

足関節底背屈筋の双方に対する電気刺激が急性期脳卒中患者の歩行速度に及ぼす影響：シングルケースデザイン

伊藤祐輝¹⁾、五十嵐達也²⁾

要旨：【目的】急性期脳卒中患者の麻痺側足関節底背屈筋の双方への電気刺激が及ぼす歩行速度への効果を、シングルケースデザインによって検討した。【方法】対象は初発脳梗塞の60歳代男性。ABC法によるシングルケースデザインにより、1日1時間の理学療法のうち、バランス練習などの理学療法を50分実施し、10分間の歩行練習を各期で変更した。A期は通常歩行練習、B期は麻痺側足関節背屈筋のみに対する歩行神経筋電気刺激装置（Walk Aide：以下WA）、C期はWAに加えて随意運動介助型電気刺激（Integrated Volitional control Electrical Stimulator：以下、IVES）を麻痺側足関節底屈筋に使用した。10m最大歩行速度（以下、MWS）を毎日測定した。【結果】MWSに対するTau-Uの結果、A-B期が0.60（ $p=0.117$ ）、B-C期が0.68（ $p=0.076$ ）、A-C期が0.84（ $p<0.05$ ）であった。【結論】急性期脳卒中患者の麻痺側足関節底背屈筋の双方に対する電気刺激は、通常の歩行練習と比較して歩行速度の改善に寄与する可能性が示唆された。

キーワード：脳卒中・電気刺激・歩行速度

1) 沼田脳神経外科循環器科病院 リハビリテーション課

〒378-0014 群馬県沼田市栄町8番地

2) 文京学院大学 保健医療技術学部 理学療学科

〒356-8533 埼玉県ふじみ野市亀久保1196

（受付日 2024年11月28日／受理日 2025年1月28日）

I. 目的

脳卒中の典型的な症状として、歩行能力の低下があげられる。歩行能力の低下は、日常生活動作（Activities of Daily Living：以下、ADL）の制限や生活の質の低下を招くとされ、生命予後との密接な関連があることが報告されている¹⁻³⁾。そのため、歩行能力の低下に対してリハビリテーションを行うことは重要である。

歩行能力の低下に対する代表的な理学療法として機能的電気刺激（functional electrical stimulation：以下、FES）があげられる。下垂足が生じた慢性期脳卒中患者に対してFESを使用することは、日本脳卒中学会の「脳卒中治療ガイドライン2021」において「行うように勧められる科学的根拠がある（グレードB）」と推奨されている⁴⁾。さらに、亜急性期や慢性期脳卒中患者の腓骨神経に対してFESを行った結果、足関節背屈動作や歩行速度が向上したと

報告されており、FESの有効性は多く報告されている⁵⁻⁷⁾。

従来の研究では下垂足が認められる脳卒中患者に対して単独のFESを行い、足関節背屈動作の改善を図っている研究が散見される。一方、Kesarらは単独のFESでは歩行中の膝関節や足関節などの複合的な動作への効果は乏しい可能性を指摘している⁸⁾。慢性期脳卒中患者を対象に、麻痺側足関節底背屈筋の双方にFESを用いて歩行機能の改善を図った結果、足関節背屈筋への単独FES群と比較し、歩行速度が向上したと報告されている^{9、10)}。急性期脳卒中患者を対象とした報告では、通常歩行群や従来のリハビリテーションと比較した麻痺側足関節底背屈筋の双方へのFESの有効性を効果検証したものがいくつかある^{6、11)}。しかし、これらの報告では、麻痺側足関節背屈筋に対する単独FESとの比較は行われておらず、麻痺側足関節底背屈筋の双方へのFESの有

効性は十分に検証されていない。さらに、麻痺側足関節背屈筋への単独FESと麻痺側足関節底背屈筋の双方へのFESの効果検証を数日間にわたって実施した報告はなく、数日間の介入が歩行速度に与える影響は未だ明らかになっていない。

急性期脳卒中患者の麻痺側足関節底背屈筋の双方に対するFESが歩行速度に効果をもたらすのであれば、脳卒中理学療法の介入方針の意思決定に貢献する知見となり得る。我々は、麻痺側足関節底背屈筋への継続的なFESの使用は、足関節背屈筋や底屈筋への単独の使用と比べて、歩行速度をより改善させるという仮説を立てた。今回、急性期脳卒中患者の麻痺側足関節底背屈筋の双方に対してFESを用いて、歩行速度の改善効果をシングルケースデザインによって検証した。

Ⅱ. 対象

対象は、右放線冠梗塞と診断された60歳代男性であった。既往歴は脱腸の手術歴と高血圧であった。病前は2人暮らしで、ADLは自立されており、農家として勤めていた。現病歴として入院前日の作業中に構音障害と左上下肢の脱力感が出現し、様子を見ていたが症状の改善が認められなかったため入院となった。図1に入院時の頭部Magnetic Resonance Imaging（以下、MRI）を示す。MRIより右放線冠領域に高信号が認められた。入院日の翌日よりリハビリテーションが開始され、理学療法、作業療法、言語聴覚療法が各1時間ずつ、毎日約3時間行われた。

11病日の理学療法所見として、Brunnstrom Recovery Stage（以下、BRS）は上肢Ⅱ、手指Ⅱ、下肢Ⅳであり、左上下肢に運動麻痺を認めていた。Fugl-Meyer Assessment Lower Extremity（以下、

FMA-LE）は26点であり、感覚機能は12点と正常であった。筋緊張の評価指標であるModified Ashworth Scale（以下、MAS）は麻痺側の背屈にて1+であった。動的バランスの指標であるMini-Balance Evaluation Systems Test（以下、Mini-BESTest）は20点、体幹機能評価であるTrunk Impairment Scale（以下、TIS）は16点であった。歩行は、左上下肢の運動麻痺の影響により、麻痺側立脚後期でのtoe offの不足、麻痺側遊脚期での下垂足や骨盤の挙上動作による足部クリアランスへの代償動作が認められていた。歩行能力を示すFunctional Ambulation Category（以下、FAC）は3点、主訴は「脚が上手く前に出ない」であった。Mini Mental State Examination（以下、MMSE）は30点であり、認知機能は保たれていた。

本症例と類似した慢性期脳卒中患者の歩行様式に対して、麻痺側足関節底背屈筋の双方へFESを行うことは歩行速度の改善に有効とされている。そのため、急性期脳卒中患者である本症例においても歩行速度の改善に寄与する可能性があると考えた。

Ⅲ. 方法

症例のタイムラインを図2に示す。介入効果の検証には、ABC法によるシングルケースデザインを用いた。使用機器として随意運動介助型電気装置（Integrated Volitional control Electrical Stimulator：以下、IVES〔OG技研社製〕）と歩行神経筋電気刺激装置ウォークエイド®（Walk Aide：以下、WA〔Innovative Neurotron ics社製〕）を用いて理学療法を行った。1時間の理学療法のうち50分間は筋力増強練習、バランス練習、歩行練習などの通常介入を実施し、残りの10分間はA期からC期に異なる方法にて歩行練習を実施した。A期は通常歩行練習を10分、B期は麻痺側足関節背屈筋に対し

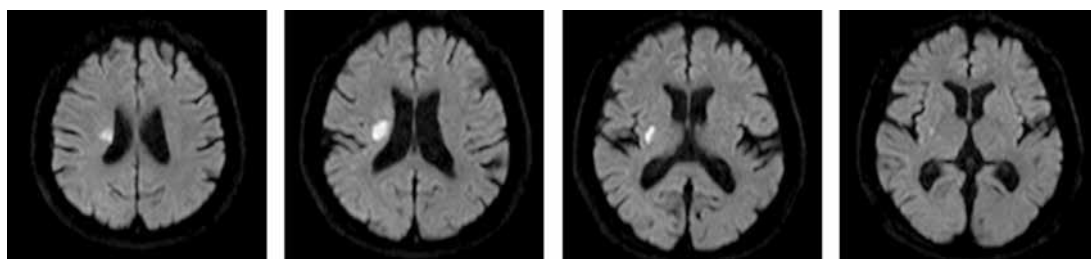


図1 症例の入院時の頭部MRI（拡散強調画像）

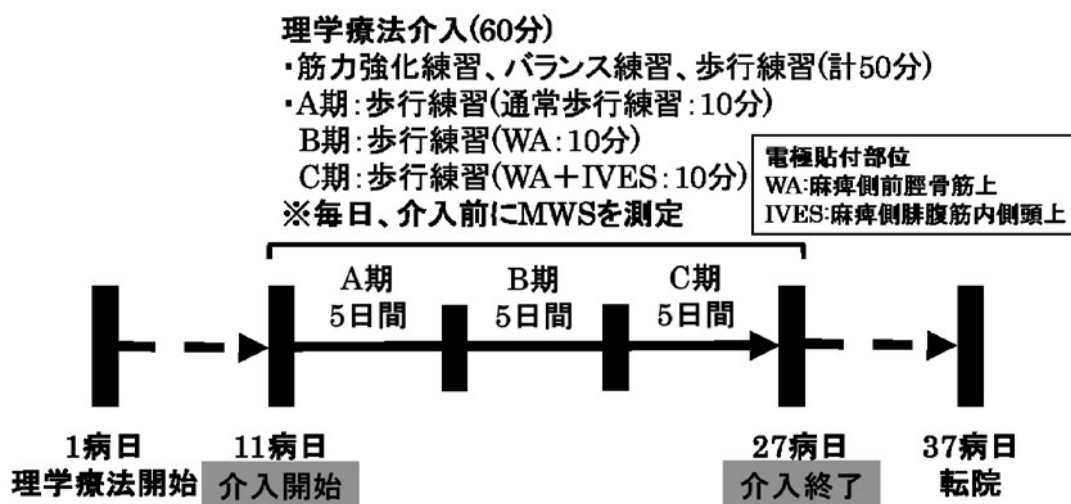


図2 症例のタイムライン

MWS; Maximum Walking Speed, WA;Walk Aide,
IVES; Integrated Volitional control Electrical Stimulator

てWAを使用した歩行練習を10分、C期はB期の介入内容に加え、麻痺側足関節底屈筋に対してIVESを併用した歩行練習を10分実施した。毎日の歩行練習は症例の快適な歩行速度で行った。時間内で連続した歩行を行い、自覚的疲労に応じ、適宜休憩を入れた。

WAは、表面電極システムであり、下腿の腓骨頭付近に巻き付ける構造である。内部には表面電極やバッテリー、傾斜センサーが含まれており、傾斜センサーモードやハンドスイッチモードなどの電気刺激方法がある。本介入ではハンドスイッチモードを使用した。ハンドスイッチモードは手動で電気刺激を行い、検者が被験者の遊脚期に合わせて足関節背屈筋（前脛骨筋上）に電気刺激を行った。2015年にBethouxらは脳卒中片麻痺患者495名を対象にWAとAFOの効果をRCT研究で比較した結果、両群ともに歩行速度の改善を認めたことを報告している¹²⁾。さらに、WAは本邦においても有用性のエビデンスが報告されている^{4, 13)}。電気刺激条件は、電流強度は感覚閾値以上、最大許容強度とした。周波数は25Hz、パルス幅は100 μ sであった。

IVESは、急性期から在宅まで、患者の状態や症状に応じて多様に対応できる「パワーアシストモード」、「外部アシストモード」、「トリガーモード」、「外部トリガーモード」、「ノーマルモード」、「センサトリガーモード」の6つの治療モードを搭載している。

本介入ではパワーアシストモード（以下、PAモード）を使用した。PAモードは刺激電極から常に対象筋の随意筋電量をモニタリングし、安静時には収縮閾値以下の強度で、随意収縮が検出されると、それに比例した電気刺激を与えることができる治療モードである。亜急性期脳卒中患者にIVESを用いた報告として、従来のリハビリテーション群と比較して、麻痺側下肢筋力や歩行速度が向上したと報告されている¹⁴⁾。本症例では麻痺側足関節底屈筋（腓腹筋内側頭上）に対して電気刺激を行った。電気刺激条件は、電流強度は感覚閾値以上、最大許容強度とした。周波数は20Hz、パルス幅 $50 \pm 5 \mu$ sの双方向矩形波の3回繰り返し出力にて実施した。

各対象筋の電極貼付部位は、伊橋らの方法¹⁵⁾を参考に運動点を研究代表者が探索後、アルコール綿で清拭し、電極貼付部位に水性ペンで印を付け、電極貼付部位が変化しないように実施した。測定項目は、10m最大歩行速度（10-meter Maximum Walking Speed：以下、MWS）で、毎日の理学療法を始める直前に1度測定した。10m歩行試験やMWSは信頼性、妥当性ともに十分な検証がなされている¹⁶⁻²²⁾。本研究でのMWSの計測時には、FESや歩行補助具は使用せず測定を行った。Mini-BESTestはシングルケースデザインの前後に測定した。

解析はFingerhutらのチャートに沿い、A期の有意な傾向がないことを確認し、online Tau-U

calculator²³⁾を用いた(有意水準:5%)。本研究ではMWSの効果検証を翌日の理学療法開始前に実施していることから、解析においてはA期を13病日から17病日、B期を18病日から22病日、C期を23病日から27病日とし、Tau-Uを求めた。本研究は症例の個人情報とプライバシーの保護に配慮し、十分な説明を行った後に口頭および書面にて同意を得た。また、症例研究を行うにあたりSCRIBEのガイドライン²⁴⁾を参照した。

IV. 結果

対象者は、従来のリハビリテーションやFESを用いた歩行練習とともに研究期間のすべてのプログラムを遂行し、有害事象は認めなかった。

各期におけるMWSの経時的な変化について図3に示した。MWSは介入前が0.76m/s、A期は0.72m/s、0.76m/s、0.79m/s、0.83m/s、0.92m/s、B期は0.79m/s、0.89m/s、0.85m/s、0.82m/s、0.90m/s、C期は0.94m/s、0.87m/s、0.98m/s、1.02m/s、0.94m/s、介入後が0.91m/sであった。Tau-Uでは、A-B期が0.60($p=0.117$)、B-C期が0.68($p=0.076$)、A-C期が0.84($p<0.05$)であった。

介入前後における評価結果を表1に示した。FMA-LEやTISに関しては介入前後を通して不変であった。主観的变化では介入前の「上手く足が前に

出ない」という訴えから、介入後は「蹴りだして前に進むようになった」と内省に変化を認めた。

V. 考察

今回、急性期脳卒中患者の麻痺側足関節底背屈筋の双方へのFESが歩行速度に及ぼす影響に対してシングルケースデザインを用いて検討した。本症例では、右放線冠梗塞により歩行速度の低下と主観的な歩きづらさを認めた。11病日の歩容では、麻痺側立脚後期のtoe offの不足、麻痺側遊脚期での下垂足や骨盤の挙上動作による足部クリアランスへの代償動作を認めたため、歩行速度が低下していると考えた。慢性期脳卒中患者を対象とした研究において、麻痺側足関節底背屈筋の双方に対して、FESを用いた結果、歩行速度の改善を認めたと報告がある。そのため、急性期脳卒中患者においても麻痺側足関節底背屈筋の双方に対するFESが歩行速度の変化に有用であると考え、本介入の意思決定に至った。

本研究の結果から、麻痺側足関節底背屈筋の双方に対するFESを併用した歩行練習は、電気刺激を用いない歩行練習と比較し、MWSの改善に寄与する可能性が示唆された。Kesarらは慢性期脳卒中患者を対象に麻痺側足関節背屈筋に加えて足関節底屈筋へもFESを実施することでtoe off時の足関節底屈角度が増加し、矢状面床反力や歩行速度が増加するこ

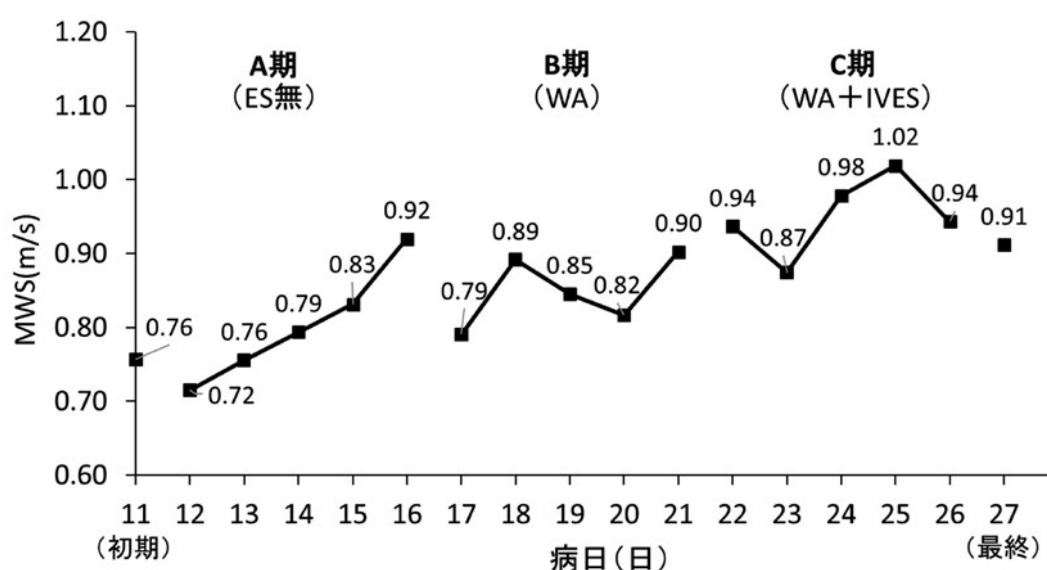


図3 各期の最大歩行速度の結果

ES: Electrical Stimulation, MWS: Maximum Walking Speed,
WA: Walk Aide, IVES: Integrated Volitional control Electrical Stimulator

表 1 介入前後の理学療法評価結果

主訴	介入前 (11 病日)	介入後 (27 病日)
	上手く足が前に出ない	蹴りだして前に進める
BRS (上肢 / 手指 / 下肢)	Ⅱ / Ⅱ / Ⅳ	Ⅲ / Ⅲ / Ⅴ
FMA-LE (点)	26	26
MWS (m/s)	0.76	0.91
FAC (点)	3	4
TIS (点)	15	15
Mini-BESTest (点)	20	24
MAS (麻痺側背屈)	1 +	1 +

※BRS;Brunnstrom Recovery Stage,
FMA-LE;Fugl-Meyer Assessment Lower Extremity,
FAC;Functional Ambulation Categories,
TIS;Trunk Impairment Scale,
Mini-BESTest;Mini Balance Evaluation Systems Test,
MAS;Modified Ashworth Scale.

とを報告している⁸⁾。歩行速度に関しては快適歩行速度と比較して最大歩行速度時のみ腓腹筋内側頭の筋活動量の増加を認めることが報告されている²⁵⁾。本研究においてもこれらの先行研究と同様に、歩行中の筋活動量の増加や関節角度の増大に寄与した可能性が示唆された。また、Mini-BESTestは介入前後で臨床的に意義のある最小差を超える変化を認めており、動的バランスの改善も歩行速度の向上に寄与した可能性が示唆された。

WA単独の歩行練習は電気刺激を用いない歩行練習と比較して、有意なMWSの変化は認められなかった。要因として、本研究ではWAの介入期間が短かった可能性が考えられる。回復期から維持期の脳卒中患者においてはWAを長期間（2ヵ月以上）介入した報告が多く、通常歩行群と比較し有意に歩行速度が上昇したと報告されている²⁶⁻²⁸⁾。急性期脳卒中患者においてはWAの短期間（3週間）の介入では通常歩行群やプラセボ群と比較し歩行速度に有意性は認められなかったと報告されている⁶⁾。松元らは、WAの使用に際して、使用前に約3日間の慣れる期間を設けることで、その後の介入で高い満足度とAFOと同等の優れた歩容の改善や歩行耐久性などの即時効果が得られることを報告している²⁹⁾。本研究ではWAを使用したB期の介入期間は5日間と短期間であったことに加え、介入前に慣れの期間を設けていなかったため、有意な改善を認めなかった可能性が考えられた。

本研究にはいくつかの限界がある。まず、麻痺側

足関節底背屈筋の双方に対するFESを併用した期間は、電気刺激を用いない期間と比較し、MWSの変化に有意な差を認めたが、WA単独の期間とは有意な差を認めていないため、WA単独使用の期間の持ち越し効果も影響していた可能性がある。今回の結果では、麻痺側足関節底背屈筋への併用が、足関節背屈筋への単独使用と比べて変化がないことに留意する必要がある。もう1点は単一事例での検討であったことである。本研究では麻痺側足関節底背屈筋の双方に対してFESを用いており、どのような症例に有効であるか、また、どのような症例には有効ではないかなど明らかとなっていないため、今後検討していく必要がある。3つ目は筋電図や動作分析装置を用いていないことである。本研究の対象は急性期脳卒中患者であり、今回の結果が機能回復による変化なのか、あるいは機能代償による変化なのかは十分に検討できなかった。そのため、今後は筋電図や動作分析装置などを用いて、より詳細な病態解釈や介入効果のメカニズムを検討する必要がある。

VI. 結論

本研究は、急性期脳卒中患者の麻痺側足関節底背屈筋の双方への電気刺激が及ぼす歩行速度への効果を、シングルケースデザインによって検討した。本研究の結果、通常歩行練習と比較して、麻痺側足関節底背屈筋の双方に対して電気刺激を行うことで、MWSの改善を認めた。このことから、急性期脳卒

中患者の麻痺側足関節底背屈筋の双方に対する電気刺激は、通常の歩行練習と比較してMWSを改善させる可能性が示唆された。

VII. 付記

本研究において開示すべき利益相反 (Conflict of Interest : COI) はない。

VI. 参考文献

- 1) Arlene Schmid, Duncan, et al. : Improvements in Speed-Based Gait Classifications Are Meaningful. *Stroke* 38 : 2096-2100, 2007.
- 2) 高根 和希、平澤 直己・他 : 自宅退院した急性期脳卒中患者の健康関連QOLと身体機能およびADLに関する検討. *理学療法科学*34 : 661-665, 2019.
- 3) Studenski S, Perera S, et al. : Gait speed and survival in older adults. *JAMA* 305 : 50-58, 2011.
- 4) 小川 彰・他 (編) : 日本脳卒中協会 脳卒中ガイドライン委員会 : 脳卒中治療 ガイドライン 2015. 協和企画、東京 : 263-264, 2015.
- 5) Robbins SM, Houghton PE, et al. : The therapeutic effect of functional and transcutaneous electric stimulation on improving gait speed in stroke patients : a meta-analysis. *Arch Phys Med Rehabil*, 87 : 853-859, 2006.
- 6) Yan T, Hui-Chan C, et al. : Functional electrical stimulation improves motor recovery of the lower extremity and walking ability of subjects with first acute stroke : a randomized placebo-controlled trial. *Stroke* 36 : 80-85, 2005.
- 7) Sabut SK, Sikdar C, et al. : Restoration of gait and motor recovery by functional electrical stimulation therapy in persons with stroke. *Disabil Rehabil*32 : 1594-603, 2010.
- 8) Kesar TM, Perumal R, et al. : Novel patterns of functional electrical stimulation have an immediate effect on dorsiflexor muscle function during gait for people poststroke. *Phys Ther*90 : 55-66, 2010.
- 9) Kesar TM, Perumal R, et al : Functional electrical stimulation of ankle plantarflexor and dorsiflexor muscles : effects on poststroke gait. *Stroke*40 : 3821-7, 2009.
- 10) Y. Dong, et al. : Hybrid and adaptive control of functional electrical stimulation to correct hemiplegic gait for patients after stroke. *Frontiers Bioeng. Biotechnol.* vol. 11, Aug. 2023.
- 11) 久保田 雅史、山村 修・他 : 急性期脳梗塞患者に対する歩行中の機能的電気刺激治療が歩容および内側感覚運動皮質のヘモグロビン濃度へ及ぼす即時的効果. *理学療法学*. 第41巻第1号 : 13 ~ 20頁、2014.
- 12) Bethoux F, Rogers HL, et al. : Long term follow-up to a randomized controlled trial comparing peroneal nerve functional electrical stimulation to an ankle foot orthosis for patients with chronic stroke. *Neurorehabil Neural Repair*29 : 911-922. 2015.
- 13) Matsumoto S, Shimodozono M, et al : Rationale and design of the therapeutic effects of peroneal nerve functional electrical stimulation for Lower extremity in patients with convalescent poststroke hemiplegia (RALLY) study : study protocol for a randomised controlled study. *BMJ Open* ; 9 : e026214. 2019.
- 14) 林 翔太、五十嵐 達也・他 : 随意運動介助型電気刺激を用いた筋力トレーニングと歩行練習が軽症急性期脳卒中患者の運動麻痺や歩行機能に及ぼす影響: 準ランダム化比較試験での検討. *理学療法科学*35 : 885-891, 2020.
- 15) 網本 和、菅原憲一 (編) : 標準理学療法学 専門分野 物理療法学. 医学書院、東京 : 100-112, 2013.
- 16) Liston RA, Brouwer BJ : Reliability and validity of measures obtained from stroke

- patients using the balance master. ArchPhysMedRehabil 77 (5) : 425-430, 1996.
- 17) Bohannon RW : Comfortable and maximum walking speed of adults aged 20-79 years : Reference values and determinants. Age and ageing 26 : 15-9, 1997.
 - 18) Bohannon RW, SMITH J, et al : Deficits in lower extremity muscle and gait performance among renal transplant candidates. Archives of Physical Medicine and Rehabilitation, 76 : 547-551, 1995.
 - 19) Bohannon RW, Walsh S : Nature, reliability, and predictive value of muscle performance measures in patients with hemiparesis following stroke. Arch Phys Med Rehabil. 73 : 721-725, 1992.
 - 20) Fransen M, Crosbie J, et al : Reliability of gait measurements in people with osteoarthritis of the knee. Phys Ther 77 : 944-953, 1997.
 - 21) 村田伸、忽那龍雄・他：最適歩行と最速歩行の相違（GAITRiteによる解析）. 理学療法科学 19 : 217-222, 2004.
 - 22) 内山 靖、小林 武・他：臨床評価指標入門. 共同医書出版、東京 : pp127-133, 2003.
 - 23) Joelle Fingerhut, Xinyun Xu, et al. : Selecting the proper Tau-U measure for single-case experimental designs: Development and application of a decision flowchart. Evidence Based Communication Assessment and Intervention, 2021.
 - 24) Parker RI, Vannest KJ, et al. : Combining nonoverlap and trend for single-case research: Tau-U. Behav Ther 42 (2) : 284-99, 2011.
 - 25) 中玉利 一輝、二宮 省悟・他：異なる歩行速度におけるtrailing limb angleと腓腹筋内側頭の筋活動量の関係. 理学療法科学 39 (4) : 180-183, 2024.
 - 26) Hwang D-Y, Lee H-J, et al. : Treadmill training with tilt sensor functional electrical stimulation for improving balance, gait, and muscle architecture of tibialis anterior of survivors with chronic stroke : A randomized controlled trial. THC. 23 (4) : 443-452, 2015.
 - 27) Bethoux F, Rogers HL, et al. : Long-term follow up to a randomized controlled trial comparing peroneal nerve functional electrical stimulation to an ankle foot orthosis for patients with chronic stroke. Neurorehabil Neural Repair 29 (10) : 911-922, 2015.
 - 28) Stein RB, Chong S, et al. : A multicenter trial of a footdrop stimulator controlled by a tilt sensor. Neurorehabil Neural Repair. 20 : 371-379, 2006.
 - 29) 松元 秀次：リハビリテーション機器の未来：脳卒中患者の歩行障害に対するウォークエイドの有効性. 脳卒中 42 (1) : 29-36, 2020.