

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 6 月 13 日現在

機関番号：11301

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K16390

研究課題名(和文) 弾性力を利用した剛性調整型足関節装具と股関節装具による片麻痺患者の歩行再建

研究課題名(英文) Improvement of gait performance by the combination of stiffness-adjustable ankle and hip orthosis which have the property of elasticity

研究代表者

関口 雄介 (Sekiguchi, Yusuke)

東北大学・大学病院・理学療法士

研究者番号：60535095

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：本課題では大きく分けて2つの研究を実施した。1つ目は、装具を開発するに当たり、脳卒中片麻痺患者の歩行を力学的な視点から動作解析装置を用いて解析した。2つ目は、剛性調整型足関節装具を開発し、既存の剛性調整型股関節装具と合わせて脳卒中片麻痺患者の歩行への効果を検証した。検証した結果、脳卒中片麻痺患者の歩行時の足関節と股関節における剛性と下肢の力学的な協調性の特性が明らかになるとともに剛性調整型装具の歩行への効果が示唆された。本研究の知見は、より効果的で科学的根拠に基づいた装具療法への寄与が期待できる。

研究成果の概要(英文)：In the research project, two experiments were conducted. Firstly, we analyzed the kinetic data during gait in patients with hemiparesis to develop the orthosis. Secondly, the ankle orthosis that can control joint stiffness was developed. Then, we examined the effect of the ankle orthosis and hip orthosis on gait in patients with hemiparesis. In the results, the characteristics of ankle and hip stiffness and kinetic coordination in lower limb during gait and the effect of the ankle and hip orthosis on gait in patient with hemiparesis were clarified. The findings may contribute to the evidence-based and more effective orthotic treatment.

研究分野：歩行解析

キーワード：脳卒中片麻痺 歩行 動作解析 足関節 股関節 装具 stiffness

1. 研究開始当初の背景

脳卒中片麻痺患者の日常生活の中でも主要な移動動作である歩行は重要な動作であるが、実際に再び地域社会で自立し歩行可能な片麻痺患者は全体の60%という報告がある¹⁾。リハビリテーション医療の発達により優れた装具がある中で、未だ地域社会で歩行が自立した片麻痺患者が少ない。これは、更なる装具の開発の必要性を示唆している。片麻痺患者の歩行における推進力の低下の要因として麻痺による足関節底屈筋や股関節屈筋の力発揮の低下が挙げられる²⁾。片麻痺患者の歩行を再建するために、麻痺した筋の発揮張力以外の力を有効に発揮出来るかがひとつの鍵となる。その力の一つとして、筋や腱、若しくは装具が伸張されることによって生じる弾性力が重要となる。弾性力は筋や腱を含む関節の剛性や装具の剛性に影響される。健常者の歩行においては、先行研究において、立脚期の背屈の最終域に底屈方向の剛性を増加させ生じた弾性力がプッシュオフ時に底屈方向の力発揮に利用されることが示唆されている³⁾。一方で、片麻痺患者は立脚期の背屈の最終域に足関節底屈筋の筋活動が低下していることが指摘されている⁴⁾。これは剛性の低下に伴い弾性力も低下し、歩行時に弾性力を健常者より利用出来ていないことが予想される。しかしながら、未だ、片麻痺患者の歩行中における股関節や足関節の剛性の特性については、明らかとなっていない。

健常歩行の立脚期において足関節底屈方向や股関節屈曲で発生する力の発揮は互いに協調しており、歩行時の推進において重要な役割を担っている⁵⁾。片麻痺患者においては、大腿、下腿、足部の運動学的な協調は健常者と比較し特異的であることが指摘されているが、下肢の関節間の運動学的な協調については検討がなされていない⁶⁾。片麻痺患者は麻痺側下肢の推進力の低下が問題となり、歩行能力が低下する。下肢の関節間の運動学的な協調を検討すると、片麻痺患者の歩行時における推進の障害のメカニズムについて、より明確になる可能性がある。

片麻痺患者の股関節と足関節に剛性を調整出来る装具を装着した歩行について検討した先行研究は、過去にない。また、近年、下肢の運動を補助するロボットスーツが開発されている。機能的に優れた機器と思われるが、価格が高値であることや、簡易的に装着することが難しいという問題もあり、十分に普及するに至っていない。我々は、歩行の動作解析の研究結果を元に低価格で、剛性が生じる角度や剛性の量の調整が可能な装具を開発することを目標としている。足関節背屈や股関節伸展の最終可動域で抵抗が加わる、剛性が調整可能な継手としてカムバネ関節機構

(図1)を使用する。カムバネ関節機構を制

作し、世界初の剛性の調整を可能にした足関節、股関節装具を協同して開発する。

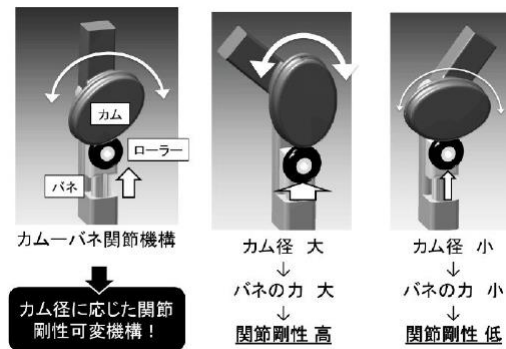


図1. カムバネ機構

2. 研究の目的

本研究では、三次元動作解析装置を用いて片麻痺患者の歩行中における足関節、股関節の剛性と下肢の関節間の運動学的な協調の特性を明らかにする。

剛性の調整可能な装具を開発する。更に開発した足関節と股関節装具の単体と、その組み合わせでの、片麻痺患者の歩行パフォーマンスへの効果を調べる。

3. 研究の方法

(1) 足関節背屈の剛性の特性

対象は、脳卒中片麻痺患者 21 名 (平均年齢 56 ± 10 歳) と年齢、身長や体重に差が無い健常者 10 名とした。歩行の測定は 3 次元動作解析装置 (MAC3D ; Motion Analysis 社製) と床反力計 4 枚 (90cm×60cm ; アニマ社製)、無線筋電計を用いて行った。全対象者は歩行補助具を使用せずに 7m の歩行を行った。歩行の解析では、足関節の角度とモーメントの値から立脚期の足関節背屈の剛性を解析し、その他に最大足関節パワーとモーメント及び歩行速度、歩行の距離時間因子を求めた。各筋の筋電図データより主動筋である足関節底屈筋と拮抗筋である前脛骨筋の共同収縮のパターンを評価するため、立脚中期における共同収縮のパラメーターを算出した。

(2) 股関節伸展の剛性の特性

脳卒中片麻痺患者 18 名 (平均年齢 53 ± 12 歳)、年齢、身長や体重に差が無い健常者 10 名を対象とした。測定方法は、(1) と同様である。股関節の運動学的パラメーターと、歩行の代表的パラメーターを算出し、歩行中の股関節伸展の剛性は、股関節の角度とモーメントの値から算出した。

(3) 足関節背屈と股関節伸展の剛性の分類

脳卒中片麻痺患者 49 名 (平均年齢 56 ± 11 歳) を対象とした。測定方法は(1)と同様で

ある。足関節背屈と股関節伸展の剛性は、(1)と(2)と同様の方法で算出した。

歩行速度と足関節背屈と股関節伸展の剛性を用いて階層クラスター解析を行い、分類を行った。

(4) 下肢の力学的な協調性

脳卒中片麻痺患者 21 名（平均年齢 57 ± 12 歳）と健常者 12 名（平均年齢 53 ± 10 歳）を対象とした。測定方法は(1)と同様である。

歩行中における下肢の各関節モーメントを用いて主成分分析を行い、各主成分を算出した。算出した主成分と床反力の時系列データとの関連を調べた。

(5) 足関節装具の効果

脳卒中片麻痺患者 11 名（平均年齢 56 ± 9 歳）を対象とした。測定方法は(1)と同様である。

底屈制動の機能を有する足関節装具であるゲイトソリューション(以下、GS)に足関節背屈時に硬さを有し蹴り出し時に足関節底屈方向の補助を担うカムバネ継手を装着した装具（以下、CGS）を開発した。

全対象者は①歩行補助具を使用しない（以下、裸足歩行条件）、②GS を使用、③CGS を使用する条件下にて 7m の歩行を行った。GS の底屈制動の強さ及びカムバネ継手の背屈時の硬さは経験年数 12 年目の理学療法士が歩容から判断し設定した。

各条件下における運動学的及び運動力学的パラメーターを算出した。



図 2. カムバネ継手付き GS

(6) 股関節装具の効果

脳卒中片麻痺患者 9 名（平均年齢 57 ± 6 歳）を対象とした。測定方法は(1)と同様である。全対象者は①歩行補助具を使用しない（以下、裸足歩行条件）、②剛性股関節装具である Acsize（今仙技術研究所）(図 3)を使用する条件下にて 7m の歩行を行った。Acsize の股関節弾性の強さは経験年数 12 年目の理学療法士が歩容から判断し設定した。

各条件下における運動学的及び運動力学的パラメーターを算出した。



図 3. Acsize

(7) 足関節装具と股関節装具の組み合わせの効果

脳卒中片麻痺患者 10 名（平均年齢 55 ± 7 歳）を対象とした。全対象者は①歩行補助具を使用しない（以下、裸足歩行条件）、CGS を使用、③Acsize を使用、④CGS と Acsize を使用する条件下（以下、併用条件）にて 7m の歩行を行った。CGS の底屈制動の強さ及びカムバネ継手の背屈時の硬さ、Acsize の伸展時の硬さは経験年数 12 年目の理学療法士が歩容から判断し設定した。

各条件下における運動学的及び運動力学的パラメーターを算出した。

4. 研究成果

(1) 脳卒中片麻痺患者の歩行中における足関節の剛性の特性

脳卒中片麻痺患者の歩行中の麻痺側立脚中期における足関節の剛性は健常者や非麻痺側より有意に低下していた ($p < 0.05$)。また、麻痺側腓腹筋の筋活動の低下と腓腹筋と前脛骨筋の共同収縮と有意に相関していた ($r = 0.63, p < 0.05$)。一方で健常者の剛性は高く、相反抑制による前脛骨筋と腓腹筋との筋活動と相関していた ($r = 0.63, p < 0.05$)。本研究の結果から立脚中期における足関節の剛性は拮抗筋と主動作筋による協調された相反神経支配で制御され、相反神経支配が障害された片麻痺患者は立脚中期における麻痺側足関節の剛性が低下することが示唆された。片麻痺患者の剛性の特性を明らかにし、その低下したメカニズムを相反抑制支配の視点から解明した点では、今後の装具開発のみならず様々な足関節に対する治療を考慮する上で重要な知見となることが予想される。

(2) 脳卒中片麻痺患者の歩行中における股関節の剛性の特性

片麻痺患者の歩行中の立脚終期における麻痺側股関節の剛性は健常者より有意に高く ($p < 0.05$)、歩行中の股関節屈曲方向の力は健常者と有意な差はなかった。また、麻痺側股関節の剛性が歩行中における股関節屈曲方向の力と有意に相関していた ($r = 0.53, p < 0.05$)。片麻痺患者は安静時の股関節屈曲方向の筋力が低下していることから、歩行中の股関節の剛性が低下した股関節

筋力の代償として歩行中の股関節屈曲方向の力発揮に関わっていることが考えられた。

(3) 脳卒中片麻痺患者の歩行中における麻痺側足関節と股関節の剛性の分類

結果から、片麻痺患者は下記の表 1 に記載された特性を持つ 4 つのグループに分類された。

表 1. 歩行中の剛性に基づいた分類

	歩行中の剛性の特性
グループ 1	ES の足関節剛性が高い
グループ 2	MS の足関節剛性が高い
グループ 3	足関節と股関節の剛性が低下
グループ 4	足関節の剛性は低下し、 股関節の剛性が高い

ES：立脚初期

MS：立脚中期

このように麻痺側下肢関節における剛性の特性に基づいた分類は、グループ毎に明確に治療を行うべき剛性の特性を示しており、装具の選定やその他の治療を行う上でより有用な分類となり得ることが考えられる。

(4) 脳卒中片麻痺患者の歩行中における下肢の運動力学的協調性の特性

脳卒中片麻痺患者の歩行中における麻痺側下肢の第一主成分は健常者よりも床反力前後方向成分と低い相関関係を示した ($p < 0.05$)。また、第一主成分は、足関節と股関節の関節モーメントと高い関連があった。脳卒中片麻痺患者の麻痺側下肢は、関節間の運動力学的な協調により、推進力は十分に発揮されていないことが明らかとなった。

これまで、片麻痺患者の推進力の低下は足関節底屈方向の力発揮の低下によることが指摘されてきた。本研究の結果からは、推進力の低下は運動力学的なパラメーターによる量的な原因のみではなく、協調性といった質的な原因も関与していることが考えられた。

(1)~(4)の成果に関しては、何れの研究も新規性があり、これまでの脳卒中片麻痺患者の歩行のバイオメカニクスの分野から十分に解明されていない剛性や運動力学的な協調という視点から脳卒中片麻痺患者の歩行の障害像を捉えた。このように検証されたパラメーターは今後、装具のみならず、様々な介入時に検証されるべきパラメーターであることが考えられる。

(5) 脳卒中片麻痺患者の歩行中における股関節装具の効果

歩行速度は股関節装具の条件において裸足歩行条件より大きい値であった ($p < 0.05$)。

股関節装具条件では、麻痺側立脚初期における麻痺側股関節屈曲角度や麻痺側遊脚期における麻痺側膝関節と股関節屈曲角度の

最大値が裸足条件より有意に大きかった ($p < 0.05$)。股関節屈曲方向の最大股関節パワーや最大股関節モーメントとは条件間で有意な差はなかった。

股関節装具である Acsvive は屈曲方向に剛性を有しているため、麻痺側立脚初期や麻痺側遊脚期において、股関節屈曲角度の増大し、連動して膝関節屈曲角度が増大したことが考えられる。しかしながら、本研究で用いた Acsvive は、股関節の力を補助するのに剛性が不十分であった可能性がある。また、比較的麻痺の程度が軽度な 2 名の症例で Acsvive 装着後にストライド長が低下していた。

今後、更なる剛性を有する股関節装具の開発が望まれるが、股関節伸展の剛性を有すると、ストライド長が制限される症例もあり、適応も考慮していく必要がある。

(6) 脳卒中片麻痺患者の歩行中における足関節装具の効果

CGS の条件では、裸足歩行条件より歩行速度、ステップ長、ストライド長が有意に大きい値であった ($p < 0.05$)。

麻痺側立脚終期においては、CGS 条件において裸足歩行条件より麻痺側膝屈曲角度の最大値が有意に大きく、CGS 条件と GS 条件において裸足歩行条件より麻痺側足関節底屈角度の最大値は有意に少なかった ($p < 0.05$)。また、立脚終期の正の麻痺側股関節パワーの最大値は CGS 条件において裸足歩行条件より有意に大きかった ($p < 0.05$)。正の麻痺側足関節パワーの最大値は、GS 条件において裸足歩行条件より有意に低かったが、CGS 条件と裸足歩行条件間には有意な差が認められなかった ($p < 0.05$)。

立脚終期において、CGS では、GS 同様に底屈制動の機能があるが、カムバネ継手により底屈補助方向の力が発揮された影響で、GS で認められた立脚終期における足関節パワーの減少が生じなかった可能性がある。また、CGS では立脚終期の足関節底屈角度は裸足条件より減少し、膝屈曲角度が増加していた。この結果は、片麻痺患者がロッカーソールを履き歩行中にフォアフットロッカーが生じた結果、立脚終期の膝屈曲角度が増加したとする先行研究と同様の結果であった⁷⁾。GS においては立脚終期の膝屈曲角度の増加はみられなかった。そのため、カムバネ継手を有する CGS においてもフォアフットロッカーが可能となり下腿がより速く前傾し、膝関節屈曲と連動し股関節屈曲方向の股関節パワーが増加した可能性がある。更に股関節パワーの増加がステップ長、ストライド長を増加させ、歩行速度を増加させたことが予想される。

このような歩行速度を増加させるメカニズムは当初予想していなかった。当初は CGS の弾性力により歩行中の足関節パワーを増強させることを予想した。予想とは異なり、足関節パワーが増強しなかった理由として、開

発した CGS の弾性力が小さかった影響もある。しかしながら、CGS の少ない弾性力により補助により、股関節屈曲方向のパワーが増強した。本研究の結果は底屈方向の少ない力の補助により歩行速度を増加させるメカニズムの存在を示唆しており、今後の装具開発に当たり、重要な知見となった。

(7) 脳卒中片麻痺患者の歩行中における足関節装具と股関節装具の組み合わせの効果

CGS 条件と併用条件では麻痺側ステップ長及びストライド長、歩行速度が裸足条件より有意に増加した ($p < 0.05$)。

底屈方向に弾性を有する CGS や併用条件においてフォアフットロッカーが可能となり麻痺側立脚終期で下腿の前方への回転の加速度が有意に増加し ($p < 0.05$)、下腿の前傾と連動して麻痺側立脚終期の膝関節屈曲と股関節屈曲方向の角加速度が有意に増加していた ($p < 0.05$)。麻痺側股関節方向の角加速度の増加は、麻痺側ステップ長を増加させる要因となった可能性がある。一方で、併用条件、Active 条件においては、股関節装具が股関節屈曲方向の速い動きを阻害したため、股関節屈曲方向の角加速度に有意な増加がみられなかった可能性がある。また、双方の条件において麻痺側遊脚期の股関節屈曲角度は有意に増加していたが ($p < 0.05$)、ステップ長は併用条件のみ有意に増加していた ($p < 0.05$)。CGS を装着していた併用条件では足部のクリアランスが確保されるため麻痺側ステップ長が増加した可能性がある。

また、裸足条件での麻痺側立脚期における最大股関節屈曲モーメント ($r = -0.66$, $p < 0.05$) と足関節底屈モーメント ($r = -0.87$, $p < 0.05$) が併用条件の歩行速度の増加率と有意な相関が認められた。一方で CGS 条件の歩行速度の増加率は裸足条件での最大足関節底屈モーメントのみに有意な負の相関が認められた ($r = -0.86$, $p < 0.05$)。

以上の結果は、CGS と併用条件における歩行速度への効果のメカニズムを示唆するとともに、歩行時の下肢の運動力学的パラメーターから装具の適応の判断が可能となることを示唆している。具体的には、歩行中の麻痺側股関節屈曲モーメントが低下している症例には、装具の併用が適応となり、麻痺側足関節底屈モーメントのみが低下している症例には、CGS が適応となる可能性がある。

本研究の成果は、世界で初めて併用条件による脳卒中片麻痺患者の歩行速度への効果、及び装具の適応を明らかにしたことが挙げられる。本研究の結果から新たな Active と CGS の併用による脳卒中片麻痺患者の歩行に対する有効性を示したことで、装具療法の治療の新たな選択肢が増えた。また、CGS や併用条件により歩行速度を増加させる症例の特徴を捉えたことで、客観的な装具の適応の判断において一助となる可能性がある。

<引用文献>

- ① Lord SE, McPherson K, McNaughton HK, Rochester L, Weatherall M, Community ambulation after stroke: how important and obtainable is it and what measures appear predictive?, Arch Phys Med Rehabil 85 巻, 2004, 234-239
- ② Olney SJ, Griffin MP, Monga TN, McBride ID, Work and power in gait of stroke patients, Arch Phys Med Rehabil 72 巻, 1991, 309-314
- ③ Ishikawa M, Komi PV, Grey MJ, Lepola V, Bruggemann GP, Muscle-tendon interaction and elastic energy usage in human walking. J Appl Physiol 99 巻, 2005, 603-608
- ④ Lamontagne A, Malouin F, Richards CL, Locomotor-specific measure of spasticity of plantarflexor muscles after stroke, Arch Phys Med Rehabil 82 巻, 2001, 1696-1704
- ⑤ Sadeghi H, Sadeghi S, Prince F, Allard P, Labelle H, Vaughan CL, Functional roles of ankle and hip sagittal muscle moments in able-bodied gait, Clin Biomech 16 巻, 2001, 688-695
- ⑥ Chow JW, Stokic DS, Intersegmental coordination of gait after hemorrhagic stroke, Exp Brain Res 233 巻, 2015, 125-135
- ⑦ Farmani F, Mohseni-Bandpei MA, Bahramizadeh M, Aminian G, Abdoli A, Sadeghi-Goghari M, The Influence of Rocker Bar Ankle Foot Orthosis on Gait in Patients with Chronic Hemiplegia, J Stroke Cerebrovasc Dis 25 巻, 2016, 2078-2082

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 2 件)

- ① Yusuke Sekiguchi, Takayuki Muraki, Dai Owaki, Keita Honda, Shin-Ichi Izumi, Regulation of quasi-joint stiffness by combination of activation of ankle muscles in midstances during gait in patients with hemiparesis, Gait and Posture, 査読有, 62 巻, 2018, 378-383
DOI:10.1016/j.gaitpost.2018.03.042.
- ② Yusuke Sekiguchi, Takayuki Muraki, Naofumi Tanaka, Shin-Ichi Izumi, Relationship between activation of ankle muscles and quasi-joint stiffness in early and middle stances during gait in patients with hemiparesis, Gait and Posture, 査読

有, 42 卷, 2015, 348–353
DOI:10.1016/j.gaitpost.2015.04.020.

〔学会発表〕(計 8 件)

① Yusuke Sekiguchi, Takayuki Muraki, Dai Owaki, Keita Honda, Shin-Ichi Izumi, Characteristics of gait pattern based on ankle and hip stiffness during gait in patients with hemiparesis due to stroke, Gait and Clinical Movement Analysis Society 2017 Annual conference, 2017 the USA, Utah

② Yusuke Sekiguchi, Takayuki Muraki, Dai Owaki, Kenichiro Fukushi, Noriyoshi Hiroi, Takeo Nozaki, Keita Honda, Shin-Ichi Izumi, Effect of unilateral hip orthosis stiffness on gait in healthy individuals, Gait and Clinical Movement Analysis Society 2017 Annual conference, 2017 the USA, Utah

③ 大脇 大、関口 雄介、本田 啓太、広井 典良、福司 謙一郎、野崎 岳夫、石黒 章夫、出江 紳一、Spring-cam 機構を用いた可変剛性足関節装具、ロボティクス・メカトロニクス講演会、2017 日本、福島

④ 関口 雄介、大脇 大、本田 啓太、広井 典良、福司 謙一郎、野崎 岳夫、出江 紳一、弾性調整型股関節装具と足関節装具の組み合わせが脳卒中片麻痺患者の歩行に及ぼす効果について、第 38 回バイオメカニズム学術講演会、2017 日本、大分

⑤ 関口 雄介、大脇 大、本田 啓太、広井 典良、福司 謙一郎、野崎 岳夫、出江 紳一、カム-バネ継手付きゲイトソリューションが脳卒中片麻痺患者の歩行パフォーマンスに及ぼす効果について、第 33 回日本義肢装具学会学術大会、2017 日本、大分

⑥ 関口 雄介、大脇 大、本田 啓太、広井 典良、福司 謙一郎、野崎 岳夫、出江 紳一、弾性股関節装具が脳卒中片麻痺患者の歩行パフォーマンスに及ぼす効果について、第 33 回日本義肢装具学会学術大会、2017 日本、東京

⑦ Yusuke Sekiguchi, Dai Owaki, Keita Honda, Shin-Ichi Izumi, Characteristics of kinetic coordination in lower limb during gait in patients with hemiparesis, Gait and Clinical Movement Analysis Society 2016 Annual conference, 2016 the USA, Tennessee

⑧ 鈴木 裕太郎、関口 雄介、本田 啓太、出江 紳一、脳卒中片麻痺患者の歩行中にお

ける股関節の硬さが歩行に及ぼす影響について、第 14 回日本神経理学療法学会学術集会、2016 日本、仙台

6. 研究組織

(1) 研究代表者

関口 雄介 (SEKIGUCHI, Yusuke)
東北大学 大学病院 理学療法士
研究者番号：60535095

(2) 研究協力者

大脇 大 (OWAKI, Dai)
東北大学大学院工学系研究科

本田 啓太 (HONDA, Keita)
東北大学 大学病院 理学療法士