歩行における上肢脊髄運動神経機能の興奮性の変化

Changes in Excitability of Spinal Motoneuron Function of the Upper Limbs during Walking

弓永 久哲¹⁾

HISANORI YUMINAGA, RPT¹⁾

¹⁾ Department of Physical Therapy, Kansai Vocational College of Medicine: 6-18-13 Karita, Sumiyoshi-ku, Osaka 558-0011, Japan. TEL+81 6-6699-2222 E-mail: yuminaga@kansai.ac.jp

Rigakuryoho Kagaku 26(5): 567-570, 2011. Submitted Mar. 22, 2011. Accepted Apr. 29, 2011.

ABSTRACT: [Purpose] We investigated the excitation levels of spinal motoneurons of the upper limbs during walking in healthy subjects using F waves as a piece of basic research in order to validate the neurophysiological mechanism behind the associated reaction in stroke patients. [Subjects] The subjects were 30 healthy men aged 24.0±5.9 years. [Method] We recorded F waves (frequency, F/M amplitude ratio and latency) in the thenar muscle of the upper arm preceding, during, just after and 1 and 2 min after walking. [Results] F wave frequency changed significantly during walking, but the F/M amplitude ratio and latency did not show any significant changes. [Conclusion] These findings indicate that the excitability of the spinal motoneurons of the upper limbs of healthy subjects had a tendency to increase during walking. From this, we reason that excitation of the spine at the levels of the upper arm muscles also increases in stroke patients during walking, and that this needs to be considered when making treatment plans for them.

Key words: F wave, walking, spinal motoneuron function of the upper limbs

要旨:〔目的〕脳卒中患者の連合反応の出現機序を検証するための基礎的研究として、健常者を対象に歩行中の上肢筋に対応する脊髄レベルの興奮性をF波を用いて検討した。〔対象〕対象は健常成人男性30名とした。〔方法〕歩行前、歩行中、歩行終了直後、終了1分後、2分後における右上肢筋のF波を記録した。〔結果〕出現頻度は歩行中に有意に変化したが、振幅F/M比と潜時は有意な変化を示さなかった。〔結語〕以上より健常者の歩行では上肢筋レベルの脊髄の興奮性は増加する傾向を示した。このことから脳卒中患者においても歩行中に上肢筋レベルの脊髄の興奮性は増加することが考えられ、治療プログラムを立案する際考慮する必要があると考える。

キーワード: F波, 歩行, 上肢脊髄運動神経機能

¹⁾ 関西医療学園専門学校 理学療法学科:大阪府住吉区荻田6-18-13 (〒558-0011) TEL 06-6699-2222

I. はじめに

脳卒中患者に対する理学療法では、目標に実用的な歩行動作能力向上をあげることが多い。しかし連合反応が出現することなく実用的な歩行動作を獲得できる例は少ないのが現状である。また歩行可能な症例に関しても歩容の問題を訴えることが多く、特に上肢の連合反応に伴うアライメント不良に関する訴えは多い印象がある。

連合反応とは、脳卒中患者の特有な臨床症状であり、非麻痺側の過剰努力や精神的な緊張により生じ、定型的なパターンによって動作を阻害する大きな要因になることが多い¹⁾。連合反応の出現機序は、随意運動の制御や抗重力活動に関与する下行性投射系の破綻により、四肢の協調的な制御に関与する神経機構が阻害され生じると考えられている²⁾。

そこで、本研究は脳卒中患者の連合反応の出現機序を神経生理学的に検証するための基礎的研究として、健常者を対象に歩行時の上肢筋に対応する脊髓運動神経機能の興奮性をF波を用いて検討した。本研究結果により、脳卒中患者の歩行動作と麻痺側上肢の連合反応との関連性を推測しようと考えた。

II. 対象と方法

対象は神経学的および整形外科的に自覚的、他覚的所見を何ら有さない健常成人男性30名とした。平均年齢 24.0 ± 5.9 歳、平均身長 173.3 ± 6.3 cm、平均上肢長 89.1 ± 4.2 cm、平均体表温 $30.1 \pm 1.3^\circ\text{C}$ であった。なお、本研究は本学の倫理委員会で承認を受けた後、被験者に実験の目的、方法、危険性を十分に説明し同意書を得た上で実施した。

実験方法は、被験者の右上肢を検査側とし、安静立位、歩行中、歩行終了直後、歩行終了1分後、歩行終了2分後にF波を導出した。歩行はトレッドミル(USAウッドウェイ社製 EXO 43) 上でを行い、歩行時間は3分間とした。歩行速度は被験者の任意とし、被験者が適度な速度と感じられる程度とした。F波記録時間は各試行30秒間で行い、歩行中の記録に関しては歩行を開始してから1分経過した後に実施した。また、歩行中以外のF波記録の検査肢位は安静立位とした。試行中、検査側右上肢は前

方の検査台に位置させ安静位とし、右母指球筋よりバイキングII(ニコレー社製)を用いてF波を導出した。刺激電極は二極の表面電極を用い右手関節部の最適な部位を選び、陰極を中枢側に陽極をその末梢側に配置した。F波刺激条件は、M波が最大となる刺激強度の120%、持続時間0.2 msの定電流矩形波で、右手関節部正中神経を1.0Hzの刺激頻度で連続30回刺激した。表面電極の配置は、記録電極を母指球筋筋腹上に、基準電極を第一指基節骨上に貼付した。周波数帯域は5Hz~2KHzとし、振幅感度は $500 \mu\text{V/D}$ 、掃引速度は5 ms/DとしF波について検討した。

F波波形分析は、出現頻度、振幅F/M比、潜時の3項目について以下の方法で行った。出現頻度(%)は、30波形のうち $500 \mu\text{V/D}$ のオシロスコープ上での判定可能な全てを対象としその割合を求めた。振幅F/M比(%)は、出現したF波の頂点間振幅の平均とM波最大頂点間振幅との比を振幅F/M比(%)とした。潜時(ms)は、F波の立ち上がりまでの時間の平均を潜時(ms)とした。なお、平均潜時とした理由としては、課題中における脊髓の持続した興奮性を反映していると考えられることから平均値を算出した。

各項目について、歩行前、歩行中、歩行終了直後、歩行終了1分後、2分後におけるF波の全体的傾向および各試行間の比較を行った。施行間の比較をTukey HSD検定法を用いて検討した。統計解析にはSPSS(Windows ver1.5, SPSS)を用い、有意水準は5%未満とした。

III. 結果

各試行におけるF波の全体的傾向および各試行間の比較を行った。以下に各分析項目のF波成績を示す(表1)。出現頻度の結果は、歩行前 $60.7 \pm 23.5\%$ 、歩行中 $73.9 \pm 17.5\%$ 、歩行終了直後 $57.0 \pm 23.0\%$ 、歩行終了1分後 $58.1 \pm 21.7\%$ 、歩行終了2分後 $55.8 \pm 22.9\%$ であった。歩行中が他試行と比較し有意に増加を示した($p < 0.05$)。振幅F/M比の結果は、歩行前 $2.95 \pm 1.0\%$ 、歩行中 $3.03 \pm 0.8\%$ 、歩行終了直後 $2.82 \pm 0.9\%$ 、歩行終了1分後 $2.86 \pm 1.0\%$ 、歩行終了2分後 $2.88 \pm 0.9\%$ であり、歩行中が他試行に対し増加する傾向を示したが有意差は認められなかった。潜時の結果は、歩行前 27.0 ± 1.9 ms、歩行中

表1 各試行間におけるF波の比較

	歩行前	歩行中	終了直後	1分後	2分後
出現頻度 (%)	60.7 ± 23.5	$73.9 \pm 17.5^*$	57.0 ± 23.0	58.1 ± 21.7	55.8 ± 22.9
振幅F/M比 (%)	2.95 ± 1.0	3.03 ± 0.8	2.82 ± 0.9	2.86 ± 1.0	2.88 ± 0.9
潜時 (ms)	27.0 ± 1.9	26.7 ± 1.9	27.0 ± 1.8	27.1 ± 1.9	27.1 ± 1.9

平均値 $\pm$ 標準偏差 *: $p < 0.05$

26.7 ± 1.9 ms, 歩行終了直後27.0 ± 1.8 ms, 歩行終了1分後27.1 ± 1.9 ms, 歩行終了2分後27.1 ± 1.9 msであり, 歩行中が他試行と比較し短縮する傾向が示されたが有意差は認められなかった。

IV. 考 察

F波とは、運動神経線維に最大上の電気刺激を与えた時、その部位からの逆行性インパルスが生じ α 運動ニューロンの再発火を起こし、順行性インパルスが生じた結果もたらされる複合活動電位であるとされている³⁾。F波の出現率は個々の運動ニューロンの発火率の総和であり⁴⁾、上位中枢からの下行性投射によって脊髄レベルで調整された結果出力される α 運動ニューロンの興奮性を反映するといわれている⁵⁾。

今回の歩行動作においては、歩行中のF波出現頻度は他試行と比較し有意な増加を示したが、振幅F/M比に関しては増加する傾向を示したものの有意差は認められず、潜時に関しても他試行と比較し短縮する傾向を示したが有意差は認められなかった。出現頻度は再発火した運動単位の発火頻度、振幅F/M比は個々の運動単位の興奮性、潜時は運動単位の大きさに反映するといわれている³⁾。今回の結果から、歩行中には右母指球筋に対応する脊髄レベルの α 運動ニューロンの興奮性は増加する傾向が示された。

筆者は継続的に動的な課題でのF波を記録し、F波出現頻度、振幅F/M比、潜時の各指標が有意な変化を示すことを確認している⁶⁻⁸⁾。特に歩行動作と類似した足踏み動作課題では、上記の各指標が有意に変化することを報告した⁹⁾。そして、鈴木らの報告に関しても、遠隔筋の筋収縮の増加によるF波の各指標の有意な変化が証明されている¹⁰⁾。このことは、F波の各指標は課題に即した筋出力増加により有意に増加することを示すものである。

人間の歩行動作における神経機構は他の哺乳類と類似した脊髄内でのセントラル・パターン・ジェネレーター（以下CPG）による制御機構が考えられている¹¹⁾。CPGはパターン運動の発生機構であり、歩行のような律動的なパターン運動を可能にしている^{12,13)}。しかし、人間は直立二足歩行という特有の歩行様式のため、他の哺乳類よりも上位中枢からの制御機構の関与が非常に重要な要因であるといわれている¹¹⁾。そのため、上位中枢からの下行性投射系の調整機構が関与することにより、 α 運動ニューロンの興奮性を最適化していると考えられている¹⁴⁾。

一方、脳卒中患者に対する電気生理学的研究では、F波の増加と中枢神経系の障害との関連性が検証されている¹⁵⁾。F波は中枢神経系の障害によって増加するが、これは α 運動ニューロンの出力調整に関与する抑制性制御

機構の破綻が原因であると考えられている¹⁶⁾。上記の先行研究から、脳卒中患者の中枢神経機構は、動作に伴う筋出力に関与する α 運動ニューロンの出力調整が不十分であることが考えられる。

F波は、興奮性制御を司る解剖学的部位の推定は不可能であるが、中枢神経系全体の興奮性の変化を知ることが可能である。近年、歩行を対象とした神経生理学的研究は、誘発筋電図の他にNIRSなどの脳機能画像法を用いた手法で検証されている。しかし、NIRSなどの各脳機能画像法による手法は、空間的・時間的分解能の問題等により一致した見解は示されていない¹⁷⁾。一方、誘発筋電図であるF波やH波は、神経伝導や反射様式を応用した方法であり、解析処理により結果が左右されず客観的に解析をすることが可能である。今回の研究で用いたF波の特徴は、促進・抑制性制御機構による α 運動ニューロンの出力の総和であり、反射様式のみを反映したH波とは異なる点である⁴⁾。またH波では、全ての健常者の上肢筋から導出することが難しいため、今回筆者が行ったような下肢運動による上肢筋に対応する脊髄神経を興奮性の変化を検討した先行研究は少ないのが現状である。

今回の結果から、律動的な下肢運動が主である歩行動作においても、上肢筋レベルの脊髄運動神経の興奮性が増加する傾向が示された。しかし、今回の結果からは、歩行動作の主要な制御機構が、脊髄レベルによるものなのか、上位中枢からの下行性投射系によるものかは不明である。また、今回の結果は足踏み動作での結果と比較すると、足踏み動作ほど著しく増加するものではなかった。このことは、歩行動作と足踏み動作とは異なる神経機構により制御されていると推測される。先行研究⁶⁻¹⁰⁾から、下肢筋や体幹筋のような遠隔筋の筋収縮増加に伴って生じる上肢筋レベルの脊髄の興奮性増加は、上位中枢からの下行性投射系の影響により脊髄全体の興奮性が増加していると考えられている。このようなことから、健常者の歩行中における上肢筋レベルの脊髄運動神経の興奮性増加は上位中枢からの持続的投射が生じ、主としてCPGの作用により協調的制御が脊髄内で遂行されていると考えられる。このため、抑制機構が破綻している脳卒中患者の歩行動作においても上肢筋レベルの脊髄運動神経の興奮性増加は著明に生じることが推測され、治療プログラムを立案する際に考慮する必要があると思われる。

今後は脳卒中患者と健常者との脊髄運動神経機能の興奮性の変化を比較することにより、脳卒中患者に対する実用的な歩行動作能力向上の介入方法を考えていきたいと思う。

引用文献

- 1) Mulley G: Associated reaction in the hemiplegia arm. Scand J

- Rehabil Med, 1982, 14: 117-120.
- 2) Shumway Cook A, Woollacott MH: Motor Control Translating Research into Clinical Practice (3rd ed), Lippincott Williams & Wilkins, Pennsylvania, 2007, p120.
 - 3) Mesrati F, Vecchierini MF: F-waves neurophysiology and clinical value. Neurophysiol Clin, 2004, 34: 217-243.
 - 4) Fisher M A: H reflexes and F waves Fundamentals, normal and abnormal patterns. Neurol Clin N Am, 2002, 20: 339-360.
 - 5) Espiritu MG, Lin CS, Burke D, et al.: Motoneuron excitability and The F wave. Muscle nerve, 2003, 27: 720-727.
 - 6) 弓永久哲, 鈴木俊明: 骨盤挙上時における腰背筋群の等尺性収縮が同側上肢脊髄神経機能に与える影響—F波における検討. 総合リハ, 2006, 34: 577-584.
 - 7) 弓永久哲, 鈴木俊明: 姿勢変化による上肢脊髄神経機能の興奮性の変化. 総合リハ, 2007, 35: 373-378.
 - 8) 弓永久哲, 鈴木俊明: 荷重量変化における上肢脊髄神経機能の興奮性の変化. 総合リハ, 2007, 35: 595-600.
 - 9) 弓永久哲: 足踏み動作による上肢脊髄神経機能の興奮性の変化. 総合リハ, 2009, 37: 753-757.
 - 10) 鈴木俊明, 藤原哲司, 武田 功: 肘関節屈筋群の等尺性収縮が対側脊髄運動神経機能に与える影響—F波における検討. 理学療法科学, 1992, 19: 359-363.
 - 11) Cohen H, Bobby R, Alder RN, et al.: Neuroscience for Rehabilitation (2nd ed), Lippincott Williams & Wilkins, Philadelphia, 1999, pp231-232.
 - 12) Pinto CM, Golubitsky M: Central pattern generators for bipedal locomotion. J math Biol, 2006, 53: 474-489.
 - 13) Zehr EP, Duysens J: Regulation of Arm and Leg Movement during Human Locomotion. Neuroscientist, 2004, 10: 347-361.
 - 14) Grillner S: Neurobiological bases of rhythmic motor acts in vertebrates. Science, 1985, 228: 143-149.
 - 15) Bischff C, Schoenle PW, Conrad B: Increased F-wave duration in patients with spasticity. Electromyogr clin neurophysiol, 1992, 32: 449-453.
 - 16) Katz R, Pierrot-Deseilligny E: Recurrent inhibition in humans. Prog Neurobiol, 1998, 57: 325-355.
 - 17) 国立特殊教育総合研究所: 脳科学と障害のある子どもの教育に関する研究. http://www.nise.go.jp/kenshuka/josa/kankobutsu/pub_b/b-215.htm (閲覧日2011年3月11日).