

動作能力向上に寄与する下位運動中枢制御機構の 変容に基づいた運動指導方略の構築

浅井直樹

研究指導教員：菅原憲一

研究補助指導教員：白濱勲二、山西倫太郎

I. 序論

脊髄損傷（以下 SCI とする。）は働き盛りの年代に多く発症し¹⁾、重篤な立位歩行能力の後遺障害が社会復帰への障壁となる²⁾。近年では不全型 SCI（以下 iSCI とする。）が増加しつつあり、今後は立位歩行能力を最大化させることの重要性が増してくるものと考えられた。

立位歩行動作の基本的要素である姿勢制御においては、あらゆるレベルでの中枢神経系が固有の役割を担い³⁾、それらが統合されて脊髄 α 運動ニューロンを経て全身の筋へその指令が出力される。したがって、脊髄 α 運動ニューロンに着目することで、中枢神経系による神経制御を集約的に観察することができる。

SCI による姿勢制御障害には神経の興奮性異常が強く影響していることが指摘されている⁴⁾。そのため H 反射を指標として脊髄 α 運動ニューロンに着目することで、脊髄が機能的な活動状態にあるかを評価することが動作学習を支援する上で有用だと考えた。

これまで系統立ったリハビリテーションアプローチに乏しかった⁵⁾ SCI の歩行練習方法として、神経系のメカニズムに着目した免荷式歩行練習について研究が進められてきた⁶⁾。しかし、その効果については検証の余地が残されており⁷⁾、さらにその効果の神経学的理論的背景を検討することで、動作の習得に有効な方略を構築するための指針を明らかにすることができると思った。

このような背景から、本研究では、患者の動作能力向上に寄与する最適な運動指導方略を構築するための客観的指針を得ることを目的とした。この研究目的に対して、近年注目を集めている免荷式歩行練習の有効性とその背景にある運動学習に関する神経系の働きに着目して、以下の研究課題①から③を通じて、運動学習に適した運動課題の難易度の解明を試みた。

II. 不全型脊髄損傷者に対する免荷式歩行器を用いた歩行練習の効果

特に独力での下肢の自重支持が可能な、American Spinal Injury Association Impairment Scale（以下 AIS とする。）が D レベルの iSCI に対する免荷式歩行練習の有効性は十分に明らかになっていない。免荷式歩行練習は正しい運動パターンでの歩行練習を実現しやすいという利点があり⁸⁾、歩行姿勢や下肢の筋活動に着目して効果を検討することが有用であると考えた。以上より、この研究課題①における目的は、AIS D レベルの iSCI に対する免荷式歩行器を用いた歩行練習の運動学、運動力学、神経生理学的効果を運動解析学的に検証することとした。

AIS D の成人慢性期 iSCI 9 例に対し、非免荷式歩行練習、免荷式歩行練習を順に 1 回ずつ実施した。介入前、非免荷式歩行練習後、免荷式歩行練習後に 10m 最大歩行速度の計測と三次元動作解析装置、筋電計による歩行分析を実施した。

その結果、非免荷式歩行練習後では前遊脚期における前脛骨筋の筋活動が低下し、歩行機能改善に不利に働く影響をもたらした。一方で免荷式歩行練習後では SCI における代表的な代償姿勢である骨盤前傾姿勢が軽減し、前遊脚期における股関節屈曲モーメントが増大して下肢の円滑な振り出しを促して最大歩行速度が増大した。

以上より、研究課題①では免荷式歩行器による歩行練習が代償的歩行パターンを緩和し、立脚期から遊脚期への移行を促すことで AIS D レベルの iSCI の歩行機能拡大に有効である可能性が示唆された。

III. 運動課題の姿勢の安定性に関わる難度の差異とその学習に伴う脊髄 α 運動ニューロン興奮性の変化

研究課題②では免荷式歩行運動を一般化した運動モデルを用い、運動課題の姿勢安定性に関わる難易度特性に着目して、その運動課題の学習過程における神経系の運動制御への影響を観察することとした。学習の対象となる運動課題の難易度の相違に伴う運動学習と H 反射の変化については明らかになっていない。したがって研究課題②の目的は姿勢安定性の難度の相違によって下位運動中枢の興奮性制御および運動学習による運動パフォーマンス改善の程度が異なるかを検討することとした。

対象は健常成人 21 例であった。難度の高い条件（以下難条件とする。）で運動課題練習を行う高難度群と難度の低い条件（以下易条件とする。）で運動課題練習を行う低難度群の 2 群に分け、各条件で平衡運動課題の練習を行った。平衡運動課題は、不安定板上に立位を取りモニター上に示される動きに合わせて不安定板の傾きを操作することとした。不安定板は底部のパーツを付け替えることで難度を変えた。練習前後の評価として、両群ともに難条件と易条件の両課題のパフォーマンスを評価した。また、ヒラメ筋 H 反射の導出を該当する各条件での課題遂行時に実施し、表面筋電図計測を同時に行った。

H 反射について、低難度群では練習前後は一定であったのに対して、高難度群では練習

によって低下した。表面筋電図については前脛骨筋において、高難度群では筋活動についても練習によって変化した一方で、低難度群では練習前後こうした変化は見られず、筋活動は一定していた。パフォーマンスの変化比については、運動課題における姿勢の安定性に関わる難度によって運動学習の程度は異なり、低難度群において、特に易条件のパフォーマンス改善率が大きかった。

以上より、本研究課題②の結果、姿勢安定性に関する難度の低い運動課題は、一定の神経制御のもとで練習を繰り返すことができ、運動学習によるパフォーマンスの向上により寄与することが示唆された。

IV. 姿勢の安定性の異なる運動課題の学習に伴う脊髄 α 運動ニューロン興奮性制御とその位相特異性

歩行などの動作は複数の位相から構成されており、H 反射の位相特異的な調整能⁹⁾についても検討が必要であると考えた。また、実際に神経系の運動制御に障害のあるものでは健常者と異なる反応を示す¹⁰⁾ことが考えられた。研究課題③の目的は運動課題の姿勢安定性に関する難度が歩行様運動課題の運動学習過程における脊髄 α 運動ニューロン興奮性の位相特異的変容動態に及ぼす影響を検討し、iSCI 症例の傾向から臨床応用について考察することとした。

健常者における検討では、対象は健常成人 20 名とし、低難度群と高難度群に割り当てた。両群とも右足は不安定板の上に、左足は高さをそろえた平らな板の上に立った姿勢を開始姿勢とし、台上に両足を交互に昇降させる動作を反復する運動学習課題を課した。低難度群では両手で手すりを掴むとともに免荷装置によって体重を部分免荷する条件で、高難度群では手すりおよび免荷装置を用いない条件で運動課題練習を実施した。練習前後の評価では両群とも手すりのみを使用して運動課題を実施し、右足を挙上する直前（振出準備期）および左足を挙上する直前（支持準備期）で右ヒラメ筋 H 反射を導出し検討を行った。

両群のいずれの位相においても運動学習に伴って H 反射は低下し、中枢神経系の運動制御様態が変化したことを示した。練習経過については振出準備期で高難度群が低難度群に比べて有意に H 反射が大きかった。また、高難度群のみにおいて練習経過に従って H 反射が低下した。

以上から健常者では、高い難度での練習では神経筋の活動の変化を伴って運動学習が進む一方で、低い難度での練習では一定した運動制御の反復学習によって運動課題へ適応していくことが推察された。ただし健常者ではどちらの難度でも運動学習が進行したことが推察された。

iSCI における検討では AIS D の成人慢性期 iSCI 3 例とし、健常者と同様の運動課題を課した。ただし不安定板は用いず、また 1 例につき難度の低い条件と難度の高い条件の 2 条件についてクロスオーバー比較試験を実施した。

症例 A は第 5 頸髄損傷であり、日常的には独歩が可能で、体幹や四肢近位筋に筋緊張の

低下が見られた。症例 B は第 4 頸髄損傷であり、独歩が可能で、全身的に痙縮が姿勢や動作に影響していた。症例 C は第 5 頸髄損傷であり、独歩が可能で、体性感覚性失調が立位動作で観察された。

実験の結果、症例 A および症例 C については難条件では練習経過として H 反射は亢進する傾向にあり、これを受けて練習後は練習前と比べて H 反射は亢進した。また易条件では練習経過において H 反射が減少し、これを受けて練習後も同様に減少した。症例 B については難条件および易条件において練習経過として H 反射は亢進する傾向にあり、同様に練習後は練習前と比べて H 反射は亢進していた。

症例 A および症例 C については易条件での運動課題練習の方がリハビリテーションとしてより適していると考えられた。症例 B については難条件および易条件ともに練習難度としては適切でなかったと考えられるが、易条件の方がよい反応が得られており、易条件よりさらに難度の低い条件が症例 B に適している可能性があると考えた。

以上より研究課題③では神経系の姿勢制御能力に障害がある iSCI の場合、姿勢安定性に関する難度が低い運動課題の方が神経生理学的により正常に近い反応が得られやすく、したがって運動学習に有利であることが示唆された。

V. 結論

以上の一連の実験的結果から、運動課題の姿勢安定性に関する難度は低い方が、下位運動中枢の異常な興奮性を誘発しにくく、動作能力の向上により寄与することが結論された。本研究によって得られた知見は患者等の生活の質の向上に資することが可能であり保健福祉への貢献としてその社会的意義は大きいと考える。

VI. 引用文献

- 1). 全国脊髄損傷データベース. 独立行政法人労働者健康安全機構吉備高原医療リハビリテーションセンター. http://www.kibirihah.johas.go.jp/003_reha/10_sekison_db/10_sekison_hyou.html, (参照 2019-2-23)
- 2). 徳弘昭博. 職業復帰と社会的アウトカム. 脊髄損傷の治療から社会復帰まで—全国脊髄損傷データベースの分析から—. 独立行政法人労働者健康福祉機構全国脊髄損傷データベース研究会, 編集, 東京都, 保健文化社, 2010, 116-129.
- 3). Macpherson JM, Horak FB. Posture. Principles of neural science. edited by Kandel ER, Schwartz JH, Jessell TM, Siegelbaum SA, Hudspeth AJ. 5th edition, New York, McGraw-Hill Companies, 2013, 935-959.
- 4). Fong AJ1, Roy RR, Ichiyama RM, Lavrov I, Courtine G, Gerasimenko Y, Tai YC, Burdick J, Edgerton VR. Recovery of control of posture and locomotion after a spinal cord injury: solutions staring us in the face. Prog Brain Res. 2009; 175: 393-418.

- 5). 武田正則, 出口貴行. 不全型脊髄損傷の特徴と理学療法. *PT ジャーナル*. 2009, 43(3), 195-202.
- 6). Waters RL, Adkins RH, Yakura JS, Sie I. Motor and sensory recovery following incomplete paraplegia. *Arch Phys Med Rehabil*. 1994 Jan; 75(1): 67-72.
- 7). Waters RL, Adkins RH, Yakura JS, Sie I. Motor and sensory recovery following incomplete tetraplegia. *Arch Phys Med Rehabil*. 1994 Mar; 75(3): 306-311.
- 8). Barbeau H. Locomotor training in neurorehabilitation: emerging rehabilitation concepts. *Neurorehabil Neural Repair*. 2003; 17(1): 3-11.
- 9). Capaday C, Stein RB. Amplitude modulation of the soleus H-reflex in the human during walking and standing. *J Neurosci*. 1986; 6(5): 1308-1313.
- 10). Thompson AK, Wolpaw JR. Restoring walking after spinal cord injury: operant conditioning of spinal reflexes can help. *Neuroscientist*. 2015 Apr; 21(2): 203-215.