8

慢性期脊髄損傷に伴う完全四肢・
対麻痺患者に対する随意的歩行訓練
—T-HAL 法 (Heterotopic
Triggered HAL method)—Voluntary Gait Training for Complete Quadri/Paraplegia
Patients Due to Chronic Spinal Cord Injury : T-HAL Method
(Hetrotopic Triggered HAL Method)清水如代^{*1} 門根秀樹^{*2} 久保田茂希^{*3} 安部哲哉^{*4}

Yukiyo Shimizu

Hideki Kadone

Shigeki Kubota

Tetsuya Abe

上野友之^{*1} 羽田康司^{*1} 山崎正志^{*4}

Tomoyuki Ueno

Yasushi Hada

Masashi Yamazaki

Key words : HAL : Hybrid Assistive Limb[®] / T-HAL 法 / 生体電位センサ / 動作解析 / 運動学習要
旨

脊髄損傷に伴う下肢麻痺患者に対するリハビリテーション治療として、歩行支援ロボットが臨床応用されている。

ロボットスーツ HAL[®] は、装着者の神経筋活動を感知できる生体電位センサをもつ外骨格型装着ロボットである。微弱な筋活動であっても、本センサにより感知し・関節運動補助ができる点が、他のロボットにない最大の特徴である。われわれは、本来の主動筋ではない残存筋をトリガーとして選択することで、麻痺患者の運動意図に沿った随意的な麻痺肢訓練 (T-HAL 法) を考案した。本稿では、慢性期脊髄損傷完全麻痺患者を対象に行った随意的歩行訓練について概説する。

はじめに

リハビリテーション医療の分野において、歩行支援ロボットの臨床応用が進んでいる。歩行支援ロボットは、据え付け型ロボットと装着型ロボットに大別される。前者には Lokomat[®]、TOYOTA パートナロボット GEAR があり、トレッドミルに付随

した免荷装置と関節角度センサ、足圧センサからなる装置により、受動歩行を行うことができる。後者には、関節角度センサ、傾きセンサ、床反力センサを備えた外骨格型の ReWalkTM、制御系を内蔵した歩行器と関節角度センサを備えた内側系機構の WPAL、そして本稿で述べる HAL[®]がある¹⁾。

ロボットスーツ HAL[®] (Hybrid Assistive Limb[®], Cyberdyne) は、筑波大学で開発された外骨格型装着ロボットで、医療機器として認可された初のロボットである。

HAL[®]は、足圧センサ、関節角度センサに加え、装着者の神経筋活動を感知する生体電位センサを有する。装着者の運動意図を感知し、股関節・膝関節のアクチュエータが作動し関節運動を補助す

*1 筑波大学附属病院リハビリテーション科
(〒305-8576 茨城県つくば市天久保 2-1-1)

E-mail : shimiyukig@md.tsukuba.ac.jp

*2 筑波大学附属病院未来医工融合研究センター

*3 筑波大学医学医療系
運動器再生医療学寄附講座

*4 筑波大学医学医療系整形外科
DOI : 10.2490/jjrmc.56.560

る²⁾。HAL[®]のアシストにより生じた関節運動により中枢神経系にフィードバックがかかるという Interactive bio-feed back 理論をもとにしたロボットである。MMT 1~2 の重度麻痺筋の収縮では関節運動が起こりにくく、関節角度センサ単独で装着者の意図を捉えることは困難であるが、生体電位センサは微弱な神経筋活動をも感知することができるため、関節角度センサに先行して装着者の意図を捉えることができる。この生体電位センサをもつことが HAL[®]の最大の特徴である。

本稿では、他のロボットにない生体電位センサに着目し、慢性期脊髄損傷完全四肢および対麻痺患者に対して、麻痺肢以外の随意的筋活動をトリガーとした Heterotopic (異所性の) Triggered HAL method (T-HAL 法)³⁻⁵⁾による麻痺肢訓練法および随意的歩行訓練法について紹介する。

ロボットスーツ HAL[®]

HAL[®]の特徴である生体電位センサは股関節屈曲・伸展、膝関節屈曲・伸展の4本からなる。HAL[®]の制御には CVC (Cybernic Voluntary Control: サイバニック随意制御システム) と CAC モード (Cybernic Autonomous Control: サイバニック自律制御システム) がある。CVC モードは、生体電位を感知し関節運動をアシストする。CAC モードは、生体電位が感知できなくても、片側下肢荷重を足圧センサで感知し、反対側下肢があらかじめプログラムされた動作で振り出されるシステムであるが、実際には、対麻痺患者が意図的に片側下肢に交互に荷重をかけるのは困難である。立位をとるためには免荷が必要であるが、免荷をした際には荷重センサは感知しにくい。

そのためわれわれは、完全麻痺患者が随意的に歩行訓練を行うために何をすべきか、という観点で歩行訓練法について再検討をした。

随意的筋活動が得られない症例であっても『四

肢を動かしたい』という運動意図により随意的に麻痺肢を動かすために、本来の主動筋ではない残存筋にセンサを貼り、トリガーとして選択することとした。この方法を Heterotopic Triggered (異所性トリガーによる) HAL method HAL 法: T-HAL 法と名づけ、完全麻痺者を対象に麻痺肢の随意運動訓練を行っている。

T-HAL 法の考案

慢性期脊髄損傷完全麻痺患者にとって麻痺肢の回復は困難なことが多く、リハビリテーション治療は残存能力を生かし、日常生活動作を獲得することが目的となる。しかし、麻痺肢の改善は患者の希望するところであり⁶⁻⁸⁾、quality of life (QOL) に大きくかわる。特に、高位頸髄損傷完全四肢麻痺の場合には、随意的筋活動は、頸部の屈曲および僧帽筋による肩甲帯の挙上に限られる。日常生活のほぼすべてに介助を要する。リハビリテーション治療は、麻痺肢の機能改善というよりは、電動車椅子駆動や環境制御装置の導入などの環境調整の優先度が高い。

本 T-HAL 法考案のきっかけとなった臨床研究として、われわれは頸髄損傷完全四肢麻痺症例 (C4A) に対し、僧帽筋をトリガーとした肘屈曲訓練を行った³⁾。

当初随意的収縮は僧帽筋のみであった患者が、僧帽筋をトリガーとして肘関節屈曲訓練を行うことにより、上腕二頭筋の随意収縮が可能となり、10 m ほど普通型車椅子駆動が行えるようになった。臨床的に MMT 0 かつ表面筋電図上で随意収縮がみられなかった上腕二頭筋に、随意的な周期的筋活動がみられたという点で、麻痺筋を賦活した可能性を考えた。本経験より、麻痺肢を訓練する際に随意筋活動が可能な残存筋をトリガーとして用いる訓練法を考案した。

T-HAL 法では慢性期脊髄損傷患者に対し随意

図1 上肢駆動 HAL (文献 4, 5 より改変)

a : 上肢トリガー部位および下肢関節運動, b : UT-HAL 装着状況, c : UT-HAL のシェーマ.

的筋活動を評価のうえ、残存筋をトリガーとして麻痺肢の運動を行う。当院現在までに行った、慢性期脊髄損傷患者（残存高位 C6～T11, American Spinal Cord Injury Association impairment scale [AIS] grade A または B）を対象とし、股関節屈筋をトリガーとした膝伸展訓練、対側上肢筋活動をトリガーとした歩行訓練^{4, 5)}を紹介する。

上肢筋活動を用いた歩行訓練

四肢麻痺・対麻痺患者に対して行う立位訓練は、関節拘縮や褥瘡、骨粗鬆症の予防、循環器系消化器系を賦活する点で有効といわれている。損傷レベルが下位胸髄以下の症例では長下肢装具を用いた歩行訓練も行われるが、上肢への負荷が大きく、膝伸展位での固定を要するため通常の歩行パターンと異なる訓練になる。また、頸髄損傷や上位胸髄損傷では、実用的な歩行訓練は困難である。

現在まで歩行訓練が適応でなかった高位損傷患者をも含めて行うこととした。まず、上肢と下肢の歩行時の協調動作に注目した^{9, 10)}。構造学的には、上肢は近位に肩関節、接続して遠位に肘関節

があり、下肢は近位に股関節、接続して遠位に膝関節があるという類似がある。また、歩行時に下肢は、対側上肢に連動して周期的な矢状面運動を行う。上下肢の構造的類似性・運動学的対称性に着目し、残存筋活動として反対側上肢筋活動をトリガーとして選択することで、随意的な歩行訓練を行うこととした（上肢駆動 HAL, Upper Limb Triggered HAL : UT-HAL 法）^{4, 5)} (図 1)。

UT-HAL 法の実際

以下にわれわれが行っている UT-HAL 法について述べる。

対象：慢性期脊髄損傷四肢および対麻痺患者（残存高位 C6～T11, AIS grade A または B の 6 例 (表 1)。

方法：対側上肢筋活動をトリガーとし、三角筋前方線維に股関節屈曲用電極、三角筋後方線維に股関節伸展用電極、上腕二頭筋に肘屈曲用電極、上腕三頭筋に膝伸展用電極をそれぞれ反対側の上肢に貼付した (図 1-b)。

評価法：HAL[®] 介入前、中、後に股関節屈筋・膝

表1 上肢駆動 HAL 後の神経学的推移

症例	1	2	3	4	5	6
性別	男性	男性	女性	男性	男性	女性
年齢	20	67	32	30	39	30
受傷後	3 y 2 m	2 y 3 m	6 y 3 m	1 y 9 m	7 y	3 y 3 m
残存高位	C6B	T6A	T10A	T11A	T7A	T7A
MMT 股関節屈筋	0/0	0/0	0/0 → 1/1	1/2 → 2/3	0/0	0/0
MMT 膝関節伸筋	0/0	0/0	0/0 → 1/1	0/0 → 1/1	0/0	0/0
歩行訓練歴	なし	なし	長下肢装具	長下肢装具	長下肢装具	長下肢装具
頻度	1~2/月	2/週	1~2/月	2/週	1/1~2 月	1~2/月
痙性緩和	あり	あり	低下傾向	著変なし	著変なし	著変なし

関節伸筋を表面筋電図 (Delsys Trigno Systems) で測定し、歩行周期は 3 次元動作計測システム (VICON MX T20S) と連動することで求めた。

HAL[®]実施：装着時および歩行時は免荷のために吊り下げ型免荷式歩行器 (All in one ; Ropox A/S 社, デンマーク) を利用した。装着肢位は立位または座位で、後方に 1 名、左右に各 1 名の 3 名で装着を行い、およそ 2~3 分を要した。

歩行時は、前方または後方からの歩行器誘導やコントローラ操作に 1~2 名の療法士およびアシスタント、モーションキャプチャーや表面筋電図を確認するエンジニア、全体統括する医師からなる 3~4 名のチームで行った。頻度は、入院例では週に 2 回、慢性期外来例では週 1 回~1, 2 カ月に 1 回の計 10 回とした。

1 回に要する時間は、動きやすい服装への更衣、HAL[®]電極装着、評価のための表面筋電図装着、介入前後の歩行計測などを含めて 90 分程度、HAL[®]を装着して歩行する時間は休憩含めて 30 分程度である。介入前、休憩時、介入後にはバイタルサインと疲労度を確認し、過負荷とならないように注意して行った。

経過中に股関節屈筋の筋活動を認めた症例には、股関節屈筋をトリガーとした膝関節伸展訓練を追加した。

結果：全症例計 10 回の HAL[®]を完遂した。有

害事象としてハーネスによる両肩の擦過傷を認めた症例があった。ハーネスの調整、クッションの追加により改善した。表 1 に示すように、症例 3 と 4 の 2 例で介入後に股関節屈筋、膝関節伸筋の筋活動が改善していた。痙性麻痺患者においては、modified Ashworth scale (MAS) の低下を認めた。

T-HAL 法の効果

運動学習には、正常に近い特異的な活動を随意的に行うこと、集中し動作を繰り返すことが必要とされる¹¹⁾。装着者の意思で麻痺肢を繰り返し動かすということが運動学習効果を果たし、今回提示した症例の神経学的変化に寄与した可能性がある。ただし、機序は明らかではなく、今後脳神経学的な評価を加え研究を継続していく必要がある。

また、従来の歩行訓練が困難であった頸髄損傷、上位胸髄損傷患者の随意的歩行が可能であり、さらに QOL の阻害因子となる痙性が介入後に緩和した。脊髄損傷患者にとっての新たなリハビリテーション法としての有効性が示唆された。

T-HAL 法の注意点

今回、慢性期完全麻痺患者を対象としたのには理由がある。1 点は、神経症状がプラトーに達していると考えられる患者を選択したということ、もう 1 点は、急性期に起こりやすい合併症を回避するた

めである。高位損傷患者では起立性低血圧や自律神経過反射のリスクがある。本研究では頸髄損傷を含むすべての症例で生じなかったが、これは個々の症例に対して合併症が起こり得る状況やその対策について評価したうえで行ったためである。また、ハーネスによる皮膚トラブルを生じてしまった例があったが、これは回避すべき合併症であり、特に感覚障害部位には十分な注意が必要である。

ロボットによる歩行訓練の可能性

脊髄損傷患者は、麻痺について回復が困難であるという告知を受ける。残存機能を生かしたりハビリテーション治療を行い、車椅子を用いたADLを獲得することはとても重要である。実用移動手段としての車椅子は優れた機器ではあるが、股関節・膝関節屈曲位を強制されるため、関節拘縮や褥瘡のリスクがある。予防のためにもモチベーションの維持が鍵となる。実用的歩行が困難と告げられた患者が、もう一度歩きたいという思いをもつ、そうしたときにHAL[®]をはじめとしたロボットを利用したりハビリテーションが果たす役割は心理的にも大きいと考えられる。

おわりに

慢性期の脊髄損傷患者を対象にT-HAL法による随意的歩行訓練を行った。本研究を通して筆者は、慢性期完全麻痺患者でも神経症状が変わり得ることを知り、神経学的評価を継続して行うことの重要性を学んだ。本法が、麻痺患者のモチベーション向上に少しでも寄与できるよう期待し、本稿の結びとする。

文献

- 1) 上野友之, 山崎正志: わが国におけるリハビリテーションロボットの現状. 脊椎脊髄ジャーナル 2016; **29**: 692-698
- 2) 山崎正志, 久保田茂希, 門根秀樹, 清水如代, 國府田正雄: 脊柱靱帯骨化症に伴う急性および慢性脊髄障害に対するロボットスーツ HAL を用いた機能回復治療. 整形外科 2018; **69**: 628-634
- 3) Shimizu Y, Kadone H, Kubota S, Ikumi A, Abe T, Marushima A, Ueno T, Endo A, Kawamoto H, Saotome K, Matsushita A, Matsumura A, Sankai Y, Hada Y, Yamazaki M: Active elbow flexion is possible in C4 quadriplegia using hybrid assistive limb (HAL[®]) technology: A case study. J Spinal Cord Med 2017; **40**: 456-462
- 4) Shimizu Y, Kadone H, Kubota S, Suzuki K, Abe T, Ueno T, Soma Y, Sankai Y, Hada Y, Yamazaki M: Voluntary ambulation by upper limb-triggered HAL[®] in patients with complete quadri/paraplegia due to chronic spinal cord injury. Front Neurosci 2017; **11**: 649
- 5) Shimizu Y, Kadone H, Kubota S, Suzuki K, Saotome K, Ueno T, Abe T, Marushima A, Watanabe H, Endo A, Tsurumi K, Ishimoto R, Matsushita A, Koda M, Matsumura A, Sankai Y, Hada Y, Yamazaki M: Voluntary ambulation using voluntary upper limb muscle activity and Hybrid Assistive Limb[®] (HAL[®]) in a patient with complete paraplegia due to chronic spinal cord injury: A case report. J Spinal Cord Med 2018; **19**: 1-9
- 6) Anderson KD: Targeting recovery: priorities of the spinal cord-injured population. J Neurotrauma 2004; **21**: 1371-1383
- 7) Jackson A, Zimmermann JB: Neural interfaces for the brain and spinal cord—restoring motor function. Nat Rev Neurol 2012; **8**: 690-699
- 8) Collinger JL, Boninger ML, Bruns TM, Curley K, Wang W, Weber DJ: Functional priorities, assistive technology, and brain-computer interfaces after spinal cord injury. J Rehabil Res Dev 2013; **50**: 145-160
- 9) La Scaleia V, Sylos-Labini F, Hoellinger T, Wang L, Cheron G, Lacquaniti F, Ivanenko YP: Control of leg movements driven by EMG activity of shoulder muscles. Front Hum Neurosci 2014; **8**: 838
- 10) Sylos-Labini F, Ivanenko YP, MacLellan MJ, Cappelletti G, Poppele RE, Lacquaniti F: Locomotor-like leg movements evoked by rhythmic arm movements in humans. PLoS One 2014; **9**: e90775
- 11) Daly JJ, Ruff RL: Construction of efficacious gait and upper limb functional interventions based on brain plasticity evidence and model-based measures for stroke patients. Scientific World Journal 2007; **7**: 2031-2045