

Case Report

歩行練習支援ロボットに歩行神経筋電気刺激を併用して歩行能力が改善した脳梗塞後左片麻痺患者の1例

山口晃史,¹ 金沢 翼,¹ 平野 哲,² 青柳陽一郎³¹明石リハビリテーション病院リハビリテーション部²藤田医科大学医学部リハビリテーション医学Ⅰ講座³日本医科大学大学院医学研究科リハビリテーション学分野

要旨

Yamaguchi A, Kanazawa Y, Hirano S, Aoyagi Y. A Case with Left Hemiplegia after Cerebral Infarction with Improved Walking Ability Through Robot-assisted Gait Training Combined with Neuromuscular Electrical Stimulation for Foot Drop. *Jpn J Compr Rehabil Sci* 2024; 15: 88-93.

【背景】片麻痺患者に対する歩行訓練として、歩行練習支援ロボット、歩行神経筋電気刺激装置が有用であると報告されている。しかし、歩行練習支援ロボット、歩行神経筋電気刺激装置を併用した患者報告例は見当たらない。今回、左片麻痺を呈した歩行障害患者に歩行練習支援ロボットと歩行神経筋電気刺激装置を併用導入し、顕著な歩行能力の向上を認めた症例を経験したため報告する。

【症例】右中大脳動脈領域の脳梗塞を発症した60歳男性。発症57日目の評価では、SIAS 下肢運動項目全て0で、歩行不可。同日より歩行練習支援ロボットを用いた治療を開始した。66日目の評価でもSIAS 下肢項目は全て0で、振出時に左足部つまずきが頻回にみられたため、歩行練習支援ロボットを用いた歩行練習に歩行神経筋電気刺激装置併用による治療を開始した。88日目の評価では、SIAS 下肢運動項目全て1、短下肢装具、サイドケインにて、FIM 歩行項目が4に改善した。89日目より、機器を用いない従来介入に移行した。114日目の評価では、SIAS 下肢運動項目全て2、裸足、T字杖にて歩行が可能となった。

著者連絡先：青柳陽一郎

日本医科大学大学院医学研究科リハビリテーション学分野

〒113-8603 東京都文京区千駄木1-1-5

E-mail: yyy@rc5.so-net.ne.jp

2024年10月10日受理

利益相反：上記論文について一切の利益相反はありません。



This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial NoDerivatives International License.

©2024 Kaifukuki Rehabilitation Ward Association

【結論】歩行練習支援ロボットと歩行神経筋電気刺激装置を併用したことで、振り出し時の足関節背屈運動が促進され、介助量の少ない歩行練習を行うことができた。その結果、患者主体の能動的な歩行、効率的な運動学習が促されたことで、歩行獲得に至った可能性が考えられた。

キーワード：歩行練習支援ロボット、機能的電気刺激、運動学習

はじめに

Wandelらは脳卒中発症直後に麻痺側下肢が完全麻痺であった患者のうち、補助具を用いて自立歩行以上の歩行能力を獲得できた患者は21%と報告した[1]。歩行自立に至らない原因の1つとして足関節背屈の機能障害があげられる。片麻痺患者のリハビリテーション治療においては装具療法が一般的な代償手段であるが、近年は歩行支援装置などのロボットリハビリテーションや機能的電気刺激が選択肢になってきており[2]、ロボット支援型歩行訓練は有効であるという報告もある[3]。健常者に対して歩行練習支援ロボット、神経筋電気刺激装置を併用し使用した報告はあるが[4]、片麻痺患者に対して併用した報告は2つに留まる[5, 6]。いずれも慢性期片麻痺患者における報告であり、回復期患者での報告は見当たらず、検討すべき課題といえる。

今回報告する回復期リハビリテーション病棟に入院した脳梗塞後の重度左片麻痺患者は、歩行練習支援ロボットを用いたが足部クリアランスに介助を要した。そこで、歩行練習支援ロボット施行中に神経筋電気刺激装置を併用導入し介助量の少ない歩行練習を反復できた結果、顕著な歩行能力の向上を認め平地歩行の獲得に至った症例を経験したため、若干の考察を加えて報告する。

症例紹介

60歳男性

現病歴：電話中に構音障害、左片麻痺を認め救急搬送され、右中大脳動脈領域の脳梗塞と診断され保存的に加療された。発症9日目の頭部MRI (T2強調画像)

では右中大脳動脈領域に高輝度領域を認めた (図1).
既往歴：高血圧

発症47日後に回復期リハビリテーション目的で当院に転院した。転院時GCSはE4V4M6でHDS-Rは12/30点。高次脳機能障害として、注意障害や失語症を認めた。Functional Independence Measure (FIM)は総計39点(運動項目26点, 認知項目13点)であった。FIMの歩行項目は1点であった。発症57日後より歩行練習支援ロボットを用いた治療を開始した。

1. 今回使用したロボット

今回使用したウェルウォーク WW-1000[®] (トヨタ自動車株式会社, 愛知, 以下, 歩行練習支援ロボット) は脳卒中などによる下肢片麻痺患者の歩行リハビリテーション支援を目的としたロボットである。麻痺側下肢にロボット脚を装着し, 患者の能力に合わせた難易度でアシストレベルを調整しながらトレッドミル上での歩行練習を行う。アシストには, 麻痺側立脚期に膝伸展アシスト, 麻痺側遊脚期に下肢振り出しアシストがある。さらに, ビデオモニターでリアルタイムな歩行映像の確認や, 麻痺側下肢荷重量を音声で確認しながら歩行練習を実施することが可能である。そのため, 良好な歩容での運動学習を促すことができる [7] (図2a)。ウォークエイド[®] (帝人ファーマ株式会社, 東京, 以下, 神経筋電気刺激装置) は歩行周期に合わせて麻痺側立脚後期に腓骨神経を電気刺激することで歩行中の足関節背屈を補助することができる [8, 9] (図2b)。

2. 評価および経過

発症57日時, Stroke Impairment Assessment Set (SIAS) 下肢運動項目全て0, 下肢感覚3, 下肢位置覚3, 体幹機能は垂直性2, 腹筋1。平地歩行では長下肢装具, サイドケインを使用し, 左立脚期の体幹前傾, 骨盤後退, 左遊脚期の左下肢振り出し困難を認めるため, 理学療法士による最大介助が必要な状態であった (図3)。左下肢支持性向上と振り出し能力の向上を主な目的として, 同日より歩行練習支援ロボットを用いた治療を開始した。歩行練習支援ロボットを用いた治療は毎日, 1日当たり約40分間実施した。ロボット脚の足関節背屈角度は, 4~8度遊動の設定とした。歩行練習支援ロボット上の歩行において振出時に左足部つまずきが頻回にみられたため, 足部クリアランス確保のために理学療法士によるロボット脚引き上げを必要とした (図4a)。一般的には左足部のクリアランス向上を目的として, ロボット脚の足関節背屈角度の調整や非麻痺側の補高を用いる場合がある。しかし, 底屈制限を背屈方向に変更することは, 立脚期において下腿を前方に傾け, 立脚期の安定性 (stability) を阻害する可能性がある。また, 非麻痺側補高が過剰となれば, 麻痺側の initial contact において墜落を引き起こし, これも立脚を不安定にさせる可能性がある。このような立脚期の運動学習を阻害する設定をせずに, 振り出しの介助量を軽減させる目的で, 発症66日後から歩行練習支援ロボットを用いた歩行練習において神経筋電気刺激装置併用による治療を開始した。刺激方法はハンドスイッチを用いて, 左下肢振出時に刺激した

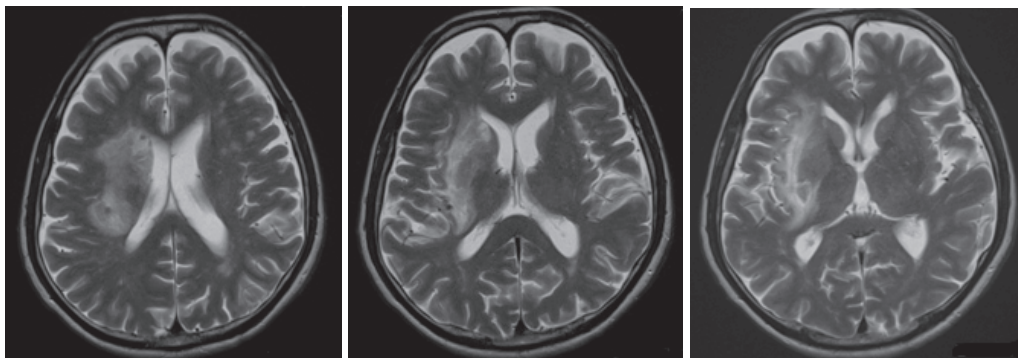


図1. 発症9日後の頭部MRI (T2強調画像)
右中大脳動脈領域に高信号領域がみられた。

a. 歩行練習支援ロボット
(Welwalk WW-1000[®])



※(株)トヨタ自動車
ホームページより

b. 歩行神経筋電気刺激装置
(WalkAid[®])



※(株)帝人ヘルスケアより提供

図2. 今回使用した歩行練習支援ロボットと歩行神経筋電気刺激装置

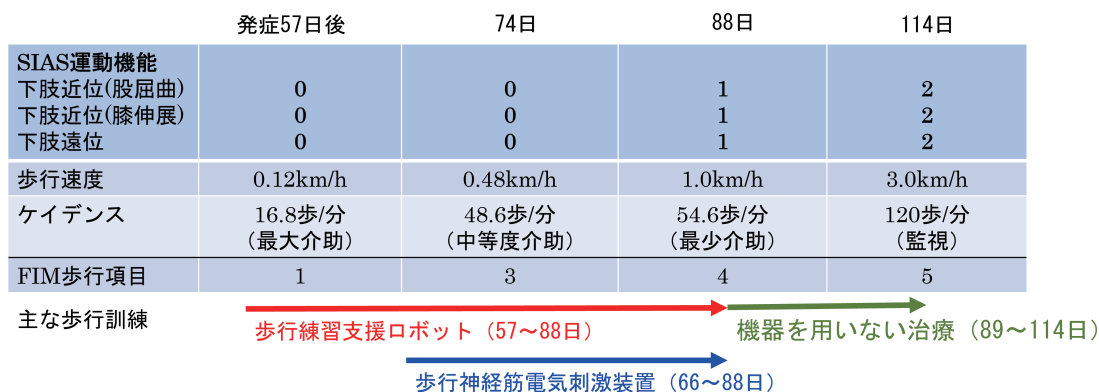


図3. Stroke Impairment Assessment Set (SIAS) 下肢運動項目, 歩行パラメーターの変化と歩行訓練内容

FIM: Functional Independence Measure

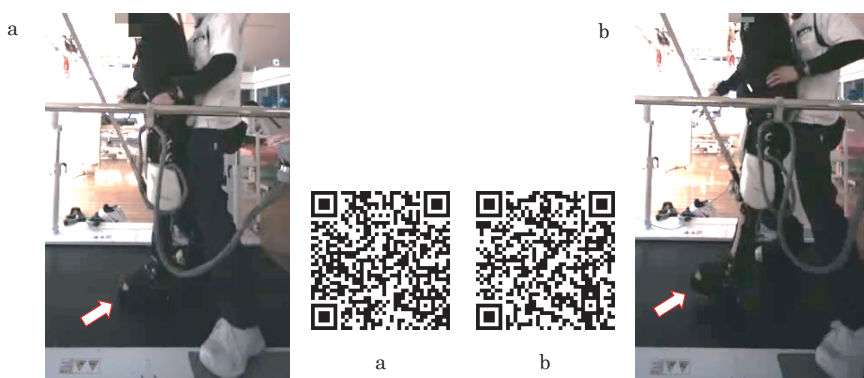


図4. 歩行練習支援ロボットを使用した歩行訓練. 発症66日後に同条件下(歩行速度0.60 km/h, 膝伸展アシスト8, 振り出しアシスト5)で撮影. 動画は下記QRコードを参照. 動画中の矢印は左(麻痺)側の足部を表す. a. 歩行練習支援ロボットのみ使用. 左下肢振り出し介助を必要とした. b. 歩行神経筋電気刺激を併用. 電気刺激使用時は麻痺側遊脚期に足関節背屈が出現し, 左下肢の振り出し介助は不要であった.

(図4b). 神経筋電気刺激装置併用によって左下肢振出時に足関節背屈運動が誘発され, 遊脚期でのクリアランス向上が得られたことで, 左足部のつまずき改善を認めた. その結果, ロボット脚引き上げによる左下肢の振り出し介助の必要がなくなり, 遊脚期では骨盤での重心移動介助のみで歩行が可能となった.

発症74日時, SIAS 下肢運動項目は発症57日時と変化なし, 下肢感覚3, 下肢位置覚3, 体幹機能は, 垂直性2, 腹筋1. 平地歩行では短下肢装具, サイドケイン使用で立脚期の体幹・骨盤の安定性が向上し膝折れが改善し, 介助量の軽減を認めた. また, 振り出しの介助量の軽減もみられた. 歩行練習支援ロボット, 神経筋電気刺激装置の併用を主体としながら, 機器を用いない平地歩行練習も行った. 歩行練習支援ロボットを用いた治療の頻度は2日に1回に減少させた. 発症88日後の評価では, SIAS 下肢運動項目全て1, 体幹機能は垂直性3, 腹筋2に改善した. 平地歩行では短下肢装具, サイドケインにて体幹・骨盤の安定性向上, 膝折れ改善, 左下肢の振り出し可能となり最小介助レベルでの歩行が可能となった. 歩行練習支援ロボット上の歩行では左立脚期において体幹・骨盤の安定性が向上, 左遊脚期つまずき改善を認め, 骨盤介

助下での最少介助が可能になった. 歩行練習支援ロボットによるアシスト機能は, 伸展アシストは6, 振り出しアシストは3へと歩行練習支援ロボットを用いた治療開始時と比較しアシスト量は減少した. 当院の歩行練習支援ロボットを用いた治療の終了基準の目安として, 「アシスト機能が伸展・振り出しアシスト最少下での監視歩行獲得」と設定しているが, 平地歩行能力の向上とともに「平地で歩きたい」という本人の強い希望があり, この段階で歩行練習支援ロボットを用いた治療を終了した.

3. 最終評価

ウェルウォーク終了4週後(発症114日目)の評価では, SIAS 下肢運動項目全て2, 下肢感覚3, 下肢位置覚3, 体幹機能は垂直性3, 腹筋3となった. 平地歩行では裸足, T字杖にて3.0 km/hでの監視歩行が可能となった. FIMは総計73点(運動項目50点, 認知項目23点)に, 歩行項目は5点に改善した.

考察

本症例は, 平地歩行において著しく体幹・骨盤の固

定性低下，左下肢の支持性低下を認めていた．このような症例に対して歩行練習を実施する際に，長下肢装具が適応となることがあるが，長下肢装具装着下での歩行練習では遊脚期での膝関節屈曲運動が困難である．歩行練習支援ロボットを用いると，振り出しアシストにより膝関節屈曲運動が可能で，早期より過剰な代償動作のない歩容での歩行練習を反復して行うことが可能である [10]．本症例もそのようなメリットを活かすために歩行練習支援ロボットを用いた治療を行ったが，振り出し時につまづきが生じることで，理学療法士による振り出し介助が必要な状態であった．歩行練習支援ロボットは麻痺側下肢の膝関節屈曲アシスト機能，振り出しアシスト機能は有するが，足関節背屈を促す機能は備わっていない．

これまでに，慢性期片麻痺患者に対して歩行訓練装置 (Lokomat) と神経筋電気刺激装置を併用したランダム化比較試験 [11] があり，併用群で歩行パラメータの改善がみられた．また，ロボット補助歩行トレーニング (RAGT) と電気ミオグラムトリガー足関節ロボットトレーニング 医療用単関節 HAL[®] (HAL-SJ, HAL-MS01) を併用し臨床応用した慢性期の症例報告がある [6]．しかし回復期患者に対して歩行練習支援ロボットと神経筋電気刺激装置を併用し臨床応用した報告例は見当たらない．本症例では，歩行練習支援ロボット上の歩行練習において神経筋電気刺激装置を併用したことで，振り出し時の足関節背屈を惹起し，介助量の少ない歩行練習を行うことができた．その結果，歩行練習支援ロボット上の歩行において，より過剰な代償動作，介助量の少ない歩容での歩行練習を行うことができた．過去の研究において総腓骨神経を電気刺激すると，皮質の運動誘発電位が持続的に促進されるという報告がある [12]．本症例においても，SIAS の下肢運動項目は神経筋電気刺激併用後に改善がみられ，発症 88 日後の評価では I に向上した．

歩行練習支援ロボットのみでは，遊脚期に足関節背屈を直接誘発できない．歩行練習支援ロボットの機能を用いて麻痺側遊脚期のクリアランスの確保を図るためには，足関節角度を背屈位固定とする，または非麻痺側補高を高くするなどの対策が考えられるが，これらの対策は立脚期の不安定性をもたらす可能性がある．そのため，今回はそのような立脚期に不利益を生じる設定変更は行わず，電気刺激を用いることで足関節背屈を促通した結果，足関節背屈機能改善に繋がった可能性がある [9]．さらに，電気刺激によってクリアランスを確保することで，より良好な歩容で練習できた可能性がある．これにより，歩行練習支援ロボット上での介助量が減少し，平地歩行への汎化を認め発症 4ヶ月以内に監視歩行獲得が得られたと考えられる．

本症例は歩行練習支援ロボットを用いた治療期間 33 日間 (歩行練習支援ロボットのみ 11 日間，歩行神経筋電気刺激装置併用 22 日間) で FIM 歩行項目が 3 点，SIAS 下肢合計が 3 点改善した．一方，2023 年 1 月から 2023 年 12 月に当院回復期リハビリテーション病棟に入院し，歩行神経筋電気刺激装置を併用せず歩行練習支援ロボットのみを使用した脳卒中患者 13 例 (平均使用期間 63.9 日) では，FIM 歩行項目改善の平均値が 0.7 点，SIAS 下肢合計改善の平均値が 0.7 点であった (未発表データ)．このことから，

歩行練習支援ロボットに歩行神経筋電気刺激装置を併用したことが，下肢運動機能，歩行機能の改善に大きく影響したと考える．

もし同じような足関節運動を伴う歩行練習をロボットで実現しようとする，足関節部分にモーターを追加して，足関節を制御するという方法が考えられる．しかし，その場合はロボット脚の質量・重量が増加し，麻痺側の振り出しや，接地位置のコントロールが難しくなる可能性がある．立脚期に確実に膝折れを予防するために膝関節制御はモーターで行い，足関節背屈については電気刺激を組み合わせるという方法は，全てモーター制御で行うよりも合理的と考えられ，本症例はその可能性を示した．

まとめ

歩行練習支援ロボットの歩行訓練に神経筋電気刺激装置を併用したことで，介助量の軽減が可能となり，患者主体の運動学習を促すことができた．そのため，神経筋電気刺激装置は歩行練習支援ロボット治療を有効に活用する 1 つの補助ツールとなるのではないかと考える．しかし，今回は，症例報告で比較対象がなく，治療効果が自然回復の影響であるかの検討はできていない．今後ロボット機器の効果について症例を重ねて検証していきたい．

文献

1. Wandel A, Jørgensen HS, Nakayama H, Raaschou HO, Olsen TS. Prediction of walking function in stroke patients with initial lower extremity paralysis: the Copenhagen Stroke Study. *Arch Phys Med Rehabil* 2000; 81(6): 736–8.
2. Japan Stroke Society Guidelines for the Treatment of Stroke. Japan Stroke Society Guideline 2021 for the Treatment of Stroke [Revised version 2023]. Tokyo, Kyowakikaku (in Japanese)
3. Mehrholz J, Thomas S, Kugler J, Pohl M, Elsner B. Electromechanical-assisted training for walking after stroke. *Cochrane Database Syst Rev* 2020; 10(10): CD006185.
4. Kimura R, Matsunaga T, Iwami T, Kudo D, Saitoh K, Hatakeyama K, et al. Development of a Rehabilitation Robot Combined with Functional Electrical Stimulation Controlled by Non-disabled Lower Extremity in Hemiplegic Gait. *Prog Rehabil Med* 2018; 3: 20180005.
5. Bae YH, Ko YJ, Chang WH, Lee JH, Lee KB, Park YJ, et al. Effects of Robot-assisted Gait Training Combined with Functional Electrical Stimulation on Recovery of Locomotor Mobility in Chronic Stroke Patients: A Randomized Controlled Trial. *J Phys Ther Sci* 2014; 26(12): 1949–53.
6. Kamimoto T, Hosoi Y, Tanamachi K, Yamamoto R, Yamada Y, Teramae T, et al. Combined Ankle Robot Training and Robot-assisted Gait Training Improved the Gait Pattern of a Patient with Chronic Traumatic Brain Injury. *Prog Rehabil Med* 2023; 8: 20230024.
7. Ii T, Hirano S, Tanabe S, Saitoh E, Yamada J, Mukaino M, Watanabe M, et al. Robot-assisted Gait Training Using Welwalk in Hemiparetic Stroke Patients: An Effectiveness

- Study with Matched Control. *J Stroke Cerebrovasc Dis* 2020; 29(12): 105377.
8. Dai R, Stein RB, Andrews BJ, James KB, Wieler M. Application of tilt sensors in functional electrical stimulation. *IEEE Trans Rehabil Eng* 1996; 4(2): 63–72.
 9. Stein RB, Chong S, Everaert DG, Rolf R, Thompson AK, Whittaker M, et al. A multicenter trial of a footdrop stimulator controlled by a tilt sensor. *Neurorehabil Neural Repair* 2006; 20(3): 371–9.
 10. Katoh D, Tanikawa H, Hirano S, Mukaino M, Yamada J, Sasaki S, et al. The effect of using Gait Exercise Assist Robot (GEAR) on gait pattern in stroke patients: a cross-sectional pilot study. *Top Stroke Rehabil* 2020; 27(2): 103–9.
 11. Bae YH, Ko YJ, Chang WH, Lee JH, Lee KB, Park YJ, et al. Effects of Robot-assisted Gait Training Combined with Functional Electrical Stimulation on Recovery of Locomotor Mobility in Chronic Stroke Patients: A Randomized Controlled Trial. *J Phys Ther Sci* 2014; 26(12): 1949–53.
 12. Knash ME, Kido A, Gorassini M, Chan KM, Stein RB. Electrical stimulation of the human common peroneal nerve elicits lasting facilitation of cortical motor-evoked potentials. *Exp Brain Res* 2003; 153(3): 366–77.