

脳梗塞後左上肢麻痺に対し単関節型HALを使用したリハビリテーションが運動主体感に有効であった1例

谷口由香理¹⁾, 古賀研人¹⁾, 山下泰貴¹⁾, 梅田裕樹¹⁾, 中園寿人²⁾, 谷口隆憲³⁾, 渡邊芳彦⁴⁾, 三浦聖史⁴⁾, 井上 亨⁵⁾, 安部 洋⁶⁾

1) 白十字会白十字病院脳卒中センターリハビリテーション部理学療法課 〒819-8511 福岡県福岡市西区石丸 4-3-1

2) 福岡国際医療福祉大学医療学部作業療法学科

3) 福岡国際医療福祉大学医療学部理学療法学科

4) 白十字会白十字リハビリテーション病院リハビリテーション科

5) 白十字会白十字病院脳卒中センター脳神経外科

6) 福岡大学医学部脳神経外科

近年、脳卒中後の運動学習に運動主体感が影響することが報告されている。運動主体感とは「自分の身体の動きをコントロールしている」という主観的な感覚であり、脳卒中後の運動障害により低下するといわれ、リハビリテーションには不可欠な要素である。脳卒中後の麻痺肢の機能改善には装着型ロボットであるHybrid Assistive Limb (HAL,

CYBERDYNE) を用いた動作反復トレーニングが有効であることが近年の研究により示されている。HALは機能改善だけでなく運動主体感にも影響する可能性があるものの、その効果やメカニズムは不明である。今回、脳卒中後の片麻痺患者へHAL医療用単関節タイプを使用したリハビリテーションにより運動主体感が改善した症例を経験したので報告する。

Key Words

stroke, the sense of agency (SoA), single joint type of Hybrid Assistive Limb (HAL-SJ), rehabilitation

Key Slide

	Pre HAL-SJ	Post HAL-SJ
SoA : NRS	3	10
Elbow Flexion and Extension movement time (seconds)	13.3	4.5
Switching Time (seconds)		
Flexion→Extension	0.17	0.06
Extension→Flexion	0.47	0.2
Muscle activity (%MVC)		
Biceps (During flexion)	24.7	58.8
Triceps (During extension)	14	20.7
FMA-UE	47	57
MAL		
AOU	3.9	4.1
QOM	2.9	4.2

HAL-SJ: single joint type of Hybrid Assistive Limb. NRS: numerical rating scale. SoA : the sense of agency. %MVC: percent maximum voluntary contraction. FMA-UE: Fugl-Meyer Assessment-Upper Extremity. MAL: Motor Activity Log. AOU: Amount of Use. QOM: Quality of Movement.

(Received May 18, 2025; Accepted October 14, 2025)

I. 緒 言

脳卒中後の運動障害に対するリハビリテーションでは、学習性不使用を予防しながら効果的かつ効率的な運動学習を促進することが求められる^{1, 2)}。近年、脳卒中後の運動学習に運動主体感が影響することが報告されている²⁾。運動主体感とは、運動に付随したフィードバックが「自分の運動によって引き起こされた」という主観的な感覚のことであり、「運動の予測」と「実際の感覚情報」が一致する場合に誘起され、さらに思考、知識、信念などの認知的手がかりによって調節されるといわれている³⁾。神経画像研究では補足運動野、小脳、後頭頂皮質、背外側前頭前野、島など複数の関連脳領域が報告されている^{4, 5)}。また臨床的病巣解析および機能的介入研究により、運動主体感の障害は右半球（特に後部島皮質、下頭頂小葉）およびそれらを結ぶ白質トラクトの損傷と関連することが示されている⁶⁾。

運動主体感は、運動学習のほかに、運動制御や運動遂行時のモチベーションにおいても重要な役割を担っている⁷⁾。よって、リハビリテーションでは単に麻痺や筋力の回復だけでなく、患者自身が思いどおりに身体を動かせるようになること、つまり運動主体感を伴う運動の獲得が重要である。

また、運動障害の回復には、患者の意図を正しく実現した高頻度の反復運動が必要であり、その方法として、徒手による促通反復療法や constraint-induced movement therapy (CI 療法)、物理療法やロボットリハビリテーションを併用することが知られている¹⁾。近年、リハビリテーションロボット開発は国内外で加速度的に進み、脳卒中治療ガイドラインにおいても、亜急性期以降の上肢運

動障害に対してロボットを用いた機能訓練が推奨されている⁸⁾。リハビリテーションロボットである Hybrid Assistive Limb (HAL, CYBERDYNE) は山海らによって開発され、身体を動かそうとする際に皮膚表面に発生する生体電位信号に応じて、意図した運動をアシストできる外骨格型ロボットである。脳と身体と HAL との間で相互フィードバックを形成しながら動作を繰り返すことで、感覚フィードバック効果を高めると考えられており、脳卒中片麻痺患者への治療効果が報告されている⁹⁾。HAL には随意運動の意図に基づく運動発現と身体感覚情報をリアルタイムに感じるメカニズムがあるため、運動主体感が低下した脳卒中患者のリハビリテーションとして有用な可能性がある。今回、運動主体感が低下した脳梗塞患者に対し、HAL 医療用単関節タイプ (single joint type of Hybrid Assistive Limb: HAL-SJ) を使用したリハビリテーションを施行し、治療効果を運動主体感および運動学的評価、上肢運動機能の側面から検証した。

II. 症 例

患 者：60 歳代前半，男性。

現病歴：起床時に左上下肢運動障害、左口角下垂、構音障害を認め当院へ搬送された。右中大脳動脈 (MCA) 閉塞による脳梗塞と診断され (Fig. 1)、血栓回収術後に再開通が得られたが尾状核～被殻、側頭葉に点状の出血性梗塞を来した。

HAL-SJ 導入までの経緯：第 2 病日より理学療法・作業療法・言語聴覚療法を開始し、意識レベル JCS 3、失語はなかった。軽度の構音障害と半側空間無視、注意障害を認めた。Fugl-Meyer assessment (FMA) の運動項目は上肢 41/66 点、

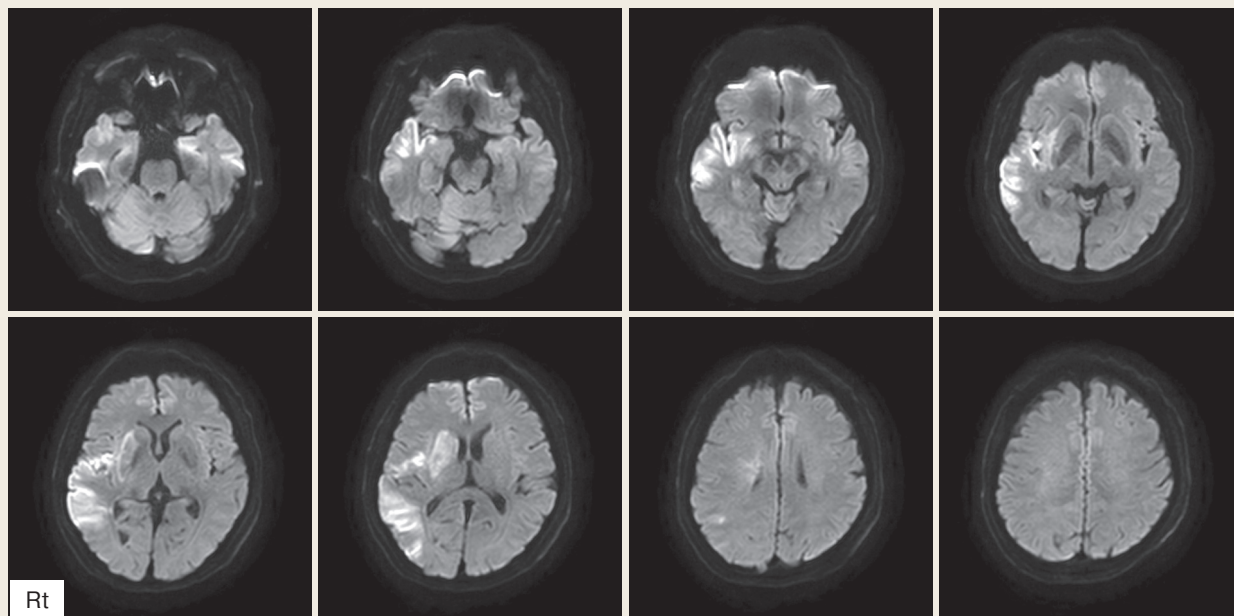


Fig. 1 Initial brain MRI showing multiple acute infarctions scattered within the right middle cerebral artery territory

下肢 19/34 点であり，運動麻痺に対して促通反復療法を実施した．第 32 病日で意識レベルは清明になったものの，軽度の半側空間無視と注意障害は残存し，上肢 FMA は 47/66 点であり ADL はおおむね見守りレベルで可能となった．検査上では左上肢麻痺は改善していたが，「自分で動かしている感じがしない」などの発言が多く聞かれ，日常生活では不使用傾向であり，促通反復療法を施行していたが効果的な反復運動を行うことができない状態が続いた．そのため自己身体認識である運動主体感の低下を疑い，肘関節屈伸運動に HAL-SJ の導入を検討した．

III. 介入方法

HAL-SJ は吊り下げキットを使用し，座位にて左肘関節に装着した (Fig. 2)．生体電位信号に基づいてアシストを行うサイバニック随意制御 (Cybernic Voluntary Control : CVC) モードに



Fig. 2 Rehabilitation using HAL-SJ

て肘関節屈伸運動を 50 ～ 300 回 / 日とし，計 10 日間施行した．HAL-SJ 使用マニュアルに従い，アシスト量は「軽く動かすことができる」と最も感じる程度とし，運動回数は筋疲労が生じず反復可能な回数を，理学療法士が立ち会いの下，毎回モニタリングしながら設定した．第 33 病日に運動主体感の評価，肘関節の運動学的評価，上肢運

動機能評価を実施し、第44病日までHAL-SJを使用したりハビリテーションを施行して、第45病日に再度評価した。

運動主体感の評価：運動主体感の評価に関する先行研究は多数報告されており、脳卒中後遺症患者の運動主体感を対象とした評価方法も報告されているが、標準化されていない。

そこで、今回我々は片山らの方法を参考に、以下の方法で運動主体感を評価した¹⁰⁾。定量的評価にはnumerical rating scale (NRS)を使用し、HAL-SJ装着下での肘屈伸中の運動主体感を「自分で肘を動かしている感覚は右と比較してどの程度ですか？」と口頭にて聴取し、「自分で動かしていると感じない」を0、「右と同じように自分が動かしていると感じる」を10として評価した。また、HAL-SJを用いたりハビリテーション以外の時間における「麻痺肢の使用変化」「日常生活の変化」など自発的な発言を記録し、定性的に評価した。

運動学的評価：運動課題は、麻痺側肩関節屈曲90°、前腕回内位を保持した状態にて、至適速度による肘関節屈伸の自動運動を5回実施した。計測には、PC内蔵カメラ(Dell Technologies)と表面筋電計(myoMUSCLE, NORAXON)を同期させ、関節運動と筋活動を同時計測し、肘関節の屈伸運動における①運動時間、②切り替え時間、③筋活動量(percent maximum voluntary contraction : % MVC)を算出した。肘関節屈伸中の「運動時間」は、5回の肘関節屈伸運動に要した時間とし、「切り替え時間」は、1回目の肘関節最大伸展位から屈曲開始までの時間、最大屈曲位から伸展開始までの計測時間を評価に用いた。「筋活動量」は、麻痺側の上腕二頭筋と上腕三頭筋を被検筋とし、

肘関節屈伸中の筋電図を記録した。筋電図データは最大等尺性収縮時の筋活動量で正規化し、肘関節屈伸中の筋活動量を求めた。

上肢運動機能評価：麻痺の程度はFMAの上肢項目、麻痺手の実生活における使用行動はMotor Activity Log (MAL)のAmount of Use (AOU)とQuality of Movement (QOM)で評価した。FMAは上肢麻痺の程度を測る評価であり、最高点が66点、最低点が0点である。MALは日常生活における麻痺手の使用頻度および主観的な使いやすさを示す評価であり、「まったく使用せず」が0点、「発症前と同様の使用頻度/使いやすさ」が5点である。麻痺手が非利き手であったため、10項目の動作を評価し、その平均点を算出した。各評価は検査手法に精通した作業療法士が実施した。

IV. 結 果

Table 1, 2, Fig. 3に示した。HAL-SJ装着下での肘屈伸中における運動主体感のNRSは3/10から10/10と向上し、HAL-SJ使用直後の随意運動時にも低下することなくその効果が持続していた。運動学的評価では、肘関節屈伸の運動時間は8.8秒、切り替え時間は、伸展位から屈曲開始が0.27秒、屈曲位から伸展開始が0.11秒それぞれ短縮した。筋活動量は屈曲時の上腕二頭筋が34.1%、伸展時の上腕三頭筋が6.7%それぞれ増大した。上肢運動機能評価は、FMAが10/66点、MALのAOUが0.2点、QOMが1.3点それぞれ改善した。

V. 考 察

本症例では脳梗塞後の左上肢運動麻痺に対して促通反復療法を施行したものの、効果的な反復運動が困難であった。先行研究では右島皮質や右半

Table 1 Evaluation results before and after 10 sessions of HAL-SJ training

	Pre HAL-SJ	Post HAL-SJ
SoA : NRS	3	10
Elbow Flexion and Extension movement time (seconds)	13.3	4.5
Switching Time (seconds)		
Flexion→Extension	0.17	0.06
Extension→Flexion	0.47	0.2
Muscle activity (%MVC)		
Biceps (During flexion)	24.7	58.8
Triceps (During extension)	14	20.7
FMA-UE	47	57
MAL		
AOU	3.9	4.1
QOM	2.9	4.2

HAL-SJ: single joint type of Hybrid Assistive Limb. NRS: numerical rating scale. SoA : the sense of agency. %MVC: percent maximum voluntary contraction. FMA-UE: Fugl-Meyer Assessment-Upper Ex-tremity. MAL: Motor Activity Log. AOU: Amount of Use. QOM: Quality of Movement.

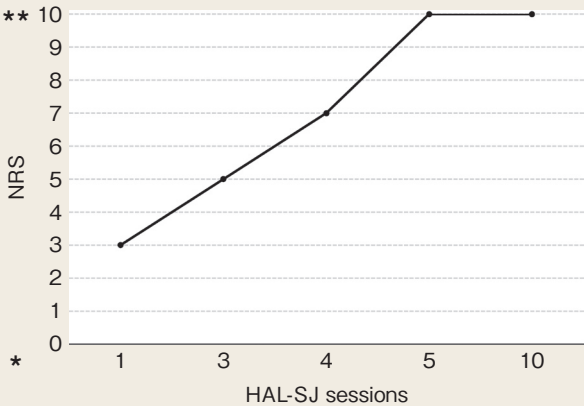


Fig. 3 Changes of SoA during sessions 1, 3, 4, 5, and 10 of HAL-SJ training

NRS : numerical rating scale
SoA : the sense of agency
**10 : [I feel like I'm moving it myself]
*0 : [I don't feel like I'm moving it myself]

球ネットワーク損傷が自己の所有感および自己による行為の認識に不可欠であることを報告しており、これらの機能は運動主体感の基盤を構成するといわれている⁶⁾。これらの知見と比較すると、本症例においても同様の神経機能の障害により、

Table 2 Qualitative evaluation based on spontaneous patient comments regarding “changes in use of the paralyzed limb” and “changes in daily life”

Pre-HAL-SJ	I don't feel like I'm getting better. I want to eat while holding the bowl in my left hand.
Post HAL-SJ 1 session	I don't feel like I'm moving it myself.
Post HAL-SJ 3 sessions	I can feel the movement it myself.
Post HAL-SJ 4 sessions	I can clearly see the feeling of movement. I feel it moving lightly.
Post HAL-SJ 5 sessions	The feeling of moving it is the same as the right hand. I was able to hold the bowl in my left hand.
Post HAL-SJ 10 sessions	I feel like I'm moving it myself.

運動主体感が低下していた可能性が考えられる。そこで麻痺側の肘関節屈伸運動に HAL-SJ を用いた反復運動を実施したところ、短期間で運動主体感、肘関節の運動学的項目、麻痺側上肢運動機能、麻痺側上肢の使用頻度および質が改善した。重～

中等度麻痺では運動主体感の改善と麻痺側上肢の使用増加は有意な関連性があるといわれており、運動主体感の改善が麻痺側上肢の使用頻度増加に寄与したと考えられる³⁾。脳卒中後の運動障害に対するリハビリテーションでは、効率的な運動学習の促進が必要であり、その要因の一つとして運動主体感が重要である^{1, 2, 10)}。しかし、運動麻痺が残存すると自身の意図とは異なった運動が生じ、期待どおりの感覚フィードバックが発生しないため、運動主体感の低下につながる^{11, 12)}。

運動主体感には、「運動の予測」と「実際の感覚情報」が一致することが必要であり、運動指令に対して感覚知覚までの時間に200～300 msの遅れがあると違和感として知覚するとされている¹³⁾。各情報の不一致は運動主体感を低下させ、運動前野および皮質脊髄路の興奮性を低下させ、運動リズムの緩慢化や筋活動の低下につながるとされている¹⁴⁾。一方で、HAL-SJは筋活動開始からトルク発生までの電気力学的遅延がわずかであり、運動指令に対する時間的不一致を改善させる可能性があると考えられる。本症例では、HAL-SJ装着下での肘屈伸中の運動主体感が向上し、使用直後の随意運動時にもその効果が持続しており、予測運動信号と感覚フィードバックの一致を促進し、運動主体感の再形成が促進された可能性を示唆する。また、反復使用によってこの主体感が強化され、随意運動にも汎化したと考えられる。さらにHAL-SJの即時効果として、障害半球の運動関連領域の脳活動が増加することが報告されており、本症例では右半球ネットワークの回復を促進し、運動主体感の改善に寄与した可能性がある⁹⁾。このような背景から、HAL-SJを用いた随意的な反復運動は、脳卒中患者の運動学習に関連する神経

可塑性を促進する可能性があり、今回、HAL-SJを用いたことで、運動主体感が向上し適切な運動学習が促進されたと考えられる。

しかし、本報告にはいくつかの留意点がある。本報告は単一症例に基づくものであり、その効果は限定的である可能性があり、異なる背景を有する症例にも当てはまるかどうかは不明である。また、評価期間が入院中に限られており、時間経過に伴う変化や因果関係を厳密に検証することはできていない。さらに本症例では、深部感覚・位置覚・運動覚などの体性感覚について、統一された評価バッテリーや定量的検査を実施していなかった。そのため、感覚障害の程度や回復過程を客観的に示すことはできず、運動主体感の変化との関連を直接検証することは困難である。ただし、臨床観察および患者本人による訴えからは、左上肢における位置覚や運動覚の低下が推察され、介入過程で一部の改善傾向も認められた。本報告で観察された運動主体感の改善は、HAL-SJによる運動支援に加え、感覚系の自然回復や適応の影響を受けている可能性が否定できない。今後は、標準化された感覚評価を併用し、運動主体感と感覚機能の関連性を明確に検討しつつ、リハビリテーション治療におけるHAL-SJの優位性について、さらなる検証が必要である。

VI. 結 語

脳卒中後の上肢麻痺に対するリハビリテーションにHAL-SJを組み合わせて、良好な結果が得られた症例を経験した。特に重～中等度上肢麻痺患者の運動主体感の低下は日常生活における上肢不使用につながりやすいため、運動主体感の要素を取り入れたリハビリテーションが重要である。

COI

本研究は白十字病院倫理委員会の承認を得て実施した（承認番号：197）。対象者には研究目的と内容を口頭および書面にて説明し、同意を得た。なお本投稿論文に関して、開示すべき利益相反関連事項は存在しない。

文献

- 1) 三浦聖史, 下堂園恵: 最新の脳卒中リハビリテーション—運動障害へのアプローチを中心に—. 日本内科学会雑誌 108: 283-8, 2019
- 2) 潮見泰蔵: 脳傷害後の機能回復と運動学習. 理学療法科学 21, 87-91, 2006
- 3) Miyawaki Y, et al: Diminished sense of agency inhibits paretic upper-limb use in patients with post-stroke motor deficits. Cortex 181: 165-78, 2024
- 4) Seghezzi S, et al: Neurofunctional correlates of body-ownership and sense of agency: A meta-analytical account of self-consciousness. Cortex 121: 169-78, 2019
- 5) Seghezzi S, et al: The Brain in (Willed) Action: A Meta-Analytical Comparison of Imaging Studies on Motor Intentionality and Sense of Agency. Front Psychol 10: 804, 2019
- 6) Kamath HO, et al: Awareness of the functioning of one's own limbs mediated by the insular cortex? J Neurosci 25: 7134-8, 2005
- 7) 温文: 運動主体感に着目した身体拡張. VISION 35: 62-7, 2023
- 8) 2-4 上肢機能障害, 273 (日本脳卒中学会 脳卒中ガイドライン委員会編: 脳卒中治療ガイドライン2021〔改訂2025〕, 協和企画, 東京, 2025)
- 9) Saita K, et al: Biofeedback effect of hybrid assistive limb in stroke rehabilitation: A proof of concept study using functional near infrared spectroscopy. PLoS One 13: e0191361, 2018
- 10) 片山脩, 兒玉隆之: 延髄外側梗塞によりしびれが出現した症例に対する感覚運動イメージニューロフィードバックシステムの効果—多面的理学療法評価による検討—. 理学療法学 46: 107-15, 2019
- 11) 中谷真太郎: リハビリテーションにおける運動主体感向上のためのシステム・制御系設計. システム／制御／情報 66: 440-5, 2022
- 12) 大内田裕 ほか: リハビリテーションにおける脳内身体表現と評価指標. 計測と制御 56: 181-6, 2017
- 13) 稲邑哲也: 仮想現実を用いたニューロリハビリテーションのためのクラウドプラットフォーム. 計測と制御 56: 204-9, 2017
- 14) 森岡周: 身体性変容のメカニズムとニューロリハビリテーション. PAIN RESEARCH 34: 10-8, 2019

Improvement of Sense of Agency following Rehabilitation using HAL Single-Joint Device in a Post-Stroke Patient with Upper Limb Paralysis: A Case Report

Yukari TANIGUCHI ¹⁾, Kento KOGA ¹⁾, Taiki YAMASHITA ¹⁾, Yuuki UMEDA ¹⁾,
Hisato NAKAZONO ²⁾, Takanori TANIGUCHI ³⁾, Yoshihiko WATANABE ⁴⁾, Seiji MIURA ⁴⁾,
Tooru INOUE ⁵⁾, Hiroshi ABE ⁶⁾

1) Department of Rehabilitation, Stroke center, Hakujuji Hospital

2) Department of Occupational Therapy, Faculty of Medical Science, Fukuoka International University of Health and Welfare

3) Department of Physical Therapy, Faculty of Medical Science, Fukuoka International University of Health and Welfare

4) Department of Rehabilitation, Hakujuji Rehabilitation Hospital

5) Department of neurosurgery, Stroke center, Hakujuji Hospital

6) Department of neurosurgery, Fukuoka University Faculty of Medicine

In recent years, the sense of agency (SoA)—the subjective awareness of controlling one's own body movements—has been recognized as an important factor influencing motor learning after stroke. Stroke-induced motor impairment often diminishes SoA, making its restoration a key component of effective rehabilitation.

The Hybrid Assistive Limb single-joint type (HAL-SJ), a wearable robotic device, facilitates repetitive motion training and has been shown to improve motor function in paralyzed limbs. Beyond functional recovery, HAL-SJ may also contribute to the enhancement of SoA, although the mechanisms underlying this effect remain unclear.

We report the case of a man in his 60s who developed left hemiplegia following a right middle cerebral artery infarction. HAL-SJ training, targeting the elbow joint, was initiated 33 days after onset. Over a course of 10 days sessions, the device assisted in repetitive elbow flexion and extension movements. Following the intervention, the patient demonstrated improvements in SoA as well as in kinematic parameters, including movement speed, timing, and muscle activation patterns. Additionally, both the frequency and quality of affected upper-limb use improved in daily activities.

These findings suggest that HAL-SJ training may enhance SoA by promoting kinematically optimized motor control in stroke survivors with upper-limb paralysis.