

## [研究助成 (C)]

脳卒中片麻痺患者の歩行リハビリテーションにおける  
BKP マーカーによるロボット介入

Robotic intervention with BKP markers in gait rehabilitation of stroke hemiplegic patients

2217005



研究代表者

関西医科大学  
リハビリテーション医学講座

専攻生

久保 峰 鳴

## [研究の目的]

二足歩行では、足関節を中心に身体重心を前方へ移動する際に、身体を動的に支えながら、身体重心に推進力を供給する必要がある。しかし片麻痺歩行では、十分な推進力を麻痺肢から得ることが困難となり、これを非麻痺肢による代償によって補う必要がある。よって、片麻痺歩行において、非麻痺肢による代償を用いずに片麻痺歩行を最適化することはできないが、リハビリテーションにおいては、いかに麻痺肢の能力を向上させ、非麻痺肢への依存を減少させるかが重要である。

近年、ロボットを歩行リハビリテーションに応用し、歩行の改善を促す試みがなされている。脳卒中片麻痺患者のロボットを用いた歩行リハビリテーション治療においては、治療効果が高い症例 (Responder) と、低い症例 (Non-Responder) が存在する。従来の臨床研究の群間比較では、なぜ Non-Responder が存在するか、という基本問題は十分に検討されていない。

本研究では、Responder と、Non-Responder を区別するマーカーの探索と、そのマーカーを用いた歩行練習による効果を検証し、麻痺側の機能回復を実現するロボットリハビリテーションの臨床的介入手法を開発することで、全ての患者を Responder にするための人間と機械の調和促進に必要な原理解明を目的としている。

## [研究の内容, 成果]

## 研究概要

脳卒中片麻痺患者のロボットによる歩行練習は、より多い反復練習や、左右対称の動作を誘導でき、歩行能力の改善を促す効果的な手段である (Hidler et al. 2009)。その一方、Hornby ら (2008) は、ロボットとセラピストによる歩行練習の効果は、セラピストの方がより改善が得られることを報告しており、一定の見解を得られていない。そこで、「麻痺脚の機能を健常脚が過剰に代替する歩行」が、正常な歩行を阻害しロボットリハビリテーションの効果を阻害しているという仮説に基づき、仮説について運動学的に検証することとした。

## 第一研究：BKP マーカーの探索

## 1. 研究目的

本研究における仮説である、「麻痺脚の機能を健常脚が過剰に代替する歩行」の証明に必要なマーカーを探索するため、足関節ロボットによる歩行練習を行った対象者から、Responder と Non-Responder を分けた上で、それらの健常脚の特徴を探索した。

## 2. 研究対象者

医師により脳卒中片麻痺の診断を受けた者 22 例 (平均 60 歳) を対象とした。整形外科的疾患の既往を有する者、少なくとも杖を用いた

自立歩行が不可能な症例は除外した。

### 3. 研究方法

治療者が対象者に対して任意の歩行タイミングで足関節底屈および背屈のアシストが可能な空気圧人工筋肉付き足関節ロボット（ATR製）を用いたトレッドミル歩行練習を週2回以上、30分間を15回実施した（図1）。

練習前と練習後で12台の赤外線カメラを用いた三次元動作解析装置（アニマ社製；MA-3000）と床反力計（アニマ社製；MG-1120）を用いた歩行解析を実施した（図2）。歩行は至適歩行速度で平地にて実施した。

歩行解析では、肩峰、上前腸骨棘、上後腸骨棘、大転子、内側上顆、外側上顆、内果、外果、第2中足骨、第5中足骨、踵骨隆起に反射マーカを貼付して実施した（図3）。

取得したマーカと床反力情報から、下肢関節（股関節、膝関節、足関節）角度、歩行推進力、Trailing limb angle (TLA)、足関節底屈

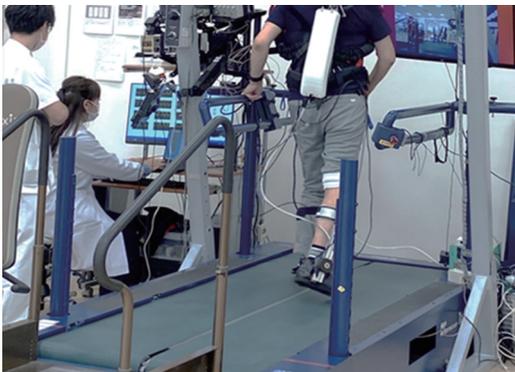


図1 足関節ロボットによる歩行練習風景

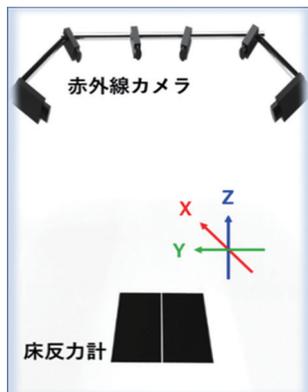


図2 三次元動作解析装置

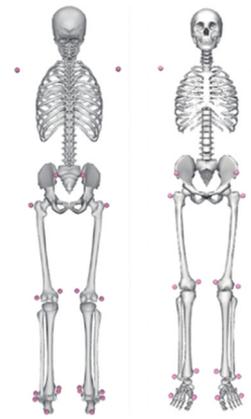


図3 採用したマーカ位置

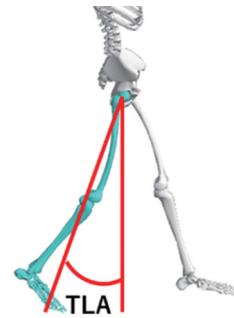


図4 Trailing limb angle

モーメントを算出した。TLAは大転子と第5中足骨を結んだ線と垂直線がなす角度とした。麻痺側における歩行推進力、Trailing limb angle (TLA)、足関節底屈モーメントについて、立脚期の最大値を算出した。健側において、下肢関節角度について、踵接地および足先離地時、立脚期前半および後半における最大値を算出した。

Campanini ら（2009）が報告した smallest real difference (SRD) の基準を参考に、平地での最大歩行推進力が1.8%BW以上増加した対象者を Responder 群、それ以外を Non-Responder 群とした。

統計解析は、歩行推進力とその他の項目の増加量についてスピアマンの相関係数を算出した。有意水準は5%とした。

### 4. 研究結果

Responder および Non-Responder 群は各11例であった。Responder および Non-Responder 群における歩行推進力を図5に示し

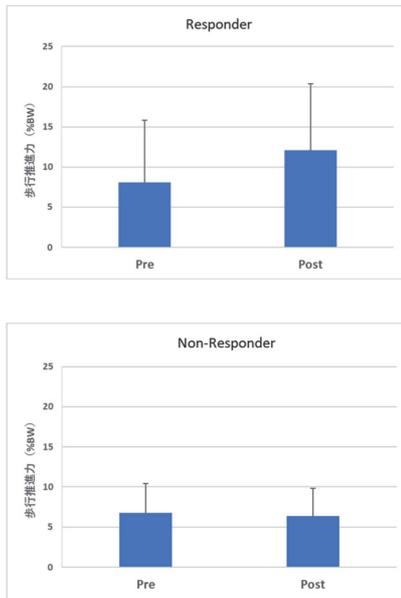


図5 各群におけるロボット前後の歩行推進力

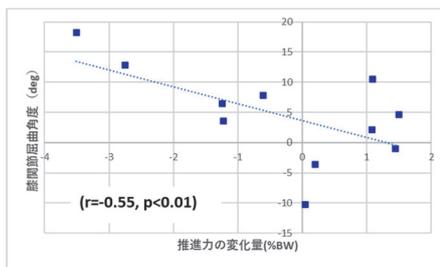


図6 Non-Responder 群における健側膝屈曲角度と患側歩行推進力の変化量の関係

た。各群の改善量は、それぞれ  $4.0 \pm 2.1\%BW$ 、 $-0.4 \pm 1.6\%BW$  であった。

Responder 群は歩行推進力と TLA の増加量に有意な相関関係 ( $r=0.673$ ,  $p=0.023$ )、Non-Responder 群は歩行推進力と底屈モーメントの増加量に有意な相関関係 ( $r=0.745$ ,  $p=0.008$ ) を認めた。

また、Non-Responder 群において、健側踵接地時の健側膝関節屈曲角度と麻痺側歩行推進力の変化量に有意な相関関係を認めた (図6) ( $r=-0.55$ ,  $p<0.01$ )。

## 5. 考察

群間で練習効果に違いがみられたことから、先行研究の報告通り、Responder と Non-Responder が存在することを示唆した。また、歩行推進力の向上について、Responder 群は

TLA の増加に依存していた。足関節底屈モーメントと TLA の増加は、歩行推進力の向上に寄与し、寄与率は TLA がその約 2 倍であると報告されている (Hsiao, et al. 2016)。Responder 群は足関節ロボットを用いて TLA を増加させることができ、歩行推進力が向上する。

Non-Responder 群において、踵接地時膝関節屈曲角度が大きい程、歩行推進力の変化量が小さいことがわかった。ヒトの歩行において、踵接地時に膝関節を伸展させて、ステップ長を確保することは歩行速度を向上させるために必須である。しかし、Non-Responder 群においては麻痺側で蹴り出しを行い、健側によるステップ長を伸ばすという過程において、健側膝関節を屈曲した状態で早期に接地し、患側を代償することを学習した結果、健側の Buckling knee pattern (BKP) を呈しているという可能性が示唆された。また、その評価項目として、健側踵接地時の膝関節屈曲角度を BKP マーカーとして、定義した (図7)。

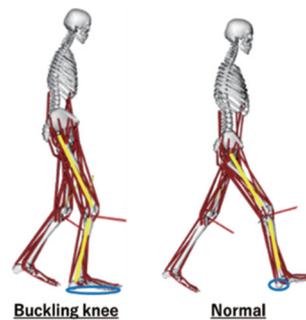


図7 Buckling knee パターンの歩行

## 第二研究：BKP マーカーを用いたロボット介入

### 1. 研究目的

第一研究で Non-Responder として抽出された対象者 1 名に、セラピストが BKP マーカーを低下させるための介入を行った後、再度ロボット歩行練習を行い得られる歩行の変化を、検証することとした。

### 2. 研究対象者

第一研究で Non-Responder と判断された 50 歳代女性の脳出血右麻痺患者一名とした (体重

51.2 kg)。対象者は疾患罹患後、16ヶ月時点であった。

### 3. 研究方法

第一研究で定義したBKP マーカーすなわち、健側踵接地時の膝関節角度について、伸展を促すよう口頭指示を与えながら、トレッドミル歩行練習を週2回以上、30分間を15回実施した。その後、第一研究と同様の方法にて、治療者が対象者に対して任意の歩行タイミングで足関節底屈および背屈のアシストが可能な空気圧人工筋肉付き足関節ロボットを用いたトレッドミル歩行練習を週2回以上、30分間を15回実施した。評価に関しても、セラピストによる歩行練習後とロボット歩行練習後に、第一研究と同様の方法にて三次元歩行解析を行った。

### 4. 研究結果

セラピストによる歩行練習後、健側踵接地時の膝関節角度は、25.10°から13.44°に減少した(図8)。

また、再度実施したロボット歩行練習後、最大歩行推進力が3.08 kgから4.74 kgまで増加した(図9)。この結果は、Campaniniら(2009)が報告したSRDの基準を上回っていた。

歩行の時間空間的因子は、表1のように変化

表1 ロボット前後の時間空間的因子

	歩行速度 (m/s)	歩行率 (steps/min)	右ステップ長 (m)	左ステップ長 (m)	右立脚時間 (%)	左立脚時間 (%)
Pre	0.64	128.40	0.32	0.27	0.61	0.64
Post	0.78	117.98	0.38	0.40	0.64	0.72

が認められた。

### 5. 考察

セラピストによる介入により、健側踵接地時の膝関節屈曲角度が減少した。すなわち、BKP マーカーを減少させることができた。それに伴い、ロボット歩行練習を再度実施した際に、健側ステップ長、麻痺側による歩行推進力増加に繋がったと考える。

足関節ロボットによる歩行練習は、患側足関節の底屈および背屈アシストに伴い、足関節の動きを学習させることができる。しかし患側において、立脚中期から終期の蹴り出しが行われている時期に、早期に健側下肢を接地すると身体重心を前方に推進することが困難となる。よって、健側による患側機能の代替が癖づいている場合、その効果を低下させ、Non-Responderになってしまう可能性がある。

本研究では、BKP マーカーを指標に、セラピストによる歩行練習を事前に行うことで、その後のロボット練習効果が増加した。これらより、健側踵接地時の膝関節角度はNon-Responderとなる要素の一つで、このようなロボット練習の効果を阻害し得る状態を改善するための事前準備を行うことで、Responderに変化させることが可能であることを示唆した。

### [今後の研究の方向, 課題]

本研究では、「麻痺脚の機能を健常脚が過剰に代替する歩行」が、正常な歩行を阻害しているという仮説に基づき本研究を行った。第一研究では、麻痺側立脚時の膝関節屈曲角度をBKP マーカーとして用いることができることを示した。また、第二研究では、実際にBKP マーカーをもとにセラピストが口頭指示にて健常脚の過剰な代替を抑制するための介入を行っ

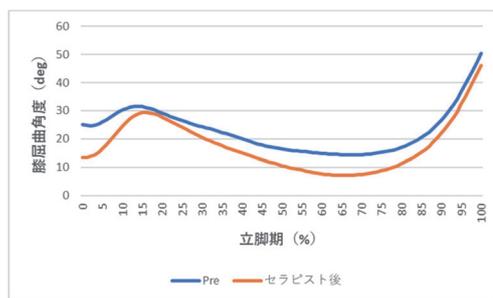


図8 セラピストによる歩行練習前後の立脚期膝関節角度

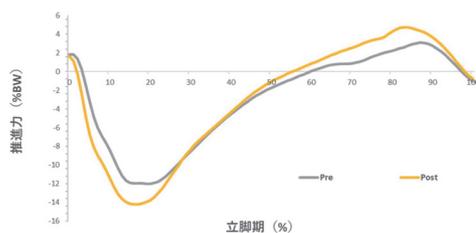


図9 ロボット練習前後の歩行推進力

たところ、より大きな歩行推進力の改善が認められた。

今後はさらに被験者を増やした上で、ロボット歩行練習開始前より評価可能な、ResponderとNon-Responderを見分けるマーカーの開発、治療アルゴリズムの構築が求められる。

[成果の発表, 論文等]

久保峰鳴, 森 拓也, 桑原嵩幸, 桑原嵩幸, 野田智之, 長谷公隆: ロボットおよびセラピストによる歩行練習が脳卒中片麻痺患者の歩行に与える影響 —— 1 症例による検討 ——, 第 58 回日本リハビリテーション医学会学術集会, 2021 年 6 月 10 日-13 日, 京都

久保峰鳴, 間野直人, 桑原嵩幸, 中條雄太, 森 公彦, 森 拓也, 寺前達也, 野田智之, 長谷公隆: 空気圧人工筋肉付き足関節ロボットを用いた歩行練習が片麻痺歩行に与える影響, 日本臨床神経生理学会第 52 回学術大会 2022 年 11 月 24 日-26 日, 京都