



## 脊髄損傷者の上肢機能は健常者よりも優れる ～脳-身体の適応による健常者を超える能力の獲得～

### 1. 発表者

中西 智也（東京大学大学院総合文化研究科・博士課程2年／日本学術振興会特別研究員 DC1）  
中川 剣人（早稲田大学スポーツ科学学術院・講師）  
小林 裕央（東京大学大学院総合文化研究科・特任研究員／信州スポーツ医療福祉専門学校）  
工藤 和俊（東京大学大学院情報学環・准教授）  
中澤 公孝（東京大学大学院総合文化研究科・教授）

### 2. 発表のポイント

- ◆脊髄完全損傷者（下肢の運動・感覚麻痺）の上肢力調節機能が、他の疾患による車椅子使用者、および健常者よりも特異的に高いことを発見しました。
- ◆力調節を行っている際の脳活動は健常者と大きく異なり、神経活動の効率化が生じていることが分かりました。さらに、運動感覚統合を司る上頭頂小葉において、容積増大や運動野との結合性増加が見られました。
- ◆脊髄損傷の受傷後には脳の変化が生じることが分かっており、スポーツなどの運動経験がこの変化を促進したことが要因である可能性があります。
- ◆この能力をスポーツや社会生活で活かす仕組みをつくることで、次世代の共生社会創生が可能と考えられます。

### 3. 発表概要

事故や病気により脊髄を損傷した方（脊髄損傷者）は、損傷された脊髄の高さ（損傷高位）以下において麻痺を呈するため、損傷高位より上位の残存機能を用いて日常生活に適応することが求められます。しかし、これまでの脊髄損傷者を対象とした研究は、歩行能力の再獲得や麻痺肢の回復など、損傷高位以下の身体部位を対象とした研究がほとんどであり、損傷高位より上位の残存機能、特に上肢運動機能がどのように変化するかという点に関しては明らかにされていませんでした。

東京大学大学院総合文化研究科の中澤公孝教授、博士課程の中西智也大学院生（日本学術振興会特別研究員DC1）らによる研究グループは、昨年、上肢の力調節能力を脊髄完全損傷者（損傷高位：胸髄以下）、他の疾患による車椅子使用者、健常者の3群を対象として行った調査で、脊髄完全損傷者の力調節能力が特異的に高いことを発見しました。調査結果では、脊髄完全損傷者の力調節能力が他の疾患による車椅子使用者に比べて特異的に高かったのは、日常での使用頻度が増加したことによる機能向上のみでなく、背景に何らかの神経系の適応が生じていることが示唆されていました。（文献1）。

本研究では、脊髄完全損傷者の脳にどのような適応が生じているか調べるため、力調節中の脳活

動をfunctional MRIを用いて計測し、さらに脳構造・ネットワーク指標の計測を行いました。その結果、健常者と比較すると、脊髄完全損傷者は力調節を行っている際の脳活動が小さいなど神経活動の効率化が生じていると考えられ（図3）、さらに、運動感覚統合を司る上頭頂小葉の脳容積や、一次運動野-上頭頂小葉間、一次運動野-小脳間の機能的ネットワークが力調節に有利な適応をしている可能性があることが分かりました（図4）。

障がい者スポーツにおいて、脊髄損傷者は上肢で車椅子を巧みに操作したりパワーリフティングでは健常者を超える記録を残すなど、健常者以上の能力を発揮することがあります。これらは日頃の練習の成果であると同時に、脊髄損傷者が神経学的に上肢運動機能を高めやすい性質を持っていることが背景にあると考えられます。脊髄損傷後のリハビリテーションにおいて、損傷高位以下の機能を再獲得することは、再び受傷前と同じ生活を送ることにつながるため、重要であることに疑いはありません。一方、残された上肢機能の潜在能力を最大限に引き出すことで、スポーツや芸術において人々を魅了する技術や作品を見せたり、就業場面においても巧みな作業を行うことが可能となり、その結果、受傷前の姿を志向するばかりではなく、新しい自己を築き新しい人生を歩むことに対して前向きになることが考えられます。本研究グループは、そのような姿もリハビリテーションの目標の選択肢となりうることを提案しました。

本研究は、独立行政法人日本学術振興会科学研究費助成事業（基盤研究A）「パラリンピックブレイン-ヒト脳の機能的・構造的再編能力」（研究代表者:中澤公孝）の一環として行われました。

本研究成果は、リハビリテーション分野で世界第2位に位置付けられている米国の学術誌「*Neurorehabilitation and Neural Repair*」（Sage Publications）に1月29日付でオンライン掲載されました。

## 4. 発表内容

### <研究の背景>

脊髄損傷により損傷高位以下の領域は、運動・感覚麻痺を呈します。麻痺に対する有効な治療法は長年見つかっていませんでしたが、ロボットや装具を用いた歩行リハビリテーションや、電気刺激などの物理療法の併用により、一部の機能が回復することが明らかとなってきました。また、今後は再生医療技術がより高まり、損傷高位以下の機能を回復させるための医療は、より発展していくと考えられます。

一方、損傷高位より上位の運動機能に着目すると、おおまかな残存機能と日常生活自立度との関係を調べた研究は多くあるものの、詳細な運動機能の定量化および運動機能の向上に影響する要因の検証は行われていませんでした。この要因と考えられているのが、脊髄損傷後に生じる脳の適応です。脊髄損傷は脊髄の障害であるため、脳に変化はない、ということがこれまでの常識でしたが、近年、大脳皮質感覚野における下肢支配領域の容積縮小や、上肢運動時の活動領域の変化が報告されています（文献2、3、4）。本研究グループは、昨年、上肢機能を司る脳領域の変化が生じているのであれば実際の上肢運動機能にも変化が生じているのではないかという仮定のもと、脊髄完全損傷者（損傷高位：胸髄以下）、他の疾患による車椅子使用者、健常者の3群を対象として、上肢の力調節能力を調べました。その結果、実際に脊髄完全損傷者の力調節能力が特異的に高いことが明らかになりました（文献1）。本研究は、脊髄完全損傷者はなぜ健常者よりも力調節能力が高いという調査結果が出たのか、その要因を探るため、実際の力調節中の脳活動お

よび背景にある脳の変化を調べたものです。

### ＜研究の内容＞

前回および今回の一連の研究では、上肢運動機能を調べるため、力調節課題（注1）を用いました。握る力をできるだけ安定させ、保つものです。その際に生じる力のゆれ（変動）を定量化しました。すなわち、値が小さければゆれが小さく力調節能力が高い、逆に大きければゆれが大きく力調節能力が低い、ということになります。この力調節課題は、年齢や筋肉の状態、高齢者の転倒可能性との関連が報告されており、ゆれの状態から運動の調節能力を測るために広く用いられていることから、運動課題として採用されました。前回の研究では、脊髄完全損傷者14名（損傷高位は胸髄以下であり、上肢に麻痺はない状態）、その他の下肢障害者15名（二分脊椎や小児ポリオなど）、健常者12名を対象とし、最大握力の2%、10%、30%、65%を算出し、モニターにターゲットラインとして提示しました。このターゲットに握力のラインをなるべく正確に合わせるようにしてもらい、その間の力波形から、ゆれの程度を算出しました。結果は、どのターゲットレベルにおいても、脊髄損傷者群が健常者よりもゆれの程度が低い結果となりました（文献1）。

今回の研究では、スポーツ経験のある脊髄損傷者8名（7名：完全損傷、1名：不全損傷、損傷高位は胸髄以下）、健常者10名を対象として力調節課題中の脳活動をfunctional MRIを用いて計測しました（図1）。また、脳容積をT1強調画像、領域間機能的結合性を安静時functional MRIにより計測しました。結果は、脊髄損傷者の力調節能力は前回の研究と同じようにとても高く（図2）、その際、脳の一次運動野の活動量が少ない”神経伝導の効率化”が生じていることが分かりました（図3）。この現象はプロの演奏家やスポーツ選手のような、熟練者に見られる神経系の発達を示す特徴の一つですが、脊髄損傷者の脳でも同様の現象が起きていることが明らかとなりました。また、視覚野への依存度低下が見られ（図3）、安静時functional MRIは、健常者と比して運動野-上頭頂小葉間の機能的結合性が高く、脳構造は上頭頂小葉の容積が肥大している結果となりました（図4）。これらの結果をまとめると、上頭頂小葉は運動感覚統合や四肢の姿勢感覚を担う領域であることから、力調節中の感覚処理や姿勢保持能力を高め、結果、力調節が安定し、視覚野への依存度が低下したと考えられます。これらの変化は過去の脊髄損傷者を対象とした研究では報告されておらず、脊髄損傷後にスポーツを行うことで生じた特異的な適応であると考えられます。

### ＜本研究成果の意義＞

本研究より、脊髄損傷者は特異的に高い上肢運動機能を発揮しやすい性質を持つことが明らかとなりました。実際、障がい者スポーツの現場を見てみると、脊髄損傷者は上肢で車椅子を巧みに操作したり、重い重量を持ち上げたりと、健常者では成しえない驚愕するパフォーマンスを発揮することがあります。これらは日頃の練習の成果であると同時に、背景には上述の神経学的な適応が関連していると考えられます。再生医療技術が急速に発展する今日、脊髄損傷後のリハビリテーションにおいて、損傷高位以下の機能を再獲得できる可能性がより高まっています。一方、残存した上肢機能に目を向けると、その潜在能力を最大限に引き出すことで、スポーツや社会生活において、健常者も成しえない技術やパフォーマンスを見せることができる可能性が本研究より示されました。受傷前の姿を目指すことはもちろん重要ですが、残存機能を代償的手段として用いるだけでなく、洗練させることで卓越した能力を獲得し、新しい自己を築くことも予想以上に可能であることを、本研究グループは提案しています。今後は、障がい者でしか発揮でき

ない能力があることを、神経学的な根拠をもとにより明らかにすることで、雇用促進や新しい役割の考案など、障がい者がより能力を発揮できる社会システムの構築や、次世代型共生社会の創生に貢献できると考えております。

- 文献1) Nakanishi T, Kobayashi H, Obata H, Nakagawa K, Nakazawa K (2019) Remarkable hand grip steadiness in individuals with complete spinal cord injury. *Experimental Brain Research* 237(12):3175–3183. <https://doi.org/10.1007/s00221-019-05656-2>
- 文献2) Freund P, Weiskopf N, Ward NS, Hutton C, Gall A, Ciccarelli O, Thompson AJ (2011) Disability, atrophy and cortical reorganization following spinal cord injury. *Brain* 134(6):1610–1622. <https://doi.org/10.1093/brain/awr093>
- 文献3) Wrigley PJ, Press SR, Gustin SM, Macefield VG, Gandevia SC, Cousins MJ, Siddall PJ (2009) Neuropathic pain and primary somatosensory cortex reorganization following spinal cord injury. *Pain* 141(1–2):52–59. <https://doi.org/10.1016/j.pain.2008.10.007>
- 文献4) Henderson LA, Gustin SM, Macey PM, Wrigley PJ, Siddall PJ (2011) Functional reorganization of the brain in humans following spinal cord injury: evidence for underlying changes in cortical anatomy. *Journal of Neuroscience* 31(7):2630–2637. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.2717-10.2011>

## 5. 発表雑誌

雑誌名 : *Neurorehabilitation and Neural Repair*

論文タイトル : “Specific brain reorganization underlying superior upper limb motor function after spinal cord injury: A multimodal MRI study”

著者 : Tomoya Nakanishi, Kento Nakagawa, Hirofumi Kobayashi, Kazutoshi Kudo, Kimitaka Nakazawa\*

DOI番号 : [doi.org/10.1177/1545968321989347](https://doi.org/10.1177/1545968321989347)

論文URL : <https://journals.sagepub.com/doi/full/10.1177/1545968321989347>

## 6. 問い合わせ先

東京大学大学院総合文化研究科

教授 中澤 公孝 (なかざわ きみたか)

研究室ウェブサイト: <http://www.neuro-reha-sport-lab.com>

## 7. 用語解説および参考文献

### 注1 力調節課題

ある一定の目標ラインと、握力センサーの出力の2本の線が表示されているモニターを見ながら、握力センサーを握り、目標ラインに対して、握力をなるべく正確に合わせる課題である。その際の力波形を記録し、ゆれの程度を定量化する。定量化は、課題中の20秒間の力波形のうち、最も安定した15秒間を抜き出し、標準偏差を平均値で除し、変動係数（%）を算出することにより行った。

## 8. 添付資料



図1 実験の設定

ある一定の目標ラインと、握力センサーの出力の2本の線が表示されているモニターを見ながら、握力センサーを握り、目標ラインに対して、握力を可能な限り正確に合わせる課題を行った。

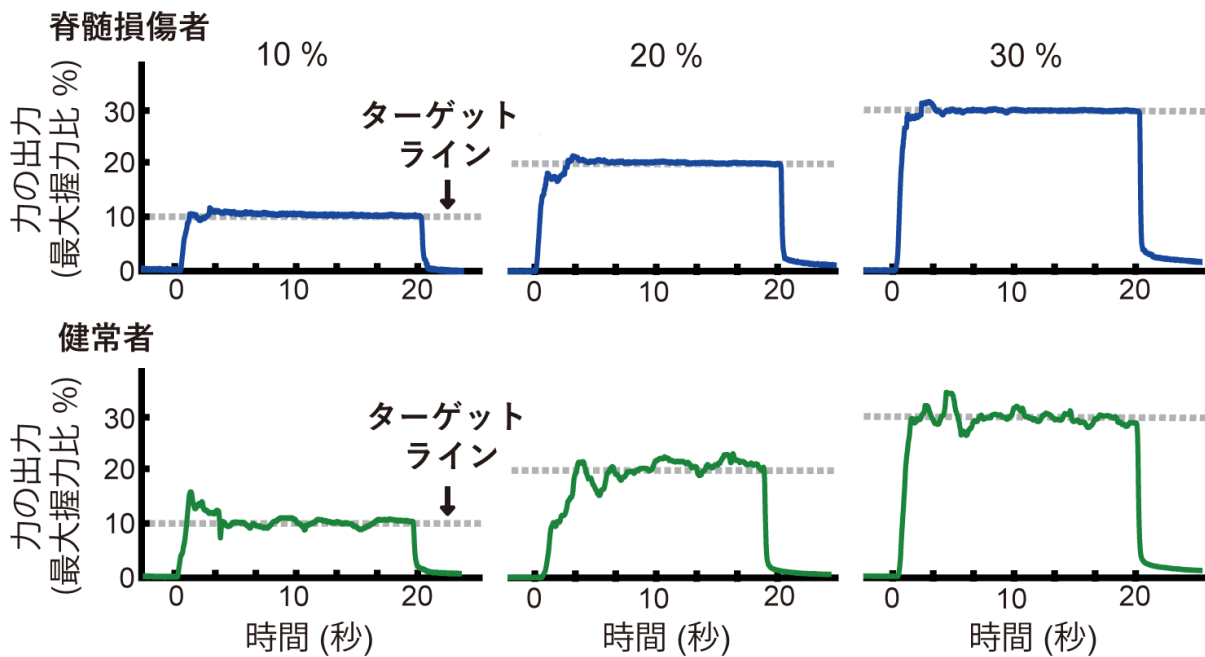


図2 力波形の典型例（ある被験者1名ずつの抜粋）

下段（緑）は健常者1名の典型波形例である。通常は力を合わせ続けようとしても、ある程度のふるえ（力の変動）がみられる。一方、上段（青）の脊髄損傷者1名の例では、力調節能力が高く、ほとんど変動が生じない。

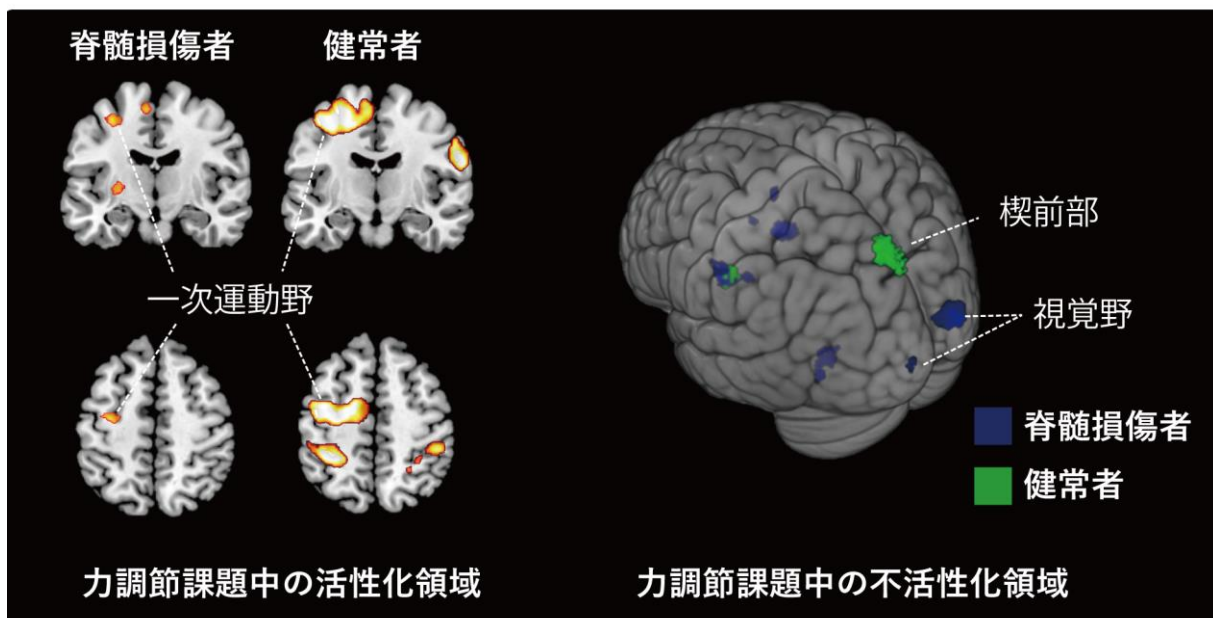


図3 力調節中の脳活動と不活性化領域

左は力調節中の脳活動を平均したものである。脊髄損傷者の一次運動野の活動は、健常者と比して小さい。一方、右は逆に力調節中不活性化(deactivation)が生じた領域である。脊髄損傷者において、力調節中に視覚情報への依存度が低下したことがわかる。

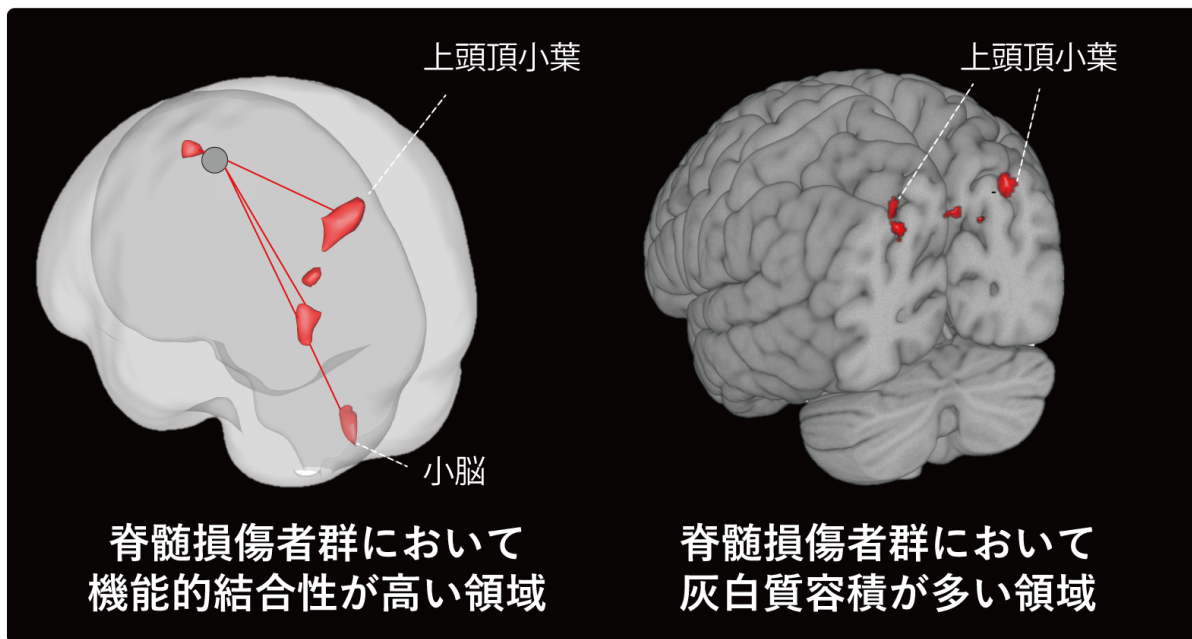


図4 脊髄損傷者と健常者の脳容積・機能的結合性の比較

左は安静時の脳機能結合性、右は脳構造（T1強調）画像における、脊髄損傷者と健常者の差分画像である。特に脊髄損傷者の上頭頂小葉が発達している様子が確認できた。