

図2 細動脈への低反応性レベルレーザー照射 (LLLTT) 後の血管拡張  
1分以内に拡張が始まり、30分から数時間持続する

わち、交感神経節である星状神経節の緊張をきたしている患者8名を対象とした。星状神経節近傍に Ga-Al-As、半導体レーザー (波長 830 nm, 出力 60 mW) を 10 分間照射した。LDF のプローブを両側第三指指尖部に装着し、照射前と照射終了後の皮膚血流と指尖部血流律動波形を各々 5 分間記録した。LDF で測定される指尖部血流律動波形には、① CW (cardiac wave) : 心拍数に一致した成分、② BW (basic wave) : 約 10 秒周期の低周波の成分、③ GCW (giant concave wave) : 深呼吸などで誘発される一過性の血流減少、の 3 成分が認められる。これらのうち、交感神経活動に関連する成分と考えられている BW 変化を定量化することにより<sup>25)</sup>、レーザー照射前後の交感神経緊張度の変化を検討した。高速フーリエ変換により血流波形の周波数分析を行い、0.1 Hz 付近 (0.05 ~ 0.15 Hz) の成分 (low frequency component : LFC) におけるパワースペクトルの積分値 (LFC power) を算出した。レーザー照射前を 100 とした時の照射後の LFC power 値 (% LFC power) を求め、% LFC power をレーザー照射後の交感神経緊張度の指標とした<sup>26)</sup>。患者群、健常人群それぞれのレーザー照射前後における典型的指尖部血流変動 (図 1) とその周波数解析の結果 (表 1) を示す。% LFC power は、

患者群では照射側で有意な減少を示し、対側でも減少傾向を示した。健常人群においては増加傾向を示したが有意差はなかった (表 1)。

動物実験においても、宮澤ら<sup>27)</sup>は、ネコの総頸動脈を狭窄させ、上頸神経節後線維からの自発放電を倍加させた実験的交感神経緊張状態を作り出し、このネコの上頸神経節にレーザー照射することで、この放電が再現性を持って抑制されることを報告し、ヒト同様、低反応レベルレーザー照射は緊張状態の交感神経のみ抑制することを明確にした。

### 3) 血管拡張作用

レーザー照射が交感神経に抑制的に働くことにより、二次的に血管拡張が生じるために血流が良くなる可能性は高い。また、血管への直接照射により、血管が拡張し、血流増加をきたす可能性もある。前川ら<sup>11)</sup>は、ラットの腸間膜の動脈を用いて、低反応レベルレーザー照射の微小循環に及ぼす影響を検討し、血管への照射後数分から細動脈の血管径が有意に拡大し、赤血球速度も増大することから、血流が著明に増大することを示した。この現象に対する血管拡張因子である NO (nitrogen oxide : 一酸化窒素) と血管運動神経の関与を知るため、次のような実験を行った。

Wistar 系雄性ラットを用い、麻酔下に開腹して小腸腸間膜を密閉チェンバー内に拡げ、顕微鏡下に固定した後、径が約 10~20  $\mu\text{m}$  の細動脈を含む部位を探した。細動脈レベルでの低反応レベルレーザー照射の影響と、血管拡張に影響する重要な血管拡張因子である NO の関与、および、血管運動神経の関与を調べる目的で、腸間膜全体に波長 830 nm の Ga-Al-As 半導体レーザーを 5 分間照射（照射群）し、細動脈の血管径、赤血球速度、血流量の変化を経時的に測定した。また、さらに NO 合成阻害薬の L-nitro-L-arginine methyl ester (L-NAME) を静脈内投与した群（L-NAME 群）、開腹して腸間膜血管に分布する血管運動神経である上腸間膜神経節を徐神経した群（除神経群）に分け、コントロール群（非照射群）と比較した。血管径はビデオ画像で、赤血球速度は二窓法で測定し、また、血流量は、血管径と赤血球速度から計算により求めた。直腸温およびチェンバー内の温度は 37°C に維持し、実験を行った。

照射群では、照射直後より有意に血管径、赤血球速度、血流量とともに増加し、経時的にさらに増加しており（図 3）。また、L-NAME 投与群、除神経群でもほぼ同様の結果が得られた（図 3）。これらの血流改善作用も、HP、PHN に有効に作用する可能性が高い。

#### 4) 抗炎症作用

天野ら<sup>28)</sup>は、RA の膝関節で、レーザー照射によって、滑膜上皮細胞の平坦化や、リンパ球や炎症性細胞浸潤の減少などの変化が生じることを示し、伊藤<sup>29)</sup>も、培養滑膜細胞上清中の IL-1 $\beta$  などの炎症性サイトカインやプロスタグランジンなどのケミカルメディエーターが減少することを報告している。これらの結果から、LLLT が抗炎症作用を持つことと、炎症性の痛みの関与の大きい新鮮例や炎症の継続している HP に LLLT が効果を持つことの理由が理解できる。

### 3. かゆみに対する作用

帯状疱疹の治癒期にかゆみを訴える症例にはよく遭遇する。このかゆみの抑制に LLLT が効果を持つことは臨床的によく知られた事実である<sup>30)</sup>。かゆみは、温覚、痛覚などと同じ体性感覚の一つであり、おそらく、痛覚とおなじ C 線維もしくは A $\delta$  線維により伝導されていると考えられている。しかし、未だにかゆみ刺激にのみ反応する受容器の存在は証明されておらず、一次ニューロンに関してはおそらく知覚と同様な伝導がなされていると考えられているものの、その全容はいまだ不明である。アトピー性皮膚炎の掻痒に対して LLLT の臨床的効果が認められたとの報告もあり<sup>31)</sup>、森田ら<sup>30)</sup>は、アトピーの末梢性のかゆみは、肥満細胞から放出されたヒスタミンなどのケミカルメディエーターが遊離され、かゆみを伝える求心性の A $\delta$  線、C 線維を上行して大脳皮質でかゆみが認識されるが、LLLT が A $\delta$  線、C 線維の伝達を遮断するため、かゆみにも効果があると考察している<sup>30)</sup>。LLLT は、知覚神経の脱分極性興奮伝導を遮断する<sup>16)</sup>ことから、直接的にかゆみの伝導を抑制するのであろうと筆者も考えている<sup>24)</sup>が、LLLT の交感神経緊張抑制や血管拡張作用も、かゆみに対して有効である理由の一つである可能性も高い。

### 4. 低反応レベルレーザー治療の実際

#### 1) 治療時間と回数

痛みを伴う新鮮帯状疱疹に対する治療は、基本的に抗ウイルス薬、NSAIDs、神経ブロックの併用となる。ペインクリニック領域では、痛みを伴う症例（HP）を扱うことが普通であるため、ほぼ全症例が LLLT の適応となる。皮膚科領域では、痛みのない場合は適応外としている施設が多いが、皮疹が先で神経痛が後から

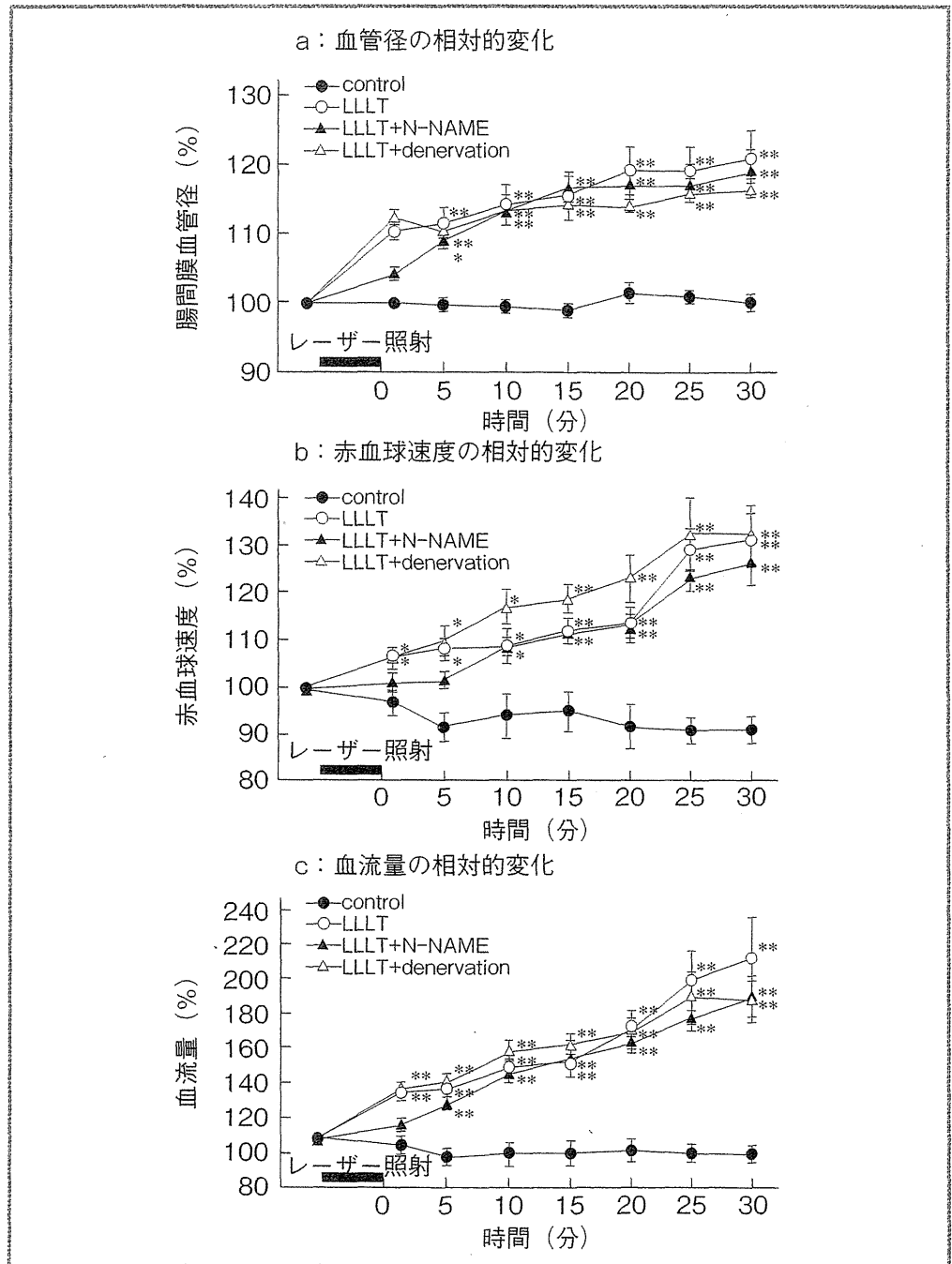


図3 4群における腸間膜血管径, 赤血球速度, 血流量の相対的变化 (文献11より引用改変)

a: 腸間膜血管径の相対的变化, b: 赤血球速度の相対的变化, c: 血流量の相対的变化いずれもレーザー照射前を比較対照とした (平均±SEM, \*: p<0.05, \*\*: p<0.01)

出現する場合もあるため, 予防的に LLLT を行うべきである.

照射は, プローブを皮膚から離し, 広範囲に遠隔スキャン照射とする. 小川<sup>32)</sup>は, LLLT 施

行群と非施行群との比較では, 発症から痛みのなくなるまでの期間, VASが0にならなかった症例数について, いずれも LLLT 施行群で顕著に治療成績がよかったことを報告している

表2 新鮮帯状疱疹に対する LLLT (低反応レベルレーザー) の治療効果 (文献 32 より引用)

	LASER 施行群	LASER 非施行群	群間の有意差
症例数 (名)	51	40	
患者年齢 (歳)	61.8 ± 13.0	55.8 ± 16.7	n.s.
発症から初診までの期間 (日)	6.8 ± 3.8	6.5 ± 2.8	n.s.
初診時 VAS	5.2 ± 1.6	4.9 ± 2.7	n.s.
VAS=0 までの日数 (日)	17.6 ± 13.1	36.4 ± 25.4	p < 0.0001
VAS=0 にならなかった症例数 (名)	4 (7.8%)	12 (30.0%)	p < 0.05

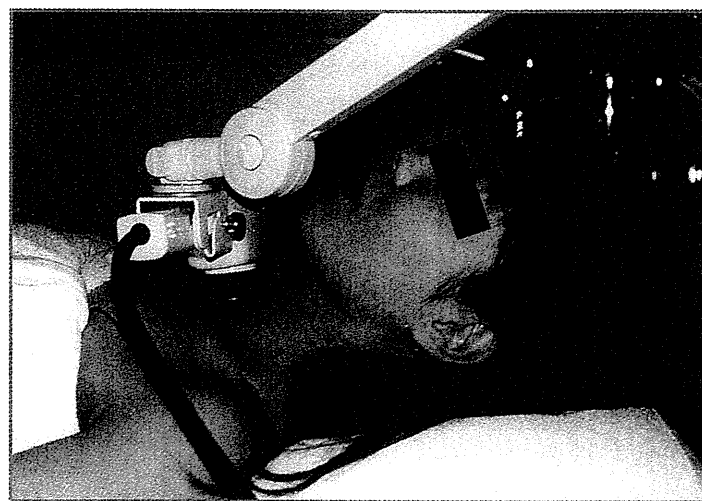


図4 星状神経節近傍照射の実際  
固定用アームを利用して照射を行う

(表2).

帯状疱疹後神経痛 (PHN) の定義は、明確ではないが、われわれの施設では、皮疹消退後3カ月を目途としている。

HP, PHN いずれの場合も, LLLT 施行は神経ブロックとの併用が基本である。150 mW の治療機器では, 1カ所 15~25 秒, 1 回の治療時間は 10~15 分, 星状神経節近傍照射 (SGL) は 10 分である。1,000 mW では, 1カ所 15~20 秒, 1 回の治療時間は 5~10 分, SGL は 5 分。10 W では, 1カ所 10~15 秒, 1 回の治療時間は 5~10 分, SGL は 5 分としている。治療回数は, 外来では 2~3 回/週, 入院では可能な限り午前, 午後の 2 回, 連日施行とする。経験的には, 治療回数が多いほど効果が高いと感じ

る。アロディニアの強い部位や新鮮な皮疹部位では遠隔照射とする。

## 2) 照射部位

三叉神経領域と頸椎神経領域, 第1~4 胸椎領域では, 痛みのある部位への照射と星状神経節近傍照射を併用する。星状神経節近傍照射は, 第6もしくは第7 頸椎横突起起支部に 150 mW で 5~8 分, 1,000 mW, 10 W で 2~5 分とする (図4)。三叉神経第1枝では, 眼窩上切痕とその内側の滑車上神経部および疼痛部位 10カ所程度と, 神経走行に沿って, さらに 10カ所照射する。第2枝では, 眼窩下孔とやはり疼痛部位 10カ所程度と神経走行に沿って 7~8カ所, 第3枝では, オトガイ孔と疼痛部位 10カ所と

やはり神経走行に沿って10カ所照射する。頸椎神経領域では、C<sub>2</sub>では、大・小後頭神経ブロックと同じ部位とC<sub>2</sub>横突起部、C<sub>3</sub>~C<sub>7</sub>では、当該神経横突起部および神経走行に沿った部位と疼痛部位の計10~15カ所に照射する。胸椎領域では、肋間神経が皮膚表面に出てくる真横、乳頭線上とその真背側部と肋間神経沿いに4~6カ所、および疼痛部位10~15カ所とする。腰椎領域では、皮疹、疼痛領域が広範である場合が多く、神経走行沿いと疼痛部位の照射部位を15~25カ所と増やす方がよい。1,000 mW, 10 W 治療器では皮下深部への到達が期待できるため、傍脊椎の神経根存在部位にプローブ先端を強く押しつけるようにして照射することを勧める。

### 3) 治療効果の評価

治療効果の評価は、痛みの評価と患者の満足度で行う。visual analogue pain scale (VAS), pain relief score (PRS) および satisfactory index (SI) の3種類で行うことを推奨する。評価時期は、初診時、2週後、1カ月後、2カ月後、3カ月後とする。

### 4) PHN に対する LLLT 施行のこつ

1カ所への照射時間を極端に長くしたり、1回の治療時間を増やすよりは、治療回数を多くする方がよい。抗凝固薬使用患者や、その他の理由で神経ブロックが併用できない場合は、入院で連日行うべきである。また、神経ブロックのように、直後に鎮痛が得られることはあまりないため、何度か LLLT を行うことで効果の出る旨を、あらかじめ患者に説明しておくことが大事である。LLLT についての詳細は成書<sup>33,34)</sup>を参考にされたい。

### まとめ

安全で苦痛のない、患者にやさしい LLLT

は、理論的にも臨床検討からも、帯状疱疹痛、帯状疱疹後神経痛の治療に臨床効果を十分に期待できるものである。この簡便な治療を神経ブロックに併用することにより、PHN への移行を防止し、また、PHN から多くの患者が救われることを祈念する。

### 文献

- 1) Mester E: Laser application in promoting wound healing. (Koebner HK, ed: Laser in medicine.) Chichester, John Willey & Sons, 1980, 190
- 2) 細川豊史: 低反応レベルレーザー. ペインクリニック 26: 662-670, 2005
- 3) 西田宣子, 瀧川千鶴子, 合田由紀子, 他: 帯状疱疹後神経痛に対するレーザー治療の応用. (特集: ペインクリニックとレーザー). ペインクリニック 8: 6-11, 1987
- 4) 豊田住江, 河内 明, 片岡晃哉他: 帯状疱疹による神経痛に対する低出力レーザーの臨床的検討. 東洋医学とペインクリニック 18: 17-20, 1988
- 5) 山田裕道, 小川秀興: 低反応レベルレーザーを用いた帯状疱疹後神経痛の治療. 臨皮 49: 238-245, 1995
- 6) Numazawa R, Kenmotsu O. et al: The role of laser therapy in intensive pain management of postherpetic neuralgia. Laser Therapy 8: 143-148, 1996
- 7) 岩崎賢一, 佐伯 茂, 伊藤真介, 他: 帯状疱疹後神経痛に対する低出力レーザー照射法の検討-円形照射の効果について-. ペインクリニック 12: 767-771, 1991
- 8) 劔物 修: 帯状疱疹後神経痛に対する低出力レーザー治療の応用. 老化と疾患 4: 100-103, 1991
- 9) 蔡 文憲, 斎藤明義: スポーツ障害と低出力レーザー: 1 低反応レベルレーザーの二重盲検試験結果. (小川節郎・編: 低反応レベルレーザーと直線偏光近赤外線-光線療法の基礎と臨床-). 東京, 真興交易医書出版部, 2001, 185-192
- 10) 原田 孝, 鶴岡 広: 1 W 半導体レーザーの使用経験. 運動・物理療法 9: 99-103, 1998
- 11) Maegawa Y, Itoh T, Hosokawa T, et al: Effects of near-infrared low-level laser irradiation on microcirculation. Lasers in Surgery & Medicine 27: 427-437, 2000
- 12) Bihari I, Mester AR: The biostimulative effect

- of low level laser therapy of long-standing crural ulcers using heliumneon laser, helium neon plus infrared lasers, and noncoherent light. *Laser Therapy* 1 : 75-78, 1989
- 13) Ceccherelli F, Altafini L, Castro GL, et al: Diode laser in cervical myofascial pain. *The Clinical Journal of Pain* 5 : 301-304, 1989
  - 14) 細川豊史: 痛みに対する「光線療法」の有効性を裏付ける基礎的研究について. *EBMジャーナル* 6 : 58-63, 2005
  - 15) 宮崎東洋: 帯状疱疹後神経痛: 臨床像とメカニズム. *ペインクリニック* 17 : 517-522, 1996
  - 16) 河谷正仁, 土屋喜由: 低出力レーザーによる末梢神経伝導の遮断. *ペインクリニック* 16 : 533-539, 1995
  - 17) Tsuchiya K, Kawatani M, et al: Diode laser irradiation selectively diminishes slow component of axonal volleys to dorsal roots from the saphenous nerve in the rat. *Neurosci Lett* 161 : 65-68, 1993
  - 18) Sato T, Kawatani M, et al: Ga-Al-As laser irradiation inhibits neuronal activity associated with inflammation. *Acupunct Electro-Therapeutics Res* 19 : 141-151, 1994
  - 19) Kono T, Kasahi S: Cord dorsal potentials suppressed by low power laser irradiation on peripheral nerve in the cat. *J Clin Laser Med Surg* 11 : 115-118, 1993
  - 20) Jimbo K, Noda K: Suppressive effects of low-power laser irradiation on bradykinin evoked action potentials in cultured murine dorsal root ganglion cells. *Neurosci Lett* 240 : 93-96, 1998
  - 21) Miura A, Kawatani M: Effects of diode laser irradiation on sensory ganglion cells from the rat. *Pain Res* 11 : 175-183, 1996
  - 22) Otsuka H, Kemmotsu O, Imai M, et al: The combination of LLLT and stellate ganglion block for the treatment of allergic rhinitis. *Laser Therapy* 4 : 117-120, 1992
  - 23) 佐藤のり子, 楊 鴻生: 半導体レーザーによる星状神経節照射の効果. *ペインクリニック* 15 : 97-101, 1994
  - 24) 細川豊史, 大森美佐子, 河端恭代: 低出力レーザー治療によるかゆみの制御. *日本レーザー医学会誌*, 24 : 3-10, 2003
  - 25) 大森美佐子, 中川博美, 細川豊史: 上肢における星状神経節ブロックの効果判定-局所皮膚血流, 皮膚温, および精神的発汗量の変化の検討-. *ペインクリニック* 14 : 3-7, 1992
  - 26) Ohmori M, Nakagawa H, Hosokawa T: A method for evaluation of sympathetic activity using spectral analysis of digital blood flow waves. *The Pain Clinic* 8 : 227-233, 1995
  - 27) 宮澤一治, 河谷正仁, 西川俊昭: 猫上頸神経節への半導体レーザー照射が交感神経活動と頸動脈血流量に及ぼす影響. *ペインクリニック* 21 : 553-561, 2000
  - 28) Amano A, Miyagi K, Azuma T, et al: Histological studies on the rheumatoid synovial membrane irradiated with a low energy laser. *Laser in Surgery and Medicine* 15 : 290-294, 1994
  - 29) 伊藤雄介: 培養滑膜細胞のPGE2およびIL-1 $\beta$ の産生に及ぼすレーザー照射の影響. *聖マリアンナ医科大学雑誌* 18 : 643-651, 1990
  - 30) 森田秀樹: 皮膚科領域における低出力レーザー治療. *日本レーザー医療学会誌* 27 : 285-288, 2007
  - 31) 庄治昭伸: 半導体レーザー療法の皮膚科領域への応用. (低反応レベルレーザーと直線偏光近赤外線-光線療法の基礎と臨床-). 東京, 真興交易医書出版部, 2001, 233-238
  - 32) 小川節郎: 新鮮例における神経ブロック, 抗ウイルス薬およびレーザー併用の効果. (劔物修・編: 図説半導体レーザーと痛みの治療). 東京, メジカルビュー社, 1996, 84-85
  - 33) 劔物 修・編: 半導体レーザーによる疼痛治療ガイドブック. 東京, メジカルビュー社, 2000
  - 34) 小川節郎: 帯状疱疹後神経痛. (小川節郎・編: 低反応レーザーと直線偏光近赤外線-光線療法の基礎と実際-). 東京, 真興交易医書出版部, 2001, 46-49

※ ※ ※

**特集** 疼痛治療に用いられる話題の診断機器と治療機器

## 《Ⅱ. 治療機器》

**硬膜外脊髄刺激療法**

深澤 圭太\* 細川 豊史\*

**キーワード** 脊髄刺激療法, 神経障害性疼痛, 末梢血管障害, 脊椎手術の失敗症候群, 複合性局所疼痛症候群

## ■ はじめに

脊髄電気刺激療法 (spinal cord stimulation : SCS) は疼痛治療における手術療法の一つとして、薬物療法、理学療法、神経ブロックに治療抵抗性の難治性神経障害性疼痛に対する治療法と位置づけられる。硬膜外腔に電気刺激電極を留置し、硬膜を介して脊髄後索を微弱電気で刺激することで痛みを和らげる効果を示す (図 1)。刺激は体外から刺激装置本体の植え込み部分にプログラマを当ててリモコン操作でオン、オフと強弱を調整して行う。すべての患者で効果を示すわけではないが、効果のある症例では、ほかのあらゆる治療に抵抗性の非常に難治性の疼痛にもかかわらず 50-70% の除痛効果を示すこともあり、非常に有効な治療手段であるといえる。

1967 年に Shealy ら<sup>1)</sup> が椎弓切除下に電極を埋め込んで施行したのが SCS の始まりである。その後電極開発が進むとともに硬膜外ブロックと同じ要領で経皮的に硬膜外腔に電極を留置する経皮的経硬膜外腔 SCS が可能となり、1975 年に体内植え込み式刺激電極装置が開発されてからは欧米で広く普及した。本邦においては一足遅れて、当施設では 1986 年から、そして 1988 年に高度先進医療として認められたころよりペインクリニックを中心として徐々に普及し始めた。1999 年に完全植え込み型脊髄刺激装置に保険適用が認められてからは、わが国における実施症例数も増加の一途をたどり、その後、より侵襲の少ない試験刺激法である puncture trial の導入や 2006 年より 2 本の

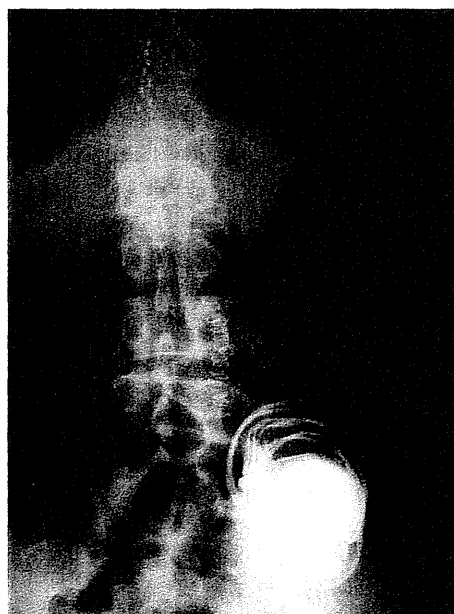


図 1 脊髄刺激療法

電極を用いるデュアルリードシステムが臨床使用されるようになったことにより、当施設においても施行症例がここ数年で倍増している状況である。現在では、難治性疼痛に対する interventional pain treatment の一つとして確立されて、世界で年間約 15,000 症例に施行されている。

複合性局所疼痛症候群 (complex regional pain syndrome : CRPS), 脊椎手術の失敗症候群 (failed back surgery syndrome : FBSS), 末梢血管障害 (peripheral vascular disease : PVD) などの疾患に対する治療としては無作為化臨床試験などのエビデンスもしっかりと確立しており、他の治療法に反応しない症例では試してみる価値のある治療法であるといえる。

\*京都府立医科大学麻酔科・疼痛緩和医療部

## 1 鎮痛機序<sup>2)</sup>

1965年にMelzakとWall<sup>3)</sup>は、“脊髄後角の膠様質のニューロンは痛みの信号を伝えるゲートの働きをしており、触、圧、振動などの低閾値感覚を伝える太い神経線維(Aβ)の刺激はこのゲートを閉ざし痛みの信号を伝えにくくする”というゲートコントロール理論を発表、これを基にSCSが考案された。そのため当初はすべての疼痛に対して鎮痛効果があると考えられていたが、その後さまざまな疾患でのSCSの臨床成績が報告されるうちにSCSは侵害受容性疼痛に対する効果が弱く、神経障害性疼痛や虚血性疼痛に効果があることが分かってきた<sup>4)</sup>。このことはゲートコントロール理論だけではSCSの奏効機序が説明できないことを示している。現在考えられている機序は以下のようなものであるが、いずれも推論の域を出ずいまだ不明な点が多い。

### 1) 脊髄分節レベルの伝導ブロック<sup>5)~7)</sup>

SCSの刺激で脊髄後角や脊髄視床路の伝導を分節的にブロックするという説である。脊髄刺激中でも、侵害刺激に対する痛覚は保たれることに矛盾する。

### 2) 下行性抑制系の賦活

橋青斑核と外側被蓋からノルアドレナリン作動性下行性抑制系が、中脳中心灰白質からセロトニン作動性下行性抑制系が延髄大縫線核を経て脊髄後側索を通り脊髄後角に達する。SCSはこの疼痛抑制系を刺激する。SCS刺激により脳脊髄液中のアドレナリンが増加したり<sup>8)</sup>、脊髄組織内のセロトニンやP物質が増加していることが報告されている<sup>9)</sup>。この系は、内因性オピオイドが関与するが、脊髄刺激では髄液中のエンケファリンの増加はなく、除痛効果がナロキソンで拮抗されないこと、さらにモルヒネでも効果のない神経痛にもSCSの効果が見られる場合があることなどから、その関与については否定的な報告も多い。

### 3) 視床レベルでの上行性疼痛抑制系の賦活<sup>4)</sup>

脊髄刺激の結果、上行性にインパルスが生じて上位の痛覚の中枢である視床が刺激され、その活動性を抑制し除痛効果が発現するという説であ

る。慢性疼痛患者においてSCSが有効な症例では単一光子放出型コンピュータ断層撮影(single photon emission computed tomography : SPECT)において視床や大脳皮質での血流変化が生じるという報告<sup>10)</sup>もあり、なんらかの形で上位中枢に影響を及ぼしている可能性が考えられる。

### 4) 神経伝達物質の分泌<sup>11)</sup>

臨床においてSCS刺激により鎮痛作用を発揮するまでには数分間を要し、刺激終了後も鎮痛作用が持続することから神経化学的な機序が関与することが推測される。事実SCSにより脊髄後角のγ-アミノ酪酸(γ-aminobutyric acid : GABA)が増加すること<sup>12)</sup>、アロディニアを示すラットの脊髄後角で増加している興奮性アミノ酸であるグルタミン酸やアスパラギン酸がSCS刺激により減少することが示されている<sup>13)</sup>。その他にもアデノシン受容体の関与<sup>5)</sup>などが報告されており、さまざまな神経化学的機序が複雑に関与している可能性が示唆される。

### 5) 交感神経抑制作用

SCS刺激が狭心症や末梢血管障害による虚血痛や交感神経依存性疼痛に対して鎮痛効果と血流改善効果を示すことから、交感神経を抑制する可能性が考えられている<sup>12)</sup>。

## 2 適応疾患

開発当初からさまざまな難治性疼痛に対してSCSが適用されてきたが、徐々に臨床経験が蓄積されてくるにつれてSCSが効果を示す疼痛は神経障害性疼痛と虚血性疼痛であることが分かってきた。神経障害性疼痛の中でも中枢神経系の障害によるものよりも末梢神経の障害による疼痛に対して効果を示す。

もっとも効果を示すのは閉塞性動脈硬化症などの末梢血管障害による疼痛と狭心痛であるとされ(表1)<sup>14)</sup>、欧州ではこの目的でSCSが施行されることが多い。しかし、本邦や米国においてはCRPSなどの神経障害性疼痛やFBSSのような神経障害性疼痛と侵害受容性疼痛の混合されているような病態においての施行が多い。

以下、代表的な疾患について述べる。



表 1 SCS の適応疾患

非常に有効	末梢血管障害 閉塞性血管攣縮 狭心症
有効	FBSS (下肢痛) CRPS 末梢神経障害 糖尿病性神経障害 腕・腰神経叢障害 断端痛
やや有効	幻肢痛 脊髄損傷 (不完全) 帯状疱疹後神経痛 FBSS (腰痛)
あまり有効でない	会陰部痛 肋間神経痛
無効	中枢痛 (脳血管障害後) 脊髄損傷 (完全) 顔面痛

### 1) CRPS

CRPS は依然として非常に難治性の疼痛であるが、CRPS に対する SCS の効果は type I, type II ともに期待できる。諸報告では 47-72% の有効率が示されている<sup>15)~17)</sup>。特に CRPS type I においては高いエビデンスを示しており、対費用効果も良好である<sup>18)</sup>。施行時期については、特に CRPS type II において発症後 12 カ月以内に施行すれば効果が高いとする報告がある<sup>19)</sup>。

### 2) FBSS

腰椎手術後に疼痛、しびれなどの症状が、不変もしくは悪化、あるいは再発した疾患群である。疼痛の原因としては癒着性神経根症や術後脊柱管狭窄症、残存もしくは再発ヘルニア、癒着性くも膜炎など複雑な病態が混在し、神経障害性疼痛と侵害受容性疼痛、時に心因性疼痛を来す。SCS についてはランダム化比較試験 (randomized controlled trial: RCT) を含む多くの報告がある。再手術<sup>20)</sup>やくも膜下オピオイド投与<sup>21)</sup>との比較でその有効性と対費用効果<sup>22)</sup>が示されている。しかし、頸椎手術後の肩-上肢痛、上位腰椎手術後の下肢末梢部の疼痛に対して施行する際には術後の硬膜

外腔の癒着により留置が困難であることが多い。

### 3) 末梢血管障害

薬物療法、手術療法、交感神経ブロックなどの従来の治療法に反応しない末梢血管障害による難治性疼痛に対して SCS は非常に有効である。適応疾患としては閉塞性動脈硬化症、バージャー病、レイノー病、凍傷といった血管攣縮性の疾患が挙げられる。

疼痛の軽減が得られるばかりでなく組織の微小循環を改善させ、救肢率を上昇させることが報告されている<sup>23)~25)</sup>。

閉塞性動脈硬化症では Fontaine 分類が III-IV で潰瘍が直径 3 cm 以下のものまでが適応とされ、組織微小循環の指標である TcPO<sub>2</sub> が治療開始前で 30 mmHg 以下であり、試験刺激でその改善と鎮痛効果が見られるものが良い適応であると考えられている<sup>26)27)</sup>。

### 4) 狭心症

SCS の狭心症に対する有効性は欧州で多く報告されている。適応となるのは薬物療法に抵抗性で、血管内治療、外科的手術の適応のない難治性狭心症である。単に狭心痛を軽減するのみではなく心筋虚血を改善させることが数多くの研究<sup>28)29)</sup>で示されている。本邦ではまだほとんど行われていない。

### 5) 帯状疱疹後神経痛

帯状疱疹後神経痛に対する SCS の効果については報告により差があるが (有効率 20-60%)<sup>16)30)</sup>、あまり高いとはいえない。当院での成績も有効率 30% 程度であるが高い効果を示す症例もあるのは事実であり、他の治療で効果が得られず強い疼痛が継続している患者には puncture trial を行ってもよいと考えている。最近では、比較的発症早期で硬膜外ブロックの効果があまり見られない症例について一時的な SCS の使用が試みられている<sup>31)</sup>。

## 3 患者選択

前項で述べた適応疾患をもち、以下の条件を満たす患者に対し試験刺激を行い、それが有効であることが条件となる。

- ① 治療について（その限界，リスク，術後の生活の制限など）十分に理解している。
- ② 他の治療（内服，神経ブロック，理学療法など）に抵抗性であり，外科的治療の適応もない。
- ③ 心理学的要因，薬物依存がない。
- ④ 自分で治療器を操作できる。

#### 4 患者への説明

治療および刺激装置の概要，合併症の可能性，術後の注意事項を説明する。われわれの施設では，患者への説明はまず簡単に SCS について説明したうえで，パンフレットを渡して持ち帰ってもらい家族とともに読んでもらう。同時に試験刺激は puncture trial で行うので侵襲が少ない手技で効果判定が可能であることも説明しておく。興味をもち治療を希望する患者には後日，次のようなことを説明する。

- ① SCS で痛みが完全に取れるわけではなく，半分から 7 割程度改善すれば上出来であること
- ② 生活の質（quality of life : QOL）の改善や鎮痛薬の減量が期待できること
- ③ 治療の流れ
- ④ 合併症
- ⑤ 術後の注意点と制限されること（後述）
- ⑥ 植え込み後はプログラマを用いて自分でいつでも刺激が行えること
- ⑦ 必要なくなれば除去することも可能であること

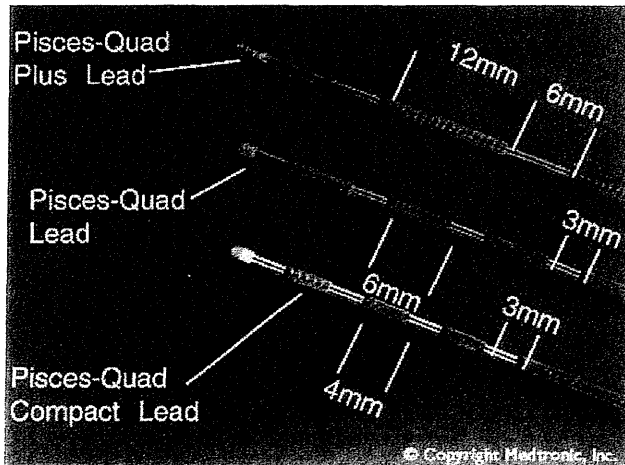


図 2 経皮的挿入用電極（4 極タイプ）

#### 5 手技の実際

##### 1) リード留置から試験刺激まで

有効性が期待される疾患については前述したとおりだが，実際のところ同じ疾患でも症例によって効果はまちまちであり，試験的に電極を留置したうえでスクリーナ（体外式テスト刺激装置）による刺激を行い，一定の効果が得られた患者に対してのみ，植え込み型刺激装置（implantable pulse generator : IPG）を留置することになる。トライアル期間は 3-7 日程度とする。

疼痛部位を支配する脊髄神経を確認し，目的の脊髄神経が脊髄後根から後角に入るレベルを電極留置の目標位置とし，穿刺部位，およびリード先端位置の目安を決定する（表 2）。

リード留置法は，リードの種類と挿入法が異なる以下の 3 法がある。

(a) 経皮的挿入による電極挿入（4 極タイプ電極を使用，図 2）

##### ① puncture trial（図 3）

表 2 電極留置位置の目安

疼痛部位	穿刺部位	リード先端部位
足	L2-L3	T11-L1
下肢	T12-L1	T9-T10
下肢・殿部・腰背部	T11-T12	T8-T9
胸壁	T4-T6	T1-T2
上肢	T1-T3	C3-C5

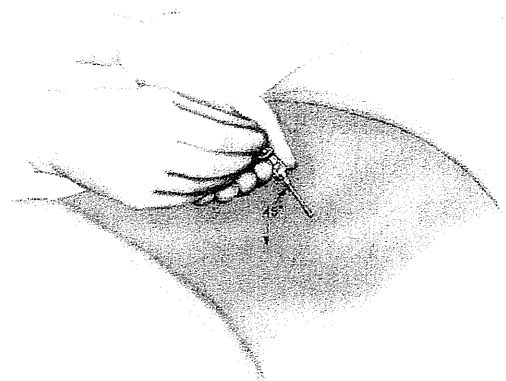


図 3 puncture trial

近年多くの施設で行われている手技である。従来行われてきた surgical trial は皮膚切開を加えてのリード留置となり侵襲が大きくなるうえ、無効時に抜去する際にも再び皮膚切開を加えての小手術が必要となる。それに対し puncture trial はほぼ硬膜外チューブの留置と同等の侵襲で試験刺激を行うことができるため、患者にも医療者側にもストレスが少ない。

患者を腹臥位（もしくは側臥位）とし皮膚を滅菌消毒した後、硬膜外ブロックと同じ要領で局麻下に Touhy 針を抵抗消失法で硬膜外腔まで進める。アプローチは傍正中法が推奨される。これは、挿入時や留置後のリードへの負荷によるリードの断線を避けるため、また硬膜外腔に対する Touhy 針の挿入角度をなるべく鈍角とすることで電極の挿入や操作がスムーズになるためである。透視で Touhy 針の先端が正中（もしくはやや穿刺側より）にあることを確認し、リードを挿入する。X線透視下に患側、ほぼ正中を上行させ目的の椎体レベルまでリード先端を進め、側面像でリードが腹側硬膜外腔へ迷入していないことを確認する。スクリーナに接続して試験通電を行い、患者と直接会話し効果を確認しながら至適部位へ刺激が得られるように調整する。目的より少し上の椎体レベルまでリードを進めてから徐々に抜いてくるようにするとリードが硬膜外腔内でたわむこともなく、微調整しやすい。至適位置が決定したら Touhy 針のみ抜去し、リードを皮膚に縫合固定して終了する。われわれの施設では清潔度の面から手術室で施行しているが、透視室でも施行可能である。試験刺激後にリードをいったん抜去して本留置の際には新しいリードを使用するため、リードが余分に必要となることはコスト面でのデメリットである。抜去は通常の硬膜外チューブ抜去と同様に簡単に行うことができる。

## ② surgical trial (図 4)

puncture trial と同様にリード位置を決定した後、刺入部を中心に皮膚に小切開を加え、リードにアンカーを通して筋膜へ固定する。リードを清潔に保つため、経皮用エクステンションを接続し皮下トンネルを経由して体外にエクステンションのみ出た状態で固定する。本留置では清潔に保た

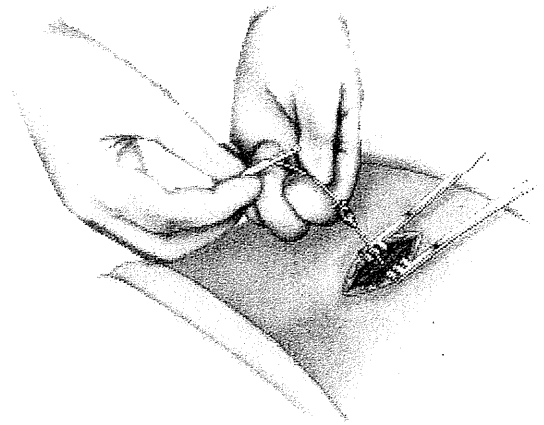


図 4 surgical trial

れたリードをそのまま使用して刺激装置本体を植え込める。

(b) 椎弓切除による電極植え込み（プレート型 4 極タイプ、図 5、図 6)

椎弓切除を行ってプレート型電極を硬膜外腔へ留置するため侵襲が非常に大きくなる一方、固定が良いため術後のリード位置ずれが少ない、手術既往があり硬膜外腔穿刺による留置が困難な症例でも留置が可能であるなどのメリットもある。

## 2) 脊髄刺激装置植え込み

トライアル期間に自覚症状の改善や日常生活動作の改善度を評価し、効果が見られた場合には IPG の植え込みを行う。体位は基本的に側臥位で行うが、改めてリードを留置する必要のある puncture trial の場合にはまず腹臥位でリードを挿入、固定後にいったん創を閉鎖し側臥位もしくは仰臥位に体位変換して施行する方法もある。通常リード位置が頸椎の場合は前胸部、胸椎、腰椎の場合は上腹部に植え込みを行う。上腹部に留置する際には前屈時に肋骨に当たることなく、かつベルトが当たらない位置を選択することが術後の QOL 向上に不可欠である。

当施設では通常側臥位で植え込みを行う。まず IPG を植え込む皮下ポケットを作製し、背部からポケット位置までトンネリングツールを用いてエクステンションコードを通す。エクステンションコードの両端をリードと IPG に接続し抗生物質入りの生理食塩液で洗浄、閉創する。

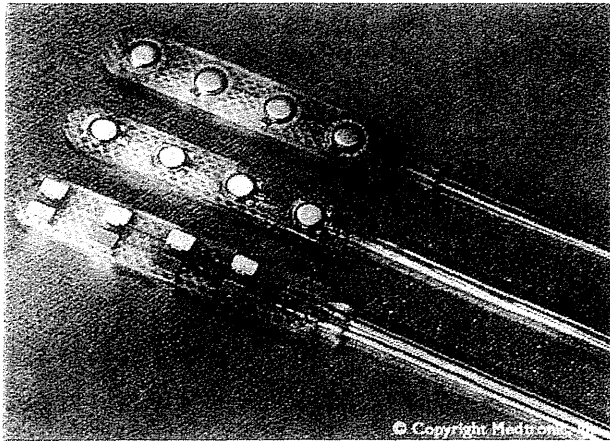


図 5 プレート型電極 (4 極タイプ)

## 6 術後の注意点

術直後の 6-8 週間は電極のずれが起こりやすいため激しい運動、自動車の運転、電動装置や工具の操作などは避ける。また、次に示すような医療処置や装置はジェネレーターを損傷させたり条件の再設定を起こしたり、リードを断線させる可能性があるため避ける必要がある。

① 磁気共鳴画像 (magnetic resonance imaging : MRI) : リード断線, ジェネレーターの損傷, 条件の再設定

② ジアテルミー : ジェネレーターの損傷, 植え込み部位の組織損傷

③ 電気メス, 除細動器 : ジェネレーターの損傷, 条件の再設定

④ 心臓ペースメーカー, 植え込み型除細動器 (implantable cardioverter-defibrillator : ICD) : ペースメーカーのセンシング異常, ジェネレーターの損傷, 条件の再設定

⑤ 盗難防止装置, 手荷物検査装置 : 電源のオン, オフが切り替わる

⑥ 電磁調理器, IH 炊飯器 : ジェネレーターの条件の再設定

### ■ おわりに

過去の症例の経験から疾患別に SCS の有効性は分かってきているものの, 上述したように SCS の作用機序がまだまだ十分に解明されておらず,

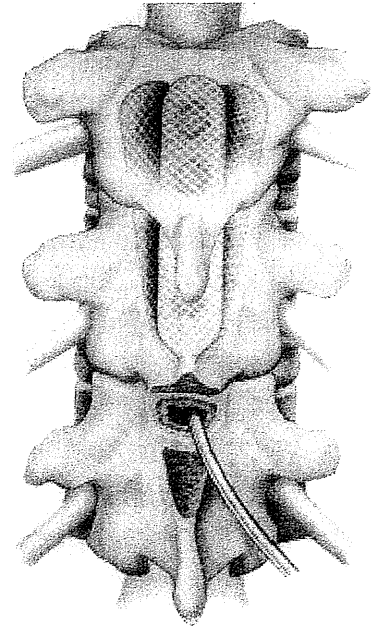


図 6 プレート型電極 (4 極タイプ) を用いた椎弓切除による電極植え込み

個々の症例でその効果を事前に完全に予測することは困難である。試験植え込み術のみが最終適応を判断する唯一の方法であることは間違いない。低侵襲の puncture trial 法の出現によって患者も医療者側も比較的ストレスなく刺激試験が行えるようになったことは, 他の保存的治療に抵抗性の難治性疼痛患者に対して考慮すべき治療法として, さらに推奨されるべきものであると考える。

### 引用文献

- 1) Shealy CN, Taslitz N, Mortimer JT, Becker DP. Electrical inhibition of pain : experimental evaluation. *Anesth Analg* 1967 ; 46 : 299-305.
- 2) 蔵 昌宏. 奏効機序. 森本昌宏編. 脊髄電気刺激療法. 東京 : 克誠堂出版 ; 2008. p.97-107.
- 3) Melzack R, Wall PD. Pain mechanisms : a new theory. *Science* 1965 ; 150 : 971-9.
- 4) Meyerson B, Linderöth B, Lind G. Spinal cord stimulation in chronic neuropathic pain. *Lakartidningen* 1991 ; 88 : 727-32.
- 5) Meyerson BA, Cui JG, Yakhnitsa V, Sollevi A, Segerdahl M, Stiller CO, et al. Modulation of spinal pain mechanisms by spinal cord stimulation

- and the potential role of adjuvant pharmacotherapy. *Stereotact Funct Neurosurg* 1997 ; 68 : 129-40.
- 6) Larson SJ, Sances A, Jr, Riegel DH, Meyer GA, Dallmann DE, Swiontek T. Neurophysiological effects of dorsal column stimulation in man and monkey. *J Neurosurg* 1974 ; 41 : 217-23.
- 7) Campbell JN. Examination of possible mechanisms by which stimulation of the spinal cord in man relieves pain. *Appl Neurophysiol* 1981 ; 44 : 181-6.
- 8) Levin BE, Hubschmann OR. Dorsal column stimulation : Effect on human cerebrospinal fluid and plasma catecholamines. *Neurology* 1980 ; 30 : 65-71.
- 9) Linderroth B, Gazelius B, Franck J, Brodin E. Dorsal column stimulation induces release of serotonin and substance P in the cat dorsal horn. *Neurosurgery* 1992 ; 31 : 289-96 ; discussion 296-87.
- 10) Nagamachi S, Fujita S, Nishii R, Futami S, Wakamatsu H, Yano T, et al. Alteration of regional cerebral blood flow in patients with chronic pain—evaluation before and after epidural spinal cord stimulation. *Ann Nucl Med* 2006 ; 20 : 303-10.
- 11) Linderroth B, Stiller CO, Gunasekera L, O'Connor WT, Franck J, Gazelius B, et al. Release of neurotransmitters in the CNS by spinal cord stimulation : survey of present state of knowledge and recent experimental studies. *Stereotact Funct Neurosurg* 1993 ; 61 : 157-70.
- 12) Linderroth B, Herregodts P, Meyerson BA. Sympathetic mediation of peripheral vasodilation induced by spinal cord stimulation : animal studies of the role of cholinergic and adrenergic receptor subtypes. *Neurosurgery* 1994 ; 35 : 711-9.
- 13) Cui JG, O'Connor WT, Ungerstedt U, Linderroth B, Meyerson BA. Spinal cord stimulation attenuates augmented dorsal horn release of excitatory amino acids in mononeuropathy via a GABAergic mechanism. *Pain* 1997 ; 73 : 87-95.
- 14) 村川和重, 森山萬秀, 野間秀樹, 保岡宏彰, 柳本富士雄, 中野 範. 【痛みに対する神経刺激療法】脊髄電気刺激による痛みの治療. *臨床脳波* 2005 ; 47 : 7-17.
- 15) Sanchez-Ledesma MJ, Garcia-March G, Diaz-Cascajo P, Gomez-Moreta J, Broseta J. Spinal cord stimulation in deafferentation pain. *Stereotact Funct Neurosurg* 1989 ; 53 : 40-5.
- 16) Kumar K, Toth C, Nath RK. Spinal cord stimulation for chronic pain in peripheral neuropathy. *Surg Neurol* 1996 ; 46 : 363-9.
- 17) Kemler MA, Barendse GA, Van Kleef M, Van Den Wildenberg FA, Weber WE. Electrical spinal cord stimulation in reflex sympathetic dystrophy : retrospective analysis of 23 patients. *J Neurosurg* 1999 ; 90 : 79-83.
- 18) Taylor RS, Van Buyten JP, Buchser E. Spinal cord stimulation for complex regional pain syndrome : a systematic review of the clinical and cost-effectiveness literature and assessment of prognostic factors. *Eur J Pain* 2006 ; 10 : 91-101.
- 19) Verdolin MH, Stedje-Larsen ET, Hickey AH. Ten consecutive cases of complex regional pain syndrome of less than 12 months duration in active duty United States military personnel treated with spinal cord stimulation. *Anesth Analg* 2007 ; 104 : 1557-60, table of contents.
- 20) North RB, Kidd DH, Farrokhi F, Piantadosi SA. Spinal cord stimulation versus repeated lumbosacral spine surgery for chronic pain : a randomized, controlled trial. *Neurosurgery* 2005 ; 56 : 98-106 ; discussion 106-7.
- 21) Hassenbusch SJ, Stanton-Hicks M, Covington EC. Spinal cord stimulation versus spinal infusion for low back and leg pain. *Acta Neurochir Suppl* 1995 ; 64 : 109-15.
- 22) North RB, Kidd D, Shipley J, Taylor RS. Spinal cord stimulation versus reoperation for failed back surgery syndrome : a cost effectiveness and cost utility analysis based on a randomized, controlled trial. *Neurosurgery* 2007 ; 61 : 361-8 ; discussion 368-9.
- 23) Jacobs MJ, Jorning PJ, Beckers RC, Ubbink DT, van Kleef M, Slaaf DW, et al. Foot salvage and

improvement of microvascular blood flow as a result of epidural spinal cord electrical stimulation. *J Vasc Surg* 1990 ; 12 : 354-60.

- 24) Broseta J, Barbera J, de Vera JA, Barcia-Salorio JL, Garcia-March G, Gonzalez-Darder J, et al. Spinal cord stimulation in peripheral arterial disease. A cooperative study. *J Neurosurg* 1986 ; 64 : 71-80.
- 25) Kumar K, Toth C, Nath RK, Verma AK, Burgess JJ. Improvement of limb circulation in peripheral vascular disease using epidural spinal cord stimulation : a prospective study. *J Neurosurg* 1997 ; 86 : 662-9.
- 26) Ubbink DT, Spincemaille GH, Prins MH, Reneman RS, Jacobs MJ. Microcirculatory investigations to determine the effect of spinal cord stimulation for critical leg ischemia : the Dutch multicenter randomized controlled trial. *J Vasc Surg* 1999 ; 30 : 236-44.
- 27) Amann W, Berg P, Gersbach P, Gamain J, Raphael JH, Ubbink DT. Spinal cord stimulation in the treatment of non-reconstructable stable critical leg ischaemia : results of the European Peripheral Vascular Disease Outcome Study (SCS-EPOS). *Eur J Vasc Endovasc Surg* 2003 ; 26 : 280-6.
- 28) Mannheimer C, Eliasson T, Andersson B, Bergh CH, Augustinsson LE, Emanuelsson H, et al. Effects of spinal cord stimulation in angina pectoris induced by pacing and possible mechanisms of action. *BMJ* 1993 ; 307 : 477-80.
- 29) Chauhan A, Mullins PA, Thuraisingham SI, Taylor G, Petch MC, et al. Effect of transcutaneous electrical nerve stimulation on coronary blood flow. *Circulation* 1994 ; 89 : 694-702.
- 30) Meglio M, Cioni B, Prezioso A, Talamonti G. Spinal cord stimulation (SCS) in the treatment of postherpetic pain. *Acta Neurochir Suppl (Wien)* 1989 ; 46 : 65-6.
- 31) 柳本富士雄, 村川和重. 帯状疱疹後神経痛発症予防のための puncture trial—temporary spinal cord stimulation—. 森本昌宏編. 脊髄電気刺激療法. 東

京 : 克誠堂出版 ; 2008. p.117-23.

## ABSTRACT

### Spinal Cord Stimulation

Keita FUKAZAWA, Toyoshi HOSOKAWA

*Department of Pain Treatment and Palliative Medicine,  
Kyoto Prefectural University of Medicine, Kyoto 602-8566*

Spinal cord stimulation (SCS) is an established treatment for intractable neuropathic pain. SCS is performed using an implantable pulse generator connected to leads with electrodes positioned in the dorsal epidural space, which are then used to stimulate the ascending and descending dorsal column fibres to achieve paresthesia covering the area of pain.

It is based on the Gate Control Theory, introduced by Melzack and Wall in 1965, which suggests that stimulation of large afferent fibres can inhibit pain transmission at the level of the dorsal horns. More recent studies indicate that SCS releases substance P, serotonin, noradrenaline and GABA in the dorsal horns ; activation of the GABAB receptor may be linked to a decrease in the release of glutamate and other excitatory amino acids, resulting in a decrease of neuropathic pain.

The clinical indications for SCS are mainly peripheral vascular diseases (PVD), refractory angina, failed back surgery syndrome (FBSS), complex regional pain syndrome (CRPS) type 1 and type 2, spinal cord stenosis and neuropathic pain.

The new puncture trial method is less invasive and can reduce psychological resistance of the patient for SCS manipulation.

**key words** : spinal cord stimulation, neuropathic pain, peripheral vascular diseases, failed back surgery syndrome, complex regional pain syndrome

## 経皮的電気的神経刺激療法 (TENS)

柿原 健<sup>1)</sup> 細川 豊史<sup>1,2)</sup>原田 秋穂<sup>1)</sup><sup>1)</sup>京都府立医科大学大学院医学研究科麻酔科学教室<sup>2)</sup>京都府立医科大学疼痛緩和医療学講座

## 要 旨

1965年にMelzackおよびWallによるゲートコントロール理論が提唱され、電気刺激による除痛が理論的に可能であることが示された。1974年にBurtonらが、経皮的電気刺激法(transcutaneous electrical nerve stimulation: TENS)による鎮痛治療の有効性を報告して以来、非侵襲型で簡便なTENSは広く臨床応用されることとなった。特に「疼痛部位をTENSで刺激し、痛みを抑制しながらその部位を動かすことで、患者自身が痛み過敏となる悪循環を抑えながらリハビリテーションを行うことができる」という特徴を生かし、理学・作業療法領域での臨床研究報告が活発である。最近、複雑な刺激条件もボタン一つで設定できるTENS用の機器が一般の電気店で高額でない値段で販売されており、患者自身が自宅で施行する上で、非常に使いやすい仕様になっている。  
(ペインクリニック 30: 1649-1656, 2009)

キーワード: 経皮的電気刺激法, ゲートコントロール理論, 高頻度TENS/低頻度TENS

## はじめに

電気刺激による疼痛治療の歴史は、西暦46年に古代ローマの医師Scribonius Largusの著書「De compositionibus medicamentorum」にまで遡る。Largusはこの著書の痛風と頭痛の項に、魚が出す電気による治療について記載している。「痛風の痛みが始まったら、生きた黒シビレエイ“Black Torpedo”を海岸の波打ち際に置いて、その上に立ち、しびれが膝までおよぶのを待つ。慢性の耐え難い頭痛がある時には、痛みを感じる場所に生きた黒シビレエイを置き、痛みが消えるのを待つ」という極めて、実際の電気刺激療法の記述である。

その後、目立った医学的な発表は認められず、2千年近くの時が流れた後、1965年にMelzackおよびWallによるゲートコントロール理論<sup>1)</sup>が提唱され、電気刺激による除痛が理論的に可能であることが示された。これに基づき、多くの電気刺激による鎮痛法が、研究されることになった。最も臨床的に有効な埋め込み型の脊髄電気刺激療法や末梢神経刺激治療は、侵襲的であり、外科的な技術の習得、かつ感染や断線、電池の交換、さらに高額なための経済的問題などを抱えており、必ずしも一般的とはいえない。約10年後の1974年にBurtonら<sup>2)</sup>が、経皮的電気刺激法(transcutaneous electrical nerve stimulation: TENS)による鎮痛治療の有効性を報告して以来、非侵襲型で簡便な

〈Special Article〉 Forefront of nerve stimulation therapy

Transcutaneous electrical nerve stimulation (TENS)

Kenshi Kakihara, et al

Department of Anesthesiology, Kyoto Prefectural University of Medicine

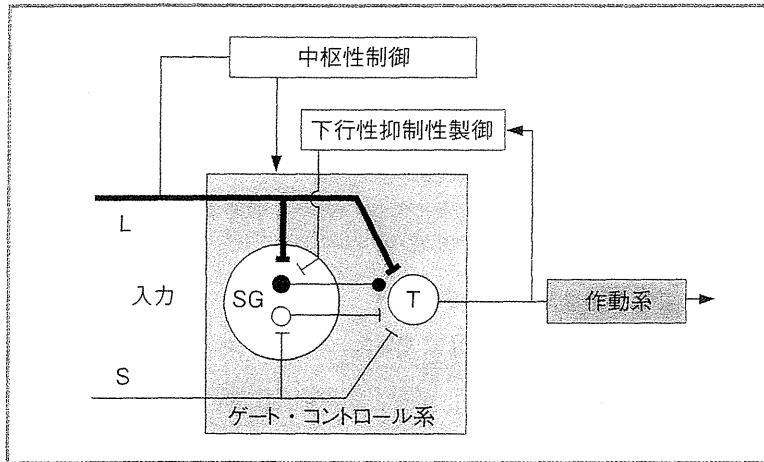


図1 ゲートコントロール機構 (文献1より引用一部改変)

Melzack と Wall によって提唱された疼痛抑制機構。現在では、SG 細胞や T 細胞に多くの介在ニューロンの存在が確認されており、中心灰白質や縫線核などの上位中枢や脊髄レベルからの関与が示されている。

L: 太い知覚神経線維 (A $\alpha$ , A $\beta$  線維), S: 細い知覚神経線維 (A $\delta$  線維, C 線維)

TENS は広く臨床応用されることとなった。

## 1. TENS の鎮痛メカニズム

TENS の鎮痛メカニズムに関しては、以下のような報告がなされている。

① 高頻度 TENS (100 Hz 程度) は一次ニューロンレベルで A $\delta$  線維を選択的に抑制する<sup>3-7)</sup>。

② 低頻度 TENS (5 Hz 程度) は脳脊髄液中の内因性オピオイドペプチド (エンドルフィン, エンケファリンなど) の産生を促すことにより除痛効果を得る<sup>8-10)</sup>。

その他、以下のゲートコントロール理論、下行性抑制および脊髄後角レベルでの抑制による理論付けがなされている。しかし現在でも、その鎮痛機序は完全に解明されておらず、TENS の刺激条件や刺激時間なども一定しておらず、まだまだ今後の研究に待つところが多い。

### 1) ゲートコントロール理論

先述のとおり、電気刺激による鎮痛効果の根

拠は、1965 年に Melzack および Wall により提唱された疼痛抑制機構のゲートコントロール理論によって常に説明がなされてきた。この理論は、「脊髄後角には、末梢からの一次求心性線維を活動系に投射している伝達細胞 (T 細胞) と、一次求心性線維と T 細胞間のシナプス伝達を抑制する膠様質細胞 (SG 細胞) がある。痛みが生じると細い感覚神経である A $\delta$  線維や C 線維が刺激される。この疼痛刺激は T 細胞を興奮させ、SG 細胞の活動を抑制する。一方、電気刺激や触覚による神経刺激は、太い感覚神経 (A $\beta$  線維など) を通して、T 細胞・SG 細胞をともに興奮させる」というものであった (図 1)。

つまり、細い神経からの刺激 (侵害入力) は、SG 細胞を抑制し、痛み信号伝達のゲートを開き、痛みを感じる。ここで皮膚に弱い刺激が加わると、太い神経からの入力により SG 細胞が興奮し、ゲートが閉ざされ、T 細胞が興奮されなくなる。

この特性を利用するためには、太い神経を選



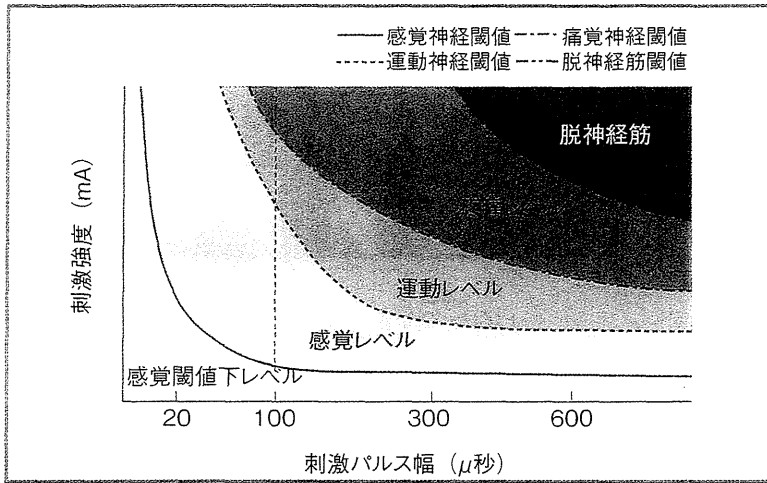


図2 強さ-時間曲線 (文献11より引用)

電気刺激に対する神経と脱神経筋の閾値は、刺激強度とパルス幅により変化する。100  $\mu$ s 以下では、感覚閾値 ( $A\alpha$ ,  $A\beta$  神経線維) は、運動閾値や疼痛閾値 ( $A\delta$ , C 線維) に比べて低い

択的に刺激しなければならない。神経線維と電気刺激のパルス幅の関係を表した、強さ-時間曲線を図2に示す<sup>11)</sup>。パルス幅が100  $\mu$ s 以下では、運動神経や痛覚神経の閾値が高いため、 $A\alpha$  や  $A\beta$  線維を電気刺激により選択的に刺激することができることがわかる。

これにより、高頻度で弱い電気刺激によるTENSで疼痛緩和効果が得られるという説明が可能となる。

## 2) 下行性抑制機構

現在では、SG細胞とT細胞の間には多くの介在ニューロンが存在しており、広汎性侵害抑制調節や中枢からの下行性疼痛抑制経路もこれに関与していることがわかっている。

中脳中心灰白質 (periaqueductal gray : PAG) は、中枢神経全体の中で最も重要な疼痛抑制に関与する部位である<sup>12)</sup>。PAGは吻側延髄腹内側部 (rostral ventromedial medulla : RVM) に投射しており、RVMのセロトニン作動性ニューロンは脊髄後角の侵害受容ニューロンを制御する。また青斑核、延髄吻側、中脳から脊

髄前側索を下行し、ノルアドレナリン、 $\alpha_2$  アドレナリン受容体が関与して脊髄後角の侵害受容ニューロンを抑制する<sup>13)</sup>。また、痛み信号を中枢へ伝える経路は視床へとつながっている (脊髄視床路) が、上行する途中でPAGに副側枝を出している。

## 3) 脊髄後角レベルでの抑制

侵害刺激に対して様々な生体反応が起こるわけであるが、その中心となる舞台は脊髄後角である。そこでGarrisonら<sup>5-7)</sup>は、TENSの周波数、刺激強度、パルス幅を変えて刺激した時のネコの脊髄後角ニューロン (spinal dorsal horn neuron : SDHN) の放電頻度を記録した (図3)。図3aは、皮膚をつまむことによる侵害刺激中にSDHNの放電頻度が増加、つまり反応が増加していることを示している。さらに侵害刺激中にTENSを加えるとSDHNの放電頻度が減少する。これは、TENSが侵害刺激によるSDHNの反応を抑制したことを示している。図3bは、SDHNの自発放電に対して刺激強度60mAに固定したTENSを加えた時の放電頻

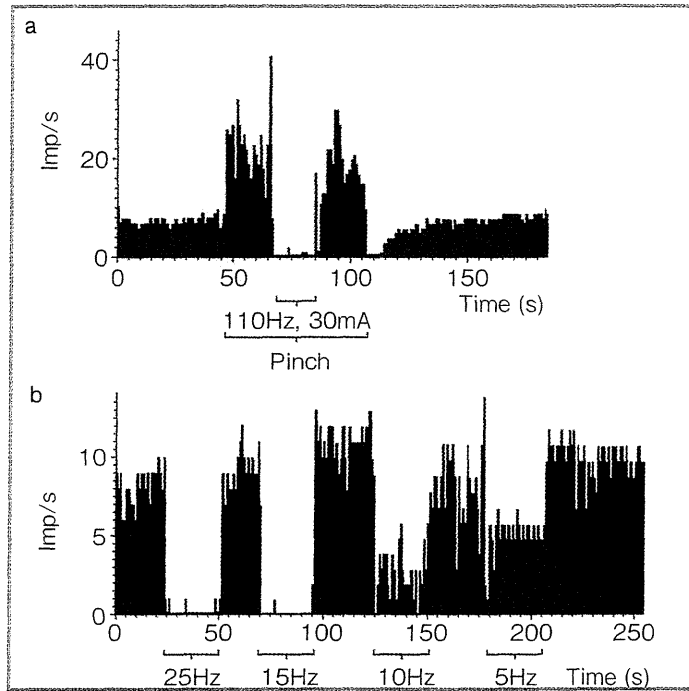


図3 侵害刺激に対する脊髄後角ニューロンの放電頻度 (文献5より引用) GarrisonとForemanはネコの脊髄後角ニューロン (SDHN) に対するTENSの効果を、放電頻度により示した。  
 a: 皮膚をつまむことによる侵害刺激によりSDHNの放電頻度が高くなるが、TENSにより放電頻度が抑制された。  
 b: TENSによるSDHNの自発放電抑制効果が周波数により変化していることを示している

度の変化を示している。TENSの周波数が5 Hzよりも25 Hzの時に、よりSDHNの反応が抑制されていることがわかる。この結果は、TENSが脊髄レベルのニューロンの発火に影響を及ぼすことを明示している。

## 2. TENS治療の実際

### 1) TENSに使用する機器

最近では、複雑な刺激条件もボタン一つで設定できるTENS用の機器が一般の電気店で高価でない値段で販売されている(図4)。温熱機能がついていたり、周波数も5 Hz程度の低周波から1,200 Hz程度の高周波まで、幅広い周

波数を選べるものも多く、医科向けの製品(図5)とほとんど遜色がない。上位機種では症状を選ぶと、刺激電極の設置すべき部位が液晶に表示されるなど、患者自身が自宅で施行する上で、非常に使いやすい仕様になっている。

### 2) TENSの適応

TENSは主に慢性疼痛に適応があり、特に慢性腰痛、筋・筋膜性疼痛、神経障害性疼痛、末梢神経麻痺、四肢の断端痛、幻肢痛、頭痛、癌性疼痛の一部などに効果があるといわれている。

TENSの特徴に「疼痛部位をTENSで刺激し、痛みを抑制しながらその部位を動かすことで、患者自身が痛み過敏となる悪循環を抑え

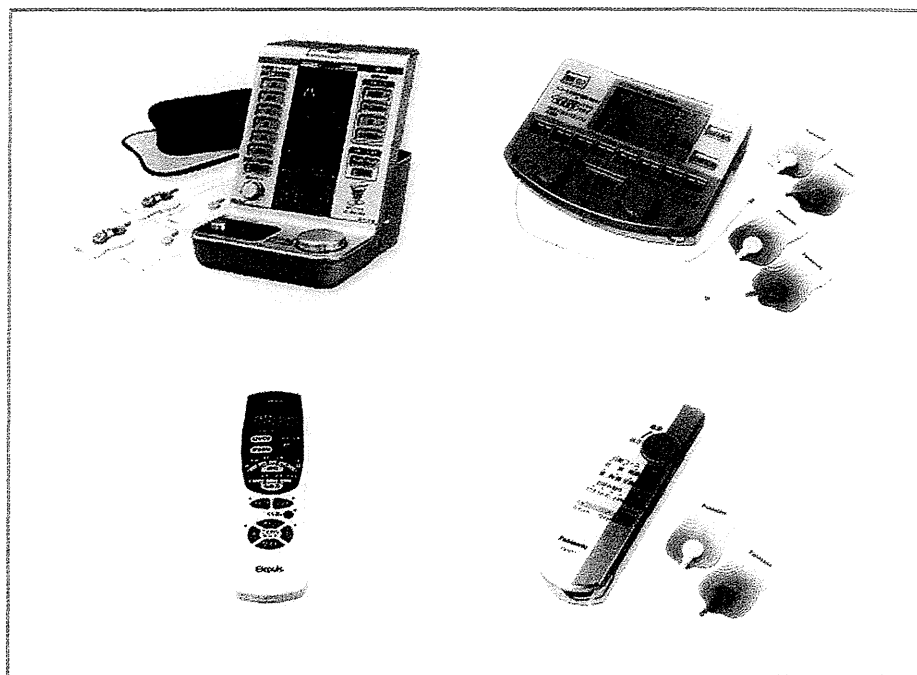


図4 一般の家電店で購入できる TENS 用機器

左上：HV-F5200 (オムロン) 24,000 円程度，右上：EW6021 P-S (パナソニック) 10,000 円程度，左下：HV-F128 (オムロン) 4500 円程度，右下：EW6011 PP-S (パナソニック) 5000 円程度 (価格は 2009 年 11 月，楽天市場の検索結果)

ながらリハビリテーションを行うことができる」ということがある。この方法により、頸肩腕症候群あるいはそこから派生した CRPS (complex regional pain syndrome) の症状も改善することができたという報告<sup>14)</sup>や、脳卒中後の麻痺上肢の鏡治療の際、患肢の痙縮を TENS で抑制し、患者の不快感を除去することで効果的なリハビリテーションを行うことができたという報告<sup>15)</sup>など、多くの理学・作業療法領域での臨床研究報告がある。

河野ら<sup>16)</sup>は、肘部管症候群の患者に、週 2 回、1 回 20 分 3 週間肘内側上顆の近位で尺骨神経を経皮的に刺激し、7 症例中 6 症例でしびれの改善が得られ、さらに痛みを伴う 4 症例中 2 症例では痛みの改善を認めたと報告している。大塚らの報告<sup>17)</sup>では、頸肩腕あるいは腰・膝の障害を主訴とする患者に対し、板状電極を C7 下

方と両足底に、棒状電極を両手掌に、吸着電極を解剖学的に疼痛に関連していると思われる脊椎の椎弓より 2~3 横指外側に左右対称に 3 対装着し、電気刺激を感じない最大出力で 10 分間、4 日間連続で通電治療した結果、8 割以上の患者に関節可動域の改善を認めたとされる。

また、急性疼痛に関しては、術後鎮痛に関する報告が多くある。まず、術後痛に対するオピオイド静脈投与による PCA (patient controlled analgesia) に加えて TENS を施行したところ、オピオイドの使用量を減らすことができたというものである<sup>18,19)</sup>。その多くは、低頻度 TENS と高頻度 TENS を組み合わせた条件で施行されたものである。また Hamza ら<sup>20)</sup>は、婦人科開腹手術術後 TENS を施行し、単調な高頻度 TENS よりも、2 Hz と 100 Hz の刺激頻度を組み合わせた刺激条件の場合に、術後のオピオイ

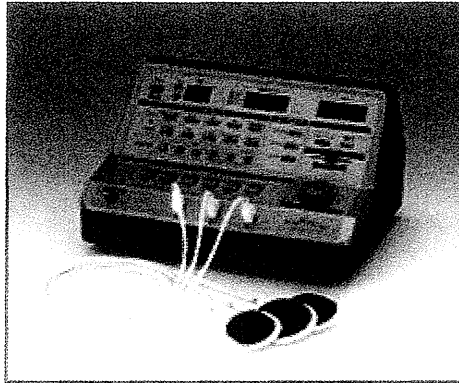


図5 医科向け TENS 用機器  
オートテズプロ（ホーマーイオン研究所）標準価格 630,000 円

ド消費量を 47% 減少させることができた」と報告している。

低頻度と高頻度の刺激の組み合わせは急性疼痛に限ったことではなく、慢性疼痛の治療においても、いわゆる「慣れ」による鎮痛効果の低下を防ぐ意味で重要と考えられ、最近の TENS 機器には、さらに 1/f ゆらぎと呼ばれる波動を取り入れた刺激なども付加されており、これらの複雑な混合刺激パターンをボタン一つで設定できるようになっている。

さらに自律神経系へも影響し、末梢循環を改善する効果があるとされる。石崎ら<sup>21)</sup>は、多発性筋炎の患者に対し、両手指末梢を手背及び手掌から挟むように電極を貼付した TENS 単独の治療で、手足の冷感が軽快し、さらに鍼治療を加えることによりチアノーゼも改善したと報告している。堀ら<sup>22,23)</sup>は、脳卒中患者の麻痺側前腕に TENS を行うと、刺激とともに指尖の温度が 2~3℃ 低下し、刺激の終了とともに上昇し、刺激前の温度を上回る傾向を示したと報告している。

友利ら<sup>24)</sup>は、ラットの坐骨神経圧挫モデルを用い、脱神経期に筋収縮を惹起させる手段として TENS を用いた。その結果、ヒラメ筋の萎縮は非刺激群に対して軽度であり、筋線維の直径も非刺激群より太く保たれ、また、坐骨神経

の有髓線維の密度・軸索直径も非刺激群より優位に高値であったと報告している。末梢神経損傷患者において、脱神経期が遷延すれば骨格筋は筋萎縮などの不可逆的な退行変化を起し、その後の神経筋機能障害や ADL 障害も重篤になることが少なくない。脱神経期の筋萎縮を予防する手段としての TENS の効果（治療的電気刺激 therapeutic electrical stimulation : TES）も期待されている。

### 3) 電極の装着

TENS の電極を装着する場所は、モーターポイント、トリガーポイント、経穴の 3 つの刺激点である。モーターポイントとは、筋肉に神経や血管が進入する狭い領域で、筋肉上の圧痛点と同じである。トリガーポイントも圧痛点であるが、こちらは、筋肉だけでなく、腱、靭帯、関節包にも分布している。これら圧痛点と経穴は、皮膚、筋の電気抵抗が少なく、電氣的刺激を与える場所として適している。

電極はある程度の柔軟さを持つ製品が多いが、常に皮膚表面の形状と適合するとは限らない。適合しない場合は、電極と皮膚の間に空気の層ができ、まったく通電しないか、あるいは局所に電流が集中し熱傷を起こすことがある。これを防ぐために電極面に伝導性の高いゲルを