

## 下肢リハビリテーション機器を用いた感覚フィードバック提示が 感覚運動野の脳血流に与える影響

Effect of robotic-assisted sensory feedback on sensorimotor activation during lower limb movements

○堀内彩花（芝工大） 櫻田武（自治医大） 李虎奎（芝工大） 米田隆志（芝工大）

Ayaka HORIUCHI, Shibaura Institute of Technology  
Takeshi SAKURADA, Jichi Medical University  
Hokyoo LEE, Shibaura Institute of Technology  
Takashi KOMEDA, Shibaura Institute of Technology

**Abstract:** During rehabilitation training for patients with motor disabilities in lower limb, physical therapists need to assist flexion-extension movements. These assisted movements have a crucial role to prevent joint contracture. We previously developed a portable rehabilitation robot to assist patients' lower limb movements and to reduce the therapists' load. In this study, we aimed to evaluate the effectiveness of the rehabilitation robot by recording neural activity with functional near-infrared spectroscopy (fNIRS). When strong sensory feedback was presented by the rehabilitation robot during lower limb movements, neural activity in sensorimotor area increased. The finding implied that moderate robotic-assisted sensory feedbacks could maximize benefits of rehabilitation for functional recovery.

**Key Words:** Sensorimotor area, Sensory feedback, Lower limb rehabilitation, Functional near-infrared spectroscopy

### 1. 序論

運動機能障害により自発的に体を動かすことが困難な患者に対する訓練の一つとして、関節可動域訓練などの他動的な運動が実施される。この訓練は、痙縮・拘縮予防や運動機能の維持・改善を目的として行われるが、理学療法士の身体的負担が大きいという問題点がある。そのため、理学療法士を補助するための様々な下肢リハビリテーション機器が開発されてきた。

代表的な機器として、TEM LX2 (安川電機)<sup>(1)</sup> や ERIGO (Hocoma 社)<sup>(2)</sup> などが挙げられる。しかしながら、既存の装置は大きく持ち運びが困難であり、かつ高価である。このため、日本のリハビリテーション施設においては導入が困難であることが指摘されている。そこで我々はこれまでに持ち運び可能な下肢リハビリテーション装置 (以下、ポータブルリハビリ装置)を開発した。<sup>(3)</sup>

近年では、リハビリテーション装置を患者に適用するだけでなく、装置の使用が脳活動に与える影響を報告する例も多い。先に挙げた機器 TEM LX2 では、Functional Near Infrared Spectroscopy (fNIRS) を用いた脳活動計測が実施され、下肢運動中の体性感覚野における脳血流変動を報告している。<sup>(1)</sup> また、Calabrò らは、ERIGO を用いた下肢リハビリテーションを実施し、その有用性を脳波計測などにより示している。<sup>(2)</sup> これらの研究結果は、リハビリ機器による他動運動が運動機能障害者の脳機能を活性化させる効果を示唆している。

また、運動機能障害者のリハビリテーションに有効な手段として、運動イメージによる訓練がある。<sup>(4)</sup> 運動イメージとは、実際には体を動かさずに頭の中で動作を想起する認知的行為であり、「筋感覚運動イメージ」と、「視覚運動イメージ」に分けられる。<sup>(5)</sup> 筋感覚運動イメージは、運動関連領域の活動を賦活することから、リハビリテーション

にも有用であるとされる。

そこで本研究では、感覚フィードバックと筋感覚運動イメージに着目し、ポータブルリハビリ装置で補助された他動運動遂行中の感覚運動野へ影響を検証する。このため、他動運動中の脳活動を fNIRS によって評価した。

### 2. 実験方法

#### 2.1. 参加者

実験には健康成人女性 1 名 (23 歳) が参加した。

#### 2.2. 実験環境

##### 2.2.1. ポータブルリハビリ装置

Fig.1 に本研究で使用したポータブルリハビリ装置を示す。本装置は空気圧人工筋によってベース部分を体幹軸方向にスライドさせることで、装着者の下肢関節の屈曲・伸展を他動的に動かすことが可能となっている。本装置を傾斜起立台に取り付けた状態で、参加者は傾斜起立台上で背臥位となる。台の傾斜は 45° とし、ハーネスにより身体を支持した。

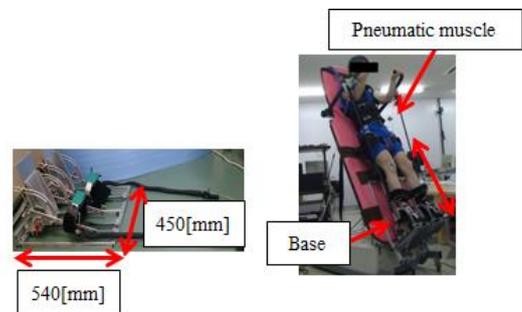


Fig.1 Portable rehabilitation robot for lower limb

2.2.2. 脳血流計測装置 (fNIRS)

ポータブルリハビリ装置で補助される他動運動が感覚運動野の活動にどのような影響を与えるか調べるため、fNIRS (日立メディコ製, ETG-4000) を用いて評価を行った。fNIRS は、生体透過性の高い近赤外光を用い、神経活動に伴う大脳皮質の血中ヘモグロビン濃度変化を計測するものである。(6) 本研究では、酸素化ヘモグロビン (Oxy-Hb) 濃度変化に注目し、課題遂行中の変化を評価した。

2.2.3. プローブセッティング

3×5のプローブ (計測チャンネル 計22ch) をFig.2に示すように配置した。具体的には、国際10-20法で規定されるCz直上にプローブの中央が乗るように配置し、下肢の感覚運動野をカバーできるようにした。



Fig.2 Probe setting

2.3. 運動課題および条件

ポータブルリハビリ装置による下肢関節の他動的屈曲・伸展運動を運動課題とした。運動周波数は 0.25Hz とした。また、実験条件として“足裏への感覚フィードバック”および“筋感覚運動イメージ”の2要因に基づく4つの条件を設定した (Table.1)。感覚フィードバックの強弱はハーネスによって支える装着者の自重を調整することで実現した。また、運動イメージについては、左右の下肢関節に関して屈伸・伸展運動を筋感覚運動イメージすることを教示した。以下、弱感覚フィードバック・運動イメージなしを wSFwoMI (Condition 1)、強感覚フィードバック・運動イメージなしを sSFwoMI (Condition 2)、弱感覚フィードバック・運動イメージありを wSFwMI (Condition 3)、強感覚フィードバック・運動イメージありを sSFwMI (Condition 4) と表記する。

Table.1 Experimental conditions

		Sensory feedback	
		Weak	Strong
Motor imagery	Without imagery	Condition1 (wSFwoMI)	Condition2 (sSFwoMI)
	With imagery	Condition3 (wSFwMI)	Condition4 (sSFwMI)

2.4. タスクデザイン

本実験では Fig.3 に示すブロックデザインとした。安静状態とする Rest phase とポータブルリハビリ装置によって他動的な下肢運動を実施する Task phase をそれぞれ 20秒ずつ組み合わせたものを1ブロックとし、これを3ブロック繰り返した後、最後にもう一度 Rest phase を挿入した。この2分20秒の課題を1セッションとし、全部で8セッション実施した。各セッションには Table.1 に示す4条件をランダムに割り当てた。今回は Condition 1 → Condition 3 → Condition 3 → Condition 1 → Condition 2 → Condition 4 → Condition 4 → Condition 2 の順で実施した。

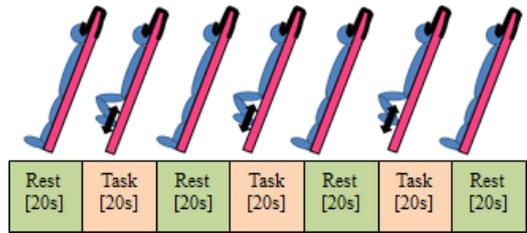


Fig.3 Task design

2.5. fNIRSデータ処理

各セッションで計測したOxy-Hbデータは以下の手順で解析を行った。

- ① セッション内におけるドリフト成分の除去。
- ② バンドパスフィルタの適用 (0.0125-0.8 Hz)。
- ③ ブロックの切り出し (Task phase開始10秒前からTask phase終了10秒後までを切り出す)。
- ④ 切り出したデータの初めの10秒間における平均値を基準としてベースラインを合わせる。
- ⑤ 切り出したデータの初めの10秒間における平均値・標準偏差を用いて標準化 (zスコア化) したのち、各条件の加算平均波形を算出。

3. 結果

実験において計22chの計測を行ったが、本稿では関心領域である感覚運動野付近 (Cz周辺) の活動についてその結果を示す。Fig. 4はCz左の領域に配置されたチャンネルの加算平均波形である。さらに、この加算平均波形におけるTask phase開始後5秒から25秒までの20秒間の時間帯に着目し、平均zスコアを算出した (Fig. 5)。個人内の傾向として、感覚フィードバックの提示が弱い条件 (wSFwoMI, wSFwMI) よりも、強い条件 (sSFwoMI, sSFwMI) において関心領域の活動が高くなる傾向を示した。Cz周辺のその他のチャンネルにおいては、上記に示した条件間の差は確認されなかった。

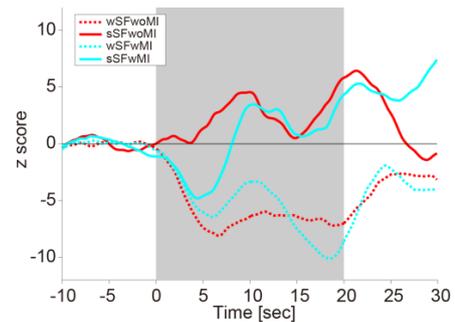


Fig.4 The time course of fNIRS response in sensorimotor area

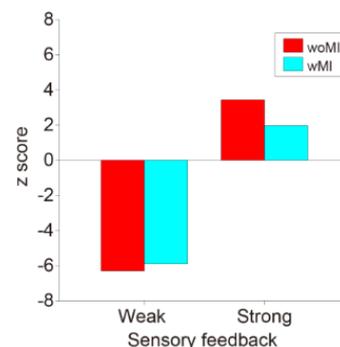


Fig.5 Mean z-scores

#### 4. 考察

感覚フィードバックを強く提示することによって，感覚運動野の一部において活動の上昇が確認された．下肢のリハビリテーションにおいて，本実験環境のように傾斜をつけた状態での運動遂行は，起立性低血圧の予防と重力に伴う適度な下肢への負荷を与えるという2点の理由から重要な設定である．したがって，無負荷での他動運動より，運動機能障害を伴う身体部位に対し適度な負荷を与えた上で他動運動を実施したほうが，より高いリハビリテーション効果を得られることが期待される．

一方，運動イメージの有無に関しては，その効果が確認されなかった．一般的に，運動イメージはそれ自体に比較的長期間での訓練が必要であると言われており，<sup>(7)</sup> 実際，今回の実験参加者も運動イメージを実施するのが初めてであった．このことから，本実験課題において明確な運動イメージを想起できず，脳活動賦活にもつながらなかったことが考えられる．今後は，個々の運動イメージ能力を質問紙<sup>(8)</sup> などにより事前に評価したうえで脳活動への影響を考察していく必要がある．

#### 5. 結論

本装置によって補助される下肢他動運動が脳活動に与える影響を明らかにするため，fNIRSによる脳活動計測を実施した．本装置による下肢他動運動時に感覚フィードバックを強くすることで，脳活動が高まる傾向が確認された．今後は参加者を増やし，今回確認された傾向の再現性を確かめていく．

#### 参考文献

- (1) 上島ら，“下肢他動運動が脳血流変動に及ぼす影響について”，*日本生理人類学会 第53回大会要旨集*, Vol.10, 特別号(1), 60-61 (2005).
- (2) Calabrò et al., “Do post-stroke patients benefit from robotic verticalization? A pilot-study focusing on a novel neurophysiological approach”, *Restor Neurol Neurosci.*, 33(5), 671-81 (2015).
- (3) 平野ら，“急性期下肢リハビリテーション装置の開発”，*日本機械学会 第27回バイオエンジニアリング講演会 論文集*, 14-67 (2015).
- (4) Kumar et al., “Motor imagery training on muscle strength and gait performance in ambulant stroke subjects-A randomized clinical trial”, *J Clin Diagn Res.*, 10(3), YC01-4 (2016).
- (5) Guillot et al., “Brain activity during visual versus kinesthetic imagery: an fMRI study”, *Hum Brain Mapp.*, 30(7), 2157-72 (2009).
- (6) Villringer et al., “Near infrared spectroscopy (NIRS): a new tool to study hemodynamic changes during activation of brain function in human adults”, *Neurosci Lett.*, 154(1-2), 101-4 (1993).
- (7) Oostra et al., “Influence of motor imagery training on gait rehabilitation in sub-acute stroke: A randomized controlled trial”, *J Rehabil Med.*, 47(3), 1977-1908 (2015).
- (8) Malouin et al., “The Kinesthetic and Visual Imagery Questionnaire (KVIQ) for assessing motor imagery in persons with physical disabilities: a reliability and construct validity study”, *J Neurol Phys Ther.*, 31(1), 20-9 (2007).