

Experience of Rehabilitation Using the Single-joint Hybrid Assistive Limb (HAL[®]-SJ) for the Remaining Quadriceps Muscle Paralysis After Spinal Injury - A Case Report -

Naoki KISE¹⁾, Etsuji SHIOTA¹⁾, Kyosuke GOTO¹⁾,
Naoya KOTANI¹⁾, Hiroyuki FUKUDA¹⁾, Kazuya SAITA¹⁾,
Satoshi KAMADA¹⁾, Tetsuya SAKAMOTO²⁾, Jun TANAKA³⁾,
Tooru INOUE⁴⁾

¹⁾ Department of Rehabilitation Medicine, Fukuoka University Hospital

²⁾ Department of Medical Emergency Center, Fukuoka University Hospital

³⁾ Department of Orthopedic surgery, Faculty of Medicine, Fukuoka University Hospital

⁴⁾ Department of Neurosurgery, Faculty of Medicine, Fukuoka University

Abstract

Effectiveness of the HAL[®] robot suit (single-joint) (Cyberdyne, Tsukuba, Japan) for rehabilitation after surgery of spinal injury due to of L₂ burst fracture was reported. A 24-year-old female with of the remaining quadriceps paralysis was treated with the HAL[®]-SJ for 9 weeks (18 training sessions) to recover her remaining quadriceps. After using the HAL[®]-SJ for 9 weeks, the patient's knee extensor scores by manual muscle testing improved from 1/5 to 4/5. The patient showed improvement in quadriceps activity, suggesting the effectiveness of rehabilitation using HAL[®]-SJ.

Key words: spinal injury, robotsuit HAL[®] single-joint, feed back, rehabilitation

脊椎外傷後の限局した大腿四頭筋筋出力低下の残存症例に対して ロボットスーツ HAL[®] 単関節タイプによるリハビリテーションを 行った1例

喜瀬 直紀¹⁾ 塩田 悦仁¹⁾ 後藤 恭輔¹⁾
小谷 尚也¹⁾ 福田 宏幸¹⁾ 斉田 和哉¹⁾
鎌田 聡¹⁾ 坂本 哲哉²⁾ 田中 潤³⁾
井上 亨⁴⁾

¹⁾ 福岡大学病院 リハビリテーション部

²⁾ 福岡大学病院 救命救急センター

³⁾ 福岡大学病院 整形外科

⁴⁾ 福岡大学医学部 脳神経外科

要旨：脊椎外傷患者に対し、術後よりロボットスーツ HAL[®] 単関節タイプ (HAL[®]-SJ) を使用し良好な結果を得た。症例は 24 歳、女性。第 2 腰椎破裂骨折により大腿四頭筋に麻痺を生じ、9 週間 HAL[®]-SJ によるト

レーニングを行った。その結果、術後2週目より介入9週目に大腿四頭筋の Manual Muscle Testing (MMT) 1 から MMT4 までの改善を認めた。今回、脊椎外傷による大腿四頭筋の筋出力低下に対し、HAL®-SJ によるリハビリテーションで回復が得られる可能性が示唆された。

キーワード：脊椎外傷、ロボットスーツ HAL® 単関節タイプ、フィードバック、リハビリテーション

対象と方法

はじめに

脊髄損傷は、脊椎・脊髄の疾病または外傷が原因で脊髄に損傷を受けることにより発生する。

新宮らによると、日本の脊髄損傷の発生頻度は人口100万人あたり40.2人で、年間5000人程度発生していると報告している¹⁾。原因としては交通事故が44%と最も多く、次いで転落が29%、転倒が13%とされている。損傷レベル別での割合は、頸髄損傷が63%、胸腰髄・馬尾損傷が37%とされており、完全麻痺が40.7%、不全麻痺が59.3%とされている。1997年から2015年までの全国の労災病院を対象とした脊髄損傷データベースの統計によると、入院時 Functional Independence Measure (FIM) の平均が63.0点なのに対し、退院時の平均が105.6点と42.6点の改善を認めたと報告されている²⁾。脊髄損傷を生じた場合、損傷レベルと程度により様々な病態を生じるため、予後に関しては様々な報告がなされているが、Fawcettらは受傷後3カ月までに活発な運動機能回復が起り、9カ月後にはほぼ終息すると報告している³⁾。これらの報告からも早期からの理学療法介入が望ましいとされており、近年その手段としてロボットを用いたリハビリテーションが臨床に応用され始めている⁴⁾。

筑波大学システム情報工学研究科山海研究室で開発されたロボットスーツ HAL® は、身体を動かす際に皮膚表面に現れる微小な電位（生体電位）を検出して下肢に障害を持つ患者や筋力の低下した患者の筋力・歩行機能をサポートする装着型の自立歩行支援ロボットである。脊椎・脊髄疾患に対してロボットスーツ Hybrid assistive limb (HAL®) を使用した場合、筋力や筋萎縮に改善が得られたとの報告が散見される⁵⁾⁶⁾。Jansenらは脊髄損傷により歩行困難になった患者に対し、1年間 HAL® を使用した結果、すべての症例において歩行能力に改善を認めたと報告している⁷⁾。

今回、脊椎外傷により馬尾損傷を呈し、大腿四頭筋に限局した麻痺が残存した症例に対して、ロボットスーツ HAL 単関節タイプ (HAL®-SJ) による急性期理学療法が有用であった1例を経験したので報告する。

患者：24歳。女性。

診断：第2腰椎破裂骨折。

術式：後方固定術 (L₁₋₃)、(MDM社 IBIS, percutaneous pedicle screw)。

椎弓切除術 (L₁partial+L₂laminectomy)。

現病歴：自宅の庭にて仰臥位で倒れている所を家族が発見。2階(5～6m)から自殺企図で転落したと考えられた。

既往歴：統合失調症(17歳)。数日前から精神的に不安定であった。

入院時所見：意識清明 (Glasgow Coma Scale: 15点) で腰部に疼痛、圧痛あり。血圧123/74mmHg、脈拍74回/分、呼吸数28回/分、経皮的酸素飽和度100%。両下肢に Manual Muscle Test (MMT) 1の筋力低下と痺れの訴えあり、腱反射は消失していた。CTおよびMRIにて、L₂に破裂骨折像あり、脊柱管占拠率は80%であった。骨片は後方に突出して馬尾を圧迫している状態で、近傍の硬膜外にT1WIとT2WIで軽度高信号域あり、血腫を生じていた(図1, 2)。



図1 MRI像
L₂椎体の破裂骨折により後方突出した骨片が脊髄を圧迫している。

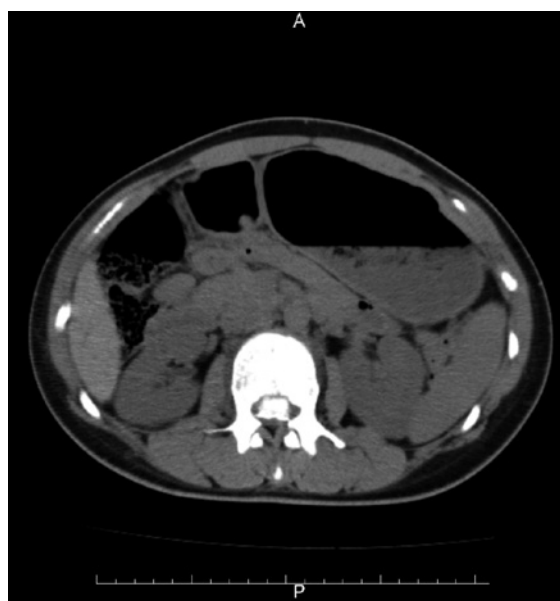


図2 CT像
CT横断像にて脊柱管占拠率80%を占めている。

経過：受傷後3日目に後方固定術を施行した。術後、麻痺症状に改善が認められなかったため、受傷後7日目に除圧目的に椎弓切除術を追加で施行した。2回目の術後7日目より理学療法開始し、硬性コルセット着用下にて離床開始となった。初期評価時、右下肢筋力MMT3、左腸腰筋、下腿三頭筋にMMT2までの改善を認めていたが、左大腿四頭筋はMMT1であった。感覚は両下肢の深部覚および右下肢の表在覚は正常であったが、左下肢はデルマトームにてL₂以下に痺れを認めていた。膀胱直腸障害は陰性、球海綿体反射は陽性で、改良型Frankel分類はC1であった。FIMはセルフケア、移乗、移動項目の減点により86点であった。歩行は術後14日目より歩行器にて開始したが左下肢に膝折れを認めたため介助を要していた。

今回の介入では一つの関節のみを介助する目的で開発されたCYBERDYNE社製HAL[®]-SJを使用した。各電極の貼付部位やHAL[®]-SJ装着方法に関しては「ロボットスーツHAL[®]単関節タイプ(HAL[®]-SJ)取扱説明書」

に準拠した。

術後14日目より、通常の理学療法に加えHAL[®]-SJを用いたトレーニングを週3回9週間(計27回)実施した。患者にモニターにて生体電位を確認してもらい、端座位にて20分間の膝関節伸展運動を疲労に応じて実施した。生体電位を検出する電極貼付部位は触診で筋収縮を触知できる箇所とし、膝関節伸展筋では1~4週目外側広筋、5~7週目大腿直筋、8~9週目内側広筋へ貼付し、屈曲筋は大腿二頭筋を対象とした。アシストゲインは×640倍から開始し、大腿四頭筋筋力の改善に応じてアシストを漸減させた。

大腿四頭筋筋力がMMT4に達した時点でHAL[®]-SJ終了し、最終評価として大腿四頭筋筋力をハンドヘルドダイナモメーター(HOGGAN社製, Hand held Dynamometer micro FET2: HHD)にて計測した。計測は加藤らの方法⁸⁾に準じ、端座位にて膝関節屈曲70°位で等尺性運動を行い、計測された実測値を体重で割った値を体重比として算出した。

結 果

HAL[®]-SJ実施前の左大腿四頭筋筋力はMMT1であった。HAL[®]-SJによる介入を始めてから1週後よりわずかに膝関節自動伸展運動が認められ、2週後には生体電位にて著明な波形の増幅と筋出力の向上を認めた。この時期より松葉杖歩行を開始し、4週後には歩行状態安定し松葉杖歩行見守りとなった。6週後には膝折れも消失し、T-cane若しくは独歩での歩行が可能となった。介入8週後にMMT3、9週後でMMT4となったためHAL[®]-SJを終了した。最終評価時のHHDで計測した大腿四頭筋筋力は2.95N/kgで、健側の4.01N/kgに対して73.5%までの改善を認めた。また、ADLでは初期評価時のFIMが86点であったのに対し、最終評価時には119点まで改善を認めた。表1にアシスト強度および筋力、歩行、ADLの経時的变化を、図3にHAL[®]-SJ使用前後の膝関節自動伸展可動域の変化を示す。

表1 アシストゲインおよび筋力、歩行、FIMの経時的变化

	開始時	1 週後	2 週後	6 週後	7 週後	8 週後	9 週後
HAL アシスト	× 640		× 320	× 60	× 40	× 20	× 10
膝関節自動伸展角度 (°)			-75	-30	-20	-15	-10
左四頭筋 MMT (HHD : N/kg)	1	1	2	2	2	3	4 (2.95)
右四頭筋 MMT (HHD : N/kg)	3	3	3	4	4	5	5 (4.01)
歩行	歩行器		松葉杖	T-cane	独歩		
FIM (点)	86						119

HAL : Hybrid assistive limb

MMT : Manual Muscle Testing (徒手筋力テスト)

HHD : Handheld Dynamometer (ハンドヘルドダイナモメーターを用いた定量化筋力)

FIM : Functional Independence Measure

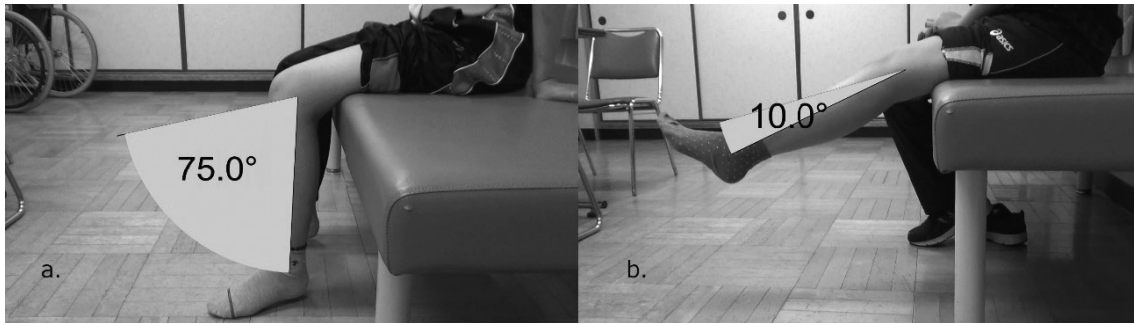


図3 HAL[®]-SJ 実施前後の膝関節自動伸展可動域の変化
a: HAL[®]-SJ 実施 2 週後 b: HAL[®]-SJ 実施 9 週後
動画解析ソフト Dratfish を使用し、膝関節伸展 0° から膝関節自動伸展の最大角度の差を計測。

考 察

脊椎外傷後の馬尾損傷により大腿四頭筋に著明な筋出力の低下を生じた症例に対し、HAL[®]-SJ を用いたトレーニングを行った結果、術後より 9 週間で MMT1 から MMT4 と筋出力の向上を認め、HAL[®]-SJ を用いたトレーニングが有用な手段である可能性が示唆された。

HAL[®]-SJ を用いたりハビリテーションの報告は少ないものの、近年では HAL[®] のフィードバック効果に着目し、膝関節術後の extension lag に有効であったとの報告がある⁹⁾¹⁰⁾。また、小谷らは前方侵入による人工股関節置換術後の大腿神経麻痺により、大腿四頭筋に MMT0 と筋出力が低下した患者に対し、HAL[®]-SJ および随意運動介助型電気刺激装置 IVES を併用した治療を行った結果、筋出力の向上が認められ、術後 6 週で MMT3、9 週で HHD にて健側比 54% までの改善を認めたと報告している¹¹⁾。本症例においては介入 8 週後で MMT3、9 週後で MMT4 となり、HHD で健側比 73.5% までの改善を認めたことより、馬尾損傷患者に対しても HAL[®]-SJ が有用であると考えられる。

山海らによると、ロボットスーツが生成する運動により随意性の神経・筋活動と同期した求心性の神経刺激が得られ、神経・筋系の活動が促進されることで効果的に筋活動を賦活できるという理論を報告しており¹²⁾、麻痺筋の不十分な生体信号から HAL[®]-SJ のアシストにより関節運動を行うことで、対象筋の神経・筋活動が効果的に賦活できたと考える。また、脊髄不全損傷患者において、近年、皮質脊髄路から発芽した側枝が損傷を免れた脊髄固有ニューロンに接続することで代償的な神経回路が構築され、運動機能の一部改善が認められることが明らかとなってきている¹³⁾。藤田らの脊髄不全損傷を呈したマウスを用いた研究によると、運動を行った対象群の損傷後 28 日までの側枝数が有意に減少し、側枝が増殖する 10 日目以降余分な側枝の刈り込みが行わ

れることで運動機能に改善が認められたと報告している¹⁴⁾。これらのことから本症例においても、損傷後早期より自動運動困難な麻痺筋に対して、HAL[®]-SJ による積極的な運動を行うことで、馬尾損傷患者に対しても効果的に運動機能の改善を図ることができたと考える。

さらに、HAL[®]-SJ には、モニターにて視覚的に生体電位を確認しながら運動を行うことができる特徴がある。視覚情報からのフィードバックを用いた大腿四頭筋訓練により、筋出力向上や過剰な筋緊張の抑制効果が得られると報告されている¹⁵⁾¹⁶⁾。重松らによると、脊髄不全損傷患者に対して筋電波形センサーによる視覚的なフィードバックを用いた筋力トレーニングを早期から行うことにより、両脚型 HAL[®] ヘススムーズに移行できたと報告している¹⁷⁾。これらの報告から、モニターからの視覚的情報を基に正のフィードバックが得られ、適切な運動学習により麻痺筋の筋出力向上を図ることが可能であったと考える。

以上のことから馬尾損傷による大腿四頭筋の筋出力低下に対して、HAL[®]-SJ を早期より使用することにより、代償的な神経回路の構築や、適切な神経・筋活動の再教育により筋出力に改善を認める可能性が示唆された。今回、HAL[®]-SJ による介入を行った結果、FIM で 119 点と ADL においても著明な改善を認めた。HAL[®]-SJ は安全かつ短時間での装着が可能なことや、視覚的フィードバックによる患者の自己効力感の向上を図ることができると、今後の理学療法への応用が期待される。本研究は単独症例であり、比較対象となる報告が少なく統計学的検討がされていないため、有効性に関して最終結論は得られていない。しかしながら本研究により脊椎外傷後の馬尾損傷患者に対して HAL[®]-SJ が有用である可能性が示唆された。

引用文献

- 1) 新宮彦助: 日本における脊髄損傷疫学調査 第 3 報

- (1990-1992). 日本パラプレジア医学会誌 8: 26-27, 1995.
- 2) 吉備高原医療リハビリテーションセンター「脊髄損傷データベース 一覧」 <http://www.kibirihah.johas.go.jp/003_reha/10_sekison_db/10_sekison_hyou.html> 「参照 2017-12-21」
 - 3) Fawcett JW, Curt A, Steves JD, Coleman WP, Tuszynski MH, Lammertse D, Bartlett PF, Blight AR, Dietz V, Ditunno J, Dobkin BH, Havton LA, Ellaway PH, Fehlings MG, Privat A, Grossman R, Guest JD, Kleitman N, Nakamura M, Gaviria M and Short D: Guidelines for the conduct of clinical for spinal cord injury as developed by the ICCP panel: spontaneous recovery after spinal cord injury and statistical power needed for therapeutic clinical trials. *spinal cord* 45: 190-205, 2007.
 - 4) Wall A, Borg J, Palmcrantz S: Clinical application of the hybrid assistive limb (HAL) for gait training; -A systematic review-. *Frontiers in systems Neuroscience* 25: 1-10, 2015.
 - 5) 久保田茂希, 山崎正志: 脊髄障害に伴う上肢および下肢麻痺に対する Hybrid Assistive Limb (HAL) を用いた機能回復治療. *整形外科* 67: 917-922, 2016.
 - 6) 森下登史, 矢次彩, 福田宏幸, 塩田悦仁, 井上亨: 脊椎脊髄疾患に対するロボットスーツ HAL を用いた訓練の有効性. *脊椎脊髄ジャーナル* 29: 699-705, 2016.
 - 7) Jansen O, Schildhauer T, Meindl R, Tegenthoff M, Schwenkreis P, Sczesny-Kaiser M, Grasmücke D, Fisahn C, Aach M: Functional outcome of neurologic-controlled HAL-exoskeletal neurorehabilitation in chronic spinal cord injury: A pilot with one year treatment and variable treatment frequency. *Global Spine Journal* 17: 735-743, 2017.
 - 8) 加藤宗規: ハンドヘルドダイナモメーターによる等尺性膝伸展筋力の測定 - 固定用ベルトの使用が検者間再現性に与える影響. *総合リハビリテーション* 29: 1047-1050, 2001.
 - 9) Goto K, Morishita T, Kamada S, Saita K, Fukuda H, Shiota E, Sankai Y, Inoue T: Feasibility of rehabilitation using the single-joint hybrid assistive limb to facilitate early recovery following total knee arthroplasty: A pilot study. *Assistive Technologies* 29: 197-201, 2017.
 - 10) 吉岡友和: 変形性膝関節症治療におけるロボットスーツ HAL 単関節型の応用. *関節外科* 36: 524-533, 2017.
 - 11) 小谷尚也, 後藤恭輔, 鎌田聡, 塩田悦仁, 山本卓明, 井上亨: 大腿神経麻痺に伴う大腿四頭筋の筋出力低下に対するロボットスーツ HAL[®] 単関節タイプおよび随意運動介助型電気刺激装置 IVES[®] の有効性. *理学療法学* 44: 232-237, 2017.
 - 12) 林知広, 岩月幸一, 長谷川真人, 田上未来, 山海嘉之: 自立運動困難な麻痺患者に対するロボットスーツを用いた新しい随意運動訓練 - 重度脊髄損傷患者への臨床適用 -. *生体医工学* 50: 117-123, 2012.
 - 13) 山下俊英: 脊髄損傷後のリハビリテーション効果のメカニズム. *Clinical Neuroscience* 34: 242-243, 2016.
 - 14) 藤田幸: 運動トレーニングによる中枢神経回路再構築の機序. *上原記念生命科学財団研究報告集* 30: 1-5, 2016.
 - 15) 佐藤洋介, 村田伸, 甲斐義浩, 中江秀幸, 相馬正之: 筋出力発揮調整時に視覚フィードバックが筋活動に与える影響. *Japanese Journal of Health Promotion and Physical Therapy* 5: 135-138, 2015.
 - 16) 福田誠, 赤木亮太, 金久博昭, 川上泰雄, 福永哲夫: 視覚フィードバックを伴う最大随意収縮が筋活動および筋横断面積あたりの筋力に及ぼす影響. *スポーツ科学研究* 6: 17-29, 2009.
 - 17) 重松英樹, 林雅弘, 城戸顕, 石田由佳子, 宮内義純, 大島学, 石田栄一郎, 奥田哲教, 倉知彦, 森本安彦, 田中康仁: 脊髄損傷患者における超急性期からの筋電バイオフィードバック訓練とロボットスーツを用いた早期リハビリテーション介入の4例. *総合リハビリテーション* 45: 839-843, 2017.
- (平成 30. 3. 26 受付, 平成 30. 6. 9 受理)
- 「本論文内容に関する開示すべき著者の利益相反状態: なし」