脊椎術後疼痛症候群に対する脊髄刺激療法後の歩行改善

—歩行分析計を用いて客観的・定量的に解析した1例—

及川 公樹, 西川 泰正, 藤原 俊朗, 小笠原 邦昭

岩手医科大学脳神経外科学講座

Improvement of Gait Disturbance after Spinal Cord Stimulation for a Patient with Failed Back Surgery Syndrome: A Triaxial Accelerometer Study

Kohki Oikawa, M.D., Ph.D., Yasumasa Nishikawa, M.D., Ph.D., Shunrou Fujiwara, Ph.D., and Kuniaki Ogasawara, M.D., Ph.D.

Department of Neurosurgery, Iwate Medical University

Spinal cord stimulation (SCS) is essentially used to relieve chronic neuropathic pain that is resistant to medication, but it might also improve motor function. Triaxial accelerometry can objectively and quantitatively assess walking. This report describes a 46-year-old woman with failed back surgery syndrome that resulted in lower extremity pain and spasticity, which SCS subjectively and visually improved. Values for cadence, speed, step length, floor reaction, coefficients of variance, time per step, number of steps and walking cycles under SCS OFF determined by triaxial accelerometry considerably differed from those of controls, whereas most of those determined under SCS ON were similar to those of controls. Therefore, triaxial accelerometry can objectively assess the effects of SCS.

(Received June 8, 2017; accepted April 13, 2018)

Key words: spinal cord stimulation, gait disturbance, triaxial accelerometer

Jpn J Neurosurg (Tokyo) 27: 686-690, 2018

はじめに

脊椎術後疼痛症候群は、腰下肢の難治性神経因性疼痛のみならず下肢の痙縮を伴うことが多く、しばしば歩行障害の原因となる。脊髄刺激療法 (spinal cord stimulation: SCS) は慢性難治性疼痛を軽減させる目的で用いられているが、痙縮などの運動障害に対する効果についても近年注目されている。しかし、SCSのこれらの効果判定は主観的であり⁹⁾¹⁰⁾、客観的に評価することはこれまで行われていない。一方、歩行は各下肢筋・関節の統合

された機能であり、歩行を客観的・定量的に解析するために歩行分析計が開発され、リハビリテーション領域で臨床応用されている¹²⁾。

今回われわれは両側大腿屈側の筋痙縮を伴った難治性神経障害性疼痛の患者に対しSCSによる刺激を行うことで、除痛効果と筋緊張の軽減した症例を経験した。この治療効果を客観的・定量的に証明する目的で臨床応用されている歩行分析計(MG-M1110, LSIメディエンス, 東京)を用いて歩行解析を行ったので報告する。

連絡先: 及川公樹, 〒020-8505 盛岡市内丸19-1 岩手医科大学脳神経外科

Address reprint requests to: Kohki Oikawa, M.D., Ph.D., Department of Neurosurgery, Iwate Medical University, 1-19 Uchimaru, Morioka-shi, Iwate 020-8505, Japan

Fig. 1 X-ray photograph shows the electrodes placed at Th9, 10, 11

Fig. 2 Areas of the pain and paresthesia

症例提示

患 者：46 歳女性.

現病歴：腰痛を主訴に 27 年前に腰椎椎間板ヘルニア (L5/S1) に対し他院にて観血的ヘルニア摘出術を施行. 術後に癒着性くも膜炎を合併し, その後より腰痛の再燃および両側大腿屈側の締め付けられるような痛みと同部位の筋緊張が出現するようになった. 当科受診 3 年前に部分椎弓切除術および硬膜外ブロックを行うも, 十分な除痛効果が得られなかったため当科紹介となった.

身体所見：腰部から両側大腿屈筋にかけて, numerical rating scale (NRS) 9/10 の締め付けられるような疼痛を認めた. また, 歩行は軽度痙性歩行にみえたが, modified Ashworth scale では 0 点であった. 各下肢筋力および反射には異常はなかった. Hamilton Rating Scale for Depression: (HAM-D) 1 点, Mini-Mental State Examination (MMSE): 30/30, Barthel index: 100/100 (生活自立) であった.

経 過：低用量ケタミン点滴による drug challenge test を行った. 患者の腰部および下肢の疼痛は VAS 2/10 に改善したが自覚的な下肢の筋緊張感は持続した. 続いて SCS トライアルを行った. Th9~11 の後索上の硬膜外スペースに左右それぞれ 1 本ずつ 8 極リードを挿入し dual-lead stimulation を行った (**Fig. 1**). 刺激条件を左: 4-, 3+, 210 μ sec, 60 Hz, 右: 12-, 11+, 210 μ sec, 60 Hz, として試験刺激を行った. 1 Volt (V) から開始し 2.5 V 付近から, デルマトーム上で L2 および L3 領域内で腰部と両側大腿屈側の疼痛部位をカバーする範囲に paresthesia の誘発が確認された (**Fig. 2**). さらに 2.7 V で自覚的に筋緊張の改善を認めた. 逆に, 3 V では不快感が強く出たため 2.7 V 設定とした. 刺激により腰部および下

肢の筋緊張が軽減し歩容が視覚的に改善した. その直後に疼痛も腰部および両下肢ともに NRS 4/10 まで低下した. また, 刺激を OFF にすると筋緊張とともに疼痛も再燃し再び痙性歩行となった. この歩容変化に対し歩行分析計を用いて客観的・定量的歩行分析を行った.

歩行分析方法・結果：歩行分析には MG-M1110 (LSI メディエンス) を用いた. この装置を専用のベルトを用いて腰背部に装着. SCS 刺激 ON の条件下で, 10 m 歩行を 6 回計測した. 30 分の休憩時間を挟み刺激 OFF の条件下で ON 時と同じ方法で 6 回計測した. また, 正常値を求めるため患者の年齢に近い健常者 5 名 (女性 1 名, 平均年齢 45 ± 2 歳) についても同様の計測を実施した. これらの歩行計測によって得られる健常者, 本症例 SCS 刺激 ON 時および OFF 時の各データから算出される以下の 8 項目 (細目を含めると 12 項目) の歩行パラメータについて比較した.

1. coefficient of variation (CV) (%) : 遊脚期の変動係数. 一歩ごとの歩行姿勢のブレ・ばらつきの程度を示す値. 数字が小さいほど歩行のブレ・ばらつきが少ない.
2. 歩行率 (cadence/min) : 1 分間歩くのに要した歩数. 痙性歩行のような小刻み歩行では数字が大きく, 大腿でゆっくりとした歩行では小さい.
3. ステップ時間 (time per 1 step) (sec) : 1 歩進むのに要する時間. 小刻みや歩行速度が早ければ短くなり, 動作がゆっくりとしてストライドが大きいと長くなる.
4. 換算歩数 (number of step) (歩) : 歩行中の一定時間 $\div$ 平均ステップ時間 (この場合 10 m 歩行するのに要した歩数). 歩幅が大きいほど数字は小さくなり, 小刻み歩

Table 1 Data obtained using a triaxial accelerometer of controls and a patient during spinal cord stimulation (SCS) on and off

	Controls	Patient	
	(n=30) *	SCS off (n=6) **	SCS on (n=6) **
Coefficient of variation (%)	3.16±1.88	12.6±12.8	4.15±2.54
First leg	2.16±0.67	11.9±11.6	3.07±1.86
Second leg	1.95±0.62	12.4±14.5	3.67±3.40
Cadence (step/min)	116±7.91	103±5.25	125±1.37
Time per 1 step (sec)	0.52±0.04	0.58±0.03	0.48±0.00
First leg	0.52±0.04	0.58±0.03	0.49±0.02
Second leg	0.52±0.04	0.59±0.03	0.48±0.01
Number of step (step)	14.0±1.44	24.6±1.32	18.4±1.03
Floor reaction (G)	0.37±0.04	0.16±0.01	0.21±0.02
Step length (cm)	72.3±7.47	40.8±2.32	54.5±3.02
Walking cycle (sec)	1.04±0.07	1.17±0.07	0.96±0.01
Speed	83.3±3.94	42.0±2.28	68.2±4.45

* Data obtained from six times for five healthy volunteers

** Data obtained from six times for one patient

行では大きくなる。

5. 力強さ (floor reaction) ($\times 9.8 \text{ m/s}^2$): 床反力=床を蹴る力強さ。蹴り出しの力が強いほど数字は大きく、弱いほど小さい。

6. 歩幅 (step length) (cm): 1歩あたりの歩幅。数字が大きいほどストライドが大きく、小刻み歩行のようにストライドが小さいと数字は小さい。

7. 歩行周期 (walking cycle) (sec): 片方の踵が床についてから次に同側の踵が床につくまでに要した時間。小刻み歩行では数字が小さくなり、一歩が大きい大股歩きであれば数字は大きくなる。

8. 速度 (speed) (m/min): 1分間の平均歩行速度。速度が上がると数字は大きくなり、下がると値は小さくなる。力強さと相関する。

刺激 OFF 時は、歩行パラメータ全項目において健常者との明らかな差を認めていたが、刺激 ON 時は全項目で正常値に近づく傾向があった (Table 1)。また、刺激 OFF 時と刺激 ON 時との間では、各項目における明らかな変化を認めた。刺激 ON 時に数値が上昇した項目は、歩行率、速度、歩幅、力強さであり、減少した項目は CV、ステップ時間、換算歩数、歩行周期であった。

考 察

SCS は薬物治療抵抗性の疼痛に対し優れた除痛効果が期待できる治療法として知られている¹⁾。SCS の効果が期待できるのはあくまでも神経因性疼痛であるため、神

経因性疼痛の関与を検討するうえでケタミンによる drug challenge test は有効である²⁾⁽⁸⁾⁽¹⁰⁾⁽¹⁴⁾。本症例は術前に行った低用量ケタミン静注にて筋緊張は改善せず痛みのみが NRS 9/10 から 2/10 へと軽減したことから、神経因性疼痛の関与が示唆された。しかしながら患者の自覚的には SCS によりまず先に下肢の筋緊張が軽減し、その直後に痛みが軽減したこと、さらに SCS を OFF にすると筋緊張の再燃の後に痛みが再燃したことから、痛みの原因として神経因性疼痛に加え筋緊張亢進に伴う痛みも関与していたと考えられる。さらに、ケタミン単独で除痛は得られたが筋緊張は改善しなかったことから、SCS が直接下肢の筋緊張を軽減させたことが示唆された。近年、SCS が痙縮や下肢筋力の改善などの運動機能に対しても効果があることが注目されている³⁾⁽⁴⁾。また、SCS の運動機能改善効果は除痛効果とは関連しない独立した効果であるという報告もある⁶⁾。本症例もこの報告に矛盾しない結果であった。

筋緊張改善効果が除痛効果に先行して現れたことから、本症例も SCS が運動神経に何らかの直接作用を及ぼした結果であると考えられる。しかしながら、SCS の運動神経への直接作用に関してはまだ不明な点が多い。脊髄神経回路網は中枢パターン発生器 (central pattern generator) が刺激されることで下行性指令がなくても交代的な運動出力を脊髄運動ニューロンに与えているため、電気刺激がその働きを賦活化している機序や⁵⁾、脊髄後索に対する電気刺激が内側毛帯-視床系を介して大脳皮質-基底核-視床ループ (運動ループ) における回路異常を間接

的に是正し、姿勢制御機構の機能を改善させるという機序が考えられている¹³⁾。

本症例では、刺激 ON 時に視覚的に歩容の変化を認めたため、歩行分析計で解析した。その結果 ON 時は OFF 時に比べ、歩行率、速度、歩幅、力強さは数値が上昇し、CV、ステップ時間、換算歩数、歩行周期は数値が減少した。歩行率の増加とステップ時間の減少は歩行動作が俊敏になったことを示すと考えられる。また、CV の減少は一步ごとの歩行のブレ・ばらつきが改善し、換算歩数の減少、歩幅と力強さの増加が示すようにストライドが大きく、蹴り出しが強くなり、安定した歩容となったことを示すと考えられる。同時に、力強さの増加に比例し、歩行周期の減少は、1 歩ごとの足の運びが俊敏となったことにより、全体のスピードも上昇したと考えられる。

歩行パラメータについては、正常値と OFF 時の間に全項目で明らかな差を認めたことから、歩行時のばらつきが大きく、筋緊張の亢進によって、1 歩あたりにかかる時間が長く、蹴り出しが弱くなっていたことが数値的にも示唆されていた。一方、ON 時では正常値と明らかな差を示す項目が OFF 時に比べ減少したことから、電気刺激により筋緊張が取れたことによって足の動きがスムーズになったと考えられた。しかし、ステップ時間が短いことが示すように、全体としてスピードは上がっているが、早歩きであり、床反力は低下していることから、小刻み歩行の所見も表しており、もともとの下肢筋力が弱いことに起因する低い蹴り出しの力は、ON 時でもあまり変化していないことが推察された。興味深い点として、刺激 OFF 時に正常値よりも高かったステップ時間が、刺激 ON 時に正常値よりも低下したことである。つまり、刺激による筋緊張は緩和したが、高かった歩行パラメータが正常値を超えて、低下まで至ったということである。筋緊張の変化と各パラメータの変化が一对一に対応するかどうかは明らかではないが、患者の筋力が健常者に比べ低下していたことが、歩行パラメータが正常値で留まらず低下してしまった原因となった可能性がある。筋緊張の変化は、複数のパラメータの関数として表せる可能性もあることから、詳細なメカニズムの解明には今後さらに症例数を増やし、検討が必要である。

これまで、痙縮の評価には modified Ashworth scale や modified Tardieu scale、筋電図、筋緊張の評価として筋緊張計などが用いられてきた。しかしながら、どの評価法においても評価者の主観に基づく判断に委ねられるため評価者間で結果にばらつきが生じることが多い。また筋緊張計などは皮膚の硬さなど患者の体格に左右されることが多く客観的に評価することは難しかった。今回われ

われが用いた歩行分析計は軸加速度センサーにより歩行パターンを記録し、得られた加速度データを専用プログラムで解析することで歩行速度・歩幅・歩行率・平均加速度・バランスなどの歩行機能を高い精度で定量評価できる⁸⁾¹⁵⁾。本症例では、本分析計を用いることで SCS による筋緊張改善効果を歩行の変化として客観的に示すことができた。また modified Ashworth scale にて 0 点と、軽度の痙縮を測ることが難しい症例においても評価が可能と思われる。

本分析計の最大の欠点として、上肢の運動機能改善効果を評価できないことが挙げられる。しかしながら arm swing の変化は歩行時の重心や CV にも影響を及ぼすことが考えられるため、これらを検討することで上肢の運動機能改善を間接的に評価できる可能性がある。今後さらに症例を重ねて検討する予定である。

利益相反：本論文に関して開示すべき COI はありません。

文 献

- 1) Angeli CA, Edgerton VR, Gerasimenko YP, Harkema SJ : Altering spinal cord excitability enables voluntary movements after chronic complete paralysis in humans. *Brain* **137** (Pt 5) : 1394-1409, 2014.
- 2) Backonja M, Arndt G, Gombar KA, Check B, Zimmermann M : Response of chronic neuropathic pain syndrome to ketamine : A preliminary study. *Pain* **56** : 51-57, 1994.
- 3) Buonocore M, Demartini L, Bonezzi C : Lumbar spinal cord stimulation can improve muscle strength and gait independently of the analgesic effect : a case report. *Neuro-modulation* **9** : 309-313, 2006.
- 4) Cook AW, Weinstein SP : Chronic dorsal column stimulation in multiple sclerosis. Preliminary report. *N Y State J Med* **73** : 2868-2672, 1973.
- 5) Clarac F : Some historical reflections on the neural control of locomotion. *Brain Res Rev* **57** : 13-21, 2008.
- 6) Denisova NP, Rogov DY, Rzaev DA, Khabarova EA, Dmitriev AB : Spinal cord stimulation in the treatment of chronic pain syndromes. *Zh Vopr Neurokhir Im N N Burdenko* **80** : 47-52, 2016.
- 7) Hunter JP, Ashby P : Segmental effects of epidural spinal cord stimulation in humans. *J Physiol* **474** : 407-419, 1994.
- 8) Hatanaka N, Sato K, Hishikawa N, Takemoto M, Ohta Y, Yamashita T, Abe K : Comparative gait analysis in progressive supranuclear palsy and Parkinson's disease. *Eur Neurol* **75** : 282-289, 2016.
- 9) Levine AB, Parrent AG, MacDougall KW : Stimulation of the spinal cord and dorsal nerve roots for chronic groin, pelvic, and abdominal pain. *Pain Physician* **19** : 405-412, 2016.
- 10) Mathisen LC, Skjelbred P, Skoglund LA, Oye I : Effect of ketamine, an NMDA receptor inhibitor, in acute and chronic orofacial pain. *Pain* **61** : 215-220, 1995.
- 11) Nikolajsen L, Hansen CL, Nielsen J, Keller J, Arendt-Nielsen L, Jensen TS : The effect of ketamine on phantom pain : central neuropathic disorder maintained by peripheral input. *Pain* **67** : 69-77, 1996.

- 12) Shirai S, Yabe I, Matsushima M, Ito YM, Yoneyama M, Sasaki H : Quantitative evaluation of gait ataxia by accelerometers. *J Neurol Sci* **358** : 253-258, 2015.
- 13) Sayenko DG, Angeli C, Harkema SJ, Edgerton VR, Gerasimenko YP : Neuromodulation of evoked muscle potentials induced by epidural spinal-cord stimulation in paralyzed individuals. *J Neurophysiol* **111** : 1088-1099, 2014.
- 14) Yamamoto T, Katayama Y, Hirayama T, Tsubokawa T : Pharmacological classification of central post-stroke pain : Comparison with the results of chronic motor cortex stimulation therapy. *Pain* **72** : 5-12, 1997.
- 15) Yoneyama M, Mitoma H, Hayashi A : Effect of age, gender, and walkway length on accelerometry-based gait parameters for healthy adult subjects. *J Mech Med Biol* **16**, 1650029, 2016.

要 旨

脊椎術後疼痛症候群に対する脊髄刺激療法後の歩行改善
—歩行分析計を用いて客観的・定量的に解析した1例—

及川 公樹   西川 泰正   藤原 俊朗   小笠原邦昭

脊髄刺激療法 (spinal cord stimulation : SCS) は慢性難治性疼痛に対し広く用いられている。今回われわれは両側大腿屈側の筋痙縮を伴った難治性神経障害性疼痛の患者に対し SCS を行い、刺激 ON にて疼痛軽減とともに下肢の筋緊張が軽減し歩容が視覚的に改善した症例を経験した。術前後において、患者の腰部に歩行分析計を装着し、10 m 歩行を各 6 回計測。Coefficient of variation, 歩行率, ステップ時間, 換算歩行, 速度, 歩幅, 歩行周期, 力強さの 8 項目について検討を行った。刺激 OFF 時に比して刺激 ON 時には、これらの項目の明らかな改善が認められ、歩行障害に対する SCS の有効性を客観的かつ定量的に解析し得た。

脳外誌 27 : 686-690, 2018

ニューロモデュレーションと歩行解析

大阪大学大学院医学系研究科脳神経外科 貴島晴彦

本報告は、failed back surgery syndrome の患者に疼痛緩和を目的に施行された脊髄硬膜外電気刺激療法が、下肢の過剰な筋緊張を低下させることにより歩行状態の改善ももたらしたことを定量的な歩行分析で示した報告である。下肢の疼痛が改善すれば、それ自体でも歩行状態の改善が得られることは、腰椎変性症の術後経過の経験からもよく知られている。本報告では疼痛の改善に加えて有害な筋緊張も減少し歩行改善に寄与したとされている。また、歩行解析にさまざまなパラメーターを用い、それらを健康人のデータと比較している点は、科学的に分析された報告であると考えられる。ニューロモデュレーションの新たな展開を示唆する報告である。

最近では、さまざまな機器を用いた歩行分析が可能となっている。今回の報告で使用された携帯型の装置は比較的簡便であり、また長距離の計測ができることが特徴である。その他には、ビデオカメラを用いた動体解析が挙げられる。これは長距離の歩行

解析には不向きではあるが、他の運動も含め動的な多くのパラメーターを計測することができ、さらに画像上のその動きを再現できるものも多い。これらのツールを相補的に利用し、それぞれの疾患について特徴的な症状とこれらの機器から得られるパラメーターとの相関が解明されることにより、歩行解析の分野が大いに発展するものと考えられる。特に、現在の高齢化社会では、いかにして歩行を維持するかということが課題となっており、歩行に関する研究は重要性が高まっていると考えられる。また、脊髄刺激療法がどのようなメカニズムで筋緊張の緩和をもたらしたのか、どの筋の緊張緩和が最も歩行改善に貢献しているのかなどについては大いに興味のあるところである。

今回の結果は短期的な経過での1例報告であるが、疼痛緩和を目的に脊髄刺激療法を継続した場合の長期的な歩行状態の変化、また筋緊張緩和との関連について、多数例での報告が期待される。