

短下肢装具による脳卒中片麻痺患者の歩行機能改善のバイオ メカニクスの解析

Biomechanical analysis of corrective functions of plastic Ankle-Foot orthoses
used by hemiplegic patients

代表研究者 東京医科歯科大学医用器材研究所助手 宮崎 信次
Instructor, Inst. for Med. and Dent. Eng., Tokyo Med. and Dent. Univ.
Shinji MIYAZAKI

協同研究者 東京都補装具研究所主任研究員 山本 澄子
Senior Invest., Tokyo Metro. Prosthetic and Orthotic Res. Inst.
Sumiko YAMAMOTO

中伊豆リハビリテーションセンター・センター長 窪田 俊夫
Director, Nakaizu Rehabilitation Center
Toshio KUBOTA

Corrective functions of plastic Ankle-Foot orthoses (PAFO) used by hemiplegic patients were analyzed by two types of gait analysis systems, *i. e.* a comprehensive accurate gait analysis system capable of measuring limited number of steps and a continuous measurement system with lower accuracy but less encumbrance to subjects. Normative data on five patients were gathered by the comprehensive system and used to establish a computer simulation model of hemiplegic gait with PAFO. Clinical data on a total of 63 patients were collected by the continuous system and new findings that 1) dorsi-flexor flexibility of conventional shoe-horn type PAFO is little functional or even hazardous to the gait at late stance and before toe off, and 2) optimal planer flexor flexibility which allows the ankle to plantar-flex during the period of heel contact to foot flat facilitates the whole body to move smoothly forward during mid-stance, were established by the measurement and computer simulation.

A new type of PAFO of which plantar flexor flexibly and the initial setting angle can be arbitrarily adjusted was designed and fabricated according to the results obtained in the analysis. Its clinical superiority to conventional PAFOs was validated in the gait analysis by the continuous measurement system and by the computer simulation model.

研究目的

人口の高齢化と救命医療技術の発達によって、近い将来我が国において脳卒中の後遺障害をもって生活する人の数は増加の一途をたどると推計されている。後遺症のうち重大なものの一つに片麻痺歩行障害がある。片麻痺の歩行障害に対する工学的対応として、古くから装具が用いられており、近年は特にプラスチック短下肢装具 (Plastic Ankle-Foot Orthoses; PAFO) が多く使用されている。

PAFO は障害者と機械の関わりのうち最も単純なものと考えられるが、多くの患者にとってその効果は顕著なものがある。このように PAFO は片麻痺患者にとって極めて重要なものにもかかわらず、PAFO については破壊との関連で材料と製作法に関する工学的研究はされているが、より本質的な歩行機能の改善がどのような機序によってもたらされているかについてバイオメカニクスの研究はほとんどされていない。そのため、PAFO の処方と適合判定は医師や理学療法士

(PT)の経験とカンに頼るところが多く確固たる指針は定まっていないのが現状である。

このような観点から、我々は数年前から歩行分析の手法を用いてPAFOによる歩行の改善についてのバイオメカニクス的研究を続けてきた。その結果、残存筋力、痙性・関節拘縮の程度との関係で各患者にとって最適なPAFOの底・背屈方向の可撓性があることが明らかになってきた。

こうした経過をふまえて、ここでは全体のプロジェクトの最終段階として、二つの目的をもって研究を進める。第1は、底屈方向と背屈方向の可撓性のある範囲で独立に可変できるPAFOを設計・製作することである。これにより、従来のPAFOで底・背屈可撓性を独立に変えることができなかつたために生じていた膝折れや反張膝などが防止できると期待される。第2の目的は、PAFOを装着した状態での歩行のシミュレーションモデルを作成し、実際にPAFOを製作する前にあらかじめ装具着用の効果や最適な可撓性を推定することができるようにすることである。同時にこのモデルの作成の過程の中で、その中に含まれる最適化基準を適切に選定することにより、装具の適合判定の客観的基準を確立することを目指す。

研究経過

研究は、四つの段階に分かれて行われた。

すなわち

- 1) 実験用可撓性可変プラスチック短下肢装具 (Plastic Ankle-Foot Orthses; PAFOと略記) の設計・製作
- 2) 上記実験用PAFOを用いた歩行計測
- 3) 高精度歩行計測システムによる計測とシミュレーションモデルの作成
- 4) 実用可撓性可変PAFOの設計・製作とその有効性の検証

このうち、1)+2)と3)は並列的に行われ、その結果をまとめて4)が行われた。

研究成果

1) 実験用可撓性可変PAFOの設計・製作

従来我々の研究で用いてきた底・背屈の可撓性が独立に可変である実験用装具は、旧式の金属支

柱付きの短下肢装具を改変して製作していたので、実際のPAFOよりかなり重かつた (おおよそ、550 g; 実際のプラスチック短下肢装具は200-250 g)。ここでは、PAFOの一部を利用しゴムバンドで可撓性を変化させる方式に改め軽量化を図るとともに、可撓性を変えるのに要する時間の短縮を図った。

改変の設計には主として山本が当たり、その実製作については山本の所属する東京都補装具研の製作部門の協力を仰いだ。PAFOとしては、湯の湖式PAFOを基本とし、これを足関節のところを下腿部と足部にいったん分け、プラスチック性単軸継ぎ手で再度結合させる。継ぎ手を跨いで、継ぎ手の前面の下腿部と足部の間にウレタンゴム片を渡すことにより、現行のPAFOの背屈補助可撓性に相当する力を発生させる。同様に、継ぎ手の後面にウレタンゴム片を渡すことによりPAFOの底屈補助可撓性に相当する力を発生させる。背屈補助力・底屈補助力はそれぞれ対応するウレタンゴム片の太さと数をかえることで、所要とされる広い範囲 (おおよそ -20 Nm から +40 Nm) で任意に変えられる。また、装具の初期角度はウレタンゴム片の長さを変えることで±10度の範囲で2度刻みで変えられる。あらかじめ必要とされるウレタンゴム片のセットを揃えておくことにより、適当な可撓性と初期角度に設定する時間は2-3分程度に短縮できた。

2) 上記実験用PAFOを用いた歩行計測

上記実験用PAFOを用いて、宮崎がすでに開発していた簡易型連続歩行計測装置を基本とし、底・背屈可撓性を種々に変化させて、片麻痺患者の歩行がどのように変化するか、延べ65名の被験者につきおおよその傾向をとらえ、その結果につき統計的解析を行った。

簡易型連続計測装置は (VTR画像処理部を除き)すでに完成しており、a)全体の実験計画の策定とb)市販の8 mmVTR画像を応用した簡易VTR画像処理部のハードとソフトの開発を宮崎が担当した。ここで作成したVTR画像処理部は、患者に特別の標点などを付けずに、市販の8 mmVTRで患者の歩行を撮影し、各フレーム毎

にパソコンに画像を取り込み、簡易型連続計測装置の信号との同期をとりつつ、マウスにより関節点をピックアップして歩行中の足関節、膝関節、股関節の角度、および上体の前傾角を計算するものである。処理にかなりの人手と時間を要し、計測精度はそれほど高くはないが、患者にほとんど計測上の制約を与えない点が優れている。

患者での測定に当たっては、患者の選定を窪田が行い、測定は宮崎・山本およびもう一人の介助者が東京より中伊豆リハビリテーションセンターに向き行った。統計的解析の計画は宮崎が策定し、VTR情報の処理とともにアルバイトの助力を得た。

計測結果の全般的傾向と統計解析の結果の検討は、窪田・宮崎・山本の全員で行った。その結果、片麻痺のPAFOには、i) 遊脚期およびheel-contactからfoot flatに至るまでに、背屈筋群の低下を補助するための背屈補助力のみが必要で、ii) 現行のPAFOで立脚中期から後期に発揮される底屈補助力は離床直前のtoe-clearanceを阻害するだけで、通常教科書的に言われていた立脚中期の底屈筋群の補助にはほとんど役に立っていないことが明らかにされた。

3) 高精度歩行計測システムによる計測とシミュレーションモデルの作成

シミュレーションモデルの第一次入力とするためのデータを得る目的で、東京都補装具研究所に設置されている高精度歩行計測システムを、中伊豆リハビリテーションセンターに一部移設し、センターの検査職員の協力の下に、片麻痺患者5名につき歩行力学データと運動学的データの同時測定を行い、基礎歩行データとした。

シミュレーションモデルについては、健常歩行を想定した第一次モデルをすでに作成してあったが、宮崎が担当して、ここでは片麻痺の装具歩行に適用できるようにモデルの改良を行った。このモデルは、従来の諸家のシミュレーションモデルが両脚支持期における空間的拘束条件を満たすために一部モデルの厳密性を犠牲にしていたのに対し、数学的記述法を工夫することにより、単脚支持期と同様の厳密性を持ちかつそれと連続性を保

証した形で数値解が求まる方式を開発した。

このモデルは矢状面内の2次元運動モデルであるので、上に述べた基礎歩行データを2次元に写像変換し、モデルへの入力とした。ある特定の機械的特性を持つPAFOを装着したときの基礎歩行データを基にシミュレーションを行い、ついでモデル上で装具の機械的特性をある範囲で変えたとき、関与する筋群の発生する筋力が不変だと、どのように歩容が変化するかをシミュレートした。さらに、機械的特性が変わったとき、適切な歩容を実現するため、筋力がどのように変調を受けるかをシミュレートした。

以上で、第2次シミュレーションモデルを完成させ、2)で述べた、8mmVTR画像より抽出した歩容データをモデルに入力し、多数の片麻痺患者につき装具の機械的特性(底・背屈方向可撓性と初期背屈角)を変えたときの歩容の変化をシミュレートし、最適な底・背屈方向可撓性と初期角度につきある種の規則性を認めた。すなわち、1)一般にPAFOにより発生される底屈補助方向の補助モーメントは底屈筋群そのものの発生するモーメントに比べるとかなり小さく、従来言われていたの反し、実際には有効な底屈補助になっていないこと、2)むしろ、底屈モーメントは離床直前のtoe-clearanceには悪影響があること、したがって、全体としては底屈補助モーメントは不必要であり、PAFOとしては背屈方向の角度変位に関しては機械的にフリーにするのが望ましいと結論された。

一方、背屈補助モーメントについては、接地後のheel contactからfoot flatのあいだに足関節の底屈が滑らかに起こるようなモーメントがその後の立脚中期の体重の前方への移行にとって望ましいことが分かった。

4) 実用可撓性可変PAFOの設計・製作とその有効性の検証

2), 3)の結果に基づき、実際に片麻痺患者が使用できる底・背屈可撓性独立可変型プラスチック短下肢装具の設計・製作を行った。1)で使った実験用プラスチック装具の、プラスチック単軸継ぎ手を外観と耐久性の観点から市販のJ社製ポ

リウレタンゴムのたわみ継ぎ手に変更しほか、製作過程上の作業手順の入れ換えを一部行った。

30名の片麻痺患者に付き足型をとり、業者に委託して実用PAFOのプロトタイプモデル30個を作成した。その有用性を調べるため、2)で述べた連続計測システムと8mmVTRにより歩行計測を行った。その結果、麻痺の回復程度の余り良くない・あるいは中程度の患者では、患者が従来使っていたプラスチックPAFOに比べ明らかに歩行機能が改善された。麻痺の回復程度のより良い残り5名に関しては背屈フリーにした改良点あまり表れず、製作の容易さ・耐久性を考えるとあえて今回開発したPAFOを使う利点はないのではないかと考えられた。

今後の課題と発展

シミュレーションモデルでは、当初装具を実際に製作する前にあらかじめ装具装着の効果や最適な底背屈方向補助モーメントの値を推定することをも目指していたが、臨床的に静的に計られる残存筋力と実際に歩行したときに働き得る筋力の値はかなり違う例もあり、この点は成功しなかった。今後は静的残存筋力と動的筋力とのギャップを埋めることが必要とされるが、これはかなり医学的色彩の濃いものであり、どこまで追求できるか疑問なしとしない。

研究機関に限られていたため、「研究成果」の4)では新しく開発したプラスチックPAFOの有効性を短期間(約1ヶ月)で確かめるにとどまった。今後は、長期のケースフォローを通じて、耐久性の検証と長期的使用による医学的利点(半張による膝関節の痛みの発生の低減など)の検証を行っていく必要がある。

一方、今後の発展としては、今回開発したシミュレーションモデルが一般性が高いことを利用して、他の歩行障害における訓練効果の予測、異なる外科的手技の効果予測など「仮想訓練」、「仮想手術」などへの応用が期待される。

発表論文リスト

以上の研究成果は下記形で発表された。

[学会などの発表]

- 1) 宮崎信次ほか:ゼロモーメント法による関節モー

メントの測定精度の簡易な検定,第31回日本ME学会大会,5月,東京(1992),p.293.

- 2) 海老名政彦ほか:可撓性と足関節初期角度が調節可能な計測用下肢装具の開発,第8回日本義肢装具学会大会,10月,名古屋(1992),p.85.
- 3) 山本澄子ほか:短下肢装具の可撓性と初期角度が片麻痺者の歩行に及ぼす影響,第8回日本義肢装具学会大会,10月,名古屋(1992),p.85.
- 4) 山本澄子ほか:短下肢装具の可撓性の評価法,第8回日本義肢装具学会大会,10月,名古屋(1992),p.108.
- 5) S. Miyazaki *et al.*: Biomechanical analysis of corrective functions of ankle-foot orthoses used in hemiplegic patients—Experimental approach, Special Lecture at University of Virginia, Nov., Charlottesville, U.S.A. (1992).
- 6) S. Miyazaki *et al.*: Biomechanical analysis of corrective functions of ankle-foot orthoses used in hemiplegic patients—Theoretical approach, Special Lecture at Beaver College, Nov., Philadelphia, U.S.A. (1992).
- 7) 宮崎信次ほか:ゼロモーメント法による歩行時の関節モーメントの計測精度の推定—典型的な歩行計測システムを例として—;第13回バイオメカニズム学術講演会,11月,東京(1992),pp.41-42.
- 8) 山本澄子ほか:短下肢装具の可撓性と初期角度が片麻痺患者の歩行に及ぼす影響,第13回バイオメカニズム学術講演会,11月,東京(1992),pp.179-182.
- 9) 宮崎信次ほか:正常裸足歩行時にMP関節に働くモーメント,第13回バイオメカニズム・シンポジウム,7月,栃木(1993).
- 10) 山本澄子ほか:片麻痺用プラスチック短下肢装具の機械的特性が歩行に及ぼす影響,第13回バイオメカニズム・シンポジウム,7月,栃木(1993).
- 11) S. Miyazaki *et al.*: Evaluation of the overall error in joint moments obtained by a typical gait analysis system: A case report, 2nd Symp. on 3D analysis of human movement, July, Poitiers (1993).
- 12) S. Miyazaki *et al.*: Effects of ankle angle and dorsi/plantar flexibility of plastic ankle-foot-orthoses on hemiplegic gait, 16th Intn'l Soc. Biomech. Congress, July, Paris (1993).

[論文発表]

- 1) 山本澄子ほか:片麻痺患者の歩行の連続計測—短下肢装具の矯正モーメントの影響を中心として—,バイオメカニズム,12,319-329(1992)第3回バイオメカニズム学会論文賞受賞.
- 2) S. Miyazaki: Simple and practical method for evaluating overall measurement error of joint

- moments obtained by force plate and position sensing device, *Frontiers of Med. Biol. Engng.*, 4, 257-270 (1992).
- 3) S. Miyazaki *et al.*: A system for continuous measurement of ankle joint moment in hemiplegic patients wearing ankle-foot orthoses, *Frontiers in Med. Biol. Engng.*, 5, 215-232 (1993).
 - 4) S. Yamamoto *et al.*: Comparative study of mechanical characteristics of plastic AFOs, *J. Prosth. Orth.*, 5, 73-82 (1993).
 - 5) S. Yamamoto *et al.*: Quantification of the effect of dorsi/plantar flexibility on hemiplegic gait: Preliminary report, *J. Prosth. Orth.*, 5, 88-94 (1993).
 - 6) S. Yamamoto *et al.*: Quantification of the effect of the mechanical property of ankle-foot-orthoses on on hemiplegic gait, *Gait and Posture*, 1, 1-8 (1993).
 - 7) S. Yamamoto *et al.*: Measurement accuracy of position sensing system using semiconductor camera, *Gait and Posture*, submitted for publication.
 - 8) S. Miyazaki *et al.*: Moment acting at the metatarsophalangeal joints during normal bare-footed level walking, *Gait and Posture*, 133-140 (1993).