脊髄損傷者における上肢運動機能および脳機能の特異的適応

中西智也（PT）[1)2)]，湯浅明子（PT）[3)]，小林裕央 [1)]，小幡博基 [4)]，中澤公孝 [1)]

[1)] 東京大学大学院総合文化研究科広域科学専攻
[2)] 日本学術振興会特別研究員
[3)] 藤田医科大学医学部リハビリテーション医学Ⅰ講座
[4)] 九州工業大学教養教育院

キーワード：脊髄損傷，脳再組織化，スポーツ

はじめに

脊髄損傷後の一次感覚運動皮質においては，代償性反応として下肢支配領域の灰白質容積低下や，上肢・顔支配領域の内側偏移が生じることが知られている [1)]。一方，健常者の脳においても高強度・頻度の運動により脳機能地図の拡大や，neural efficiency が生じる [2)]。これらの障害特異的代償性変化かつ使用依存性可塑的変化により，スポーツを日常的に行い活動度が高い脊髄損傷者においては，特異的な脳再組織化が生じ，それに伴い残存部位の運動機能も向上していると考えられる。本研究は，スポーツを行っている胸髄完全損傷者を対象として，受傷後の適応過程において高い上肢運動機能を獲得しうるのか（研究Ⅰ），またその際の脳活動はいかなる機能的再編成が生じているのか（研究Ⅱ），明らかにすることを目的とした。なお，本研究は東京大学大学院総合文化研究科・教養学部，ヒトを対象とした実験研究に関する倫理審査委員会の承認（承認番号 581-2（-2））を得て行われた。

研　究　Ⅰ

1. 方法

14 名の胸髄完全損傷者（以下，cSCI 群：平均年齢 49.3 ± 5.8 歳，男性 12 名，女性 2 名，14 名とも ASIA scale A），15 名のその他下肢疾患者（以下，Others 群：平均年齢 41.8 ± 14.2 歳，男性 14 名，女性 1 名），12 名の健常者（以下，Healthy 群：平均年齢 30.8 ± 7.7 歳，男性 7 名，女性 5 名）を対象とした。参加者は机上にある固定板に利き腕前腕を乗せ，肘関節屈曲 70° 位にてフォースセンサー（Uchida Electronics, Oosaka, JAPAN）を把持した。測定は参加者の最大把持力（以下，MVC）を 3 回計測し，最大値を各参加者の MVC とした。MVC から 2%，10%，30%，65%MVC を算出し，この 4 強度をターゲットとして設定した。参加者は提示されたターゲットラインに自身の力出力ラインをなるべく正確に 12 秒間合わせる，という力調節課題を各強度 3 試行ずつ，計 12 試行行った。

解析は 12 秒間の力調節中の波形のうち，標準偏差（以下，SD）がもっとも低値となり変動が少ない 10 秒間を抽出し，変動係数（coefficient of variation：以下，CV [CV = SD / mean force × 100]）を算出した [3)]。統計処理は 3（群）× 4（ターゲット強度）の二要因による反復測定デザインの分散分析を行い，主効果および交互作用について検討した。有意水準は 5% として設定した。また，事後比較として Tukey-kramer 法を行った。さらに，各強度の変動係数と，受傷後経過年数・運動年数との関係をピアソン相関係数により算出した。

2. 結果

2% 強度では，cSCI 群および Others 群は Healthy 群と比較して CV が低く，すなわち，疾患にかかわらず日常的に車椅子を用いている両群で CV が低値となった。これに対し 10%，30%，65％強度では cSCI 群が Others 群と Healthy 群よりも CV が特異的に低い結果となった（図 1）。さらに，変動係数と運動年数の間に有意な相関関係が見られた（図 2）。

研　究　Ⅱ

1. 方法

対象は 8 名の胸髄損傷者（以下，SCI 群：41.0 ± 13.8 歳，男性 6 名，女性 2 名，ASIA scale A 6 名，B 1 名），

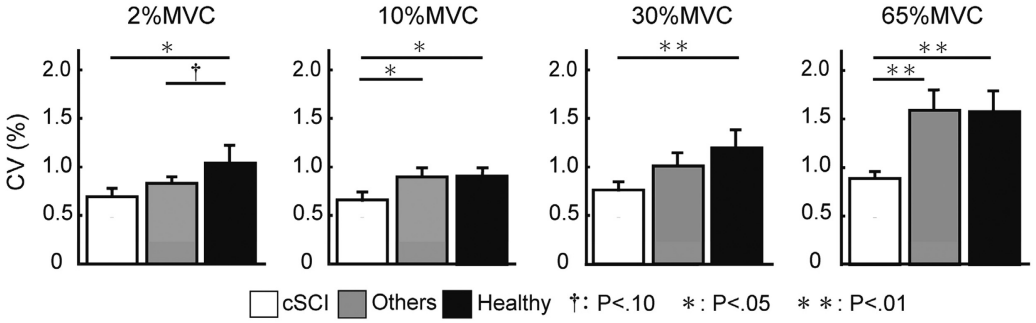

図 1　各強度における変動係数（CV）の平均値
各強度における各群の CV 平均値 ± 標準誤差（SE）を示す．Others 群および Healthy 群は強度の増加に伴って CV が増加しているが，cSCI 群はどの強度においても低い．

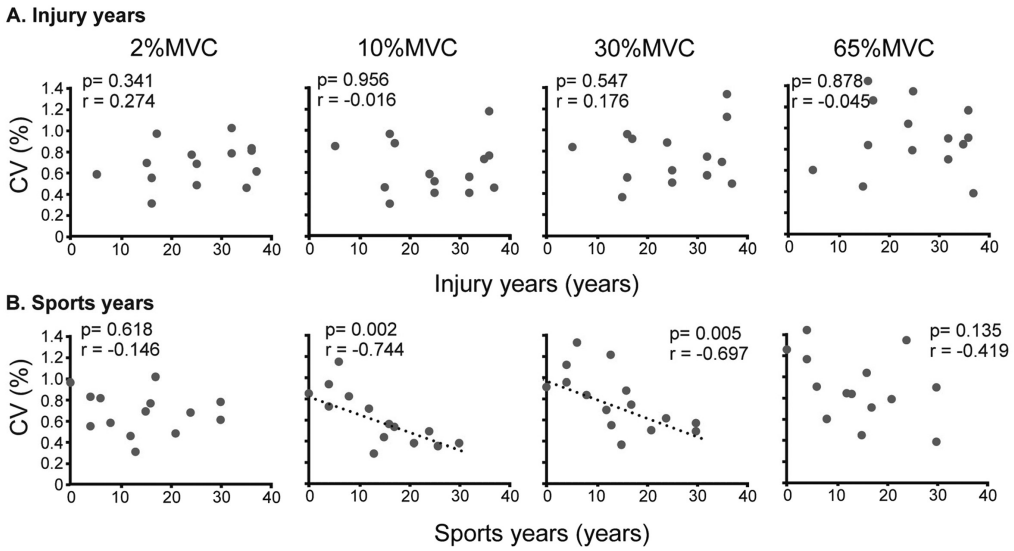

図 2　cSCI 群における各因子との関係
有意な相関関係が認められた強度においてのみ，近似直線を示す．（A）変動係数と受傷後経過年数との関係．どの強度においても有意な相関関係は見られなかった．（B）運動年数と変動係数との関係．10% 強度（r = −0.774, p = 0.002）および 30% 強度（r = −0.697, p = 0.005）において有意な負の相関を示した．65% 強度においても有意でないものの，r = −0.419 と負の相関傾向を示した．

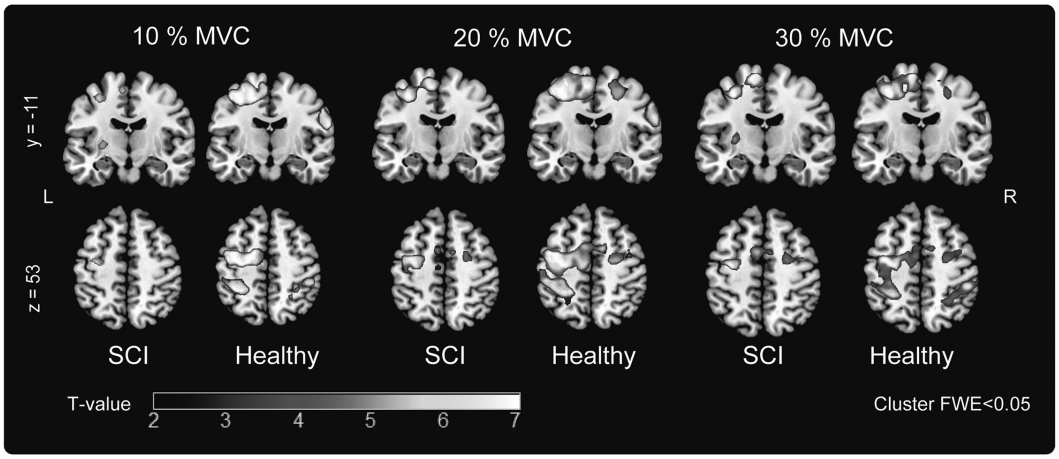

図 3　各強度における力調節課題中の賦活領域
各強度における SCI 群および Healthy 群の集団解析の結果を示す．すべての強度において SCI 群は一次運動野の賦活量が小さかった．

および 10 名の健常者（Healthy 群：23.0 ± 3.6 歳，男性 8 名，女性 2 名）とした。参加者は MRI ガントリー内で背臥位となり，右上肢でフォースセンサーを把持した。その後，MVC を 3 回計測し，最大値を各参加者の MVC とした。撮像シーケンスは最初に 8 秒間のダミースキャンを経て，20 秒間安静・20 秒間の力調節課題を 1 回の session あたり 6 回繰り返し（4 分 28 秒），合計 3 scan 行った。その後，構造画像（T1 強調画像；MPRAGE）の撮像を行った。撮像開始後は，画面右端に「安静・上（30%MVC）・中（20%MVC）・下（10%MVC）」のいずれかがランダムに提示された。安静中はセンサーを握らず，上・中・下のいずれかが提示された場合には，画面中央に提示されている各ターゲット強度ラインに 20 秒間，なるべく正確に力を合わせるよう教示を与えた。解析は左中心前回における課題中の賦活量（Cluster size）を算出した。統計解析は各強度における群間でのマン・ホイットニー U 検定を行った。有意水準は 5% とした。

2. 結果

全強度において，課題中の反対側一次運動野の賦活量は SCI 群が Healthy 群より有意に小さかった（図 3）。

考　　察

研究Ⅰでは，脊髄完全損傷者はその他疾患群および健常者群と比して特異的に把持運動中の力調節が安定すること，研究Ⅱでは把持運動中の反対側一次運動野の賦活量が健常者よりも小さい結果となった。すなわち，脊髄損傷者は受傷後の適応過程で，力調節能力に代表するような上肢運動機能を健常者のそれよりも高めるが，その背景には末梢運動器官だけでなく脳機能においても適応が生じていることが明らかとなった。脳機能の適応は，脊髄損傷により求心性信号入力の完全遮断が生じ，脳の構造・機能的再編成が促進されたためだと考えられる[4)5)]。これに加え，運動を通じた上肢使用頻度の増加による使用依存性可塑的変化が促進されたことが考えられる[6)7)]。

また，結果の臨床現場への応用を考えると，高い力調節安定性は時間経過とともに自然と向上するのではなく，運動の継続が必要であった，という点が重要である。脊髄損傷者を対象として運動の有効性を検討した研究では，心肺機能や基礎代謝，心理状態，社会参画の点でその有効性が認められている。これらに加え本研究より，運動は残存した運動機能向上をもたらすこと，背景にある脳機能の適応を促進しうることが示唆された。これらのデータを基にリハビリテーションに対する意欲向上や，運動への意識付けをさらに高め，健康増進と活動量向上につなげることができると考える。

文　　献

1) Debarnot U, Sperduti M, *et al*.: Corrigendum: Experts bodies, experts minds: how physical and mental training shape the brain. Front Hum Neurosci. 2015; 9: 1–17.
2) Callan DE, Naito E: Neural Processes Distinguishing Elite from Expert and Novice Athletes. Cogn Behav Neurosci. 2014; 27(4): 183–188.
3) Enoka RM, Christou EA, *et al*.: Mechanisms that contribute to differences in motor performance between young and old adults. J Electromyogr Kinesiol. 2003; 13(1): 1–12.
4) Jain N, Florence SL, *et al*.: Reorganization of Somatosensory Cortex After Nerve and Spinal Cord Injury. Physiology. 1998; 13(3): 143–149.
5) Lotze, M, Laubis-Herrmann U, *et al*.: Combination of TMS and fMRI reveals a specific pattern of reorganization in M1 in patients after complete spinal cord injury. Restor Neurol Neurosci. 2006; 24(2): 97–107.
6) 中澤公孝：歩行のニューロリハビリテーション．杏林書院，東京，2010.
7) Sampaio-Baptista C, Khrapitchev AA, *et al*.: Motor Skill Learning Induces Changes in White Matter Microstructure and Myelination. J Neurosci. 2013; 33(50): 19499–19503.

発表実績

原著論文

1) Tomoya Nakanishi, Kento Nakagawa, Hirofumi Kobayashi, Kazutoshi Kudo, Kimitaka Nakazawa: Specific brain reorganization underlying superior upper limb motor function after spinal cord injury: A multimodal MRI study. Neurorehabilitation and Neural Repair. 2021 (in press).
2) 中西智也，小林裕央，島崎崇史，横本勝也，中澤公孝：スポーツによる脊髄損傷者上肢筋脳機能地図の拡張．理学療法学．2020; 47(6): 577–586.
3) Tomoya Nakanishi, Hirofumi Kobayashi, Hiroki Obata, Kento Nakagawa, Kimitaka Nakazawa: Remarkable hand grip steadiness in individuals with complete spinal cord injury. Experimental Brain Research. 2019; 237: 3175–3183.

学会発表

1) 中西智也，小林裕央，島崎崇史，横本勝也，中澤公孝：スポーツによる脊髄損傷者上肢筋脳機能地図の拡張．第 24 回日本基礎理学療法学術集会，新潟，2019 年 11 月
2) Tomoya Nakanishi, Hirofumi Kobayashi, Hiroki Obata, Kento Nakagawa, Kazutoshi Kudo, Kimitaka Nakazawa: “Specific adaptations of the upper limb motor function and brain activity in individuals with Spinal Cord Injury.” Vista 2019 Conference, Amsterdam, Netherlands, October, 2019 (Poster).
3) Tomoya Nakanishi, Matija Milosevic, Atsushi Sasaki, Akiko Yamaguchi, Kimitaka Nakazawa: “Effects of functional electrical stimulation therapy on reorganization of brain function: A case report.” World Confederation for Physical Therapy (WCPT) Congress 2019, Geneva, Switzerland, May, 2019 (Poster).
4) Tomoya Nakanishi, Atsushi Sasaki, Kento Nakagawa, Kimitaka Nakazawa: “Unique excitation of the ipsilateral motor pathway in an elite high jumper with below-knee amputation.” Neural Control of Movement 2019, Toyama, Japan. April, 2019 (Poster).
5) 中西智也，小林裕央，中川剣人，中澤公孝：脊髄損傷者における力調節課題中の安定性評価と脳機能計測の試み．第 12 回 motor control 研究会，東京，2018 年 8 月