

慢性期の脳卒中片麻痺者に対して ロボットスーツ HAL を用いた歩行練習を実施した一症例

山口 和輝¹⁾, 中俣 孝昭¹⁾, 齋藤 恒一¹⁾, 畠中 泰彦^{1), 2)}

1) 鈴鹿医療科学大学 保健衛生学部 理学療法学科

2) 鈴鹿医療科学大学 大学院 医療科学研究科

研究報告

慢性期の脳卒中片麻痺者に対して ロボットスーツ HAL を用いた歩行練習を実施した一症例

山口 和輝¹⁾, 中俣 孝昭¹⁾, 齋藤 恒一¹⁾, 畠中 泰彦^{1), 2)}

1) 鈴鹿医療科学大学 保健衛生学部 理学療法学科

2) 鈴鹿医療科学大学 大学院 医療科学研究科

キーワード： ロボットスーツ HAL, 片麻痺, 歩行練習, 運動学解析, 運動力学解析

要 旨

目的) 本研究の目的は、慢性期の片麻痺者に対する、HAL を用いた歩行練習の効果を検証することである。

方法) 対象は、66 歳男性の慢性期脳卒中片麻痺者（下肢 Brunnstrom recovery stage III, 発症後 8 年経過）とした。HAL を用いた 1000 歩の歩行練習を実施し、練習前後の裸足歩行を計測した。HAL を用いた歩行練習は、荷重応答期における股関節伸展をアシストして実施した。計測には、3 次元動作解析装置（VICON612）と床反力計（OR-6-6）を用いた。計測項目は、ストライド長、ステップ長、歩行速度、麻痺側の股関節、膝関節、足関節の関節角度及び関節モーメントとした。

結果) 荷重応答期における股関節伸展モーメントが増加した。さらに、立脚終期における股関節伸展角度及び足関節底屈モーメントが増加した。遊脚初期における股関節屈曲モーメントが減少した。

結語) HAL を用いた 1000 歩の歩行練習は本研究の対象に効果を認めた。

1. はじめに

近年、脳卒中片麻痺者（以下、片麻痺者）に対するリハビリテーションデバイスとして、練習支援型ロボットが研究、開発されている。練習支援型ロボットとは、対象者本人がリハビリテーションに取り組む際に、効果の高い練習を提供することにより、対象者の機能改善を狙ったロボットである¹⁾。特に、歩行練習に練習支援型ロボットを活用したロボット支援歩行練習（Robotic Assist Gait Training：以下、RAGT）が注目されている。しかし、片麻痺者に対して、RAGTが従来の歩行練習より練習効果を認めるか明らかとはなっていない。Hidlerら²⁾は、ロボットのアシストが過剰であると、学習者の意識水準が低下するため、従来の歩行練習より練習効果が少なくなると推測した。また、Reinkensmeyerら³⁾は、ロボットにより運動の全てをアシストする事は、効果的ではないことを示した。これらの知見から、ロボットを用いてアシストすることは、練習したい運動が他動的になるため、対象者の機能向上につながらない可能性が示唆される。

すでに国内で運用が開始されている歩行練習を支援する練習支援型ロボットに、ロボットスーツ HAL[®] 福祉用（以下、HAL）がある⁴⁾。HALは Hybrid Assistive Limb[®]の略で、筑波大学の山海らによって開発された装着型パ

ワーアシスト外骨格ロボットである（図1）。HALの制御には、二つの方法が用いられている。一つは、装着者の皮膚表面に貼付した電極から、随意運動時に発生する生体電位信号を検知し、動作意思と連動したアシストを行う「サイバニック随意制御」である。もう一つは、HALに内蔵された角度センサ、足底荷重センサなどから得られた装着者の関節角度、姿勢、体重移動の情報を用いて、推定した立ち上がりや歩行を自律的に制御する「サイバニック自律制御」である^{4,5)}。特に、前者の制御方法により、装着者の随意制御が可能であることが、HAL最大の特徴である。HALは、装着者の随意制御とロボットによる自律制御が可能であるため、片麻痺者のRAGTにおいて、有効なデバイスであると考えられる。そこで、本研究では、慢性期の片麻痺者に対して、HALを用いた歩行練習を実施し、練習効果を運動学、運動力学的に検証する。

2. 方法

2.1 対象

対象は、著明な高次脳機能障害を認めず、自立歩行が可能な慢性期の片麻痺者（66歳、男性、右片麻痺、発症後8年経過、下肢Brunnstrom recovery stage III）1

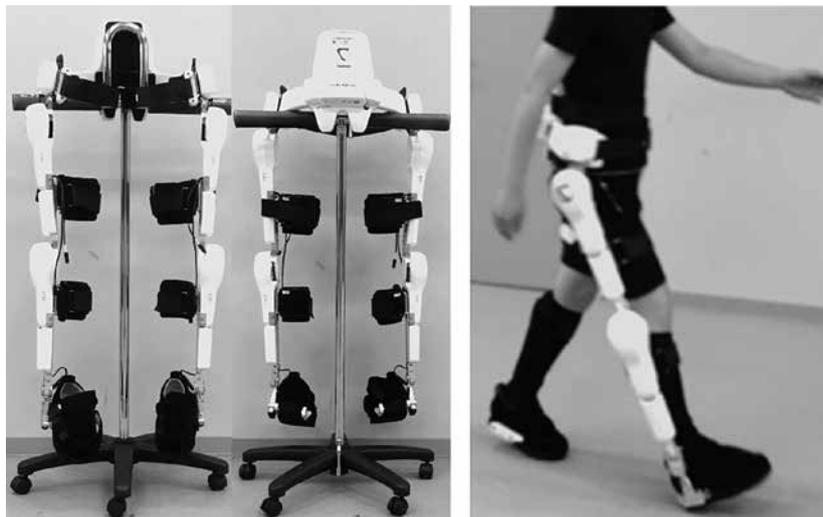


図1 ロボットスーツ HAL 福祉用（前面、後面）（左）ロボットスーツ HAL 福祉用装着時（右）

例とした。対象には、主治医の許可の下、事前に研究の目的及び実験方法を十分に説明し、書面にて同意を得た。なお、本研究は鈴鹿医療科学大学臨床試験倫理審査委員会の承認（受付番号 177）を受け実施した。

2.2 対象の歩容

対象の歩容は、荷重応答期における麻痺側股関節に過度な屈曲がみられた。また、立脚終期に麻痺側股関節の伸展が見られず、麻痺側から非麻痺側へのステップ長は減少していた。さらに、遊脚期の下肢の振り出しは、非麻痺側の股関節伸展、骨盤後傾により代償していた。

2.3 HAL のセットアップ

HAL は、股関節、膝関節の屈曲、伸展をアシストする。アシストは、股関節、膝関節それぞれ個別に設定することが可能である。本研究では、対象の歩容から、荷重応答期における麻痺側股関節の過度な屈曲を改善することを目的に、荷重応答期における股関節伸展をアシストした。

生体電位信号を検知するための電極は、股関節伸展筋の電極を大殿筋、股関節屈曲筋電極を大腿直筋、基準電極を上前腸骨棘に貼付した（図 2）。

2.4 練習回数

Lang ら⁶⁾ は、片麻痺者の機能回復にとって繰り返し練習することが重要であるにも関わらず、実際にリハビリテーションで実施されている動作練習の回数が、動物やヒトを対象とした基礎研究の練習回数と比較して少ないことを報告した。そこで、本研究では、Yin ら⁷⁾ によるサルのプリズム効果に関する実験を根拠に、片脚 500 歩、両脚 1000 歩の歩行練習を実施した。

2.5 実験手順

はじめに、HAL を用いた歩行練習前の裸足歩行を計

測した。続いて、HAL を用いた 1000 歩の歩行練習を実施した。最後に、練習直後の裸足歩行を計測した。計測時の歩行速度は至適速度とした（図 3）。

2.6 計測及び解析環境

対象の身体標点に赤外線反射マーカを貼付し、三次元動作解析装置 VICON612（VICON 社）と 10 台の赤外線カメラを用いて、裸足歩行時の身体標点の空間座標データを計測した。さらに、床反力計 OR6-6（AMTI 社）を用いて、床反力データを計測した。身体標点は、両側の肩峰、大転子、膝関節裂隙、外果、第 5 中足骨骨頭の計 10ヶ所とした。サンプリング周波数は 120Hz とした。身体標点の空間座標データ及び床反力データを剛体リンクモデルに生体力学定数とともに代入し、逆動力学解析手法を用いて、麻痺側股関節、膝関節、足関節の関節角度及び関節モーメントを算出した。また、ストライド長、ステップ長、歩行速度を算出した（図 4）。なお、計測したデータは、VICON 上で Date Interface Format

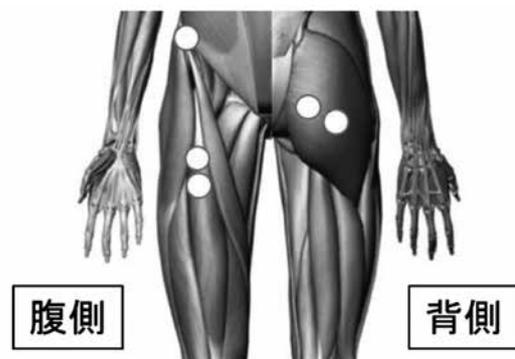


図 2 電極貼付位置
屈曲側：大腿直筋 伸張側：大殿筋
基準電極：上前腸骨棘

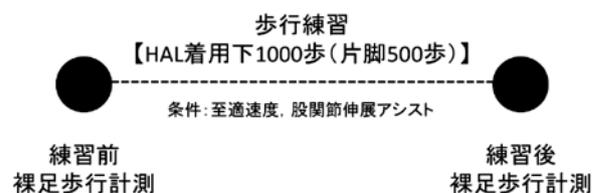


図 3 実験手順

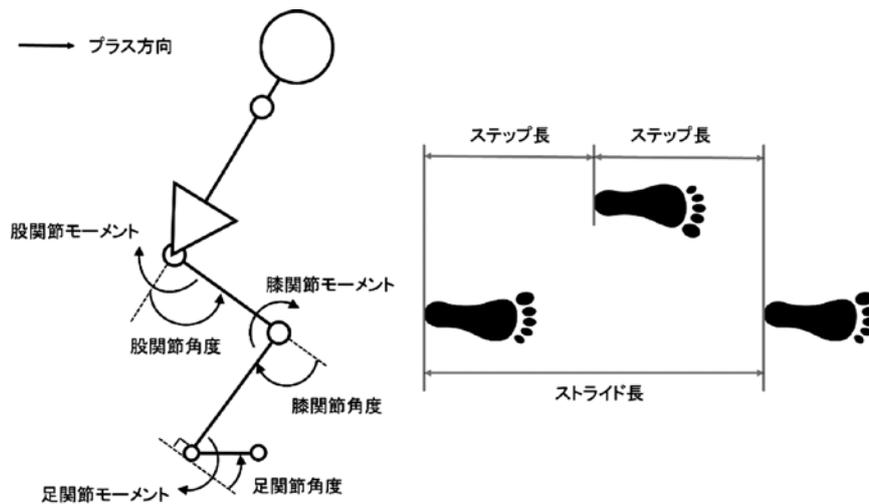


図4 関節角度，関節モーメント，ストライド長，ステップ長の定義

File（以下，DIFF）形式に変換し，DIFF GAIT ソフトウェア（臨床歩行分析研究会）を用いて計算した。

3. 結 果

本研究において，HAL を用いた歩行練習による有害事象は認めなかった。図5に練習前，練習後の1歩行周期における股関節，膝関節，足関節の関節角度及び関節モーメントの変化を示す。練習前に比較し，荷重応答期における股関節伸展モーメントは $23.9[\text{N} \cdot \text{m}]$ から $31.9[\text{N} \cdot \text{m}]$ に増加，股関節屈曲角度は $29[\text{deg}]$ から $25[\text{deg}]$ に減少，立脚終期における股関節伸展角度は $0.8[\text{deg}]$ から $9.8[\text{deg}]$ に増加，足関節底屈モーメントは $43.6[\text{N} \cdot \text{m}]$ から $71.7[\text{N} \cdot \text{m}]$ に増加，遊脚初期における股関節屈曲モーメントは $22.6[\text{N} \cdot \text{m}]$ から $12.2[\text{N} \cdot \text{m}]$ に減少した。表1に練習前，練習後のストライド長，ステ

ップ長，歩行速度の変化を示す。ストライド長は $0.71[\text{m}]$ から $0.75[\text{m}]$ に増加，麻痺側から非麻痺側へのステップ長は $0.21[\text{m}]$ から $0.34[\text{m}]$ に増加，非麻痺側から麻痺側へのステップ長は $0.50[\text{m}]$ から $0.41[\text{m}]$ に減少，歩行速度は $33.5[\text{m}/\text{min}]$ から $35.9[\text{m}/\text{min}]$ に増加した。

4. 考 察

本研究では，HAL を用いて荷重応答期における股関節伸展をアシストした1000歩の歩行練習を実施した。練習の結果，アシストした荷重応答期における股関節伸展モーメントの増加及び股関節屈曲角度の減少を認めた。

トレーニングの初期段階における筋出力の増大は，収縮時に動員される運動単位数が増加すること，運動単位の発火頻度が上昇することで生じる⁸⁾。HAL を用いて荷重応答期における股関節伸展をアシストした歩行を反復

表1 練習前，練習後におけるステップ長，ストライド長，歩行速度の変化

| | ステップ長(m) | | ストライド長(m) | 歩行速度(m/min) |
|-----|----------|-------|-----------|-------------|
| | 麻痺側 | 非麻痺側 | | |
| 練習前 | 0.5 | 0.212 | 0.712 | 33.5 |
| 練習後 | 0.412 | 0.34 | 0.752 | 35.9 |

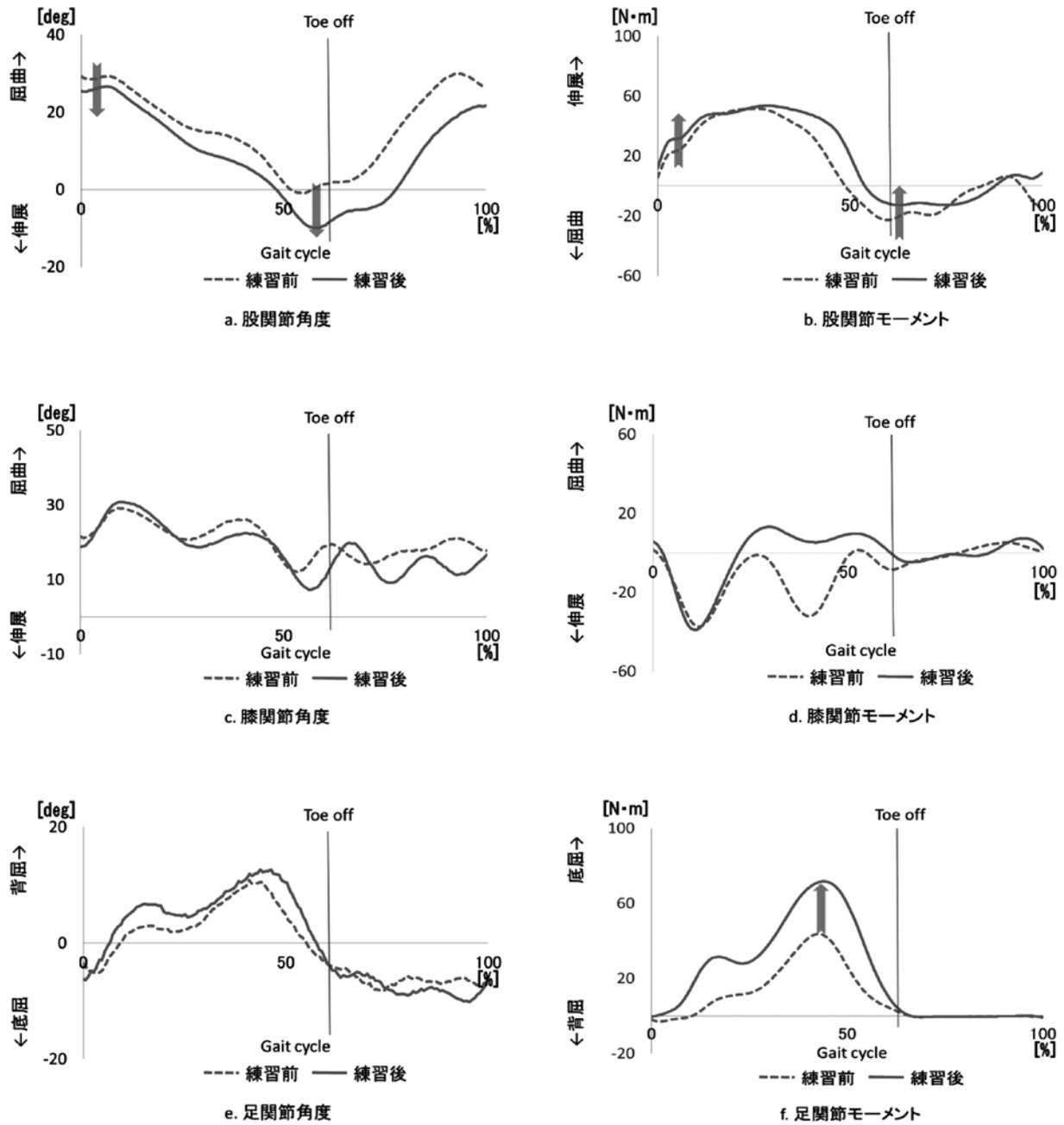


図5 1歩行周期における麻痺側股関節、膝関節、足関節の関節角度及び関節モーメントの変化

- a. 荷重応答期における股関節屈曲角度の減少，立脚終期における股関節伸展角度の増加を示した
- b. 荷重応答期における股関節伸展モーメントの増加，立脚終期における股関節屈曲モーメントの減少を示した
- f. 立脚終期における足関節底屈モーメントの増加を示した

したことで、股関節伸展筋に神経適応が生じたと考える。その結果、股関節伸展筋の筋出力が増大し、荷重応答期における股関節伸展モーメントが増加したと考えた。また、荷重応答期における股関節伸展筋の筋活動は、立脚期の股関節を安定させ、体幹直立を保持する⁹⁾。股関

節伸展筋の筋出力が増大したことで、荷重応答期における体幹直立が保持され、股関節屈曲角度が減少したと考えた(図6)。

さらに、本研究では、アシストしていない立脚終期における股関節伸展角度及び足関節底屈モーメントの増加、

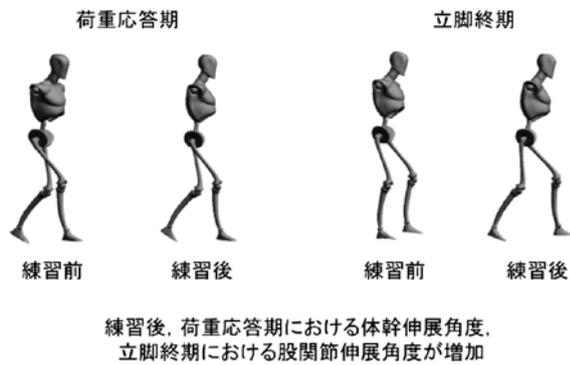


図6 HALによる歩行練習前後のアライメント

遊脚初期における股関節屈曲モーメントの減少を認めた。

正常歩行において、立脚終期における股関節伸展に股関節伸展筋の直接的な制御は必要ではない⁹⁾。立脚終期における股関節伸展は、荷重応答期に体幹直立が保持されることで立脚中期に重心が前上方へ上昇し、上昇した重心が落下する際に生じる力を推進力に変換することで、受動的に制御されている^{10,11)}。本研究では、荷重応答期における股関節伸展筋の筋出力が増大し体幹直立が保持されたことで、受動的な制御による立脚終期の股関節伸展が可能となり、股関節伸展角度が増加したと考えた(図6)。また、正常歩行において、立脚終期における足関節底屈筋は、下肢が前方移動する際に生じる足関節背屈モーメントに拮抗する⁹⁾。本研究の対象は、HALを用いた歩行練習前、立脚終期における股関節伸展がみられなかった。そのため、足関節底屈筋への筋活動の需要は少なかったと考える。しかし、HALを用いた歩行練習により、立脚終期における股関節伸展角度が増加した。そのため、下肢が前方移動する際に生じる足関節背屈モーメントも増大し、増大した足関節背屈モーメントに拮抗するため、立脚終期における足関節底屈モーメントが増加したと考える。このことから、本研究の対象は、足関節底屈筋の筋力は保持されていたにもかかわらず、立脚終期における股関節伸展がみられなかったため、足関節底屈モーメントが減少していたと考えた。

正常歩行において、遊脚期の下肢の振り出しは、慣性力を用いることで受動的に制御される^{9,11)}。本研究では、

HALを用いた歩行練習により、立脚終期における股関節伸展角度及び足関節底屈モーメントが増加したことで、慣性力による受動的な制御が可能となり、下肢の振り出しに対する股関節屈曲筋の筋活動が減少したため、股関節屈曲モーメントが減少したと考えた。

また、本研究の対象は、発症から8年が経過した陳旧例であった。Sterrら¹²⁾は、点字読者では、点字を読む際に使用する指を支配する運動皮質の体部位再現領域が拡大することを示した。これは、身体の特定の部位を使用して運動学習を行うほど、使用した部位を支配する脳の領域が拡大する使用頻度に依存した可塑性(Use Dependent Plasticity 以下、UDP)を有していることを示している。また、Nudoら¹³⁾は、実験的に脳梗塞を起こしたサル損傷脳において、運動療法がUDPを促進することを示した。これらの知見は、片麻痺者のリハビリテーションにおいて、麻痺側を繰り返し使用することが、機能向上を促進する可能性を示唆している。本研究では、HALを用いた歩行練習を1000歩実施した。片麻痺者にとって、アシストなしで1000歩の歩行練習を実施することは困難である。本研究の結果は、HALを用いて歩行練習を実施することで、麻痺側を繰り返し使用することが可能となり、慢性期の片麻痺者であっても機能向上が見込める可能性を示唆していると考ええる。

5. おわりに

HALを用いて荷重応答期における股関節伸展をアシストした1000歩の歩行練習を実施した。練習の結果、アシストした荷重応答期の股関節のみではなく、直接アシストをしていない立脚終期の股関節及び足関節、遊脚期の股関節にまで練習効果を認めた。また、本研究では、発症から8年が経過した陳旧例であっても、練習効果を認めた。本研究の結果は、HALを用いた歩行練習は、慢性期片麻痺者に対する歩行練習のデバイスとして有効である可能性を示唆していると考ええる。

6. 参考文献

- 1) 平野 哲, 田辺 茂雄, 才藤 栄一, 他: 脳卒中のロボティクスリハビリテーション①. 脳と循環, 19, 37-42, 2014.
- 2) Hidler J, Nichols D, Pelliccio M, et al : Multicenter randomized clinical trial evaluating the effectiveness of the Lokomat in subacute stroke. *Neurorehabil Neural Repair* 23, 5-13, 2009.
- 3) Reinkensmeyer DJ, Emken JL, Cramer SC :Robotics, motor learning, and neurologic recovery. *Annu Rev Biomed Eng* 6, 497-525, 2004.
- 4) 山海嘉之, 桜井尊: サイバニクスを駆使した HAL(Hybrid Assistive Limbs) 最前線 1. 分子脳血管病, 11, 261-270, 2012.
- 5) 鍋島厚太, 新宮正弘, 河本浩明, 他: 装着型歩行補助ロボットのリスク管理方法. 日本ロボット学会誌, 32, 380-385, 2014.
- 6) Catherine E. Lang, Jillian R. MacDonald, Darcy S. Reisman, et al : Observation of amounts of movement practice provided during stroke rehabilitation. *Arch Phys Med Rehabil* 90, 1692-1698, 2009.
- 7) Yin PB, Kitazawa S : Long-lasting aftereffects of prism adaptation in the monkey. *Exp Brain Res* 141, 250-253, 2001.
- 8) Earle RW, Baechle TR : パーソナルトレーナーのための基礎知識. 森永製菓株式会社, 東京, 57-62,2007.
- 9) Götz-Neumann K : 観察による歩行分析 (第1版). 医学書院, 東京, 39-76, 2005.
- 10) 山本 澄子: 脳血管障害の歩行分析. 理学療法科学, 17, 3-10,2001.
- 11) Perry J, Burnfield JM : 歩行分析—正常歩行と異常歩行— (原著第2版). 医歯薬出版株式会社, 東京, 77-82,2012.
- 12) Sterr A, Müller MM, Elbert T, et al : Changed perceptions in Braille readers. *Nature* 391, 134-135, 1998.
- 13) Nudo RJ, Wise BM, SiFuentes F, et al : Neural substrates for the effects of rehabilitative training on motor recovery after ischemic infarct. *Science* 272, 1791-1794, 1996.

Gait exercise using HAL to chronic phase hemiplegic patient

A case report

Kazuki YAMAGUCHI¹⁾, Takaaki NAKAMATA¹⁾,
Koichi SAITO¹⁾, Yasuhiko HATANAKA^{1), 2)}

1) Department of Physical Therapy, Faculty of Health Science, Suzuka University of Medical Science

2) Graduate School of Medical Science, Suzuka University of Medical Science

Key words: robot suit HAL, hemiplegia, gait exercise, kinematics, kinetics

Abstract

Purpose)

The aim of this study was to determine whether there is an effect in chronic phase hemiplegic patient after gait exercise of using HAL.

Method)

The subject was a 66-year-old male with hemiplegia (Br. stage of lower limb:III, 8 years from the onset). The number of gait exercise was 1000 steps(500 steps for each leg). Measurements were made barefoot before exercise and after exercise. Gait exercise was assisted by using the HAL extension of hip in the loading response. The gait of a subject was measured by three-dimensional motion analysis system(VICON612) and a ground reaction force plate(OR-6-6). Measured items were changes in stride length, step length, gait speed, joint angle and joint moment of the hip, knee, ankle of affected sides.

Results)

Extension moment of hip in the loading response increased. In addition, extension angle of hip and plantar flexion moment in the terminal stance increased. Flexion moment of hip in the initial swing decreased.

Conclusion)

This study showed that 1000 step of walking exercises using the HAL was effective to the subject of this study.

略 歴

山口 和輝 (保健衛生学士) 鈴鹿医療科学大学 保健衛生学部 理学療法学科 助手

学 歴 :

平成 21 年 鈴鹿医療科学大学 保健衛生学部 理学療法学科 卒業

職 歴 :

平成 21 年 国立大学法人 三重大学医学部附属病院 リハビリテーション部 理学療法士

26 年 鈴鹿医療科学大学 保健衛生学部 理学療法学科 助手 (現在に至る)

主な研究内容 :

ロボットスーツ HAL によるニューロリハビリテーションの開発