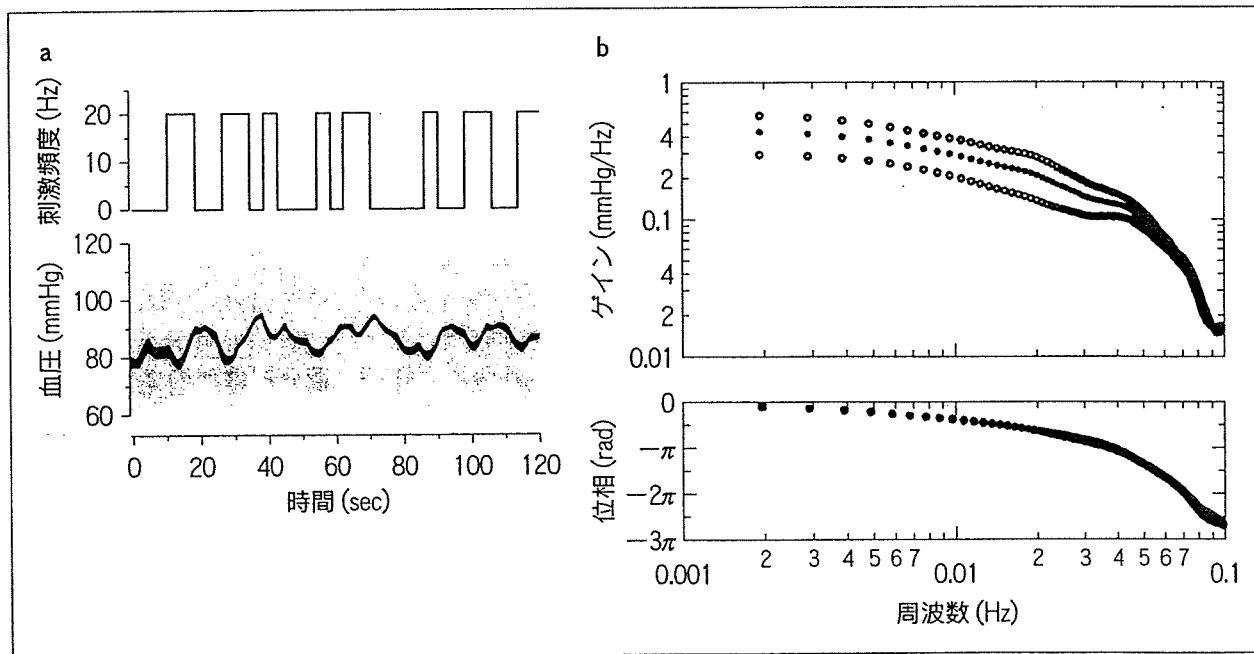


図4 脊髄交感神経の不規則刺激の例と伝達関数

- a: 不規則な電気刺激に対する血圧の応答は緩徐である．
- b: 電気刺激に対する血圧応答に関する伝達関数 ($n=12$)．伝達関数により刺激に対する動脈圧応答が定量的に推定可能になる．数値は平均(●)±標準偏差(○)で示している．

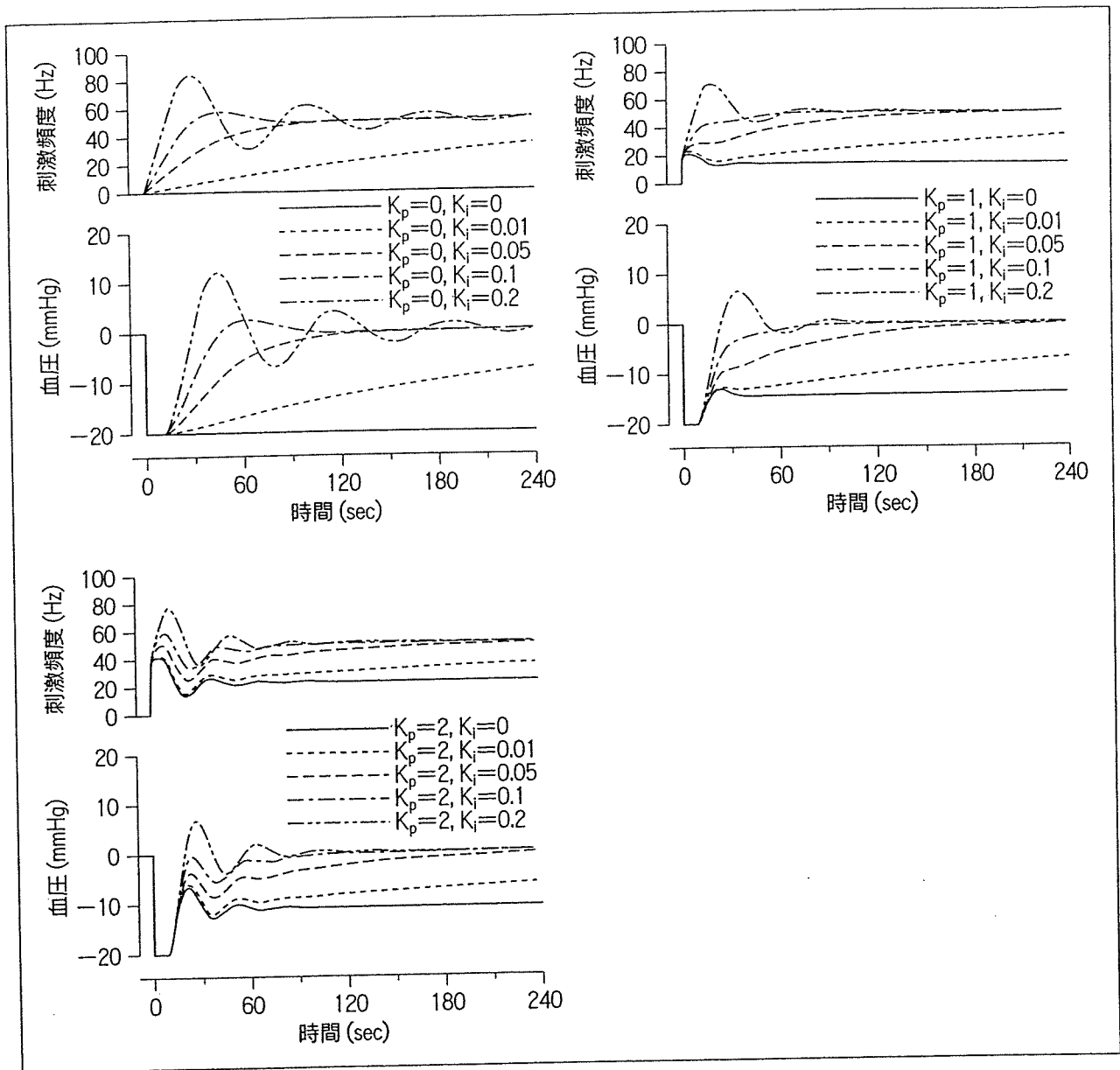


図5 数値シミュレーションによる人工的血管運動中枢の補償係数パラメータの決定
 K_p と K_i はそれぞれ、比例補償係数と積分補償係数を示す。

この機能を抑制するため^{16,17}，少量の出血などでも予期せぬ血圧低下をきたすことがある^{18,19}。そこで，図3のように，圧センサー→コンピュータ→電気刺激装置→硬膜外カテーテル電極を用いたバイオンック圧反射装置 (bionic baroreflex system: BBS) を用いて，血圧の自動制御を試みた。

1. 動作原理の開発戦略

サーボコントロールの原理を応用してBBSを試作した。サーボコントローラの動作原理として

は，いわゆる，比例・積分補償型のネガティブフィードバックを採用した²⁰。被制御変数である瞬時血圧 $AP(f)$ の標的血圧 $AP_t(f)$ からの偏差，すなわち，制御誤差 $E(f)$ は， $E(f) = AP_t(f) - AP(f)$ と表される。 $E(f)$ から脊髄交感神経刺激 $STM(f)$ までの伝達関数 $H_1(f)$ は，比例補償係数 K_p と積分補償係数 K_i および Laplace 演算子 $s = 2\pi f j$ を用いると次のように表される。

$$H_1(f) = K_p \frac{K_i}{s}$$

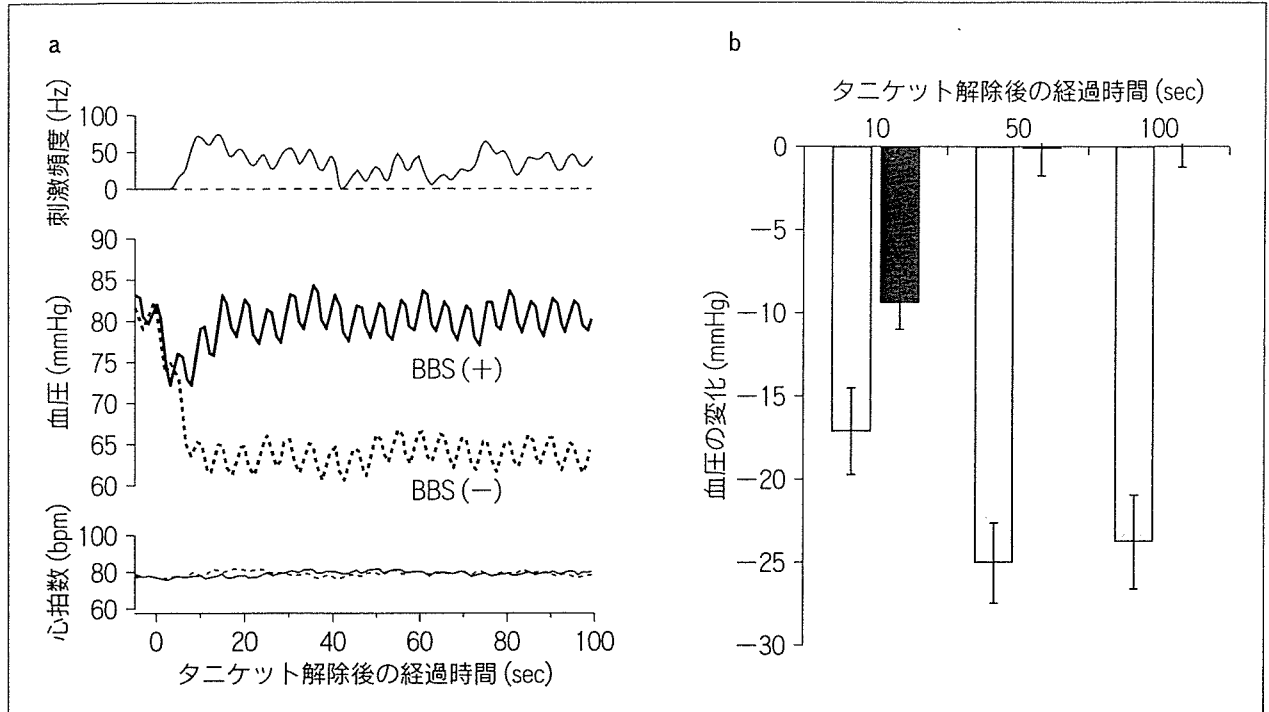


図6 バイオニック圧反射装置を用いた術中血圧制御

a: 典型例.

b: 21例におけるBBSの有効性に関する評価. BBS未使用の場合(□)とBBS使用の場合(■). 数値は平均±標準偏差である.

また、脊髄交感神経刺激に対する血圧の応答特性を示す伝達関数を $H_2(f)$ とすると、被制御変数は次のように表される。

$$AP(f) = \frac{H_1(f)H_2(f)}{1+H_1(f)H_2(f)} AP_i(f) + \frac{1}{1+H_1(f)H_2(f)} AP_d(f)$$

ここで、 $AP_d(f)$ は、サーボコントロールシステムに加わる外乱である。上の式から明らかなように、外乱の影響は、 $1/(1+H_1(f)H_2(f))$ に抑制されることがわかる。

したがって、外乱に抗して血圧の安定化を図るためには、 $H_1(f)$ の最適設計が必要である。そこで、まず、計測可能な $H_2(f)$ を次項のような方法で求め、ついで、数値シミュレーションにより $H_1(f)$ の係数 K_p および K_i を最適になるように設計した。

2. サーボコントローラの設計

頸椎手術症例で、術中に脊髄誘発電位検査を施行予定の患者を対象にした。吸入麻酔薬による全身麻酔の導入後、経皮的に硬膜外カテーテル電極を挿入し、第9ないし第12胸椎レベルに電極を留置した。ついで刺激パルスのパラメータをパルス幅0.1ミリ秒、刺激頻度20 Hzに設定した。刺激強度は、この刺激パルスにより平均動脈圧がおおむね10 mmHgだけ上昇する電流値に調整した。筋弛緩薬投与下で、電気刺激装置に白色雑音様の不規則なトリガー信号を入力しながら、動脈圧の変動を15分間記録した。刺激パルスの頻度は、0か20 Hzかのいずれかになるように8秒間隔ごとに不規則に切り替えた。不規則刺激中の血圧応答の例を図4aに、また推定された伝達関数 $H_2(f)$ を図4bに示す。ついで、12例で求めた平均的 $H_2(f)$ を用いて、ステップ状の血圧低下 (-20 mmHg) に対する血圧サーボシステムの振る舞いを比例補償係数 $K_p=0, 1, 2$ 、積分補償係数 $K_i=0, 0.01$,

0.05, 0.1, 0.2の組み合わせでシミュレーションした。その結果, $K_p=1$, $K_i=0.1$ の場合にもっとも迅速かつ安定的に血圧低下が防止されることが明らかとなった(図5)。そこで, $K_p=1$, $K_i=0.1$ として人工的血管運動中枢をプログラムした。

3. BBSの有効性の検証

膝の人工関節置換術時に大腿に巻かれたタニケット(圧迫止血帯)の解除に伴う血圧低下を外乱とみなし, BBSの有効性を検証した。その結果, 図6に示すように, BBSを用いることにより迅速で安全な自動血圧管理が可能であることが明らかになった³⁾。

ま と め

神経インターフェイス技法に基づいたバイオニック療法が, 慢性心不全に対する画期的な治療戦略となりうることを示す基礎研究結果, およびバイオニック圧反射装置により術中血圧を自動管理しうることを示唆する臨床研究結果を得ることができた。積極的に循環調節の破綻を是正したり, 機能を再建することにより循環器疾患を治療するというバイオニック戦略の今後の展開に期待したい。

文 献

- 1) Sato T, Kawada T, Sugimachi M et al: Bionic technology revitalizes native baroreflex function in rats with baroreflex failure. *Circulation* 2002; **106**: 730-734
- 2) Li M, Zheng C, Sato T et al: Vagal nerve stimulation markedly improves long-term survival after chronic heart failure in rats. *Circulation* 2004; **109**: 120-124
- 3) Yamasaki F, Ushida T, Yokoyama T et al: Artificial baroreflex: clinical application of a bionic baroreflex system. *Circulation* 2006; in press
- 4) Pfeffer MA: Left ventricular remodeling after acute myocardial infarction. *Annu Rev Med* 1995; **46**: 455-466
- 5) Cerati D, Schwartz PJ: Single cardiac vagal fiber activity, acute myocardial ischemia, and risk for sudden death. *Circ Res* 1991; **69**: 1389-1401
- 6) Schwartz PJ, La Rovere MT, Vanoli E: Autonomic nervous system and sudden cardiac death. Experimental basis and clinical observations for post-myocardial infarction risk stratification. *Circulation* 1992; **85**(Suppl I): I-77-I-91
- 7) La Rovere MT, Bigger JT Jr, Marcus FI et al: Baroreflex sensitivity and heart-rate variability in prediction of total cardiac mortality after myocardial infarction. *Lancet* 1998; **351**: 478-484
- 8) Lechat P, Hulot JS, Escolano S et al: Heart rate and cardiac rhythm relationships with bisoprolol benefit in chronic heart failure in CIBIS II trial. *Circulation* 2001; **103**: 1428-1433
- 9) Pfeffer MA, Pfeffer JM, Steinberg C et al: Survival after an experimental myocardial infarction: beneficial effects of long-term therapy with captopril. *Circulation* 1985; **72**: 406-412
- 10) Burkoff D, Sagawa K: Ventricular efficiency predicted by an analytic model. *Am J Physiol* 1986; **250**: R1021-R1027
- 11) Zhao G, Shen W, Xu X et al: Selective impairment of vagally mediated nitric oxide-dependent coronary vasodilation in conscious dogs after pacing-induced heart failure. *Circulation* 1995; **91**: 2655-2663
- 12) Kakinuma Y, Ando M, Kuwabara M et al: Acetylcholine from vagal stimulation protects cardiomyocytes against ischemia and hypoxia involving additive non-hypoxic induction of HIF-1 α . *FEBS Lett* 2005; **579**: 2111-2118
- 13) Ando M, Katare RG, Kakinuma Y et al: Efferent vagal nerve stimulation protects heart against ischemia-induced arrhythmias by preserving connexin 43 protein. *Circulation* 2005; **112**: 164-170
- 14) Sato T, Kawada T, Inagaki M et al: New analytic framework for understanding sympathetic baroreflex control of arterial pressure. *Am J Physiol* 1999; **276**: H2251-H2261
- 15) Sato T, Kawada T, Shishido T et al: Novel therapeutic strategy against central baroreflex failure: a bionic baroreflex system. *Circulation* 1999; **100**: 299-304
- 16) Tanaka M, Nishikawa T: Arterial baroreflex function in humans anaesthetized with sevoflurane. *Br J Anaesth* 1999; **82**: 350-354
- 17) Keyl C, Schneider A, Hobbhahn J et al: Sinusoidal neck suction for evaluation of baroreflex sensitivity during desflurane and sevoflurane anesthesia. *Anesth Analg* 2002; **95**: 1629-1636
- 18) Tarkkila PJ, Kauknen S: Complications during spinal anesthesia: a prospective study. *Reg Anesth* 1991; **16**: 101-106

- 19) Kahn RL, Marino V, Urquhart B et al: Hemodynamic changes associated with tourniquet use under epidural anesthesia for total knee arthroplasty. *Reg Anesth* 1992; 17: 228-232
- 20) Kawada K, Sunagawa G, Takaki H et al: Development of a servo-controller of heart rate using a treadmill. *Jpn Circ J* 1999; 63: 945-950

脊髄誘発電位を用いた頸髄障害の高位診断^{*1}

池本 竜則^{*2} 牛田 享宏^{*3} 谷口慎一郎^{*3}
井上 真輔^{*3} 谷 俊一^{*3}

はじめに

圧迫性頸髄症は、感覚・運動系のさまざまな症状をもとに、画像上における脊髄の圧迫を根拠として診断されているが、その症状の重症度は必ずしも個々の脊髄圧迫の強さに比例しないことが知られている。このような頸髄症の背景には単なる脊髄の圧迫ではなく、脊髄内の神経細胞体や索路に障害が生じており、そのニューロンの機能障害が症状の重症度に関与しているためであると考えられる。電気生理学的検査の一つである脊髄誘発電位 (spinal cord evoked potential ; SCEP) は、脊髄神経線維の伝導ブロックを同定することができる検査法であり、この伝導ブロックの病態の解明が頸髄症の病態の推察につながるものと考えられる。本稿では、脊髄誘発電位の解釈を computer simulation の結果をもとに概説したうえで、実際の頸髄症手術症例に対し、それぞれ感覚路および運動路のモニターと考えられる上行性および下行

性脊髄誘発電位を術中に記録し、その伝導ブロックの有無やその程度と臨床症状の関係を調査し、それらの電位の起源と脊髄横断面から頸髄症の病態を考察した。

脊髄誘発電位の種類と伝導ブロック

① 上行性脊髄誘発電位 (ascending spinal cord evoked potential ; A-SCEP)

A-SCEP には末梢神経刺激-脊髄記録と脊髄刺激-脊髄記録があり、われわれの施設では主に後者の方法に近く、脊髄円錐部または馬尾刺激を行い、頸椎椎間レベルで上行性の波形を記録することにより、その伝導ブロックを同定している。基本波形は通常2つの陰性棘波として記録され、潜時の早い第1電位は脊髄後側索浅部、遅いほうの第2電位は主に後索を伝導する電位であると考えられている。ただし、刺激強度を非常に強めた場合は、これらの索路以外の線維に由来する波形が含まれることも知られている^{2,9)}。

② 下行性脊髄誘発電位 (descending spinal cord evoked potential ; D-SCEP)

D-SCEP には大脳刺激-脊髄記録によるものと脊髄刺激-脊髄記録があるが、われわれの施設では、経頭蓋的に高電圧電気刺激を行い、頸椎椎間

Key words

圧迫性頸髄症 (compressive-cervical myelopathy)
脊髄誘発電位 (spinal cord evoked potential)
コンピュータシミュレーション
(computer simulation)

*1 Electrophysiological Diagnosis of Compressive Cervical Myelopathy with Spinal Cord evoked Potential

*2 高知大学大学院医学系研究科博士課程神経科学系専攻 [〒780-8520 高知市曙町二丁目5-1]/Tatsunori IKEMOTO : Department of Orthopaedics, Kochi Medical School, Kochi University

*3 高知大学医学部生体機能・感染制御学講座運動機能学教室/Takahiro USHIDA, Shinichirou TANIGUCHI, Shinsuke INOUE, Toshikazu TANI

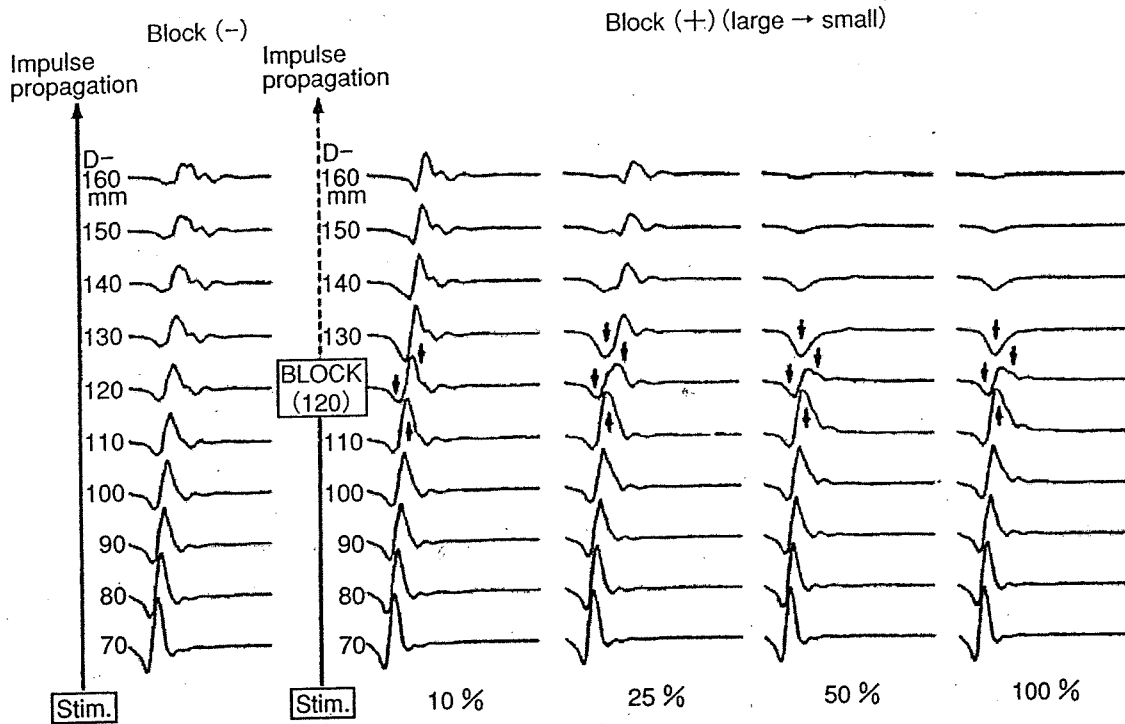


図1 Computer simulation of A-SCEP⁹⁾
 脊髓小脳路の線維を large fiber から遮断して、block 点を基準に波形を記録。

レベルでの記録により D-SCEP を施行している。刺激部位は脳皮質運動野付近の頭蓋から行っているが、記録される電位起源についてはその伝導速度から皮質脊髄路以外にも錐体外路系が含まれることが示唆されている³⁻⁷⁾。

③ Computer simulation による伝導ブロックの波形解析⁹⁾

Solid angle approximation theory に基づき、単一の神経インパルスによって生じる電位を computer simulation し、さらにその電位を背側脊髓小脳路の線維径の分布に従って summation することで、脊髓刺激-脊髓記録による SCEP の第一電位を computer simulation した (図 1, 2)。

大径線維から順次、伝導遮断を行っていくと (図 1)、10% 程度の伝導遮断では、遮断直前の波形において初期陰性電位の振幅増大 (augmentation) がみられ、遮断部位においては遮断直前のものと比較して初期陽性電位が大きくなり、陰性電位の低下がみられる (図 1 中矢印参照)。さらに大径線維を 50% 伝導遮断すると、波形変化はより顕著となり、遮断直前の波形で初期陰性電位の振幅増大と、

遮断部位における初期陽性電位の増大、陰性電位の低下がみられ、遮断部位より遠位では killed-end potential (陰性電位の消失) を認めるようになる。この computer simulation からは、陰性電位の消失が伝導遮断部位を特定するのではなく、伝搬していく波形の初期陽性電位と初期陰性電位に注目すると、遮断部位においては遮断部位直前の波形と比較して、初期陽性電位の増大と、初期陰性電位の低下が生じており、この波形変化部位が伝導遮断部位であると理解される。

また、小径線維から伝導遮断を行っていくと (図 2)、0% から約 60% の伝導遮断では明らかな波形変化はないが、75% になると伝導遮断部位より遠位での陰性電位および終末期陽性相の振幅増大がみられている。さらに伝導遮断される線維の数が 85% を超えると陰性電位は急速に減少し、killed-end potential のような波形となってくるものの、98% 遮断でも伝導遮断部位から少し遠位の地点で再び陰性電位が認められている。さらに 100% 遮断ではそれらの陰性電位は消失し、killed-end potential が認められている。

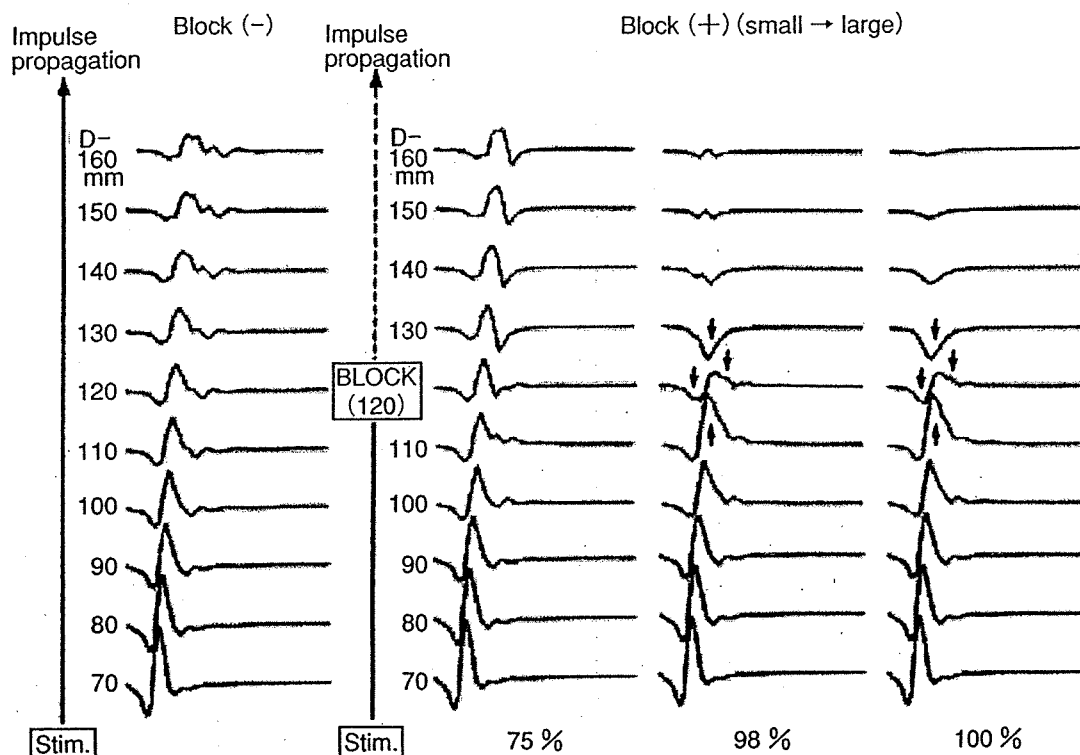


図 2 Computer simulation of A-SCEP⁹⁾
 脊髓小脳路の線維を small fiber から遮断して、block 点を基準に波形を記録。

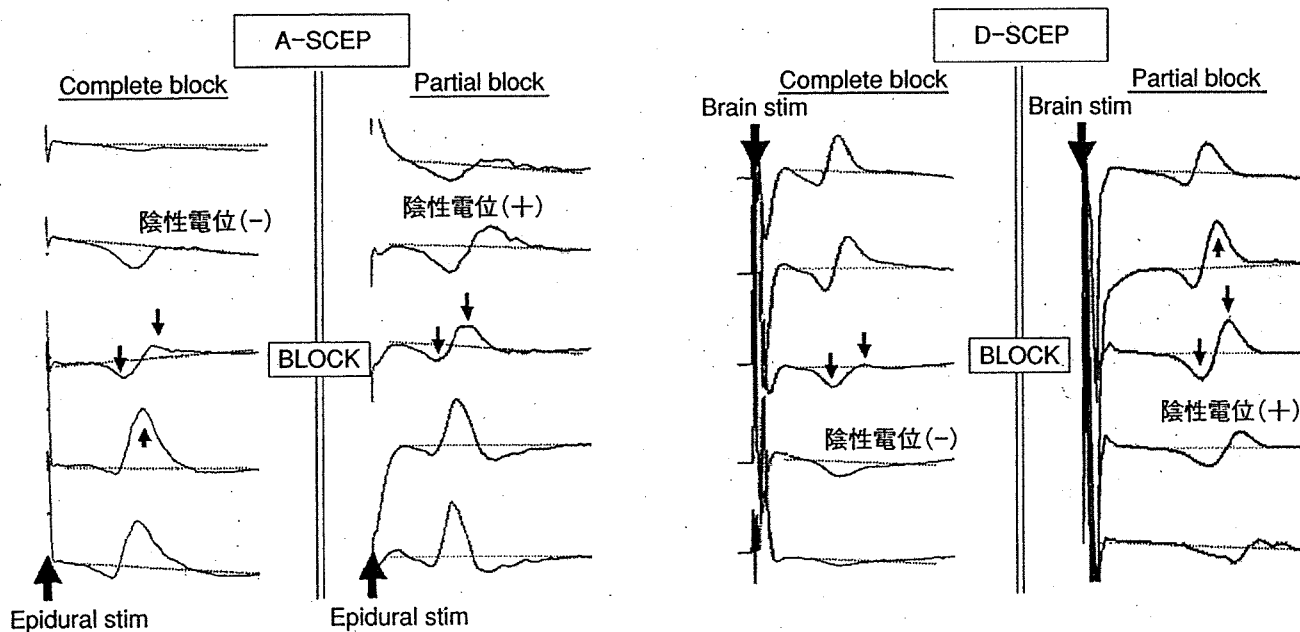


図 3 A-SCEP および D-SCEP の伝導ブロックの判定基準

4 頸髄症における伝導ブロックの波形解析

Computer simulation の波形解析の結果から、伝導ブロックの判定は、A-SCEP の場合も D-SCEP の場合も、伝導ブロック部位における陽性電位の増大を伴う陰性電位の低下を基準とした。

またその 1 椎間刺激側で記録された陰性電位の増大も参考に判定した。さらに誘発電位の波形の種類について、ブロック部位を通過した後、陰性電位が残存しているものを partial block、陰性電位が消失しているものを complete block と判定し

た。これは、電位に反映される脊髄神経線維が部分的に遮断されたという意味や、完全に遮断されているという意味ではなく、神経線維の遮断率が異なることにより、遮断部位より遠位の陰性電位がどう変化しているかについて便宜的に用語を定義したものである (図 3)。

頸髄症症例における脊髄誘発電位と伝導ブロックの関係

2002年から2005年までに施行された頸髄症手術症例のうち、術中SCEP検査にて伝導ブロックと判定された63例を対象とした。これらの症例のうち、2003年まではA-SCEPのみを記録していたが、2004年からはA-SCEPおよびD-SCEPを併せて記録し、それらの波形解析を行った。その波形解析と臨床所見から伝導ブロックの意義や臨床症状の関係を検討したうえで、頸髄症の病態を考察した。

1 方法

SCEPの記録は、全例、全身麻酔下での手術中に筋弛緩剤(臭化ベクロニウム:マスキュラックス®)を併用して施行した。

1. 刺激

D-SCEPでは刺激装置は高電圧刺激装置(D-185, Digitimer社製)の刺激を用い、刺激部位は、Cz(国際脳波標準電極配置10-20法)から2cm前方、5cm側方を刺激点としCork Screw電極を使用して電気刺激を行った。刺激条件は、50 μ sの矩形波、強度200~400V、頻度1Hzで、左右の刺激の極性を変え20回ずつ行った。またA-SCEPでは、カテーテル型双極電極を腰椎部または下位胸椎部の背側硬膜外腔に挿入し、100 μ sの矩形波で、40mA、20Hzで、200回刺激した。

2. 記録

Neuropack MEB 2200(日本光電社製)を用いて行った。記録の関電極は、D-SCEP、A-SCEPともに前方手術の場合は椎間板から、後方手術の場合は黄色靭帯に挿入した単極針電極を用いた。また、基準電極は単極針電極を用い、D-SCEPでは術野のできるだけ尾側皮下に置き、A-SCEPでは

関電極と同レベルの筋肉内または術野の頭側端の皮下に置いた。

2 検討項目

1. 伝導ブロック程度(Partial block vs Complete block)と臨床症状の関係

全症例のA-SCEPおよびD-SCEPの波形からpartial blockまたはcomplete blockと判定されたものの術前頸髄症JOA scoreをそれぞれ総点(17点満点)で比較検討した。

2. 各症例におけるA-SCEPとD-SCEPの伝導ブロック程度(partial block vs complete block)

A-SCEPおよびD-SCEP、両方の波形を記録した35例において、それぞれpartial blockまたはcomplete blockと判定したものの数を比較検討した。

3. A-SCEPとD-SCEPにおける伝導ブロック高位

A-SCEPおよびD-SCEP、両方の波形を記録した35症例において、多椎間の脊髄圧迫の有無にかかわらず、伝導ブロックが単一レベルに特定されるのか否かを検討した。

3 結果

1. 伝導ブロック程度(partial block vs complete block)と臨床症状の関係

A-SCEPでは、伝導ブロックと判定された63例のうち、partial blockが41例、complete blockが22例であった。これらの伝導ブロック程度から臨床症状の重症度について頸髄症JOA scoreで比較すると、partial block群では 9.36 ± 3.69 点、complete block群では 7.23 ± 3.47 点であり、complete blockと判定された症例群はpartial blockと判定された症例群に比べて有意に点数が低く($p < 0.05$, Mann-Whitney U検定)、重症度が高い傾向がみられた。またD-SCEPでは、伝導ブロックと判定された38例のうち、partial blockが22例、complete blockが18例であった。同様にこれらを頸髄症JOA scoreで比較すると、partial block群では 9.52 ± 3.51 点、complete block群では 6.86 ± 3.26 点であり、complete blockと

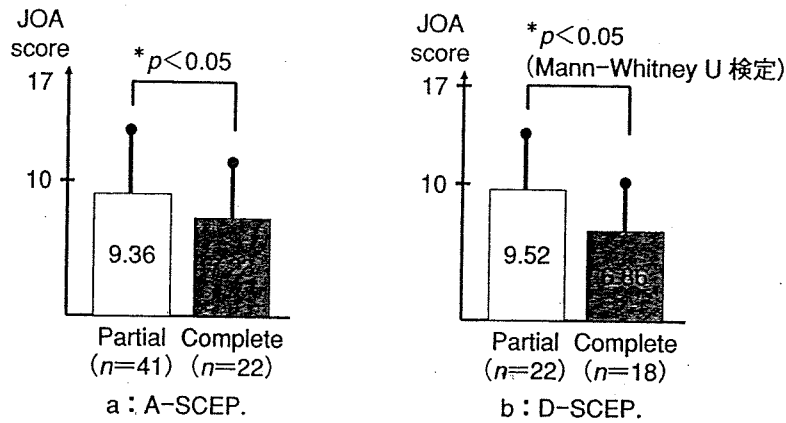


図 4 A-SCEP および D-SCEP の伝導ブロック程度と臨床症状 (JOA score) の関係

表 1 A-SCEP と D-SCEP における伝導ブロック程度 (partial block vs complete block) の比較

	D-SCEP	
	Complete block	Partial block
A-SCEP	Complete block	8
	Partial block	14
	Block (-)	3

判定された症例群において有意に点数が低く ($p < 0.05$), 重症度が高い傾向がみられた (図 4).

2. A-SCEP と D-SCEP における伝導ブロック程度 (partial block vs complete block) の比較

2004 年以降に記録した A-SCEP および D-SCEP のいずれかで伝導ブロックと判定された 38 例において, 硬膜外刺激電極の挿入困難により A-SCEP 記録不能が 3 例あり, 残りの 35 例について A-SCEP および D-SCEP の伝導ブロック程度を比較した. A-SCEP では, partial block が 23 例, complete block が 9 例であり, 伝導ブロック (-) が 3 例であった. 一方, D-SCEP では partial block が 18 例, complete block が 17 例であった. A-SCEP と D-SCEP で伝導ブロック程度に差がなかった症例は 22 例であり, とともに complete block と判定されたものが 8 例, 両方で partial block と診断されたものが 14 例であった. 一方, 両方で伝導ブロック程度に差がみられた症例は 13 例あった. 伝導ブロック程度の大きさを線維遮断率から complete block > partial block > 伝

導ブロック (-) と考えると, 線維遮断率が A-SCEP > D-SCEP は 1 例 (A-SCEP: complete block, D-SCEP: partial block が 1 例) であったのに対して, A-SCEP < D-SCEP は 12 例 (A-SCEP: partial block, D-SCEP: complete block が 9 例, A-SCEP: 伝導ブロック (-), D-SCEP: partial block が 3 例) であり, D-SCEP のほうがより遮断率の大きい伝導ブロックを示す傾向にあった (表 1).

3. A-SCEP と D-SCEP における伝導ブロック高位の比較

A-SCEP および D-SCEP, 両方の波形を記録した 35 症例において伝導ブロック高位について検討した. D-SCEP と A-SCEP は 1 症例においてのみ異なる高位で伝導ブロックを呈したが, その他の症例では, MRI 画像上に見られた多椎間の脊髄圧迫の有無にかかわらず, 伝導ブロックは単一高位のみに認められた (図 5).

SCEP からみた頸髄症の病態の考察

SCEP は, 画像検査では知りえない脊髄機能を

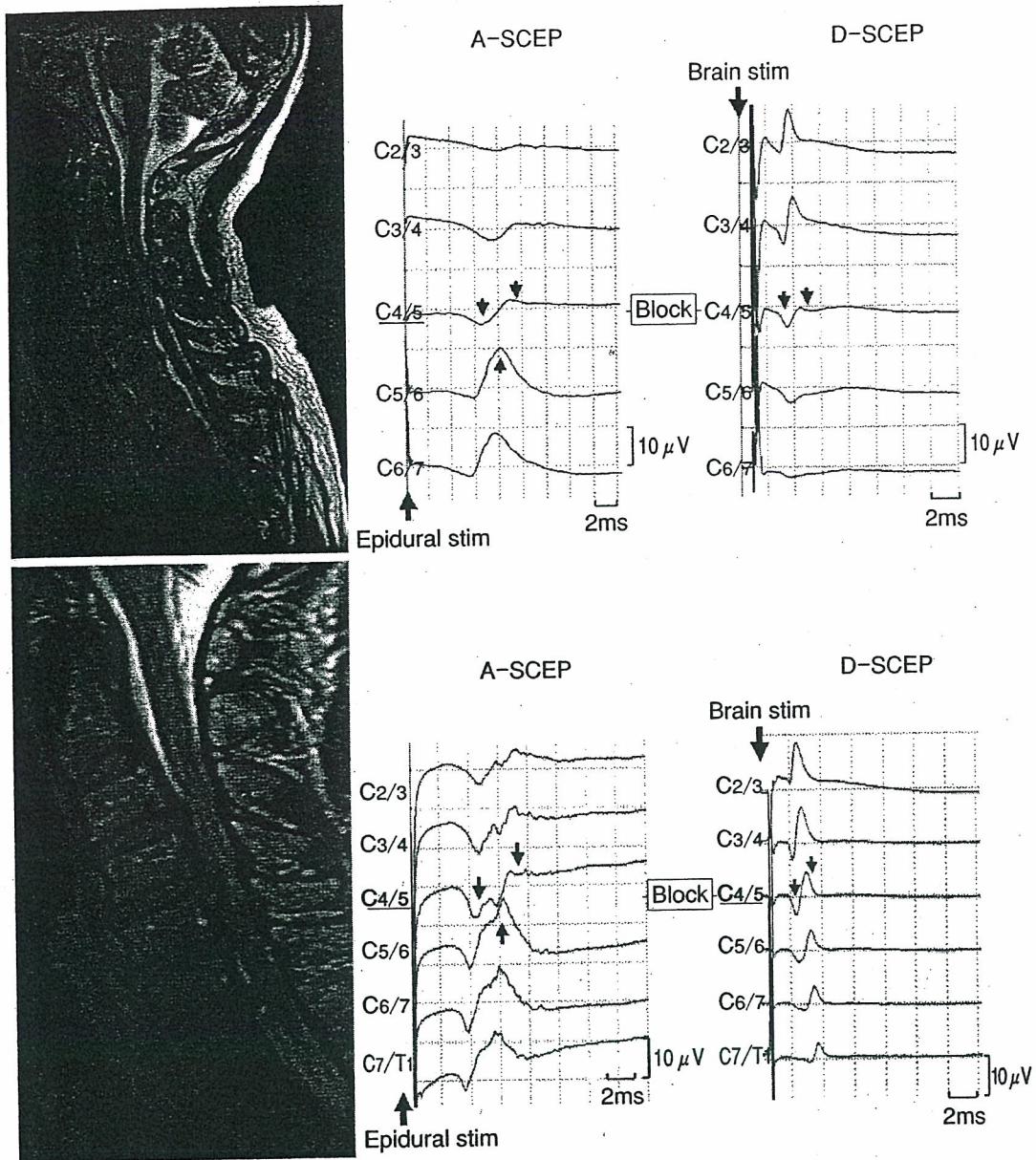


図5 A-SCEPとD-SCEPによる伝導ブロック高位の比較

a : 67歳女性. 頸椎MRI T2強調矢状断像と術中頸椎椎間板より記録したSCEP.
 b : 58歳男性. 頸椎MRI T2強調矢状断像と術中頸椎黄色靭帯より記録したSCEP.

探ることができる有用な検査法であると考えられる。まずSCEPの波形解析に関しては、初期の陽性電位・陰性電位を対象としているため、主に脊髄索路の中でも伝導速度の速い大径線維の状態を反映しているものと考えられる。このことは脊髄誘発電位のcomputer simulationを用いた波形解析の結果からみても、脊髄索路の中でも小径線維よりも大径線維の障害により、波形変化が生じやすいことで裏づけられているものと考えられ

る。またこれらの基礎的データに基づき、SCEPに反映されている線維障害数が実際に臨床症状に影響するかについて検討したところ、A-SCEPおよびD-SCEP両方の波形において、神経線維の遮断率の大きいcomplete blockのほうが、partial blockよりもJOA scoreでは有意に重症度が高くなることが示唆された。したがって、SCEPは主に脊髄内大径線維の遮断率を反映するものであり、すべての伝導性線維における伝導障害を特定

することは困難であるが、少なくとも頸髄症における神経伝導障害の病態と臨床症状の重症度を関連づける神経機能評価法として有用な検査手段であると考えられる。

一方、これまで SCEP の研究から A-SCEP の初期陰性波の起源は主として後側索や後索が、また経頭蓋高電圧刺激による D-SCEP の初期陰性波の起源は主として皮質脊髄路や錐体外路が考えられている。今回の検討では A-SCEP と D-SCEP における伝導ブロック程度 (partial block vs complete block) の比較により、どちらの電位が線維の遮断率が大きい伝導障害を呈するか調査したところ、D-SCEP のほうがより遮断率の大きい伝導障害を示す傾向にあった。このことを電位の起源と線維の易損性から考察すると、圧迫性頸髄症では、皮質脊髄路や錐体外路由来の線維のほうが後側索や後索の線維に比べ易損性が大きいことが推察される。

さらに、A-SCEP と D-SCEP から伝導ブロック高位について調査した。このような上行性および下行性の2方向からの SCEP の検査意義について考察していくと、例えば図 5a のような症例に A-SCEP 検査のみを施行した場合、仮に C3/4 で伝導障害が存在していても、C4/5 で complete block を生じているため、その波形からは C3/4 で伝導障害は診断が困難である。一方、D-SCEP を併せて行うことにより、C3/4 における明らかな伝導障害がないことが証明され、この脊髄圧迫には SCEP に反映される神経伝導障害が生じていないことが示唆される。したがって、この症例の場合、2 椎間の脊髄圧迫所見が存在するにもかかわらず、主たる神経伝導障害は C3/4 単椎間で生じており、この伝導障害が頸髄症の病態と考えられる。このように今回検討した 35 例中、1 例を除いたすべての症例で、伝導ブロックは単椎間だけに認められた。このことから、圧迫性頸髄症の大部分において、複数椎間の脊髄圧迫の有無にかかわらず、症状の責任高位はほとんどが単一椎間であると考えられた。このことは、高齢者の圧迫性頸髄症において MRI 上で多椎間に圧迫所見が認め

られても、その多くは症状の形成に直接関与していない可能性が高く、過去のわれわれの報告³⁾において、伝導ブロック部位のみ除圧固定した単椎間前方手術が広範囲椎弓形成術と比べ同等以上の成績が得られた原因ではないかと考えられる。また、このことは圧迫性頸髄症における病態の特徴の一つであるとも推察することができる。

まとめ

SCEP の解釈を computer simulation の結果をもとに概説し、その波形変化と神経線維遮断率に基づき頸髄症の病態を考察した。それぞれ上行路および下行路のモニターと考えられる A-SCEP と D-SCEP の波形解析結果から、神経線維の遮断率の大きい complete block のほうが、partial block よりも JOA score では有意に重症度が高くなる傾向にあった。また、波形に反映される線維起源から圧迫による神経線維の易損性について考察すると、皮質脊髄路や錐体外路由来の線維のほうが、後側索や後索の線維に比べ易損性が大きい可能性が推察された。さらに2方向からの波形解析の結果から、圧迫性頸髄症の大部分において複数椎間の脊髄圧迫の有無にかかわらず、症状の責任高位はほとんどが単一椎間であると考えられた。

文献 (太字番号は重要文献)

- 1) 池本竜則, 谷口慎一郎, 石田健司, 他: 多椎間圧迫性頸髄症に対する前方除圧固定術と椎弓形成術の術後成績. *中四国整形* 17: 265-269, 2005
- 2) 今井卓夫: 硬膜外腔における脊髄刺激による誘発脊髄電位について—基本波形とその意義. *日整会誌* 50: 1037-1056, 1976
- 3) 北川秀機, 高野治雄, 高桑一彦, 他: 上位頸椎手術時の motor evoked potential モニタリング. *脊椎脊髄* 6: 457-463, 1989
- 4) Levy WJ, McCaffrey M, York DH, et al: Motor evoked potentials from transcranial stimulation of the motor cortex in humans. *Neurosurgery* 15: 287-302, 1984
- 5) Merton PA, Hill DK, Moerton HD, et al: Scope of technique for electrical stimulation of human brain, spinal cord, and muscle. *Lancet* 2: 597-610, 1982
- 6) 小川 潤, 里見和彦, 福井康之, 他: 成猫の経頭蓋刺

激による下行性脊髄誘発電位について. 脊髄電気診断学 13:118-120, 1991

- 7) Patton HD, Amassian VE: Single and multi-unit analysis of cortical stage of pyramidal activation. *J Neurophysiol* 17:345-362, 1954
- 8) Satomi K, Nishimoto GI: Comparison of evoked

spinal potentials by stimulation of the sciatic nerve and the spinal cord. *Spine* 10:884-890, 1985

- 9) 牛田享宏, 谷 俊一: Solid angle approximation theoryに基づく脊髄誘発電位の computer simulation. 日整会誌 68:207-220, 1994

ご案内

第31回 日本足の外科学会

会 期 2006年6月23日(金)・24日(土)
会 場 ロイトン札幌
〒060-0001 札幌市中央区北1条西11-1 TEL 011-271-2711
会 長 門司順一(三草会クラーク病院整形外科)

プログラム

教育研修講演

- 1) Sharad Pendsey 先生: Diabetic Foot
- 2) J. E. Herzenberg 先生: Correction of Foot Deformity using External Fixation (TSF)
(日本整形外科学会教育研修単位を申請予定です)

主題

1. 先天性内反足
2. 足の外科における創外固定
3. 足底筋膜炎
4. 糖尿病足

ランチオンセミナー, モーニングセミナーを予定しております。

演題募集 主題, 一般演題を募集します。

応募方法 インターネットでのオンライン登録といたします。ホームページの演題募集からご応募ください。

<http://www.31jssf.jp>

抄録受付期間 2005年12月1日(木)~2006年2月1日(水)

お問い合わせ 〒104-8172 中央区築地1-13-1

株式会社アサツーディ・ケイ メディカル事業推進室内

第31回日本足の外科学会事務局

TEL 03-3547-2533 FAX 03-3547-2590

E-mail: n200711@adk.jp

高齢者頸椎症性脊髄症に対する 電気診断法に基づいた単椎間手術*

谷 俊一** 谷口慎一郎 牛田 享宏
池本 竜則

はじめに

高齢化の進む今日、高齢者の頸椎症性脊髄症 (cervical spondylotic myelopathy ; CSM) が急増している。CSM は、日本では非外傷性脊髄障害としては最も頻度が高く、特に高齢者では痙性四肢麻痺が容易に重症化して四肢機能が廃絶し、生活の自立を奪う。CSM は圧迫性脊髄症であるため、その診断や手術部位の決定には MRI が不可欠であるが、高齢者では症候性圧迫に混じって無症候性の脊髄圧迫や硬膜圧迫が MRI 上多数描出され、症候性圧迫か無症候性圧迫かの鑑別が困難なことから、一律に椎弓形成術による広範囲後方除圧が適用されることが多い。私たちは、上行性および下行性脊髄誘発電位 (以下、SCEP) によって症候性圧迫を正確に診断し、可能な限りその高位にのみ前方あるいは後方除圧を行う単椎間手術を行っている。

伝導ブロック

伝導ブロックはインパルス伝播の遮断であり、

Key words

頸椎症性脊髄症 (cervical spondylotic myelopathy)
伝導ブロック (conduction block)
高齢患者 (elderly patient)

脊髄障害による運動麻痺や感覚麻痺の背景にある神経生理学的変化のうち最も重要なものである。圧迫性脊髄症において脊髄索路の伝導ブロックは治療可能な脊髄障害の主役である。伝導ブロックの原因には、圧迫に伴う神経内血行障害 (ischemia, hypoxia) と局所的脱髄 (focal demyelination) があり、それぞれ除圧手術後の early recovery と late recovery の背景にある病態と考えられる¹⁾。したがって、症候性圧迫高位の診断は、伝導ブロック高位の診断と言える。

脊髄伝導ブロックの診断：SCEP 波形解析

図 1a は電気診断を目的に紹介された症例の MRI で、重度の歩行障害 (JOA score 1 点) を呈するが、その割に上肢症状が軽微 (JOA score 3~4 点) な症例であった。MRI では頸椎症性の脊髄圧迫と頸胸椎移行部から上位胸椎部に OPLL (後縦靭帯骨化症) による脊髄圧迫もみられ、手術部位の判定を依頼された。図 1b は上行性 SCEP の後方記録法を示している。刺激電極として腰椎硬膜外腔にカテーテル型双極電極を挿入し、記録関電極として X 線透視下に単極針電極を椎弓間に経皮的に刺入した。基準電極は頭側皮膚に設置し単極誘導で記録した。図 1c はこの方法で記録

* Monosegmental Surgery guided by Electrodiagnosis for Cervical Spondylotic Myelopathy in the Elderly

** 高知大学医学部整形外科 [〒783-8505 南国市岡豊町小蓮] / Toshikazu TANI, Shinichirou TANIGUCHI, Takahiro USHIDA, Tatsunori IKEMOTO : Department of Orthopaedic Surgery, Kochi Medical School, Kochi University

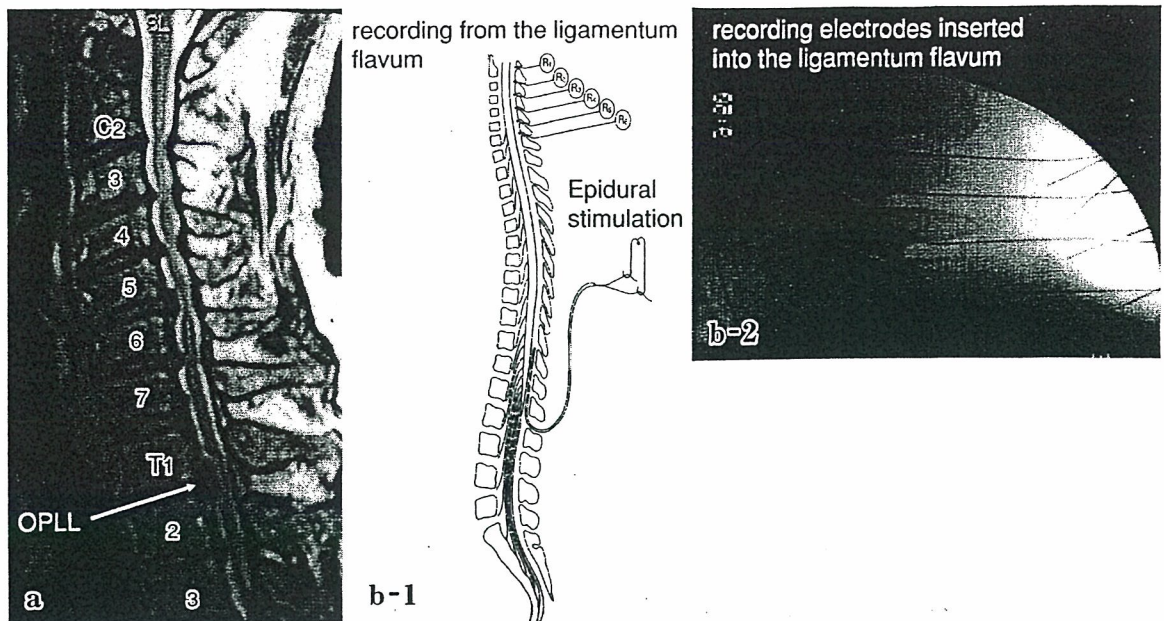
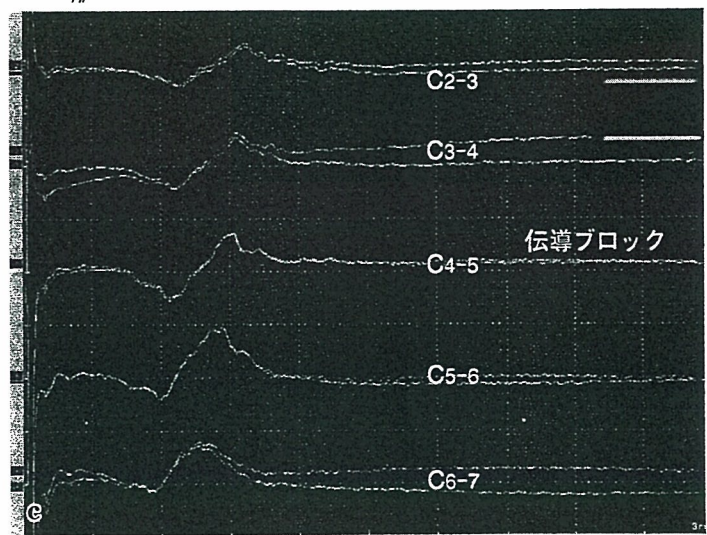


図 1 上肢症状が軽微で重度歩行障害を呈する症例 (64 歳, 男性)

- a : MRI T2 強調像.
- b : 経皮的上行性 SCEP 記録法. 腰椎硬膜外腔に挿入したカテーテル型双極電極で馬尾を刺激し, X 線透視下で椎弓間に経皮的に刺入した単極針電極で上行性 SCEP を多チャンネル同時記録する.
- c : b の方法で椎弓間から記録した上行性 SCEP 波形. これらの波形から C4-5 レベルで伝導ブロックが存在すると診断できるが, その説明は図 6 を参照.



した上行性 SCEP 波形であり, これら誘発電位の波形変化から症候性脊髄圧迫は C4-5 レベルであり, C5-6, C6-7, T1-2, T2-3 レベルの脊髄圧迫は無症候性であると診断できる. この波形診断の根拠について以下に説明する.

詳細は省略するが, 容積導体中にある神経線維をインパルスが伝導するとき, それによって発生する近接電場電位 (near field potential) の変化を立体角近似理論によってモデル化した. そしてコンピュータシミュレーションにより, 伝導ブロックに伴う電位変化 (波形変化) を予測した⁸⁾. 図 2 はコンピュータにより描かれた SCEP 波形で, 脊髄近傍 10 mm の距離から脊髄に沿って 7

mm ごとに上行性 SCEP を記録した場合のシミュレーションである. 図 2 の左は伝導ブロックがない場合で時間的分散 (temporal dispersion; 刺激部位と記録部位の距離が長くなればなるほど, 誘発電位波形の振幅は低下し持続時間が長くなる現象) が再現されている. 図 2 の右は刺激点から 119 mm で伝導ブロックを起こした場合で, 伝導ブロック部位では陰性波 (上向きの振れ) の振幅低下と同時に, 陽性波 (下向きの振れ) の振幅増大を伴うことが特徴で, その手前の部位では陰性波の振幅増大を生じることがわかる.

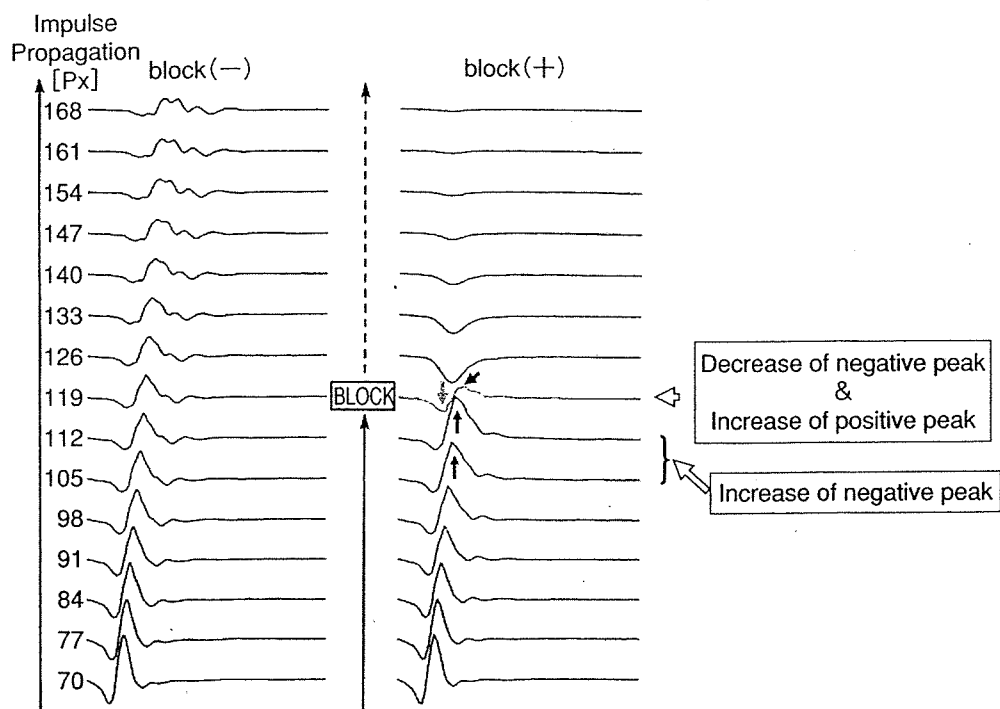


図2 コンピュータシミュレーションによる上行性SCEP波形
 刺激点から70mmの点から168mmの点まで7mmごとに記録したと仮定している。
 左は伝導ブロックがない場合で、右は刺激から119mmの点で伝導ブロックを起こした
 場合のシミュレーション波形である。

臨床例 (CSM) における記録波形

図3は71歳の男性、CSMによる歩行不能例で、頸椎前方手術時に記録したSCEP波形である。記録は術野を展開後、図4のように関電極(長いほうの針電極)を椎間板に刺入し基準電極(短いほうの針電極)を関電極と同一高位の頸長筋に刺入して行った。SCEP波形は、C4-5レベルで陰性波(上向き)の急激な振幅低下と陽性波(下向き)の振幅増大を示し、その手前のC5-6レベルで陰性波の振幅増大がみられることから、伝導ブロックがC4-5レベルで生じているための波形変化と理解することができる^{9,10)}。また、その頭側レベルであるC3-4、C2-3レベルでは陽性波のみとなり、陰性波がまったく認められない。このような状態を完全ブロック(complete block)といい、C4-5ですべてのインパルスの伝導が遮断されていることを意味する。

一方、図5bは、62歳の男性で、頸椎後方除圧術時に記録した上行性SCEP波形である。この症

例のように、脊髄障害が軽くなると(言いかえると、伝導ブロックを生じている軸索の数が少なくなると)、伝導ブロックの波形診断は難しくなる。一見、これは図2の左に示される時間的分散による波形変化のような印象を受ける。しかし、図5cのように基線を引くと、complete blockのときと類似の波形変化を認識することができる。すなわち、SCEP波形は、C5-6レベルで陰性波(上向き)の急激な振幅低下と陽性波(下向き)の振幅増大を示し、その手前のC6-7レベルで陰性波の振幅増大がみられることから、伝導ブロックがC5-6レベルで生じているための波形変化と理解することができる。そして、その頭側レベルである、C4-5、C3-4、C2-3レベルでは陰性波が認められる。このような状態を不完全ブロック(partial block)という⁷⁾。

ここで最初に示した図1cに戻って各波形に基線を引いてみよう。すると、図6に示すようにC4-5レベルにおけるpartial blockの存在が明らかとなる。すなわち、C4-5レベルにおいて陰性波

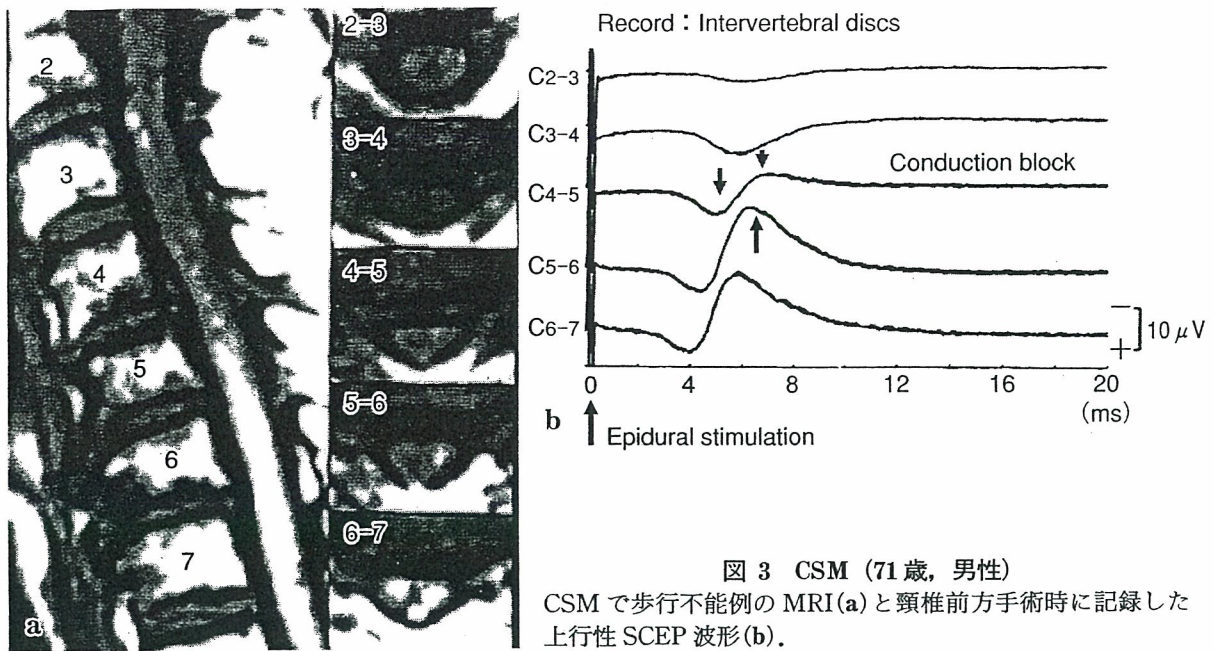


図3 CSM (71歳, 男性)

CSMで歩行不能例のMRI(a)と頸椎前方手術時に記録した上行性SCEP波形(b).

(上向き)の急激な振幅低下と陽性波(下向き)の振幅増大がみられ,その尾側のC5-6レベルでは陰性波の振幅増大が明らかとなる。

このようにして,CSM手術症例129例において上行性SCEPで伝導ブロック高位を診断すると,図7に示す結果となる⁶⁾。すなわち,伝導ブロックは年齢が高齢になるにしたがってC5-6, C6-7椎間からC3-4, C4-5椎間へと移ることが明らかとなった($\rho=0.466, p<0.0001$)。

実際の臨床では,患者を全身麻酔下に腹臥位とし,X線透視下に頸椎の各椎弓間部に記録針電極を刺入する。刺激電極としては,上行性電位誘発のために腰椎部背側硬膜外腔にカテーテル型双極電極を,下行性電位誘発のために頭皮内コークスクリュー電極を設置する。このようにして上行性および下行性SCEPを多チャンネル同時記録し,伝導ブロック高位を診断してそのまま手術に移行する。しかし,前方手術を行う場合には,電気診断が終わると体位を背臥位にする必要があり,その分麻酔時間が長くなるので,最初から背臥位とし,前方の術野を展開してから椎間板記録によって伝導ブロック高位を診断している。

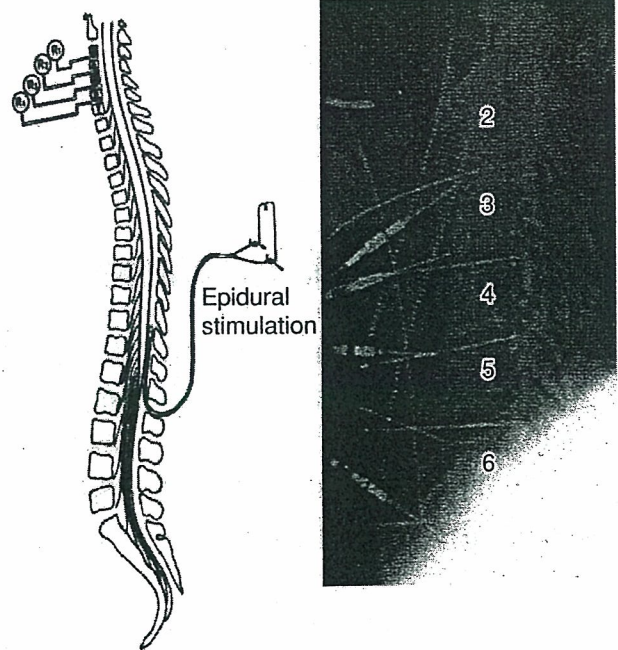


図4 図3の上行性SCEP記録法

単椎間前方除圧固定術の成績

70歳以上の索路症状を主徴とするCSMに対し,SCEPによって明らかとなった伝導ブロック高位を手術高位決定のよりどころとして顕微鏡下に前方除圧固定術を行った症例のうち,術後2年以上経過を追跡できた35例について成績を検討した^{4,5)}。手術時年齢は70~86(平均76)歳,追跡

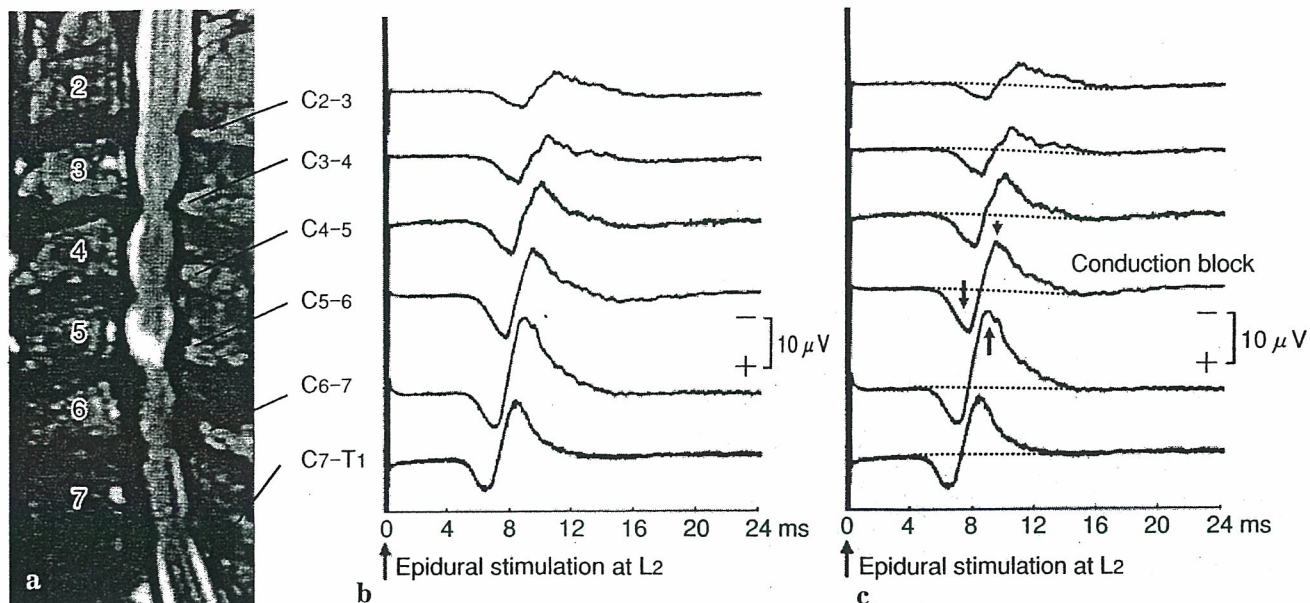


図 5 CSM (62歳, 男性)

- a : MRI T2 強調像。
- b : 頸椎後方除圧時に黄靱帯から記録した上行性 SCEP 波形。
- c : b の各波形に基線を引いたもの。Partial block の診断では基線を引くことが重要である。

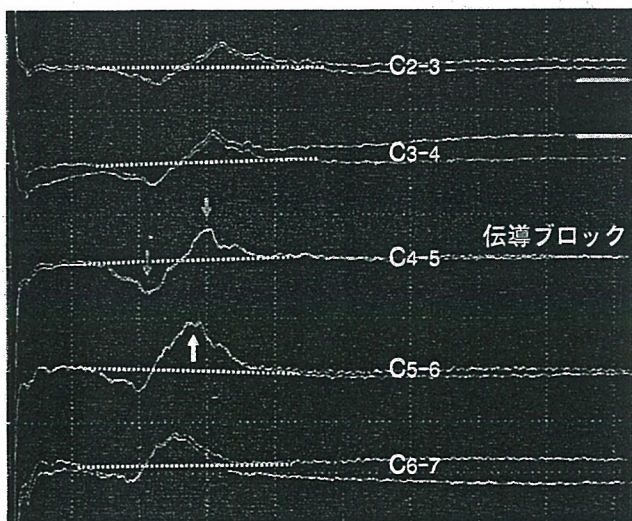


図 6 図 1 c の各波形に基線を引いたもの
Partial block の診断では基線を引くことが重要である。

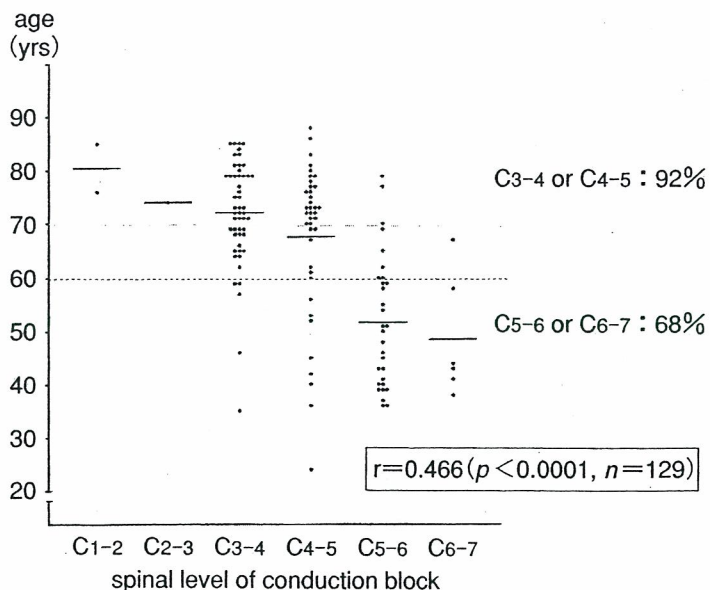


図 7 CSM 129 症例において、上行性 SCEP によって明らかになった伝導ブロック高位 (横軸) とそのときの年齢 (縦軸) (文献 6) より改変)

期間は 24~108 (平均 53) カ月であった。35 例のうち、単椎間手術が 33 例、2 椎間手術が 2 例であった。単椎間手術例では、伝導ブロックの高位のみに、エアドリルによる顕微鏡下の前方除圧と腸骨からの tricortical bone を用いた固定術を行った。術後は原則としてソフトカラーまたは

フィラデルフィアカラーで、翌日より起座をさせた。

33 例の単椎間手術高位は、C3/4 が 15 例、C4/5 が 16 例、C5/6 が 1 例、C7/T1 が 1 例であった。最終調査時、すでに 9 人が CSM や手術に関連のない原因で死亡していた。JOA score は術前平均

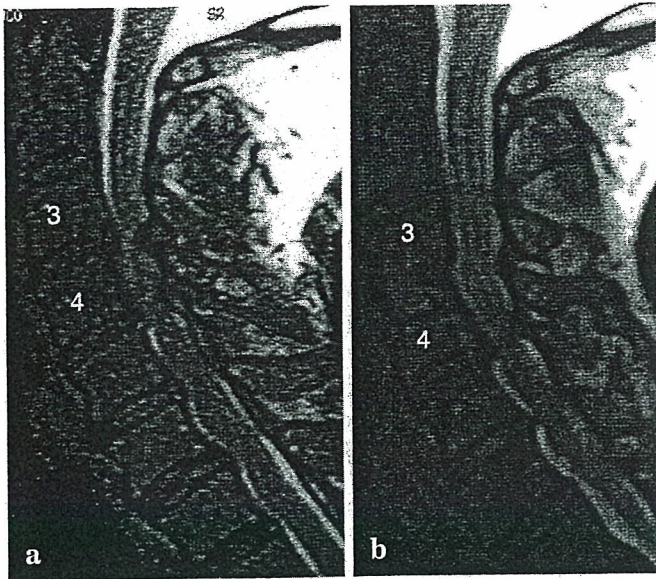


図 8 CSM (62歳, 男性)

a : 術前 MRI T2 強調像。

b : 術後 1 年 MRI T2 強調像。

多椎間圧迫を呈するが, 上行性 SCEP は C3-4 レベルの伝導ブロックを示し, C3-4 単椎間前方除圧固定術を行った。JOA score は, 術前 5 点, 術後 3 年で 15 点に改善している。

8.1 点が最終調査時 12.8 点に改善し, 改善率 (平林法) は平均 54% であった。改善率 75% 以上 (excellent) は 7 例 (図 8), 50% 以上 (good) は 14 例, 25% 以上 (fair) は 10 例, 25% 未満 (poor) は 4 例であった。また, 運動機能の改善率を上肢と下肢で比較すると, 上肢は平均 68%, 下肢は 23% で, 下肢運動機能の改善が有意に劣っていた ($p < 0.0001$)。歩行能力の改善を妨げる高齢者特有の因子として, 腰部脊柱管狭窄症 8 例, 変形性膝関節症 5 例, 変形性股関節症 3 例, 痴呆 1 例などの合併があった。また, 骨癒合については, 多くは粗鬆骨にもかかわらず, 移植骨の圧潰や吸収を認めた症例はなく, 1 例を除いて骨癒合が得られた。2 例 (6%) に隣接椎間障害によると思われる歩行能力の再悪化があった。

結 論

CSM に対する SCEP を用いた単椎間手術について手技の解説ならびに成績を示した。上述した JOA score の改善率は椎弓形成術によるそれに

劣らない。例えば, 宮本ら²⁾は 70 歳以上の CSM と OPLL に対する伊藤-辻法 39 例の術後 1 年以上, 平均 31 カ月の改善率は 46% と報告し, 三好ら³⁾は 75 歳以上の CSM に対する棘突起正中縦割法 13 例の術後 1 年以上の改善率は 39% と報告している。したがって, SCEP を利用した単椎間前方除圧固定術は, 高齢者 CSM に対する治療選択肢の一つと考えてよいと思われる。

文 献 (太字番号は重要文献)

- 1) Ishida K, Tani T, Ushida T, et al : Recovery of spinal cord conduction after surgical decompression for cervical spondylotic myelopathy : serial somatosensory evoked potential studies. *Am J Phys Med Rehabil* 82 : 130-136, 2003
- 2) 宮本紳平, 小泉寿章, 鈴木省三, 他 : 高齢者の圧迫性頸髄症に対する椎弓形成術一術式の選択と手術にあたっての留意点. *脊椎脊髄* 12 : 989-994, 1999
- 3) 三好光太, 中村耕三, 三上容司, 他 : 高齢者における頸椎症性脊髄症に対する脊柱管拡大術. *脊椎脊髄* 12 : 995-999, 1999
- 4) Tani T, Ishida K, Ushida T, et al : Intraoperative electroneurography in the assessment of the level of operation for cervical spondylotic myelopathy in the elderly. *J Bone Joint Surg* 82 B : 269-274, 2000
- 5) 谷 俊一, 武政龍一, 牛田享宏, 他 : 高齢者の脊椎手術. *整・災外* 46 : 423-428, 2003
- 6) Tani T, Ushida T, Taniguchi S, et al : Age related shift in the primary sites of involvement in cervical spondylotic myelopathy from lower to upper levels. *J Neurol Neurosurg Psychiatry* 73 : 316-318, 2002
- 7) Tani T, Ushida T, Taniguchi S, et al : Partial conduction block in cervical compression myelopathies : waveform changes of ascending spinal evoked potentials. *Suppl Clin Neurophysiol* 59 : 265-274, 2006
- 8) Tani T, Ushida T, Yamamoto H, et al : Waveform changes due to conduction block and their underlying mechanism in spinal somatosensory evoked potential : a computer simulation. *J Neurosurg* 86 : 303-310, 1997
- 9) Tani T, Ushida T, Yamamoto H, et al : Waveform analysis of spinal somatosensory evoked potential : paradoxically enhanced negative peaks immediately caudal to the site of conduction block. *Electroencephalogr Clin Neurophysiol* 108 : 325-330, 1998
- 10) Tani T, Yamamoto H, Kimura J : Cervical spondylotic myelopathy in elderly people : a high incidence of conduction block at C3-4 or C4-5. *J Neurol Neurosurg Psychiatry* 66 : 456-464, 1999

頸部神経根症における障害根の新しい 機能診断法：上肢筋T波の検討

川田 倫子¹⁾，谷 俊一¹⁾，池本 竜則¹⁾，石田 健司¹⁾，谷口慎一郎¹⁾

T波は、筋伸張反射を複合筋活動電位として記録するものでH反射と異なり広くさまざまな筋から記録できる利点がある。今回我々は、上肢筋伸張反射を頸部神経根症における障害根診断に用いるために健常例において随意収縮下に伸張反射をT波として安定して記録し¹⁾²⁾、その潜時、振幅、左右差について検討したので報告する。

対象および方法

対象は、実験の概要について十分に説明し承諾を得た健常者のボランティアで、男性8名、女性10名の計18名で、平均年齢は、39歳（18～79歳）であった。

Reflex hammerは、先端に電極を備え、叩打部位に貼り付けたアルミ箔に接触した瞬間にトリガーパルスが発生。加速度センサーを内蔵させ製作した。

ウィンドウ型叩打判定装置は、徒手に行う叩打力を標準化するためインパクトセンサーを内蔵し、ある一定範囲の叩打力(加速度)の場合のみトリガーパルスが筋電計に入力されるように製作した。

記録電極には表面電極を用い、belly-tendon法に従って、記録電極を筋腹中央に、基準電極を腱または骨上に設置した。対象筋としては、上腕二頭筋、腕橈骨筋、上腕三頭筋、第一背側骨間筋とし、それぞれ、C5、C6、C7、C8神経根の評価に用いた。記録の周波数帯域は20Hz～3kHz、掃引速度は5～10ms/DIV、感度は500μV/DIVに設定した。

T波が安定して誘発されるように被験筋の等尺性随意収縮下に行い、その程度は、最大筋力の10～20%としリアルタイム積分筋電計を用いて標準化した。上腕二頭筋、腕橈骨筋、上腕三頭筋は10回の反応を、第一背側骨間筋は、50～100回の反応を加算平均しそれぞれ2回記録した。検査は坐位にて行い、両側

について検査した。リアルタイム積分筋電計は、T波の記録電極を利用してまず、最大収縮時の単位時間当たりの筋放電の積分値を記録させ、弱収縮時筋放電の積分値がその何%に相当するかをリアルタイムにデジタル表示されるように製作した³⁾。

このリアルタイム積分筋電計を用いて、最大筋力の10～20%の随意収縮下に、先に述べたreflex hammerで腱を叩打しT波を誘発した。この際、time lockされたT波と、randomな随意収縮の筋放電を区別するために10～100回の反応を加算平均して記録した。筋電計は日本光電社製Neuropackを使用した(図1)。

加算平均したT波の開始潜時と、基線から陰性波の頂点間の振幅を計測した。

結 果

上腕二頭筋T波の開始潜時は平均15.6ms、振幅は平均680μV、腕橈骨筋T波の開始潜時は平均19.9ms、振幅は平均212μV、上腕三頭筋T波の開始潜時は平均16.3ms、振幅は平均583μV、第一背側骨間筋T波の開始潜時は平均31.1ms、振幅は平均223μVであつ

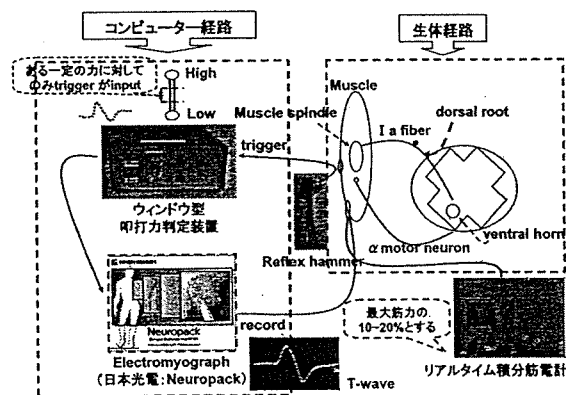


図1 T波誘発経路

T-wave evoked in human upper limb muscles during voluntary contraction : Tomoko KAWADA et al. (Department of Orthopaedics, Kochi Medical School)

1) 高知大学医学部運動機能学教室

Key words : T-wave, Upper limb muscles, Voluntary contraction