

〔短期在外研究〕

研 究 者	東京大学 大学院総合文化研究科広域科学専攻 博士後期課程 石川 慶一	2256101
研 究 課 題 名	侵襲型ブレインマシンインターフェースを用いた脊髄損傷患者への脊髄電気刺激	
共同研究者／所属、職名	Matija Milosevic/University of Miami, Assistant Professor	
在 留 地 域	アメリカ / マイアミ	
渡 航 期 間	2026 年 2 月 7 日～2026 年 3 月 11 日（32 日間）	

〔在外研究の目的・意義〕

脊髄損傷は、運動・感覚・自律機能に影響を及ぼす重篤な障害であり、患者の QOL を著しく低下させる。WHO によると全世界で約 250 万人の患者が存在し、その社会的・経済的負担は大きい。

このような状況に対し、近年注目を集めているのが、ブレイン・コンピュータ・インターフェース (BCI) 技術である。BCI を用いたリハビリテーションとは脳内の神経信号を取得・解読し、身体外に接続した刺激装置を通じて運動をアシストし、患者の運動機能回復を狙うものである。BCI には、電極を手術で埋め込む「侵襲型」と経皮的に信号をやり取りする「非侵襲型」の 2 方式がある。「侵襲型」は刺激をより精密に制御できる一方で、高度な医学・神経工学の知見と臨床現場との密接な連携が必要とされることから、研究を展開することが非常に難しい。

共同研究を行う Miami University の Milosevic 研究室は既に複数人の脊髄損傷患者に対し、侵襲型 BCI 研究を実施しており、研究手法を確立している。所属している研究員は BCI に必要な信号解析と刺激装置制御に関する工学的知識を持ち、技術・設備が揃っている。加えて、病院が隣接しており、理学療法士が常勤している臨床体制が整っている。

これらを踏まえて、本在外研究では、マイアミ大学にて実施される侵襲型 BCI を用いた脊髄損傷患者への介入研究に参加し、その効果を検証するとともに、侵襲型 BCI を用いた研究手法と実装方法を学ぶことを目的とした。本研究を通して、人間の失われた運動機能を機械の助けを借りて再構築するための最先端の技術と知見を学ぶことができた。これは、日本国内における非侵襲型 BCI 関連技術のさらなる発展に寄与するとともに、侵襲型 BCI 研究の国内展開に向けた制度・倫理的基盤の整備にも貢献できるものと考えられる。さらに、人間と機械が双方向に調和する未来の実現に向けて、神経科学、工学、リハビリテーション医学が融合した研究の重要性を実感する貴重な機会となった。

〔得られた成果・効果と今後の発展性〕

脊髄損傷患者 1 名（男性、51 歳、C4-5 頸髄損傷）に対し、頸髄硬膜外に刺激用電極を外科的に挿入した（図 1）。介入開始前に、上肢の運動を効果的にアシストできる刺激条件（刺激部位・強度・パターン等）を個別に設定した。その刺激条件を用いて、BCI を介したリハビリテーションを実施した。BCI リハビリテーションでは、患者が課題動作の運動イメージを行い、脳波計がその運動意図を検出した際に、外部の刺激装置を介して頸髄硬膜外電極から筋への電気刺激が送られ、患者は運動アシストを受けながら実際の動作を行った。このトレーニングを週 5 回・4 週間にわたって実施し、介入前後および介入中における上肢運動機能の変化を比較・評価した。

4 週間の介入の結果、手機能評価指標である

Toronto Rehabilitation Institute-Hand Function Test (TRI-HFT) のスコアが介入前後で改善し、BCI リハビリテーションの有効性が示された。本研究の対象患者は損傷後 10 年以上が経過した慢性期の脊髄損傷患者であり、従来のリハビリテーションによる機能改善はすでに頭打ちの状態にあった。今回の結果は、侵襲型 BCI を用いたリハビリテーションがその限界を超えて機能回復をもたらす可能性を示すものであり、臨床的に非常に意義深い知見といえる。一方、介入中に実施した短期評価では、BCI リハビリテーション実施直後には有意な改善が認められず、機能回復には長期間にわたる継続的な介入が必要であることが示唆された。

現時点では上肢運動機能に関する行動学的評価とその解析を完了したが、他にも皮質脊髄路興奮性、脊髄興奮性、筋活動など神経生理学的指標の計測も並行して実施した。脊髄損傷は脳から脊髄を介して筋に接続している皮質脊髄路が損傷することで、脳からの運動指令が末梢の筋に上手く伝わらず、運動障害を引き起こす。BCI リハビリテーションによって皮質脊髄路の機能がどの程度回復するのか、さらにそれが運動機能回復にどれほど貢献しているのかを明らかにすることで、機能回復の背景にある神経メカニズムの解明を目指す。得られた知見を基盤として非侵襲型 BCI リハビリテーションへの応用を図り、患者負担の少ない、より手軽な BCI リハビリテーションの実現につなげたい。

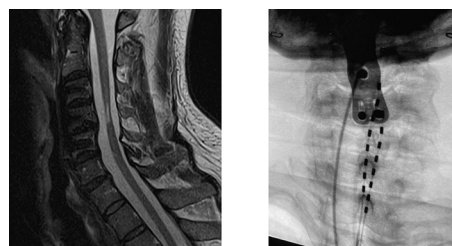


図 1 実際に埋め込まれた刺激用電極

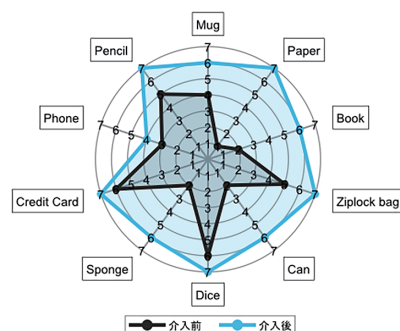


図 2 BCI リハビリテーション前後の機能変化