

20020299

厚生労働科学研究費補助金
障害保健福祉総合研究事業

脊髄損傷者用歩行補助装具の開発

平成14年度 総括・分担研究報告書

主任研究者 太田 裕治

平成15（2003）年 4月

目 次

I. 総括研究報告 脊髄損傷者用歩行補助装具の開発 太田 裕治	-----	1
II. 分担研究報告 中澤 公孝	-----	4
III. 研究成果の刊行に関する一覧表	-----	6
IV. 研究成果の刊行物・別刷	-----	8

脊髄損傷者用歩行補助装具の開発

主任研究者 太田 裕治 お茶の水女子大学生生活科学部

研究要旨

本研究では脊髄損傷者（対麻痺者）の立位歩行の実現を目的に、市販装具である Advanced Reciprocal Gait Orthosis をベースに、股・膝関節回転にパワーアシスト機構を組込むことで、より簡便に利用可能な動力化歩行装具の開発を行った。さらに開発装具を踏まえ傷害部位の様々な脊髄損傷者を対象に装具歩行を行い、VICON システムによる3次元動作解析、歩行エネルギー評価などを行った。その結果、パワーアシスト機構により歩行労力は減少し、歩行能力、生理機能も向上することがわかり、立位歩行は脊髄損傷者の健康管理・維持増進に極めて有効であることが示された。次年度以降は、本動力化装具を利用して、脊髄神経内歩行パターンジェネレータのメカニズムに関して検討を行うとともに、両関節運動を長期間継続した場合の可塑的变化に関する検討を行う。

分担研究者

中澤公孝・国立身体障害者リハビリテーションセンター研究所・運動機能系障害研究部・神経筋機能系障害研究室・室長

A. 研究目的

本研究の目的は脊髄損傷者（対麻痺者）が日常的に利用可能な簡便な歩行補助装具を開発することである。具体的には、①近年、研究進展の著しい2足歩行ロボット技術を応用することで、股・膝関節回転にパワーアシスト機構を組込んだ動力化歩行装具を開発する、②装具歩行により両関節運動を長期間継続的に行うことで脊髄神経内歩行パターンジェネレータの再建を目指す。またこれを促進させるメカニズムを装具に組み込み2足歩行再建プログラムとして完成する、の2点を行う。

現在までに脊髄損傷者は移動の手段として主に車椅子を利用してきた。しかし車椅子のみに頼り歩行を放棄すれば、長期的に呼吸循環機能、筋量、骨密度、免疫、消化機能等は低下し、また、心理的側面（視線の高さの違い）も問題となる。これに対して、現在までに脊髄損傷者の歩行を可能とする補助装具が多く開発されてきた。しかし、これらはいずれも専門施設でのリハビリテーション訓練を主目的とした装具であり、多大な歩行労力が必要、僅かな段差越えも困難であることが多いことから歩行補助を日常的に実現するには多くの課題が残されている。

本装具開発等により期待される成果としては、①脊損者の安定した日常歩行が可能となり、生理・心理両面での状況の改善、Quality of Lifeの向上、②長期的歩行動作により脊髄機能が再建されれば、より自律的な歩行動作が可能

となり、結果として装具に要求されるパワーアシスト設計仕様はより小さいものとなり安価簡便な装具が提供可能となる、③脊損者の社会参加、就労支援、ノーマライゼーションに貢献、④将来的に脊髄神経の再生技術が実現した場合でも、神経の再接続・学習には相当量の歩行訓練が必要であり本歩行器をそれに利用、などがあげられる。

B. 研究方法

過去に開発された歩行装具の問題点として、膝関節が曲がらないなど関節回転自由度が少ないこと、また、動力手段を持たない為歩きにくく多大な歩行労力を要すること、などを考慮し、ここでは、両者の問題に対し新しいメカニズムを考案した。すなわち、膝関節の回転アシスト（動力化）に関しては、膝関節の裏側に5節リンク機構を組み込み、リンク機構の一端をリニアアクチュエータにより伸縮させることで、膝関節を回転させる方式を採用した。リニアアクチュエータは低イナーシャDCモータ（3042, Faulhaber, German）及びボールネジ（Kuroda Precision Industries Ltd.）を組合せて作成し、屈曲角度は最大で70度とした。このメカニズムを市販装具中、剛性・長期信頼性が高く、交互歩行のためのレシプロ機構を有するAdvanced Reciprocal Gait Orthosis（ARGO）装具に取付けた。取付けに際してはARGO自身が有する膝関節ロック機構を利用し遊脚期以外は膝関節は伸展位置でロック状態を保つようにし安全面に十分注意した。

一方、股関節回転（脚振出しのアシスト化）に関しては、ARGO装具では左右脚はワイヤで連結されており、一方が前に振り出されると他方は後方へ回転する仕組みになっており、ここでのこのメカニズムをリニアアクチュエータに

より前後に動かすことで股関節回転（脚振出し動作）のパワーアシスト化を行った（3557, Faulhaber, German並びにEP150, Asahi Seiko Co. Ltd.）。膝・股関節の両機構とも駆動用電源にはニッケル・水素蓄電池を12本直列接続し、連続1時間程度の使用を可能とした。また両関節の回転操作はユーザ自らが行うものとし、スイッチはクラッチ（杖）の握手部分に設置した。スイッチとモータとの電気的接続は赤外線リモコンとし、ケーブルによる転倒・断線による危険性低減を図った。以上の装具を踏まえて傷害部位の様々な脊髄損傷者を対象に装具歩行を行い、VICONシステムによる3次元動作解析、歩行エネルギー評価などを行った。

（倫理面への配慮）

歩行計測実験は国立身体障害者リハビリテーションセンター研究所にて行うこととし、同研究所及び同病院の研究倫理規定に則り被験者の人権を尊重して行った。特に障害者が被験者となるときは、事前に研究趣旨を十分説明し了解の上実施した。また、研究で得たデータを被験者に伝え、健康管理に役立てる方法を考慮した。

C. 結果ならびに考察

（1）4名の脊髄損傷者（T12, T8, T11, T5）に対して呼吸ガスモニタ（換気流量, V_{O2} , V_{CO2} ）、血中乳酸濃度、心拍計測により装具歩行中の生理量計測を行った。歩行条件は、安静（3分間）＋装具歩行（10分間）＋休息（7分間）とした。以上の計測をパワーアシストの有無で比較検討した。その結果、4例とも血中乳酸濃度の上昇はみられず有酸素運動の範囲内であったこと、アクチュエータの有無により歩行速度（運動量）も異なってくるため、単純な比較はできず、被験者群を傷害部位（高位・低位）で分けるなどの工夫が必要と考えられた。

（2）股関節アシスト機構を用い、脊髄損傷者の歩行運動の損傷部位依存性に関して検討した。脊髄損傷の場合、身体機能に現れる麻痺などの制限は傷害部位に依存することから、有効な歩行アシストを得るには、各損傷レベルごとに適切な歩行補助機構が必要となる。具体的には、脊髄損傷者4名（男、損傷部位：T5, T8, T11, T12）を装具歩行計測の被験者とし、股関節動力化装具を装着させ約6mの区間の有杖歩行を行った。歩行計測は5回ずつ行った。被験者及び杖先に18個のマーカを貼り付け、VICON370に基づき3次元画像解析することで歩行動作を計測し、損傷部位による歩行動作の

違いを見るため、歩行速度、ストライド長、肩・骨盤回旋角度、頭頂左右動揺、上半身前傾等を解析した。結果として、損傷が高位になるにつれ上半身の動きを多用しつつ歩行することが分かった。これは特にT5被験者において顕著であり、歩行負担の増加が懸念された。また装具の動力化の有効性は高位損傷者で特に確認することができた。一方、訓練とともにこれらの値も劇的に向上することがわかった。

（3）脊髄損傷者の装具歩行時における愁訴として前腕筋疲労が多く聞かれることから、この上肢負担につき調べた。すなわち装具歩行時にはバランス維持の為に常に両杖で体幹部を支持する必要があり、さらに歩行時には体幹部を持ち上げかつ回旋運動することで下肢振出しを実現するため、これには多大な上肢の筋負担が伴うと考えられる。被験者は前項同様、T5, T8, T11, T12の4名とした。上肢負担の測定には床反力計を用いた。その結果、杖にかかる力の時間的変化は2峰性となることがわかった。即ち、杖接床期前期の第1峰は上体の前方転倒を防止する役割（身体を垂直に保とうとする制動力）となり、第2峰（杖接床期後期）は前方移動のための推進力として利用されると考えられる。ただし、後者に関しては損傷高位の場合には推進力として有効に作用していないことがわかり、別途、推進機構が必要と考えられた。

なお本研究の中心テーマは、“残存脊髄神経内の歩行パターンジェネレータが歩行運動によりどのような影響を受けるか”、に関してであり、それについては、本年度、以下の新たなデバイスを別途開発し、来年度に検討を行う予定である。すなわち、上で述べた動力化歩行装具においてパワーアシスト量（速度、トルク等）を自在に変化させようよう、DCモータからACサーボモータへとアクチュエータの改変を行った。同時に、その改良アクチュエータを用いた歩行訓練による歩行パターンジェネレータの長期可塑的变化を調べる必要があり、そのために、歩行訓練中に任意のタイミングで足関節に強制反射刺激の入力が可能なAFO（Ankle Foot Orthosis）も開発した。これにより脊髄反射系の特性を歩行訓練中に調べることが可能となる。

D. 結論

本年度は膝・股関節のパワーアシスト機構（直流モータおよびリンク機構）を開発し、市販装具であるARGOに取付け、各種損傷高位の脊髄損傷者を対象に歩行実験を行い、基礎的歩

行運動データ（含む経時変化）を収集した。具体的な測定項目としては、バイコンシステムによる3次元運動計測、歩行エネルギー消費量計測である。

その結果、以下の結果概要が得られた。

(1) パワーアシスト機構により脊損者の歩行労力は減少し、歩行能力、生理機能も向上することがわかった。これは高位損傷者で顕著であった。また、訓練とともに歩行能力は著しく改善されることもわかり、立位歩行は脊髄損傷者の健康管理・維持増進に極めて有効であることが示された。

(2) 3次元運動解析システムにより広範囲にわたる脊髄損傷者の歩行動作を解析し、損傷部位により歩容が大きく異なること、また上肢負担が大きいことなどを定量的に解析した。これらの定量的データに基づき、損傷部位に柔軟に対応できる装具開発に役立てることが可能となる。

(3) 先行研究を通じ、外部強制的に歩行運動を与えることで麻痺筋からさまざまな筋活動が生じることを見出しており、これを本研究では歩行パターンジェネレータの再賦活と位置付けている。この特性（外部から与える運動条件と引き起こされる筋活動の関連）を調べるために、パワーアシスト量を自由に変化させうるACモータへの改良を行った。また歩行訓練中に任意のタイミングで足関節への強制反射刺激の入力が可能なAFOを開発した。

(4) 膝関節のアシスト機構に関しては、安全確保のためには踵接地時に膝関節が完全に伸展していなければならない。現行のアクチュエータではややパワー不足であるため、モータ動力の増加を図る必要がある事がわかった。さらに、安全性を十分確認した上で、股関節アクチュエータとの連動を検討する必要がある、等を確認した。

E. 健康危険情報 分担研究報告参照。

F. 研究発表（学会発表）

Ohta Y, Yoshida M, Shinoya Y, Matsumoto A, Kawashima N, Nakazawa K, Yano H. A gait orthosis for paraplegics with a motor-driven knee joint. 4th World congress of Biomechanics. CD-ROM, 2002.

Ohta Y, Yoshida M, Kawashima N, Nakazawa K. A gait orthosis for paraplegics with a motor-driven hip joint. International Society for Postural and Gait research 2003, 142, 2003.

吉田ももこ, 河島則天, 中澤公孝, 矢野英雄, 太田裕治. 脊髄損傷者の歩行装具と理論値の比較検討. 第18回ライフサポート学会大会講演予稿集, 130, 2002.

田口大介, 河島則天, 太田裕治, 山本紳一郎, 米田隆志, 中澤公孝, 赤居正美. 脊髄損傷者の損傷高位に応じた歩行装具の開発. 人と福祉を支える技術フォーラム2003, 5, 2003.

河島則天, 太田裕治, 谷崎雅志, 中沢公孝, 赤居正美, 矢野英雄. 装具歩行のkinematicsの違いが脊髄損傷者の麻痺筋活動に及ぼす影響. 第18回日本義肢装具学会, 268-269, 2002.

松元明弘, 田中聡, 秋元俊成, 太田裕治. 受動的方向の概念を導入した歩行補助機械の設計に関する考察. 2003年度精密工学会春季大会, 511, 2003.

G. 知的財産権の出願・登録状況

1. 取得特許

特になし

2. 実用新案登録

特になし

3. その他

特になし

脊髄損傷者用歩行補助装具の開発

研究者 中澤公孝（国立身体障害者リハビリテーションセンター研究所）

研究要旨

脊髄損傷者用の交互歩行装具（Advanced Reciprocating Gait Orthosis：ARGO）に膝関節屈曲-伸展動作を実現するための動力機構を装備した。第12胸髄完全損傷者による試歩を行ったところ、通常のARGO使用時の歩行速度、股関節運動を減ずることなく歩行遊脚期における膝関節動作が実現され、この動作に伴って、膝関節の動作に関与する下肢麻痺筋の活動振幅・位相に変化が認められた。本研究の結果は、脊髄損傷者の装具歩行における膝関節動作の実現が、麻痺筋およびそれを支配する脊髄運動ニューロンの活動励起による神経生理学的な効果を生ずる可能性を示唆するものであった。

A. 研究目的

我々はこれまで、脊髄完全損傷者の装具歩行中に、麻痺状態にある下肢の筋群に歩行周期に同調した筋活動（以下、歩行様筋活動）が生じることを報告してきた。本研究では脊髄損傷者用の交互歩行装具（Advanced Reciprocating Gait Orthosis：ARGO）の膝関節部に動力機構を装備し、歩行遊脚期における膝関節屈曲-伸展動作の実現を試みた。装具歩行中に膝関節の動的運動が実現されれば、周囲の筋や関節から脊髄への求心性神経情報にも変化が生じることが予想されるため、上記の歩行様筋活動も変化を示すものと仮定した。すなわち本研究の目的は、脊髄損傷者の装具歩行における歩行遊脚期の膝関節屈曲-伸展動作の実現効果を、麻痺領域に認められる歩行様筋活動の変化の観点から検討することであった。

B. 研究方法

本研究の主旨を理解し、研究参加への同意を得た第12胸髄完全損傷者1名（24歳、受傷後23ヶ月経過）を対象とした。

試作した膝関節屈曲-伸展機構はリニアアクチュエータ（DCモータとボールネジの組み合わせ、電源：充電電池、約14V）の駆動により遊脚期に膝関節屈曲-伸展動作を実現するもので、操作はロフトランド杖のグリップ部に設置した赤外線リモコンによって使用者本人が行った。（以降、改良型ARGO、通常型ARGOと表記）

通常型ARGO、改良型ARGO両装具による実験室内

の自己快適速度での歩行を実施し、ヒラメ筋（SOL）、内側腓腹筋（MGAS）、前脛骨筋（TA）、大

腿直筋（RF）、大腿二頭筋（BF）の各筋より筋EMG活動を記録した。

身体各部位に貼付したマーカの3次元座標データをVICON 370 System（Oxford matrix製）により取得、さらに床面に埋め込まれた3分力床反力計（Kistler社製）上を歩行することにより、床反力を記録した

C. 研究結果

改良型ARGOを用いた歩行では、遊脚期に膝関節の屈曲-伸展動作（膝関節可動域： 31.78 ± 1.92 deg、伸展角速度： 152.36 ± 1.48 deg/sec、屈曲角速度： 204.37 ± 6.24 deg/sec）が実現された。歩行中の股・足関節の動作、床反力には装具間の顕著な差異は認められず、いずれの装具を用いた場合にも前脛骨筋を除く各筋に歩行周期に同調した筋活動（歩行様筋活動）が発現した。このうち、遊脚期における大腿直筋、立脚期における内側腓腹筋に、膝屈曲-伸展動作に伴う活動振幅の有意な増加が認められた（ $P < 0.05$ ）。

D. 考察

脊髄損傷者の長下肢装具を用いた歩行と健常者の歩行の間の最も顕在的な差異は、膝関節の屈曲-伸展動作の有無である。したがってこの点に関しては装具の改良上、比較的多くの視点が注がれているようである。しかしそのうちの殆どは、床面と足底のクリアランス確保、運動効率の改善という運動学的観点からの問題意識に基づくものであり、膝関節動作の実現効果を神経生理学的観点から検討しようとする本研究とは立場を異にする。

本研究で認められた改良型ARGO、通常型ARGO両装具による歩行中の筋活動の差異は、膝関節の屈曲-伸展動作の有無に起因することは明

らかであり、膝関節動作に伴う関節および筋・腱の固有受容器からの求心性神経入力が発現機序の一端を担うことは間違いないものと考えられる。歩行中の膝関節屈曲-伸展動作を神経生理学的観点から捉えると、麻痺筋の筋長変化や関節運動による求心性神経情報の発現、さらには脊髄運動ニューロンの活動喚起等、脊髄損傷後の身体機能低下の抑止に貢献する可能性の高い、様々な変化を生ずるものと考えられる。上記の両装具間の歩行様筋活動の差異は、膝関節動作による求心性神経情報の変化が脊髄運動ニューロンの興奮性に変化を及ぼした可能性を示す事象であり、膝関節動作の実現によって麻痺領域の神経活動を促し得ることを示す重要な所見であった。

脊髄損傷者の多くは運動機能麻痺によって立位・歩行からの隔離を余儀なくされるが、このことは生来課されてきた重力負荷の喪失、とりわけ骨や筋・腱組織に対する mechanical stress の著しい減少を意味する。併せて完全損傷の場合には随意的に筋を活動させることが困難となることから、脊髄損傷後の麻痺領域の筋・骨萎縮の進行は極めて早い。これらの事実から、装具歩行によって再び麻痺領域に対する mechanical stress を課す、あるいは運動ニューロンの活動喚起によって麻痺筋に反射性筋活動を発現させることが可能であれば、脊髄損傷後の身体機能を維持する重要な方策と成り得るものと考えられる。

E. 結論

本研究で認められた両装具における麻痺下肢の歩行様筋活動の差異は、膝関節屈曲-伸展動作の実現に伴う求心性神経情報の変化に応じて、脊髄神経回路が可変的に応答する事実を示す結果であった。また、装具歩行動作の変化が麻痺領域の神経活動に変化をもたらす事実は、装具の適切な改良によって脊髄損傷者の麻痺領域への神経生理学的な効果を生ずる可能性を示唆するものであり、装具の改良に新たな視座を与えるものと考えられる。

F. 健康危険情報

本研究の実施に際しては転倒等の危険性に十分に配慮し、転倒予防のための牽引装置下での歩行を実施、動作習熟後も後方からの幫助により、

転倒防止に備えた。また、立位姿勢保持による起立性低血圧の発現、褥瘡好発部位に対して適切な防止策、処置を講じた。

G. 研究発表

1. 論文発表

河島則天、太田裕治、谷崎雅志、中澤公孝、赤居正美 脊髄損傷者の装具歩行における膝屈曲-伸展動作付与の試み 日本義肢装具学会誌 19(3), 2003 (印刷中)

河島則天、太田裕治、谷崎雅志、中澤公孝、赤居正美、矢野英雄 装具歩行の kinematics の違いが麻痺下肢筋活動に及ぼす影響 義肢装具学会誌:18; 268-269, 2002

Kawashima N, Sone Y, Nakazawa K, Akai M. and Yano H. Energy expenditure during walking with weight bearing control orthosis in thoracic level of paraplegic patients. Spinal Cord (in press)

2. 学会発表

河島則天、太田裕治、谷崎雅志、中澤公孝、赤居正美、矢野英雄 装具歩行中の kinematics の違いが麻痺下肢筋活動に及ぼす影響 第18回義肢装具学会(福岡):2002.11

河島則天、谷崎雅志、田口大介、太田裕治、中澤公孝、赤居正美 脊髄損傷者の損傷高位と装具歩行パフォーマンスの関連 第19回義肢装具学会(仙台):2003.11(演題登録済)

田口大介、河島則天、太田裕治、中澤公孝、赤居正美 脊髄損傷者の損傷高位に応じた歩行装具の開発-股関節動力補助機構の試作- 第19回義肢装具学会(仙台):2003.11(演題登録済)

H. 知的財産権の出願・登録状況

1. 取得特許

特になし

2. 実用新案登録

特になし

3. その他

特になし

研究成果の刊行に関する一覧表

書籍

著者氏名	論文タイトル名	書籍全体の編集者名	書籍名	出版社名	出版地	出版年
中澤公孝	身障者の歩行(脊髄損傷者の歩行)	金子公有、福永哲夫編著	バイオメカニクス	杏林書院	東京	2003(出版予定)
中澤公孝	「11」脊髄損傷のニューロリハビリテーション	矢部京之助、大築立志、笠井達哉編著	入門運動神経生理学-リハビリテーションからスポーツまで-	市村出版	東京	2003(出版予定)

雑誌

発表者氏名	論文タイトル名	発表誌名	ページ	出版年
Ohta Y, Yoshida M, Shinoya Y, Matsumoto A, Kawashima N, Nakazawa K, Yano H	A gait orthosis for paraplegics with motor-driven knee joint.	4 th World congress of Biomechanics.	CD-ROM	2002
Ohta Y, Yoshida M, Kawashima N, Nakazawa K	A gait orthosis for paraplegics with a motor-driven hip joint.	International Society for Postural and Gait research 2003	142-143	2003
Kawashima N, Sekiguchi H, Miyoshi T, Nakazawa K, Akai M	Inhibition of the human soleus H-reflex during standing without descending commands.	Neuroscience Letters	In press	2003
Kawashima N, Sone Y, Nakazawa K, Akai M, Yano H	Energy expenditure during walking with weight bearing control orthosis (WBC) in thoracic level of paraplegic patients.	Spinal Cord	In press	2003
吉田ももこ, 河島則天, 中澤公孝, 矢野英雄, 太田裕治	脊髄損傷者の歩行装具と理論値の比較検討	第18回ライフサポート学会大会講演予稿集	130	2002
田口大介, 河島則天, 太田裕治, 山本紳一郎, 米田隆志, 中澤公孝, 赤居正美	脊髄損傷者の損傷高位に応じた歩行装具の開発	人と福祉を支える技術フォーラム2003	5	2003
河島則天, 太田裕治, 谷崎雅志, 中澤公孝, 赤居正美, 矢野英雄	装具歩行の kinematics の違いが脊髄損傷者の麻痺筋活動に及ぼす影響	第18回日本義肢装具学会(福岡)	268-269	2002

松元明弘, 田中聡, 秋元俊成, 太田裕治	受動的方向の概念を導入した歩行補助機械の設計に関する考察	2003年度精密工学会春季大会学術論文集	511	2003
河島則天, 太田裕治, 谷崎雅志, 中沢公孝, 赤居正美, 矢野英雄	装具歩行の kinematics の違いが脊髄損傷者の麻痺筋活動に及ぼす影響	義肢装具学会誌	印刷中	2003
河島則天, 太田裕治, 谷崎雅志, 中澤公孝, 赤居正美	脊髄損傷者の装具歩行における膝関節屈曲-伸展動作付与の試み	義肢装具学会誌	印刷中	2003

20020299

以降は雑誌/図書に掲載された論文となりますので、
P.6-P.7の「研究成果の刊行に関する一覧表」をご参照ください。