

〔原著〕

脊髄横断面等電位図による下行性伝導性 脊髄誘発電位の波形起源に関する研究

村上正純* 井上駿一* 今井克己*
出沢明* 吉永勝訓* 岡本弦*

(昭和62年5月25日受付)

要 旨

脊髄誘発電位の臨床的有用性に関してはすでに多くの報告があるが、測定条件の相違により波形が異なることもあるので、波形起源および波形解析による機能的診断に関してはいまだ多くの問題点がある。

脊髄刺激による伝導性脊髄誘発電位 (C-SpEP) の基本波形は初期スパイク電位 P₁-N₁ とそれに続く多相性電位 P₂~N₄ からなる。本研究では C-SpEP の発生起源を検索する目的で、麻酔ネコを用い腰膨大部脊髄横断面半側の格子状41点より活動電位を導出し、同一潜時における電位補間により等電位図としてカラー表示した。得られた等電位図より以下の結果を得た。

①初期スパイク波 P₁-N₁ の P₁ 潜時等電位図では、Rexed VI~VII層に陽性電位のピークが見られ、また N₁ 潜時では側索後部および前索に陰性電位のピークが分布していた。これら P₁-N₁ 成分は、高頻度刺激により得られた等電位図においてもピークの局在、振幅ともに変化がなく、それぞれ脊髄内に分布する大径線維を伝導する活動電位の current source, sink に相当すると考えられた。

②N₄ 潜時においては後索および後角に広く陰性電位のピークが見られ、高頻度刺激において特に後角部分の振幅低下が著明であった。N₄ 成分は後角細胞の活動および後索線維の活動電位を反映していると考えられた。

以上、脳波解析用に開発されたトポグラフィックシステムを応用した本法による等電位図は、比較的簡便であり、またカラー表示による視覚的効果も加え、C-SpEP の各波形成分の起源を解析する上で極めて有用であった。

Key words : 伝導性脊髄誘発電位, 等電位図, 波形起源, 脊髄モニタリング

略語一覧 : SpEP: Spinal Cord Evoked Potential, C-SpEP: Conductive SpEP, S-SpEP: Segmental SpEP, CDP: Cord Dorsum Potential

はじめに

脊髄誘発電位 (Spinal cord evoked potential, SpEP) の中で、脊髄を直接刺激して脊髄から記録される伝導性脊髄誘発電位 (Conductive SpEP, C-SpEP) に

関しては、脊椎・脊髄手術における術中モニタリングとして広く利用され、その有用性が報告されている¹⁻⁴⁾。しかし測定条件の相違等により電位波形が著しく変化することもあるため、波形起源および波形解析による機能診断に関してはいまだ多くの問題点が残されている。

* 千葉大学医学部整形外科科学講座

Masazumi MURAKAMI, Shun-ichi INOUE, Katsumi IMAI, Akira DEZAWA, Katsunori YOSHINAGA and Yuzuru OKAMOTO: Intraspinal Topographic Analysis of Descending Conductive Spinal Cord Evoked Potential.

Department of Orthopedic Surgery, School of Medicine, Chiba University, Chiba 280.

Received for publication, May 25, 1987.

末梢神経を刺激してその所属髄節において記録される分節性脊髄誘発電位 (Segmental SpEP, S-SpEP) の波形解析に用いた脊髄横断面等電位図記録法⁵⁾ を今回下行性 C-SpEP に応用し、その波形起源について解析したので若干の考察を加え報告する。

実験方法

体重 3 kg 前後のネコ 6 匹を用いた。10% ウレタン・1% α -クロラロース溶液 (5 ml/kg) 腹腔麻酔下に腰部椎弓切除術を行い硬膜切開後、腰膨大部を広く展開した。続いて第 4 頸椎硬膜外腔正中中に双極カテーテル電極を刺激電極として挿入した。定位固定装置に固定後、pancronium bromide (0.1mg/kg を初回静注し適宜追加) にて非動化し人工呼吸下に以下の SpEP を記録した。

刺激装置には、日本光電製 MODEL-1101 刺激装置および SS-101J アイソレーターを使用し、刺激は 0.2 msec 矩形波定電圧とし刺激頻度は 2 Hz または 50 Hz、また刺激強度は最大上刺激を用いた。記録装置には Medelec 製 MS-92 を使用し、記録の周波数域を 2 Hz~10 KHz、サンプリング時間を 21 μ sec として分析時間は 10 msec または 20 msec とした (図 1)。

1. Cord Dorsum Potential, CDP

記録電極には、直径 100 μ m、電極抵抗約 600 K Ω のタングステン微小電極を使用し最も高振幅に記録できる第 5 腰髄、第 6 腰髄移行部背面正中中に接触させた。基準電極は傍脊柱筋に刺入した針電極を用いた。

2. 脊髄横断面等電位図カラー表示

記録電極には前述のタングステン微小電極を用い、図 1 のごとくマイクロマニピュレーターに装着して 500 μ m または 600 μ m 間隔で半側脊髄横断面の格子状 41 点より活動電位を順次導出し、データレコーダー (TEAC MR10) に収録した。解析装置の都合上、得られた活動電位を脊髄の前部、後部に二分し、それぞれ 21 チャンネルごとに日本電気三栄製 トポグラフィーシステム 100

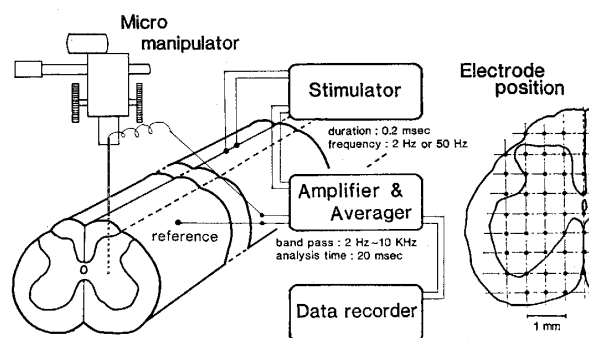


図 1. 実験方法

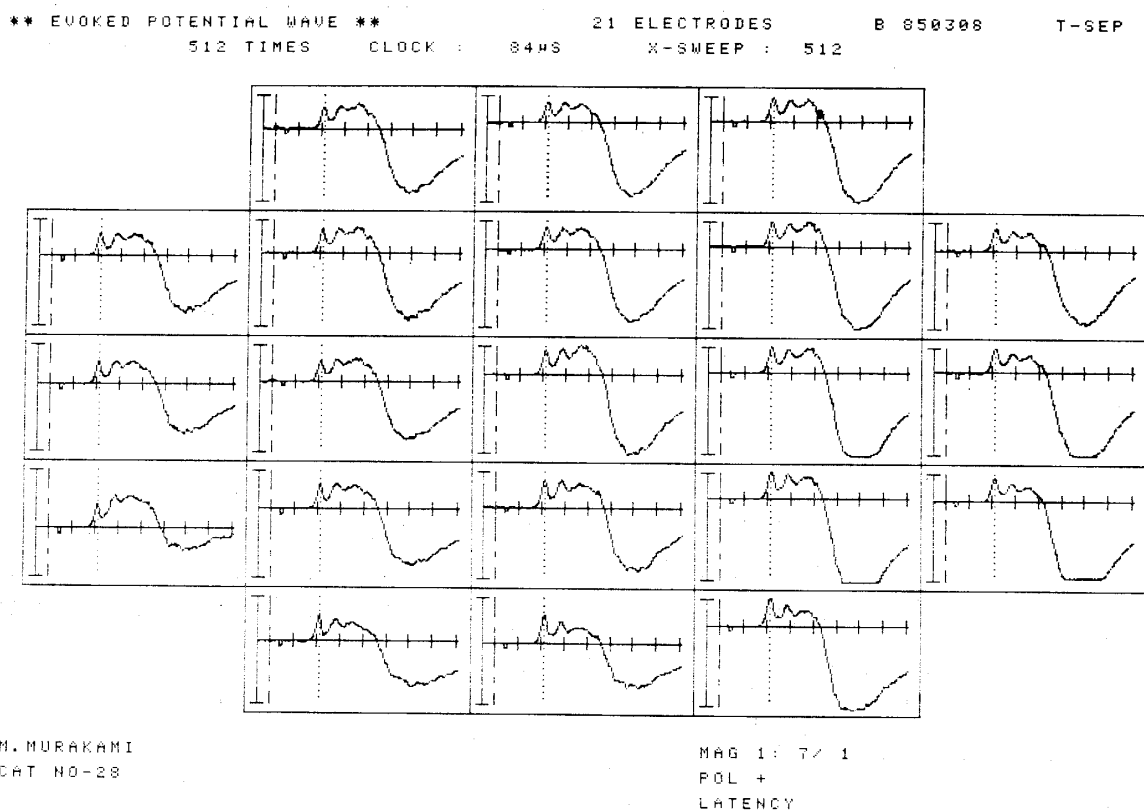


図 2. 21チャンネル入力波形

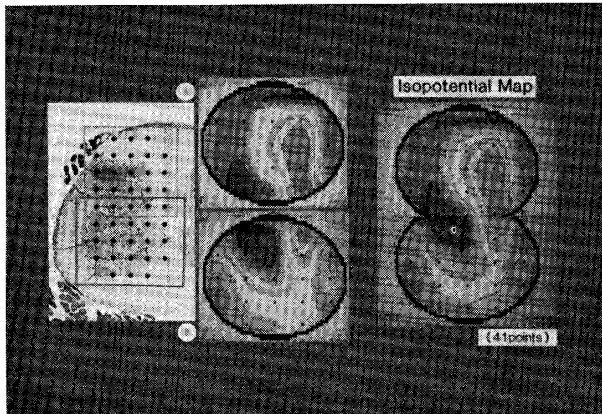


図 3. 等電位図の合成法

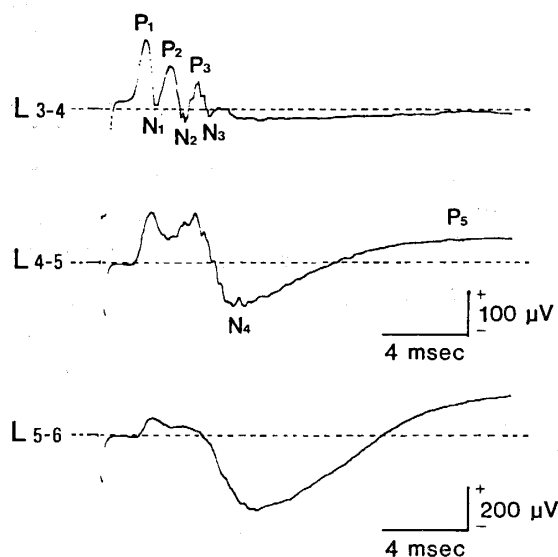


図 4. CDP の各記録高位による基本波形

(Signal Processor 7 T17) に入力した。この際各チャンネルごとにそれぞれ24回の平均加算を行った。本装置を使用して入力された21個の誘発電位は同一潜時での電極間電位を補間することにより等電位図化され、それを赤から青の11段階の等電位図としてカラーディスプレイ上に表示した。このとき赤色系は陽性電位、青色系は陰性電位を示すように設定した。

このようにして求めた脊髓半側の前部、後部の2枚の等電位図を実験終了後に摘出固定染色した電極刺入高位の脊髓横断標本に基づいて、その正確な刺入部位を再校正した上で合成し1枚の等電位図とした。すなわち最終的に得られた等電位図は脊髓横断断面の半側を示しており、上部が脊髓背面、左側が外側となる(図3)。

実験結果

1. Cord Dorsum Potential, CDP

単極誘導による CDP の基本波形は、最大上刺激を用

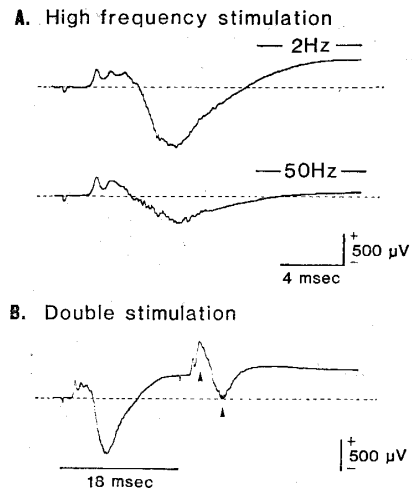


図 5. 高頻度刺激, 2重刺激による影響

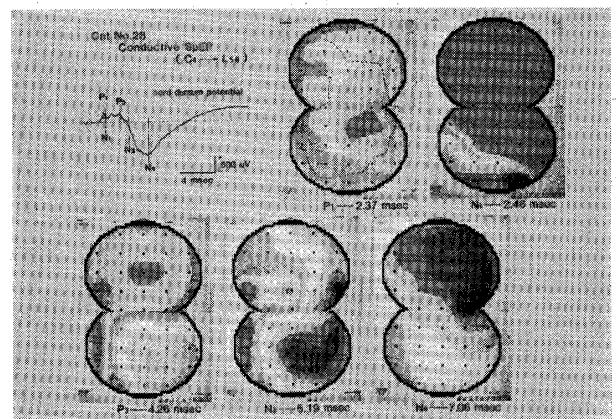


図 6. 低頻度刺激により得られた等電位図

いた場合は図4のごとく L3-4 レベルにおいて3相のスパイク波 P_1-N_1 , P_2-N_2 , P_3-N_3 が見られる。さらに記録高位が腰膨大部に近づくに従いスパイク波に続く陰性波 N_4 , 持続時間の長い陽性波 P_5 が明らかになってくる。

次に刺激頻度による CDP 各成分の振幅変化をみると、高頻度刺激(図5-A), 2重刺激(図5-B)ともに初期スパイク波 P_1-N_1 には変化が見られないのに対し、 P_2 以下に著明な振幅変化が見られた。

2. 脊髓横断面等電位図カラー表示

①低頻度刺激(2 Hz)

図6は刺激を2 Hz とした場合に得られた等電位図の一例である。この例ではスパイク波 P_1-N_1 のうち潜時2.37msec の P_1 は Rexed VI~VII層を中心にピークが見られ、潜時2.46msec の N_1 ピークは前索内外側部に局在していた。図7は同様な条件で得られた3例の等電位図より P_1 , N_1 ピークの局在をまとめたものである。平均潜時2.41msec の P_1 ピークは Rexed VI~VII層に局在しているのに対し、 N_1 ピークは平均潜時2.47msec であ

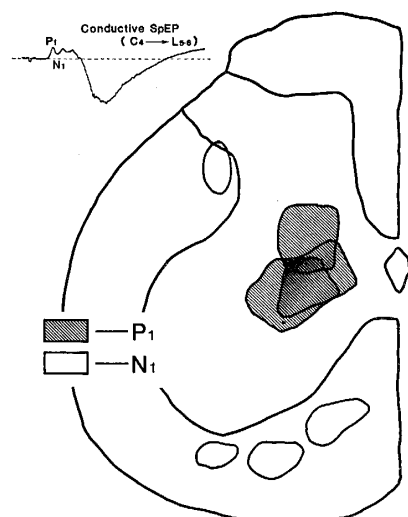


図 7. 低頻度刺激例より得られた P₁, N₁ ピークの局在

るが前索以外に後部側索に見られる例もあった。

CDP の P₃ 頂点付近すなわち潜時 4.26 msec では陰性電位が前角内側部 VII ~ VIII 層部分に広く分布し、陰性電位をとり巻くように後角、後部側索および前角外側部分に陽性電位が見られる。この前角部分の陰性電位は、さらに潜時を遅らせ CDP の N₃ 潜時 5.19 msec では相対的に振幅が増大している。最後に N₄ に関しては、7.06 msec の等電位図上陰性ピークは後索および後角全体に広く認められる。

②高頻度刺激 (50Hz)

図 8 は図 6 と同一例において刺激頻度を 50 Hz とした場合の等電位図である。CDP 上各ピークの若干の遅延が見られるが、潜時 2.54 msec, 2.58 msec のスパイク電位 P₁, N₁ ピークはそれぞれ Rexed VII 層、前索部分に分布しており、振幅も含めて低頻度刺激の場合とほぼ同一である。これに対して潜時 7.98 msec の N₄ ピークは、振幅の低下が著明でありその傾向は特に後角部分に強く認められる。

考 察

1. 伝導性脊髄誘発電位 (C-SpEP)

教室では 1971 年以來、各種脊椎・脊髄手術に対し主に脊髄を硬膜外腔より直接刺激し円垂部クモ膜下腔より導出する下行性 C-SpEP を脊髄機能のモニターとして応用し、その有用性を報告してきた¹⁻⁴⁾。波形解析に基づいて機能的診断を下すためには、各波形成分の起源を詳細に理解することが極めて重要である。しかし、SpEP は刺激強度を強刺激とするか弱刺激とするか、導出法として双極誘導を用いるか単極誘導とするかなど、測定条

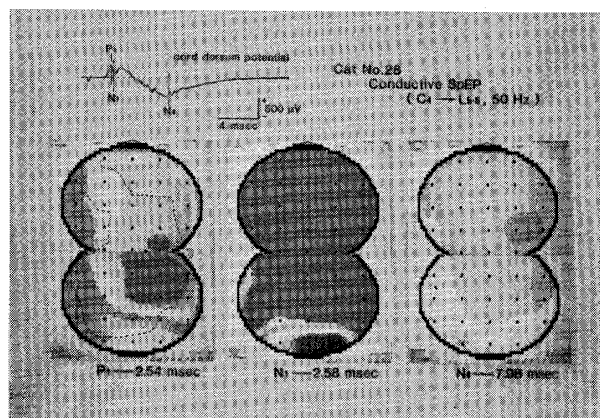


図 8. 高頻度刺激により得られた等電位図

件の違いにより得られる波形の解釈に若干の相違が認められる。

1976 年今井⁶⁾は上行性 C-SpEP, 下行性 C-SpEP ともに、第 1 電位は脊髄側索浅層の神経線維に、第 2 電位は後索線維に由来する活動電位であると推定し、さらに円垂部付近で記録される下行性 C-SpEP には第 2 電位に続いて馬尾神経に由来する神経根電位が混入してくると報告した。これに対し、中等度刺激を用いた 1983 年原田⁷⁾の微小電極による脊髄内記録実験によると、下行性 C-SpEP の第 1 電位は全脊髄野から記録され、特に後部側索浅層の一部、前索中心溝付近、側索等に島状に強電界を持つ電位であり、これらの部分からの field potential の総和であると述べられている。

強刺激を用いた場合には、脊髄部分切断実験より 1982 年四宮⁸⁾, 1984 年 Satomi and Nishimoto⁹⁾ ともに上行性 C-SpEP の初期陰性成分 N₁ に後索および前索を伝導する活動電位が含まれていることを証明している。下行性 C-SpEP に関しても、1984 年 Toyoda and Kanda¹⁰⁾ は初期スパイク成分 P₁-N₁ には前索や後索を順行性および逆行性に伝導する活動電位も含まれていることを報告している。さらに彼らは P₁-N₁ に続くスパイク成分 P₂ から N₃ には、後索を伝導する活動電位と側索および前索を介して駆動される中間層と前角における介在ニューロンの活動電位が含まれ、円垂部で記録される持続の長く振幅の大きな陰性電位 N₄ は、後角細胞と後索線維の活動を表していると述べている。

2. 脊髄横断面等電位図

等電位表示を用いた SpEP の解析は 1945 年 Campbell¹¹⁾ に始まるが、1969 年の報告¹²⁾ 以来 Willis らにより主に各種神経刺激による S-SpEP を中心に行われてきた。C-SpEP に関しても 1970 年 Skinner and Willis¹³⁾ の報告があり、極めて有用な方法である。著者ら⁵⁾は、これを一歩進めて脳波解析用に開発されたトポグフィー

ンシステムを SpEP に応用したわけであるが、すでに S-SpEP の波形解析においてその有用性が十分証明されており、今回得られた結果からも以下のごとく C-SpEP の波形解析に極めて有用な等電位図を得ることができた。

①P₁-N₁

図7のように初期スパイク電位 P₁, N₁ ピークの局在は、それぞれ Rexed VI~VII層中心、前索および後部側索に見られ図8のごとく高頻度刺激によっても変化が見られない。神経線維を伝導する活動電位を細胞外にて記録した場合、通常陽性-陰性-陽性の3相波が記録できる。本研究で得られた N₁ ピークはその分布および高頻度刺激に追従する点を考慮すると脊髓内の大径線維を下行する活動電位の陰性部分と考えられ、側索後部以外にもその分布が見られるという原田⁷⁾, Toyoda and Kan-da¹⁰⁾ の結果を支持するものである。また P₁ 成分はその時間的経過より N₁ 成分の current source に相当すると考えられ、腰膨大部において下行大径線維が Rexed VI~VII層を中心に終末分布を形成していることを示している。

②P₂~N₃

P₂-N₂ 成分に関しては、後索を伝導する活動電位が主体であるという点で諸家の意見が一致しているので、今回は等電位表示による波形解析から除外した。

図6において P₃ 潜時での等電位図では、前角内側部 Rexed VII~VIII層部分に陰性電位のピークが見られ、それをとり巻くように陽性電位が見られている。さらに N₃ 潜時では、この前角部分の陰性電位の振幅が増大している。1970年 Skinner and Willis¹³⁾ は、ガラス管微小電極を用い脊髓内の250 μ m 間隔より導出した下行性 C-SpEP に基づいて等電位表示を行っており、著者らの P₃ 潜時に相当する等電位図において Rexed VII~VIII層に陰性電位、後角部分に陽性電位を認めている。彼らはこの陰性電位を下行性大径線維により monosynaptic に誘発された介在ニューロンの活動に相当するとし、陽性電位は後角に投射される2次ニューロンの current source であるとした。今回著者らの結果も極めて酷似しており、同様な解釈もできる。しかし、Toyoda and Kan-da¹⁰⁾ によると P₃ 成分は後索を伝導する活動電位または後角の活動電位としており、N₃ 潜時において特に後索にも強い陰性電位を認めることを考えると、P₃ 潜時での後角の陽性電位に関しては後索を下降する活動電位の current source であるとの解釈も可能である。

③N₄

1982年 Shimizu et al.¹⁴⁾ によるとヒト硬膜外記録の

結果より、著者らの N₄ 成分は後索および側索後部を伝導する線維により駆動された介在ニューロンの活動を示しているとされている。今回の等電位図上 N₄ 潜時においては、後索および後角に広く陰性電位のピークが見られ、図8のごとく高頻度刺激において特に後角部分の振幅低下が著明である。また Skinner and Willis¹³⁾ の後索および側索後部切断実験においては、N₄ 成分が認められない。これらの事実を考え合わせると、N₄ 成分は後索および側索後部に由来する電位であることは明白であり、後角細胞の活動以外にこれら線維特に後索を伝導する活動電位も反映しているとする Toyoda and Kan-da¹⁰⁾ の結果を支持するものである。

本研究に際し直接御指導下さいました本学第一生理学教室本間三郎教授、中島祥夫助教授以下教室員の皆様へ心より深謝いたします。なお、本研究の要旨は第15回日本脳筋電図学会学術大会(福島)において発表した。

Summary

This study was performed to investigate the location and response properties of electric generators of each component of the conductive spinal cord evoked potential (C-SpEP). Experiments were carried out on 6 adult cats. Field potentials were recorded from 41 points with a tungsten microelectrode inserted into the spinal cord. Using interpolation between these potentials at a given latency, isopotential topography of the transverse section was constructed and displayed on a color display apparatus.

The isopotential topographies showed a focus of positivity in the laminae VI~VII at the P₁ latency, negative foci in the lateral and ventral column at the N₁ latency respectively. In case of high frequency stimulation, the topographies corresponding to the P₁ and N₁ peaks did not change in amplitude and location of each focus. It is supposed from these topographies that the initial spike potential of the C-SpEP originates from the action potential which conducts through large fibers in the lateral and ventral funiculi.

The isopotential topographies at N₄ latency showed negative focus throughout dorsal column and dorsal horn. In case of high frequency stimulation, the field potentials corresponding to the N₄ peak decreases in amplitude especially in the dorsal horn. It is supposed that the N₄ wave reflects the activity of dorsal horn cells and axons in the dorsal column.

文 献

- 1) 玉置哲也, 小林英夫, 山根友二郎, 江頭泰平, 辻 陽雄, 井上駿一: 誘発脊髄活動電位の臨床応用. 整形外科 28, 681-689, 1977.
- 2) 小林英夫, 玉置哲也, 中川武夫, 豊田 敦, 今井克己, 村上正純, 井上駿一: 脊髄誘発電位—その臨床応用. 臨床脳波 22, 454-463, 1980.
- 3) Tamaki, T., Noguchi, T., Takano, H., Tsuji, H., Nakagawa, T., Imai, K. and Inoue, S.: Spinal cord monitoring as a clinical utilization of the spinal evoked potential. Clin. Orthop. 184, 58-64, 1984.
- 4) 今井克己, 村上正純, 中川武夫, 井上駿一, 玉置哲也: 脊椎脊髄外科における脊髄誘発電位を用いた術中脊髄モニタリング法の検討—術後神経合併症と電位変化の関係について—. 日整会誌 58(II) Suppl., S258-259, 1984.
- 5) 村上正純: 脊髄横断面等電位図記録による腰部分節性脊髄誘発電位の発生部位に関する研究. 脳波と筋電図 14, 198-210, 1986.
- 6) 今井卓夫: 硬膜外腔脊髄刺激による誘発脊髄活動電位について—基本波形とその意義—. 日整会誌 50, 1037-1056, 1976.
- 7) 原田吉雄: Spinal Cord Monitoring に関する実験的研究—脊髄長軸方向牽引時に起る脊髄誘発電位の変化. 日整会誌 57, 685-701, 1983.
- 8) 四宮謙一: 誘発脊髄電位を用いた脊髄機能のモニタリングに関する基礎的研究. 日整会誌 56, 1551-1560, 1982.
- 9) Satomi, K. and Nishimoto, G. I.: Effects of selective spinal cord transection on evoked spinal potential in cats. In: Fundamentals and Clinical Application of Spinal Cord Monitoring. Homma, S. and Tamaki, T., eds., PP87-98, Saikon Publishing, Tokyo, 1984.
- 10) Toyoda, A. and Kanda, K.: Origins of Spinal cord potentials evoked by stimulation of the cat spinal cord. In: Fundamentals and Clinical Application of Spinal Cord Monitoring. Homma, S. and Tamaki, T., eds., PP99-111, Saikon Publishing, Tokyo, 1984.
- 11) Campbell, B.: The distribution of potential fields within the spinal cord. Anat. Rec. 91, 77-88, 1945.
- 12) Willis, W. D., Skinner, R. D. and Weir, M. A.: Field potentials of alpha and gamma motoneurons and Renshaw cells in response to activation of motor axons. Exp. Neurol. 25, 57-69, 1969.
- 13) Skinner, R. D. and Willis, W. D.: Spinal cord potentials produced by ventral cord volleys in the cat. Exp. Neurol. 27, 305-317, 1970.
- 14) Shimizu, H., Shimoji, K., Maruyama, J., Matsuki, M., Kuribayashi, H. and Fujioka, H.: Human Spinal Cord Potentials produced in lumbosacral enlargement by descending volleys. J. Neurophysiol. 48, 1108-1120, 1982.