

仮想現実技術を用いた脳再プログラミング療法の 脳性麻痺患者の痙縮に及ぼす効果

村川雄一朗* 仲上 恭子* 新本 啓人** 原 正彦****

【要約】 痙縮は脳性麻痺患者で最も頻繁に認められる症候の1つである。歩行機能や日常生活動作能力の低下に繋がるため、ボツリヌス療法や選択的脊髄後根切断術、軟部組織離解術等の介入手段が存在するが、副作用による影響や治療による疼痛、侵襲性などが存在するため非侵襲的かつ効果的な治療が望まれている。今回我々は、脳性麻痺による痙縮を有する3例（11歳の男児、26歳の成人期男性、12歳男児）にmediVRカグラ®ガイド下脳再プログラミング療法を行い、痙縮の改善や各種日常生活動作能力の改善が得られた症例を経験した。VRリハには入院や痛みを伴う侵襲的な介入を必要としないため、学齢期や就労期の脳性麻痺患者の痙縮治療に対する有用性が示唆されたと考えた。また、自宅や施設での実施容易性も強みであると考えた。今後症例数を集積したさらなる検討が望まれる。（神経治療 41：55-59, 2024）

Key Words : brain re-programming therapy, cerebral palsy, virtual reality, spasticity

はじめに

脳性麻痺は胎児期あるいは乳児期に生じた脳の異常が原因で運動機能や筋緊張、姿勢障害が生じる疾患群である^{1,2)}。筋緊張障害の中でも痙縮は脳性麻痺患者で最も頻繁に認められる症候の1つであり²⁾、上位運動ニューロンの障害が原因で歩行機能や日常生活動作能力の低下を引き起こすだけでなく、関節拘縮などによって介護負担を増大させる因子であるため効果的な治療手法が求められている^{3,4)}。痙縮の病態整理については未だ完全には明らかとなっていないが、錐体路や網様体脊髄路、前庭脊髄路などの神経経路の障害のみで引き起こされるのではなく、脳や神経の可塑的变化や再編成が関与している可能性についても報告が存在する⁵⁻⁷⁾。痙縮には経口痙縮薬やボツリヌス療法、バクロフェン髄腔内投与療法、選択的脊髄後根切断術、整形外科的な軟部組織離解術などが存在するが、副作用による影響や治療による疼痛、侵襲性などが存在するため患者や家族からは非侵襲的かつ効果的な治療が望まれている^{4,7)}。

一方で近年、急速に発展する仮想現実（virtual reality：VR）技術の医療分野での応用が益々広がりを見せ、脳性麻痺分野においても運動機能改善に対して有望な結果を示す例が散見されるようになってきた^{8,9)}。本邦で利用可能なリハビリテーション用医療機器であるmediVR社製「mediVRカグラ®」は、通常の仮想現実技術をベースとした機能に加え、15種以上の特許技術に裏打ちされた独自技術によって脳の可塑性を刺激することで脳卒中後の片麻痺に伴う

痙縮や、小脳性運動失調、半側空間無視や慢性疼痛といった神経領域における難治疾患群で幅広い効果を発揮することが報告されており、この治療法はmediVRカグラ®ガイド下脳再プログラミング療法と称されている¹⁰⁻¹³⁾。今回我々は、脳性麻痺による痙縮を有する3例にmediVRカグラ®ガイド下脳再プログラミング療法を行い、痙縮の改善や各種日常生活動作能力の改善が得られたため報告する。

症 例

症例は2021年9月から2022年12月に痙縮を有する脳性麻痺の診断のもと、主に歩行機能の獲得を目的として当センターを利用した連続3症例（Table 1）。いずれも痙縮による歩行障害を有しており、これまでに療育施設や医療機関においてリハビリテーション加療を受けていたが、直近2年間で明確な機能改善を得られていない状態であった。また、ボツリヌス療法や選択的脊髄後根切断術、筋延長術を受けるも日常生活動作上の改善は得られず、治療が奏効していない状態であった。痙縮の時系列評価にはModified Ashworth Scale（MAS）を用いた。

方 法

治療にはmediVR社製「mediVRカグラ®」を用いた。本機器は通常の仮想現実技術をベースとした機能に加え、点推定と多信号生体フィードバックと呼ばれる独自技術により、それぞれフィードフォワードによる強力なボディイメージの構築と、動作成功時に視覚、聴覚、触覚の複数のモダリティを用いた感覚フィードバックを与えることで脳の可塑性を高め、運動学習を効率的にサポート可能な機器であると著者らは仮説を立てている¹⁰⁻¹³⁾。患者はヘッドマウントディスプレイを装着し、VR空間内に出現する目標物に対して手で保

* リハビリテーション科、mediVRリハビリテーションセンター大阪

** リハビリテーション科、mediVRリハビリテーションセンター東京

*** 島根大学大学院医学系研究科 地域包括ケア教育研究センター

(2023年5月2日受付/2023年10月23日受理)

http://doi.org/10.15082/jstn.41.1_55

Table 1 Cases' Summary

	Patient 1	Patient 2	Patient 3
Patient Background			
Age, years-old	11	26	12
Sex	male	male	male
Baseline disease of cerebral palsy	periventricular leukomalacia	periventricular leukomalacia	unidentified
Type of cerebral palsy	spastic diplegia	spastic diplegia	spastic diplegia
History of medical treatment			
botulinum neurotoxin injection	Yes	No	Yes
selective dorsal rhizotomy	Yes	No	No
Lengthening of muscle-tendon units	Yes	Yes	No
Conventional rehabilitation			
Physical therapy	45 min once a week	30-40 min once a week	45 min once a month
Occupational therapy	45 min once a month	-	-
mediVR KAGURA-guided brain-reprogramming therapy			
Number of times performed (20-40 min)	24	13	1
Total time of treatment	16 hours	8 hours 40 min	20 min
Frequency of intervention	5 times a week	Roughly 1 time per 2 weeks	1 time
Duration of intervention	33 days	7 months	1 day
Adverse events			
motion sickness	None	None	None
Modified Ashworth Scale			
At presentation → last follow-up			
Elbow extension (right/left)	1/1+ → 1/1	1/1+ → 0/1+	0/0 → 0/0
Hip flexion (right/left)	1/1 → 0/0	3/2 → 2/2	1+/1+ → 1+/1+
Knee flexion (right/left)	1/1 → 0/0	2/3 → 1+/2	3/2 → 2/2
Knee extension (right/left)	3/3 → 1+/1+	2/2 → 1/1	3/2 → 2/2
Foot joint dorsiflexion (right/left)	0/0 → 1/1	2/2 → 1/1+	2/3 → 2/3

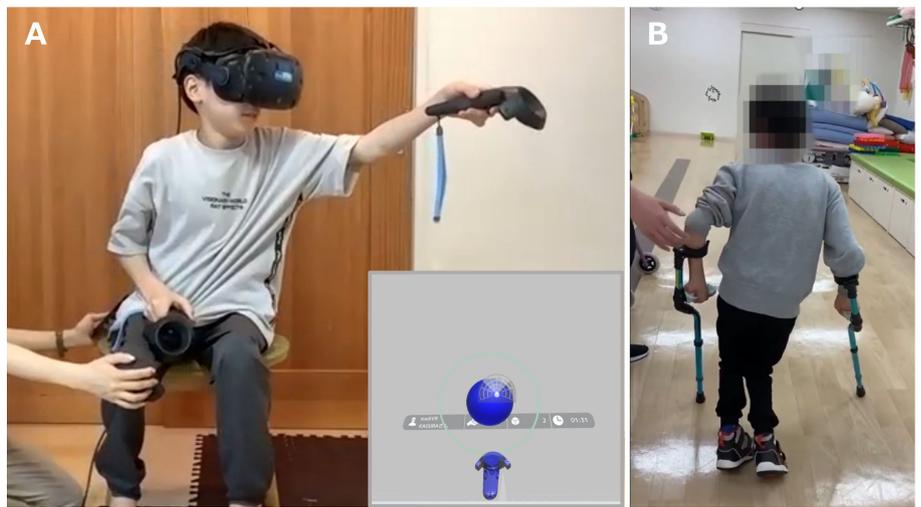
持したコントローラーで軽く触れるようリーチング動作を行うように指示を受ける。Fig. 1AではVR画面内に床上3mの位置からゆっくりと落下してくる青色のボールが映し出されており、患者は左手に保持した青色のコントローラーでボールに触れるように手を伸ばすリーチング動作を行っている。この文脈でフィードフォワードとは前向き動作予測を意味し、ヘッドマウントディスプレイに表示されるVR空間では体が見えないことから、患者はこれから行うべき体の動きを視覚代償がない状態でより強くイメージしなければならない。従って、通常の現実空間で行われるよりも強力なフィードフォワードが脳内で生成されていることが推定される^{10,11)}。一方、ボールに触れた瞬間に目的動作を達成したことを患者に報知する仕組みをフィードバックと表現した。本機器内では、ボールに触れた瞬間に目標動作が上手くいったことを文字情報により視覚情報として、効果音により聴覚情報として、コントローラーのバイブレーションにより触覚情報として、フィードバックを行う仕様となっている^{10,11)}。本機器を用いた治療の場合、どのような疾患や症候に対しても「座位」で治療を実施し、必ず「左右交互」にリーチングタ

スクを行わせるという特徴的な介入を行う (Fig. 1及びFig. 2)^{10,11)}。介入 (以後、VRリハ) は1回あたり原則として約40分行った。VRリハ時の上肢リーチング課題は、対側上肢、体幹、頸部、股関節、下肢等に軽度の代償動作が出現する程度の運動強度に設定した (Fig. 2)。より具体的には、上肢リーチング時の股関節内転や肩甲帯の過緊張による挙上、足部内反尖足や体幹の側屈などである。我々はこのような随意的に動かそうとする部位 (※Fig. 2A-Dにおける左上肢) 以外の関節に生じる不随動的な動きを関節連関と表現しており (Fig. 2B及びC)¹⁰⁾、本3症例に対しても関節連関が1リーチング毎に徐々に治まっていくことを確認しながら介入を行った。また、関節連関がある程度落ち着いた際には的の大きさを小さくする、リーチングの距離や高さ、角度を変える等の負荷設定の変更を行うことによって、動作バリエーションや要求される動作精度を調整しながら出現する関節連関をその都度取り除くようにVRリハを継続した。関節連関そのものに対しても声かけやライトタッチによる触覚刺激を介した位置情報の補正、介助誘導を行うことで関節連関による代償動作を軽減させるよう適宜介入した (Fig. 1A, Fig. 2C及びD)。

Fig. 1 A rehabilitation scene of patient 1 (A), and his first time to walk, with Lofstrand canes (B)

(A) A mother rehabilitating her 11-year-old boy. She encouraged him to reach a target (falling blue ball) in a 3-dimensional virtual space and attempted to prevent his right hip joint from turning inward.

(B) During his first visit, the patient had difficulty sitting on a chair by himself. However, after 33 days of treatment, he was able to walk independently on his own using Lofstrand canes.



経 過

症例1

症例は11歳の男児 (Fig. 1)。治療開始前は下肢優位の痙縮により大腿四頭筋やハムストリングス、下腿三頭筋の中等度過緊張を認め、各種動作時には股関節内転や膝関節屈曲、足部内反、底屈などの意図しない運動が出現しやすい状況であった。体幹機能は著明に低下しており、座位保持には前後左右の姿勢動揺を抑制するため背もたれのある座位保持椅子が必要であった。起立は重度介助、歩行は補助具を使用しても困難であり長下肢装具装着で全介助状態であった。

本症例に対しては自宅に機器を設置し、母親がVRリハを1日40分、24回実施したところ座位保持椅子は不要となり背もたれの無い椅子でも骨盤前傾位で端座位保持が可能となった。治療の際にはWEB会議ツールを用いてセラピストが介入方法を母親に直接指導しながらVRリハが行われた。治療後は、歩行器を用いた立位保持や両口フストランド杖を用いた十数歩程度の歩行が可能となり、動作場面の足部の内反や膝関節屈曲による異常運動パターンは軽減した¹³⁾。MASの経過をTable 1に示す。なお、経過中筋力は増加傾向にあったものの、各関節可動域が段階的に向上し、その度に患児より「力が入りにくくて不安である」との発言が認められた。

症例2

症例は26歳の成人期の男性。治療開始前は下肢痙縮が強く、他動的関節可動域 (ROM 右/左) は股関節屈曲60°/90°、膝関節屈曲135°/105°、Straight Leg Raising (SLR) は20°/15°であった。歩行は口フストランド杖を用いて可能だが内反尖足によってすり足で不安定であり、10m快適歩行は13.6秒 (29歩) であった (Fig. 2E-G)。

セラピストによるVRリハを1回40分程度、遠方からの受診のため7ヵ月かけて13回実施した。初回VRリハ直後から筋緊張の軽減を認め、13回終了時点でのROMは股関節屈曲70°/85°、膝関節屈曲160°/150°、SLRは45°/35°となり、10m快適歩行は12.5秒 (25歩) となった (Fig. 2E-G)。自覚的な歩きやすさは向上し、歩行時の下肢振り出しの拡大やすり足の軽減、立脚時のふらつき減少が得られた。さらに階段昇降を手すりなしで昇降可能となった。MASの経過をTable 1に示す。なお、本症例でも経過中各関節部位の拘縮が段階的

に緩む現象が認められたが、患者本人からは「力を段階的に調整できるようになった感じで、力が入りにくいことはない」「手足を動かそうとすると最初は脳の中で絡まっていた運動の指令が、VRリハを重ねるごとにどんどん紐解けてくる感じで分離した動作が可能となった」等との発言が得られた。

症例3

症例は12歳の男児。治療開始前は下肢痙縮が強く、椅子座位では膝関節伸展し足底接地が困難であった。尖足が強いため介助下でも歩行困難であった。セラピストによるVRリハを1回20分のみ実施した所、最初の数リーチング経過後から下肢の筋緊張の軽減を認め、20分後には椅子座位で足底接地可能となり、さらに尖足傾向の軽減に伴い立位での足底接地が可能となったため後方介助で歩行可能となった。また、膝周囲の筋緊張の軽減を認めた。MASの経過をTable 1に示す。なお、VRリハの持続効果に関しては検証ができなかった。

考 察

本報告の3症例はいずれも両麻痺による痙縮を有しており、mediVRカグラ®ガイド下脳再プログラミング療法により、MASによる筋緊張変化のみならず生活動作上の改善を認めた。いずれの症例も理学療法、或いは作業療法による介入を定期的に継続し、症例1と3ではボツリヌス療法を併用していたところ (Table 1)、VRリハ開始後に良好な治療経過となったことから、併用した理学療法、作業療法、ボツリヌス療法の効果に加えて、VRリハがさらなる改善に寄与したのではないかと推察している。mediVRカグラ®は適切な負荷量の中でフィードフォワードとフィードバックを組み合わせることで脳の可塑性を刺激し、効率的な脳内運動モデルの構築を促すと考えられることから、これが動作中の過剰な代償動作の除去と筋緊張のコントロールを自然に促し、生活動作上でも再現されるいわゆる手続き記憶的な機能改善に寄与した可能性が考えられる^{10,11)}。

また、痙縮は上位運動ニューロン病変に起因する感覚運動制御の障害とされており¹⁴⁾、mediVRカグラ®が有する多信号生体フィードバック機能は痙縮患者の運動と感覚の機能統合の一助となった可能性がある。さらに、痙縮には網様体脊髄路や前庭脊髄路の過興奮性

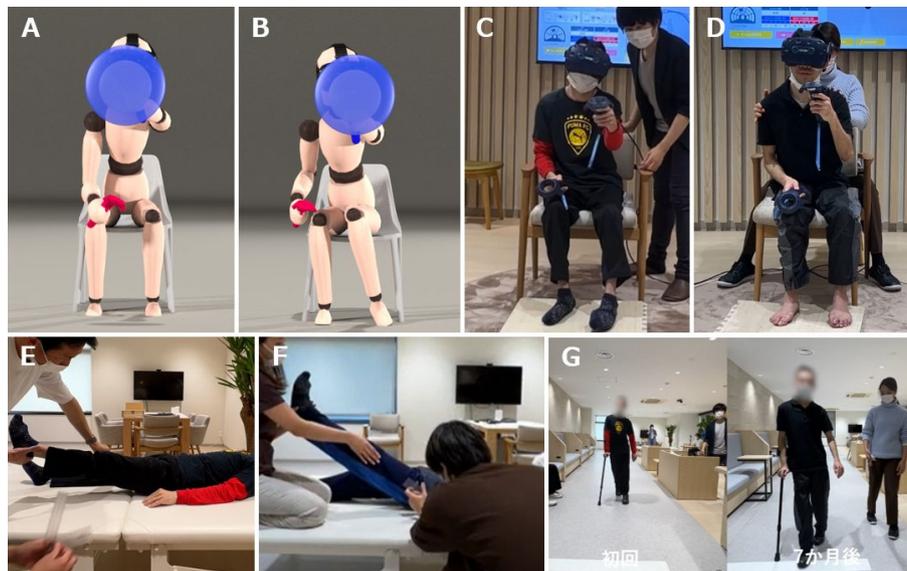


Fig. 2 A schematic and practical example of mediVR KAGURA-guided brain reprogramming therapy

(A) A schematic illustration of the reaching motion of a healthy person touching a blue target displayed in a virtual reality space with a controller held in the left hand. mediVR KAGURA-guided brain reprogramming therapy was performed by alternating the left and right reaching movements in a sitting position.

(B) A schematic illustration of an articular linkage in a patient with cerebral palsy. Involuntary movements were observed in many joints other than the left upper limb, including lateral flexion and rightward rotation of the trunk to the right, internal rotation of the left hip joint, and hypertonia of the right elbow, in conjunction with the reaching movements of the left upper limb.

(C) An initial treatment scene of patient 2. In addition to the reaching movements of the left upper extremity, articular linkages such as lateral flexion of the neck to the left side, lateral flexion of the trunk to the right side, hypertonia of the right shoulder girdle and elbow, and internal rotation of the left foot were observed.

(D) The late-stage treatment of patient 2. The articular linkage associated with reaching the left upper limb subsided considerably and approached the movement of a healthy person.

(E) Straight leg raising was 15° in the left lower limb at the initial visit of patient 2.

(F) After 13 interventions in patient 2, straight leg raising increased from 15° to 35° in the left lower limb.

(G) A 10-m comfortable walking time for patient 2 was 13.6 s (29 steps) at his initial visit and decreased to 12.5 s (25 steps) after 13 interventions (showing an improvement).

が関与しているという報告や、体幹や上下肢近位筋の協調的運動や姿勢制御に網様体脊髄路が関与しているという報告があるなど、姿勢制御系の改善が重要であると示唆される知見が散見されている³⁻⁷⁾。それらの報告を踏まえると、mediVRカグラ®による座位での微細な姿勢コントロール訓練と関節連関と呼ばれる協調障害へのアプローチはこれらの網様体脊髄路や前庭脊髄路の調節機構に作用し、結果的に本症例の痙縮改善につながった可能性が考えられる。

これまで痙縮に対するリハビリテーション治療は、ストレッチをはじめ筋へのボツリヌス毒素投与や筋腱の外科的治療など筋そのものに対して機械的刺激を与えるものが多く、患者にとっては治療中の疼痛に対する忍耐を求められていた³⁻⁷⁾。また、脊髄や筋に対する

外科的治療は一定期間の入院が必要であり、学童期以降の患者にとっては就学や就労との両立に悩む場合も少なくない。本VRリハは入院が不要であり、疼痛などの侵襲刺激も伴わない治療法であることから、学童期や就労期の脳性麻痺の痙縮治療として自宅や地域の施設にて簡単に取り組むことができる点で有用であると考えた。治療に際しては、筋緊張低下に関する事前説明や、筋緊張低下時に生じる不安に寄り添う姿勢も重要になると思われる。

なお、本報告の限界として、症例3に関しては1度の治療のみの効果であり脳の可塑性を述べるにはあまりにも早すぎる改善効果であり、関節可動域の拡大が改善の主因であるとの考えもあり得る。また、VRリハの持続効果に関しては別途検討が必要である。

結 論

mediVRカグラ®ガイド下脳再プログラミング療法により脳性麻痺患者の痙縮が改善し、座位保持や歩行に関する日常生活動作能力に改善を認めた3例を経験した。VRリハは脳性麻痺患者の痙縮改善効果を発揮できる可能性が示唆された一方で、本報告は3症例の限定的な報告に留まっているため、今後症例数を集積したさらなる検討が不可欠である。

本論文に関連し、開示すべきCOI状態にある企業・組織や団体は以下の通り。

村川雄一郎 報酬額：株式会社mediVR
 仲上恭子 報酬額：株式会社mediVR
 新本啓人 報酬額：株式会社mediVR
 原 正彦 報酬額：株式会社mediVR 株式の利益：株式会社mediVR

文 献

- 1) No author listed : The definition and classification of cerebral palsy. *Dev Med Child Neurol* 49 : 1-44, 2007
- 2) Wimalasundera N, Stevenson VL : Cerebral palsy. *Pract Neurol* 16 : 184-194, 2016
- 3) 長谷公隆 : 痙縮の病態生理. *バイオメカニズム会誌* 42 : 199-204, 2018
- 4) 公益社団法人日本リハビリテーション医学会 : 脳性麻痺リハビリテーションガイドライン第2版, 金原出版, 東京, 2014
- 5) Brown P : Pathophysiology of spasticity. *J Neurol Neurosurg Psychiatry* 57 : 773-777, 1994

- 6) 辻 哲也, 正門由久 : 筋緊張異常. *総合リハ* 28 : 521-528, 2000
- 7) 池田 巧, 栗林正明 : リハビリテーション医療における痙縮治療. *京一日赤医誌* 1 : 4-13, 2018
- 8) Fandim JV, Saragiotto BT, Porfirio GJM et al : Effectiveness of virtual reality in children and young adults with cerebral palsy : a systematic review of randomized controlled trial. *Braz J Phys Ther* 25 : 369-386, 2021
- 9) Lopes JBP, Duarte NAC, Lazzari RD et al : Virtual reality in the rehabilitation process for individuals with cerebral palsy and Down syndrome : A systematic review. *J Bodyw Mov Ther* 24 : 479-483, 2020
- 10) 原 正彦, 村川雄一郎, 新本啓人 : Virtual Reality技術を用いた回復期リハビリテーション医療の未来. *臨床リハ* 31 : 1226-1232, 2022
- 11) 村川雄一郎, 原 正彦 : VR技術を用いたリハビリテーション医療の工学的理論背景. *リハビリテーションエンジニアリング* 37 : 122-126, 2022
- 12) Yamaguchi T, Miwa T, Tamura K et al : Temporal virtual reality-guided, dual-task, body trunk-balance training in a sitting position improved persistent postural-perceptual dizziness : proof of concept. *J Neuroeng Rehabil* 19 : 92, 2022
- 13) Virtual Reality's Potential to Change Medicine : *NHK World Japan Medical Frontier* October 31, 2022 (on-demand online streaming until the end of October, 2023). <https://www3.nhk.or.jp/nhkworld/en/tv/medicalfrontiers/20221031/2050134/>
- 14) Pandyan AD, Gregoric M, Barnes MP et al : Spasticity : clinical perceptions, neurological realities and meaningful measurement. *Disabil Rehabil* 27 : 2-6, 2005

Effects of brain reprogramming therapy via virtual reality technology on spasticity in patients with cerebral palsy

Yuichiro MURAKAWA*, Kyoko NAKAUE*, Keito SHINMOTO**, Masahiko HARA***

*Department of Clinical Rehabilitation, mediVR Rehabilitation Center Osaka

**Department of Clinical Rehabilitation, mediVR Rehabilitation Center Tokyo

***Center for Community-Based Healthcare Research and Education, Shimane University Faculty of Medicine

Spasticity is one of the most frequently observed symptoms in patients with cerebral palsy. Since it leads to impairments in the ability to walk and in the activities of daily living, interventions such as botulinum therapy, selective dorsal rhizotomy, and soft tissue dissection are considered available treatment options. However, non-invasive and effective treatments are required owing to the side effects of the former treatments, including pain and invasiveness. In our study, we encountered three patients with spasticity due to cerebral palsy (an 11-year-old boy, a 26-year-old man, and a 12-year-old boy) who were suc-

cessfully treated with mediVR KAGURA-guided brain reprogramming therapy (virtual reality [VR] rehabilitation). All patients showed reduced spasticity and improved activities of daily living, such as walking. Since VR rehabilitation does not require hospitalization, pain, or other invasive interventions, our findings suggested that it might be effective in treating spasticity in school-aged or working-aged patients with cerebral palsy. Moreover, its ease of implementation at home or at a local facility might be an additional strength. Therefore, further studies with larger sample sizes are required.