

メカトロニクスを導入した短下肢装具の開発研究

- 粘性抵抗可変の継手を有する短下肢装具の試作と歩行実験 -

Introducing Mechatronic Technology into Ankle-Foot Orthosis Joint

- Experimental gait wearing an AFO with Variable Joint Viscosity -

赤澤 康史 中川 昭夫 松原 裕幸 中村 俊哉

AKAZAWA Yasushi, NAKAGAWA Akio, MATSUBARA Hiroyuki, NAKAMURA Toshiya

野村 毅 田中 正夫 (大阪大学大学院)

NOMURA Tsuyoshi, TANAKA Masao

キーワード :

バイオメカニクス、リハビリテーション、片麻痺、
装具設計、足継手、MR 流体

Keywords:

biomechanics, rehabilitation, hemiplegia,
orthosis design, ankle joint, MR-fluid

Abstract:

Ankle-foot orthoses (AFOs) are essential tools for considerable part of patients with gait disorder. It is obviously understood that mechanical characteristics of an AFO joint directly effects the wearer's walking function. In this study aiming to improve gait with AFOs, we have firstly discussed about relationship between hemiplegic ankle joints function and AFO joint characteristics during gait. Then, we developed and examined an AFO ankle joint device using magneto-rheological fluid which rheological behavior could be controlled by changing intensity of magnetic field applied. Using the prototyped metal-upright AFO equipped this joint device with magnet position control mechanism, two hemiplegic volunteers participated in gait experiments where the joint viscosity was intended to be high immediately before heel-off to keep dorsal flexion during swing phase, and to be low at initial stance phase to realize smooth foot-flat motion. The switching operations were done with a wired manual switch by a physio-

therapist as a follower. Although the severer subjects have shown little improvement in gait with the AFO, the other indicated that realized were stable dorsal flexion position during swing and smooth motion during initial stance phase when the viscosity were switched properly.

1 はじめに

中枢性麻痺のために関節のコントロールが随意にできない下肢障害者にとり、装具継手の機能は歩行能力に直結する重要な問題である。切断者が使用する義足においては、歩行速度に合わせ機械特性を変化させる高機能膝継手がインテリジェント義足膝継手を始めとしてすでに市販・使用されている。一方、同じ歩行のためのツールである下肢装具の継手の高機能化については、若干の研究は行われているものの実用に至ったものはなく、油圧を用いて特性調節をマニュアルで行う足継手がようやく実用化されたばかりである。下肢切断者に比して下肢麻痺者の絶対数はかなり多く潜在的需要が比較的大きい、にもかかわらず、装具研究への取り組みは総じて低調と言わざるを得ない。短下肢装具(Ankle-foot orthosis、以下AFO)の場合、メカトロニクス技術の導入により、必要に応じて能動的に足関節モーメントを発生できれば、装具歩行の画期的な進展が期待されるし、受動的であっても、装具足継手特性を歩行に同調して変化させることで従来にない歩容が実現される可能性がある。

本研究では、昨年度までに、磁気により粘性が変化する特殊な流体を用いた継手を設計し、これを組み込むことで力学的特性(抗底屈モーメント)を可変とするAFOを試作した。本報では、その実効性を確認するため、歩行実験を行ったので報告する。

2 MR流体を用いた足継手¹⁾と実験用AFO

2.1 磁気粘性(MR)流体

MR流体は、直径が μm オーダーの強磁性体粒子を溶媒中に均一に分散させたもので、磁気によって粘度が変化するという特徴を持つ。MR流体には発生力が大きく応答時間が短い(10msec未滿)という特長がある。これを作動流体に用い、与える磁場を調節することで回転に対する抵抗を比較的少ないエネルギーで可変とすることが期待できる。本研究では表1のような特性を持つMR流体(Lord、MRF-132AD)を引き続き使用した。

表1 使用したMR流体の物性²⁾

Table 1 Properties of the MR fluid used

Properties	Value/Limits
Base Fluid	Hydrocarbon
Operating Temperature	-40°C to 130°C
Density	3.09 g/cc
Color	Dark gray
Weight Percent Solids	81.64%
Coefficient of Thermal Expansion (calculated values)	Unit Volume per °C
0 to 50°C	0.55×10^{-3}
50 to 100°C	0.66×10^{-3}
100 to 150°C	0.67×10^{-3}
Specific Heat @ 25°C	0.80 J/g°C
Thermal Conductivity * @ 25°C	0.25 - 1.06 w/m°C
Flash Point	>150°C
Viscosity	
Calculated for slope between 800 1/s and 500 1/s at 40°C	0.09 (+/- 0.02) Pa-s.

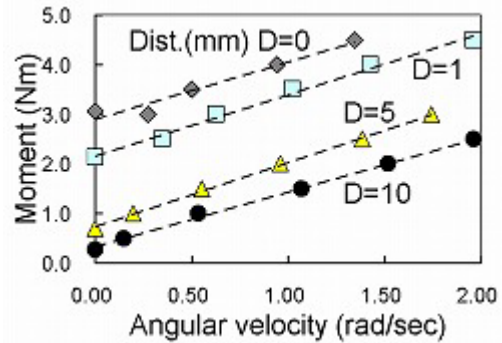
2.2 継手構成と抵抗モーメントの与え方

昨年度報告書で述べたように、ロータリシリンダとウレタンチューブからなる閉回路に前記MR流体を満たした継手主要部とした。チューブの中間部の平行管路(幅3.6mm、長さ10.0mm、深さ0.6mm)に磁場を与えることで流れの抵抗が変化し軸が回転する際の抵抗モーメントを変化させることが可能となる。重錘と滑車による試験の結果、MR流体のビンガム塑性を十分反映した図1(a)のような特性を持つことが確認されている。したがって、例えば、図1(b)のごとく高低二段階に継手粘性を制御することで、遊脚中期の背屈位保持によりトウクリアランスを確保するとともに、踵接地からスムーズにフットフラットへの移行を誘導できると考えられる。さらには、高粘性への切替を、最大背屈角をとる踵離地近傍タイミングで行うことで足先の離床性の改善も期待できる。

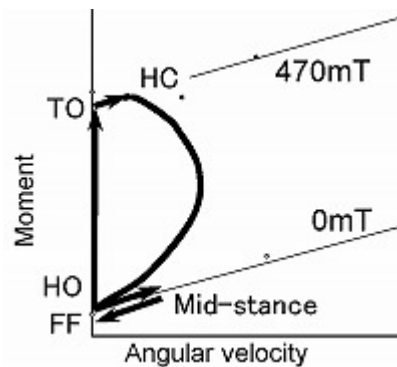
2.3 継手粘性切替機構

絞りに対する磁石位置は、ラジコン用サーボモータ(サワ、ERG-WRX)、マイコン(Parallax、Basic Stamp 2sx)およびソフトウェア(PBASIC)を用いて調節した。モータ軸から30mmの距離に磁石を取り付け、軸を0.52rad(30deg)回転させることで絞りに磁場の影響が生じない距離(10mm)以上となるように設定した。この磁石位置を位置 P_{flex} 、磁石

が最も絞り部に近接する磁石位置を位置 P_{stif} とし、両位置の切替を行う押しボタン式スイッチを準備した。両位置の切替に要する機械的な時間は約0.04秒である。



(a) 継手の回転抵抗特性¹⁾



(b) 二段階粘性切替の例

(TO:Toe Off HC:Heel Contact FF:Foot Flat HO:Heel Off)

図1 継手特性と特性切替の考え方

Fig.1 (a)Resistant moment of the joint¹⁾

(b)Example of viscosity switching sequence



図2 試作した抵抗可変継手付きAFO

Fig.2 Lateral view of the prototyped AFO

2.4 実験用AFO

組み上げた実験用AFOを図2に示す。両側支柱式AFOをベースに、MR継手軸を支柱に、継手筐体をあぶみ部に固定した。外側への張り出しはあぶみより最大70mmと大きい。支柱にCFRP(東名プレース、バーボン)、あぶみに高強度低合金チタン(啓愛義肢材料販売所、KS-100)を用い、さらに継手部のキャップをはずすことに

よって昨年度に比して約22%の軽量化を行ったが、バッテリー(7.2V、750mAh)を含め全体の重量は約1.1kgとなった。これは通常の両側支柱式AFOに比べ、2倍強の重量であるが、装着した健常者の主観により、重量および慣性モーメントとも歩行の支障にならない程度であることを確認した。なお、特性の切替は、装着者の歩行を観察しながら、追従者がワイヤードリモコン(押下中に磁石



図3 継手粘性切替時の歩容(被験者K、一歩行周期分)
Fig.3 A gait cycle of subject K



(a) 踵接地時に継手粘性小

(b) 切替操作が遅れ踵接地時に継手粘性大

図4 継手粘性切替タイミングによる踵接地時~フットフラット時の膝屈曲角の相違

Fig.4 Knee flexion angles difference with switching timing

(a) AFO joint stiffness low at heel contact (b) AFO joint stiffness high at heel contact

が位置 P_{stif} となるモメンタリ方式押しボタンスイッチ)により行うこととし、当 AFO を健常者に装着させ、反復歩行により十分な操作練習を行った。

3 試作 AFO による歩行実験

3.1 被験者

日常的に金属支柱 AFO (背屈 5 度から底屈 0 度までに可動域を制限) を使用しシューホン型への移行を検討中の右片麻痺者 1 名 (被験者 S、50 歳、男性、身長 165cm、体重 60kg、下肢 Br.stage) および日常的にシューホン型 AFO を使用し比較的長距離を歩く右片麻痺者 1 名 (被験者 K、56 歳、男性、身長 167cm、体重 61kg、下肢 Br.stage) にボランティアとして協力を得た。実験にあたり十分に趣旨およびリスクを説明し、本人と担当 PT の了解を得た。担当 PT には被験者直後からの追従と特性切替操作を依頼した。

3.2 被験者足関節特性

文献 3 の方法で各被験者の端座位における足関節背屈剛性を計測した。底背屈 0 度から背屈 5 度における背屈剛性は、被験者 S が 0.34Nm/deg、被験者 K が 0.20Nm/deg であった。したがって 5 度背屈位を保つのに必要なモーメントは、大きい方の被験者 S で 1.7Nm であり、試作足継手の初動モーメント 3.0Nm はこれら被験者の背屈位保持にとって十分大きいと言える。

3.3 歩行実験

2.2 節で述べたように、切替条件は、立脚後期 (踵離地直前を目的) で磁石を位置 P_{stif} に、踵接地直後に位置 P_{flex} に切り替えることとする。約 5 m の歩行路 (訓練室内通路) を特段の指示なく歩行させた。その結果、被験者 S においては、主観的には通常使用 AFO との差は認識できないとのことであったが、当試作 AFO による患側ステップ長が通常使用 AFO に比してわずに大きくなる傾向が見られた。期待された難離床性の軽減についてはほとんど実現されなかった。また、被験者 K においては、歩きやすさについて良好または不変評価の間で一定しなかったが、図 3 に示すごとくステップ長の左右差は小さく、患側遊脚中期のクリアランスも十分、踵接地後の体重移動もスムーズな歩行が観察された。ただし、必ずしもすべてのストライドでこのような歩容が達成されたわけではなかった。

3.4 考察

被験者 S は普段、背屈角が 5 度までの AFO を装着している。踵離地時に 5 度背屈していたとすれば、足関節特性から計算される 1.7Nm は保持可能であるため、難離床性が改善されなかったのは、背屈角不足あるいは装具重量そのものによる影響と考えられる。また、常

用 AFO は底屈しないため、底屈可能な AFO では踵接地時に不安定さを感じるにつながった可能性も指摘される。被験者 K では当該 AFO の機能が反映された歩容を観察することができた。必ずしも安定した結果が得られなかったのは、片麻痺者の不安定性⁴⁾ によるものか、スイッチングが手動で行われることによる微妙な時間のずれによると考えられるが、試行ごとより歩ごとの違いが比較的顕著であったのでスイッチング操作の影響が支配的と推察される。たとえば P_{flex} への切替が遅れることにより図 4 のような通常より大きい膝屈曲が現れたと考えられる。今後、より多段の特性切替のためには、例えば下腿角速度をトリガとする自動切替機構の搭載が必要となる。四段階の切替、すなわち、今回に加え、フットフラット直後にごく短い時間底屈剛性を高くすることで反張膝を防止する機能を持たせることも可能である。

4 おわりに

短下肢装具継手を高機能化することを念頭に、底屈に対する抵抗を 2 段階に変化させる機構を AFO に組み込み歩行実験を行った。個別の装着者に合わせたタイミングと粘性の大きさの決定手法が課題ながら、本研究の機構を用いれば、歩行のさまざまなタイミングで無段階粘性調節が可能である。このようなメカトロニクス機構を装具に導入することで、下肢麻痺者の歩行の改善に役立つと確信する。なお、装具継手には大きさ・重量・音・耐久性について厳しい要求があるため、こうした点も同時に取り組むことで実用モデルに近づけられるものと考えられる。

謝辞 装具特性に関して助言を頂いた障害をお持ちの方、兵庫県立総合リハビリテーションセンター理学療法士諸氏に感謝する。また、MR 流体の入手と利用に関してご教示頂いた岡山理科大学森本正治教授、およびモータ制御回路製作にご協力頂いた(株)デュアル電子工業に謝意を表す。

参考文献

- 1) 赤澤康史、中川昭夫、小西克浩、中村俊哉ほか：「メカトロニクスを導入した短下肢装具の開発研究 - MR 流体を用いた特性可変継手を有する短下肢装具の試作 -」、福祉のまちづくり研究報告集平成 14 年度、pp.176-179、2002
- 2) Lord 社のサイト <http://www.lord.com/>
- 3) 赤澤康史、上松弘幸ほか：「装具継手要件検討のための片麻痺者足関節特性評価」、第 17 回生体・生理工学シンポジウム論文集、pp.127-130、2002
- 4) 山本澄子、海老名政彦、久保茂、川合秀雄ほか：「片麻痺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 11、pp.319-330、1992