

脊髄損傷者に対する足関節他動運動の効果

Effects of passive ankle motion in patients with spinal cord injury

○ 新美未幸 (お茶大), 河島則天 (国立リハ), 太田裕治 (お茶大)

Miyuki NIIMI, Graduate School of Ochanomizu University

Noritaka KAWASHIMA, Research Institute, National Rehabilitation Center for Persons with Disabilities

Yuji OHTA, Graduate School of Ochanomizu University

Abstract: Motor paralysis due to spinal cord injury (SCI) inevitably causes joint contracture, spasticity and hypo-circulation in the paralyzed area. Muscle stretching and passive joint motion are usually prescribed in the course of rehabilitation in order to improve range of motion and prevent joint contracture. We developed a device which can one hand realize passive ankle motion as a rehabilitation alternative, and the other hand, enable us to evaluate the ankle stiffness. In the present study, we aimed to evaluate the effects of passive ankle motion on the paralyzed area of patients with SCI quantitatively by our developed device.

Key Words: Spinal cord injury, Passive ankle motion, Ankle torque, Stretch reflex, NIRS

1. 背景と目的

脊髄損傷後には、麻痺領域の関節拘縮や痙性麻痺、慢性的な低循環状態が生じる⁽¹⁾⁻⁽³⁾。受傷後のリハビリテーションにおいては、関節可動域の拡大と拘縮予防などを目的としてストレッチングや関節他動運動が実施されているが、現場レベルでの効果判定はセラピストによる主観的評価に止まることが多い。ストレッチングや関節他動運動が脊髄損傷後に発現する諸症状に及ぼす影響を与えるか定量的に検討することは、健康維持・増進、二次障害抑止のための効果的なリハビリテーションを処方する上で大いに役立つと考えられる。我々はこれまで、運動麻痺患者でもモータ駆動による足関節の他動運動が可能な装置を開発し、その効果についての基礎的検討を進めてきた⁽⁴⁾。本研究では、モータ駆動による足関節の他動運動実施に加え、他動運動中の他動トルク計測、機械的外乱による伸張反射計測が可能な装置を製作し、同装置を用いて脊髄損傷者に対する足関節他動運動の効果を検討したので報告する。

2. 方法

対象は下肢運動機能に完全麻痺を持つ脊髄損傷者 8 名 (平均年齢 34.5±8.3 才, 平均身長 170.9±8.8 cm, 平均体重 60.9±11.6 kg, 損傷レベル Th5~12) とした。本研究は国立障害者リハビリテーションセンター倫理委員会の承認、被験者のインフォームド・コンセントを得た上で行った。Fig. 1 に実験に用いた足関節他動運動装置 (A) および装置のフットプレート部の構造 (B) を示す。アクチュエータには、直動型電動シリンダを使用した。電動アクチュエータと周辺機器の接続は Fig. 2 に示す通りである。はじめに、被験者の足関節を装置のフットプレートに固定した。また実験中の姿勢のずれを最小限に抑えるため、被験者の体幹及び大腿部をストラップを用いて装置に固定した。被験者には、実験中は安静座位を保つよう指示を与えた。実験は足関節を 10 分間他動運動させた前後 (それぞれ pre 計測, post 計測) で、足関節他動トルク並びに伸張反射応答の計測を行った。また、足関節他動運動中の代謝・循環動態を近赤外分光法により計測した。他動運動は左右逆位相とし、動作範囲は足関節角度 90 度 (水平フットプレートに足を載せた状態) を基準として底屈 12 度~背屈 12 度とした。動作速度は 0.5 Hz の不等速運動, すなわち、最大底背屈位付近において速度が減少し、足関節角度 90 度付近で最大速

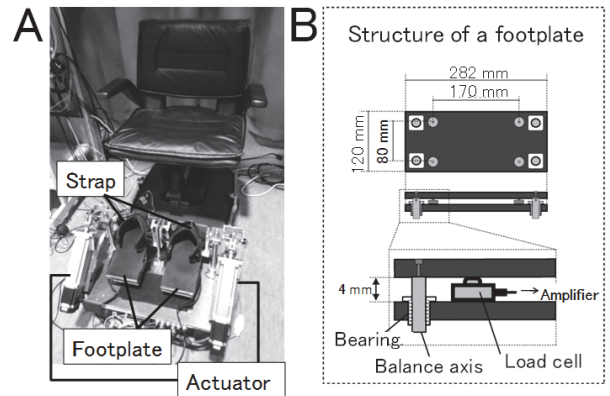


Fig. 1 A: Ankle passive motion device which we developed. B: Structure of a footplate of the device. Four load cells were mounted in each footplate, which measured resistance force.

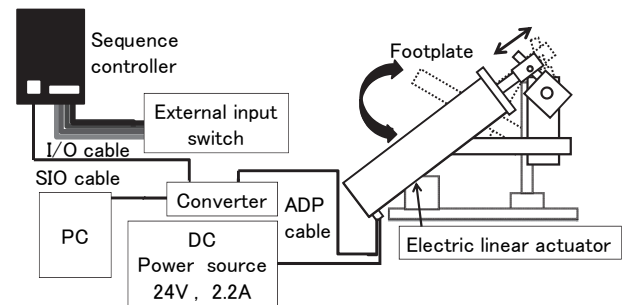


Fig. 2 The electric connection of actuator and peripherals. The actuator was connected with the sequence controller through the ADP cable, the connector converter, and the serial interface connection cable. The motion patterns of footplates were set by the controller. This controller was connected with the external input switch through the I/O cable for the external signal input, and the motion patterns were switched by this switch. Actuators were controlled by position control, i.e., the positions of rods and the velocities of motions of rods were set on the sequencer.

度となる運動とした。なお、装置のフットプレートに取り付けた 4 つのロードセル (Fig. 1B) の鉛直荷重 (反力) から足関節の他動トルクを算出した⁽⁵⁾。足関節角度は装置の回転軸部分に取り付けたポテンショメータより得た。以下に、各測定項目の計測方法と解析方法を示す。

1) 足関節他動トルク: 足関節を底屈 10 度~背屈 20 度まで、5 度/秒で 6 回底背屈動作させ、足関節に掛かる他動ト

ルクを計測した。底背屈動作は左右同位相とした。解析は、足関節が背屈される際の角度-トルク曲線、及び足関節角度底屈 10 度、0 度、背屈 10 度、および背屈 20 度における足関節他動トルクの平均値を求めた。

2) 伸張反射: 伸張反射計測ではヒラメ筋 (SOL) より筋活動電位を計測した。足関節角度 0 度~背屈 10 度の範囲において、伸張反射を誘発し得る 4 段階の速度 (低速度, 中速度, 中高速度, 高速度) においてランダムに 5 回ずつ、計 20 回背屈させた際の筋活動電位を計測した。なお伸張反射を誘発し得る 4 段階の速度設定については、それぞれ最大で 60, 90, 120, 150 度/秒の速度を実現し得る設定とした。解析では 4 段階それぞれの角速度における伸張反射振幅 (peak to peak) の平均値を求めた。

3) ヘモグロビン濃度: 麻痺筋の代謝・循環動態を反映する指標として、ヘモグロビン (hemoglobin: Hb) 濃度および組織酸素化指標 (tissue oxygenation index: TOI) を計測した。近赤外分光装置のプロブを内側腓腹筋 (GAS) 並びに前脛骨筋 (TA) に貼付し、足関節他動運動中のヘモグロビン濃度 (oxy Hb, deoxy Hb, total Hb の濃度変化) および TOI を記録し、30 秒毎の平均値を算出した。

3. 結果

10 分間の足関節他動運動中、8 名中 3 名の被験者において痙性の発現が認められた。うち 1 名は運動前半、2 名は運動後半にそれぞれ痙性の発現が認められたが、装置の動作を妨げるまでには至らなかった。しかし、運動後半に痙性が発現した 1 名においては post 計測が困難であったため、解析から除外した。以下に各測定項目の結果を示す。

3-1 足関節他動トルク

角度-トルク曲線の典型例を Fig. 3A に示す。7 名中 1 名において動作範囲全域における足関節他動トルクが post 計測で増加したが、他 6 名の被験者では足関節他動運動前後で変化は見られなかった。足関節角度底屈 10 度、0 度、背屈 10 度、および背屈 20 度における足関節他動トルクの平均値を Fig. 3B に示す。いずれの足関節角度においても他動運動の前後で結果に有意差は見られなかった。

3-2 伸張反射

他動運動前後で伸張反射応答を比較すると、7 名中 4 名の被験者において、4 段階の角速度いずれにおいても伸張反射応答は減少した。また、他 2 名においては、低速度及び中速度において、1 名においては中速度において伸張反射応答の減少が認められた。7 名の平均データを Fig. 4 に示す。Fig. 4 より、低速度から中速度における伸張反射応答は足関節他動運動により減少する傾向にあった。

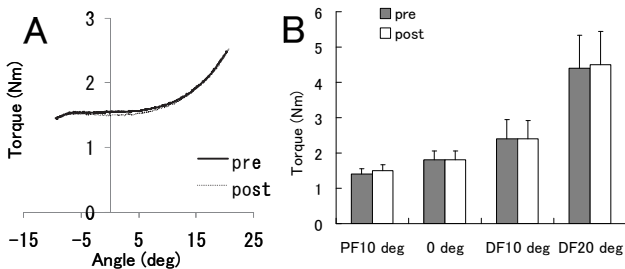


Fig.3 A: Typical example of angle-torque curve during ankle passive motion in dorsiflexion. B: Averaged data (n=7) of ankle passive torque in pre- and post-passive ankle motion (mean ± SEM). PF and DF stands for plantar flexion and dorsiflexion, respectively.

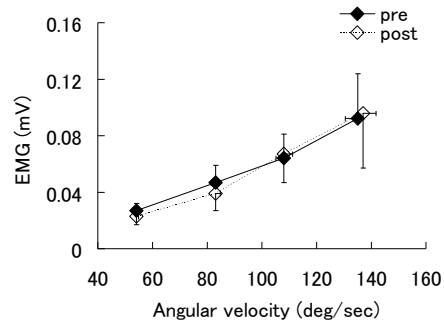


Fig. 4 Averaged data (n=7) of stretch reflex EMGs in pre- and post-passive ankle motion (mean ± SEM).

3-3 ヘモグロビン濃度

全ての被験者において、total Hb 濃度変化は、Fig. 5 に示すように運動周期に同調した変化を示し、他動運動に伴う筋内圧の変化から血管の収縮拡張運動が生じたと推察された。Fig. 6 にヘモグロビン濃度および TOI の平均値 (30 秒毎) を示す。GAS では、total Hb, oxy Hb とともに運動中盤から減少傾向を示した。TA では、total Hb は運動開始後に減少し、その値を維持する傾向を示し、oxy Hb は運動開始後微増しその後は減少傾向を示した。TOI は GAS, TA とともに運動開始後に増加し、その後も初期値を上回る傾向を示した。

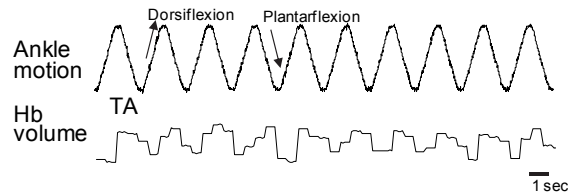


Fig. 5 Typical waveform of Hb volume in TA during passive ankle motion.

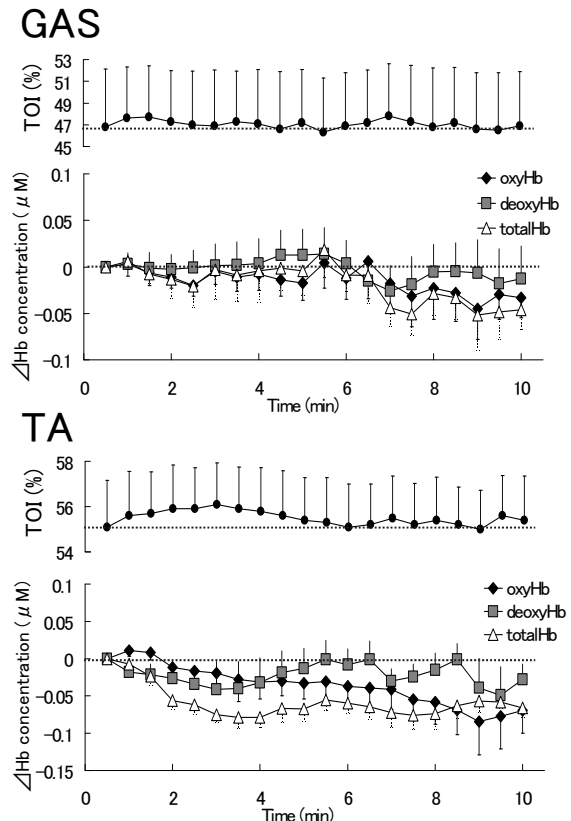


Fig. 6 Averaged data of TOI (n=6), and those of concentration changes in the oxy Hb, deoxy Hb, and total Hb (n=7) in each lower leg muscle during passive ankle motion (mean ± SEM).

4. 考察

本研究では、下肢に完全麻痺を持つ脊髄損傷者を対象として足関節他動運動の効果を定量的に検討することを目的とした。

今回の結果では、足関節他動トルクに運動前後で変化は見られなかったが、先行研究においては、足関節他動運動前後における足関節他動トルクの減少が報告されている⁽⁶⁾、⁽⁷⁾。その際実施された運動の動作範囲は本研究で行った他動運動よりも大きく、運動時間も長いものであった。すなわち、先行研究で実施された他動運動は、本研究で行った他動運動よりも麻痺筋への筋伸張量、関節への物理的刺激が高かったものと考えられる。したがって、本研究で実施した他動運動は、先行研究と比較すると強度の低い運動であったため、運動直後の足関節他動トルクに影響を与えなかったと考えられる。

伸張反射応答は低速度から中速度の伸張速度に対して減少する傾向が見られた。我々の先行研究では、0.7Hz (約38度/秒)の他動運動を本研究と同様に10分間実施した際、運動の継続に伴って痙性麻痺が徐々に消失する傾向を認めている⁽⁴⁾。この先行研究の結果と併せて考えると、低～中速度における伸張反射の減少は、痙性麻痺の減少を示唆するものであると考えられる。他動運動中には、筋の伸張-短縮による周期的かつ繰り返しの求心性神経入力が生じるため、これら入力が伸張反射経路の興奮性減少を引き起こしている可能性がある。一方で、本研究では2名の被験者において運動後半から痙性麻痺の発現を認めた。これは、既述の痙性麻痺の減少と矛盾する結果であったが、足関節他動運動が麻痺による不活動で停滞している脊髄運動ニューロンの活動を励起した結果とも考えられる。この結果は、麻痺領域への他動運動の効果は、必ずしも様な影響を持つとは限らないことを示している。

他動運動中のヘモグロビン濃度は底背屈の周期に応じて増減を繰り返し、初期値に対して運動中に減少する傾向が認められた。これは他動運動によって筋内圧が増加し、下腿からの血液の排出が起こったためであると考えられる⁽⁸⁾。完全麻痺を持つ脊髄損傷者では、交感神経の作用による血管収縮や随意的な筋収縮による筋ポンプ作用が働かないため、重力の影響等による下腿の血液貯留、および血流のうっ滞が生じやすい。このことを考慮すると、他動運動は下腿に貯留された血液の排出を促し、麻痺領域の血流のうっ滞を改善し得るものであると言える。また、TOIはGAS、TA両筋において、運動開始後に増加しその後も初期値を上回る傾向を示した。これは、他動運動によって麻痺筋の酸素化が亢進されたことを示唆するものであると言える。以上の結果は、他動運動によって麻痺筋の代謝・循環状態が変化することを支持するものである。

5. まとめ

足関節他動運動が足関節他動トルク、伸張反射応答および麻痺筋の代謝・循環状態に与える効果を定量的に検討した。その結果、足関節他動トルクに変化は見られなかったが、伸張反射応答は低速度から中速度の伸張速度に対して減少する傾向が見られた。これは痙性麻痺の減少を示唆するものであると考えられるが、今後詳細に検討する必要がある。また、下腿深部血液量は運動の実施に伴い減少、麻痺筋の酸素化は運動開始後に亢進する傾向が見られ、他動運動による麻痺筋の代謝・循環状態の変化が見られた。今回、足関節他動運動中、及び運動前後での効果の検討を行ったが、実際のリハビリテーションは長期に渡って行われ

るものであることを考慮すると、足関節他動運動の長期的効果についても今後の検討課題であると言える。

参考文献

- (1) M Dalyan, A Sherman, D D Cardenas, Factors associated with contractures in acute spinal cord injury, *Spinal Cord*, vol. 36, pp. 405-408, 1998.
- (2) J. W. Lance, Spasticity: Disordered Motor Control, R. G. Feldman, R. R. Young, and W. P. Koella, Eds. Chicago, IL: Year Book Medical, pp. 485-494, 1980.
- (3) Mireille C. P. van Beekvelt, Wim N. J. C. van Asten, Maria T. E. Hopman, The effect of electrical stimulation on leg muscle pump activity in spinal cord-injured and able-bodied individuals, *Eur J Appl Physiol*, vol. 82, pp. 510-516, 2000.
- (4) 鈴木里江, 太田裕治, 大塚博, 内山朋香, 高野千尋, 中澤公孝, 河島則天, 運動機能障害者の二次障害予防を目的とした足関節受動運動装置の開発, *生体医工学*, vol. 45, no. 2, pp. 152-160, 2007.
- (5) Winter A.D, Biomechanics and motor control of human movement forth edition, John Wiley&Sons, Inc., pp. 117-121, 2009.
- (6) Zhang L. Q., Chung S. G., Bai Z, Xu D, van Rey E. M., Rogers M. W., Johnson M. E., Roth E. J., Intelligent stretching of ankle joints with contracture/spasticity, *IEEE Trans Neural Syst Rehabil Eng.*, vol. 10, no. 3, pp. 149-57, 2002.
- (7) Fan Gao, Yupeng Ren, Elliot J.Roth, Richard Harvey, Li-Qun Zhang, Effects of repeated ankle stretching on calf muscle-tendon and ankle biomechanical properties in stroke survivors, *Clinical Biomechanics*, vol. 26, no. 5, pp. 516-522, 2011.
- (8) Quaresima V., W. N. Colier, M. van der Sluijs, M. Ferrari, Nonuniform quadriceps O₂ consumption revealed by near infrared multipoint measurements, *Biochem. Biophys. Res. Commun.*, vol. 285, pp. 1034-1039, 2001.