
インテリジェント短下肢装具*i*AFOの開発研究

—足継手まわりの底背屈粘弾性試験—

Development of Intelligent Ankle-Foot Orthosis: *i*AFO

—Viscoelasticity test for orthotic ankle joint with MR fluid—

赤澤康史 松原裕幸 中村俊哉 原 良昭

AKAZAWA Yasushi, MATSUBARA Hiroyuki, NAKAMURA Toshiya, HARA Yoshiaki

多賀谷兼介 内藤 尚 田中正夫 (大阪大学大学院)

TAGAYA Kensuke, NAITO Hisashi, TANAKA Masao (Graduate School of Osaka University)

キーワード:

リハビリテーション、片麻痺、装具足継手、底背屈、抵抗モーメント、試験機

Keywords:

Rehabilitation, Hemiplegia, Orthotic ankle joint, Dorsal/Plantar flexion, Resistant moment, Test machine

Abstract:

Ankle-foot orthoses (AFOs) are highly used tools for people with lower limb disability to assist or to limit ankle movement in daily living. It is important for walking design for such patients to grasp mechanical characteristics of AFOs joints, because it directly affects motion of ankle joint and above in walking. In this article, we designed and prototyped a test machine for AFOs with viscoelastic ankle joints. An AFO specimen was the intelligent AFO which we have developed for these years. Before testing, working magneto-rheological fluid and the size of pipe orifice has been modified to expand the range of resistant moment which was generated according to magnetic field intensity. For several selected angular velocity, we tested the AFO and reconfirm Bingham plastic characteristics, and also found the moment was proportional to the angle for the range of each motion starting. It is considered that the angle-dependency generates from other parts of the AFO which is connected with the ankle joint directly.

1 はじめに

短下肢装具は脳卒中片麻痺などにより障害を負った人々の動作を補助（あるいは医療上の必要により制限）する道具として、非常に多く処方・製作され使用されている。しかし義肢と異なり、メカトロニクス技術を利用した高機能継手はいまだ実用化されていない。我々はコンピュータ技術や機能性流体を利用し歩行動作中に特性を変化させられる短下肢装具の実現をめざし数年前より開発に取り組んできた^{1), 2)}。これが平成17年度よりNEDOが実施する人間支援型ロボット実用化基盤技術開発というプロジェクトの一部となり、継手の力学特性や制御ソフトウェア機能の大幅改良が大学や企業を含む開発チームで進められているところである³⁾。

一方、短下肢装具用に市販されている継手部品は多種にわたるが、基本的に弾性要素、一自由度回転軸と角度ストップ、あるいはその組み合わせがほとんどである。最近になって、粘性要素である小型油圧シリンダを採用した製品が登場し普及しつつあるが、固定したニーズを持つユーザーも多く、ますます部品は多様化する傾向と言える。いずれにしても、これまでの短下肢装具処方において論じられることがあまりなかった足継手まわりの速度依存性について議論することは意義深く、そのエビデンスを収集するための環境を整備することは重要である。

そこで、本年度は、継手まわりの回転速度を規定できる試験機を用いて、*i*AFO全体としてどのような力学的特性を持つのか検討する。

なお、上記プロジェクトで同継手機構をMRブレーキ機構と呼称していることから、以後本稿でも同じ名称に統一することとする。

2 装具足継手と構成された装具の特性

足継手製品の部品としての力学的特性は各製造者が設計段階および完成時に十分検討や検証しているものと考えられるが、装具としての力学的特性は公表されていない。それは、装具として成立するには他の部材との組み合わせが必須であり、身体と接するという装具の基本性格上、ある部材の大きさや曲率が異なり結果として力学特性がバリエーションを持つためである。

本研究で用いてきたMRブレーキ機構にしても、単体での特性は把握できていた¹⁾が、一般的な継手付AFOと同様、歩行中にその足部やあぶみなどに変形を生じる可能性が高く、その影響は調べていなかった。装具全体の詳細な変形の様子を把握し力学応答のすべてを評価することはできなくとも、歩行中に発生する足関節回りのトルクを推測するためには、少なくとも装具足継手に直結する部品を含んだ足継手まわりの力学特性を知ることが重要である。また広範囲の角速度かつ高精度で回転作用を与えながら特性を評価することも粘性を含む継手部品を調べるには必要である。このようにして得られる特性データは歩行時のMRブレーキ制御の基礎情報となる。

3 装具底背屈粘弾性試験機

3.1 基本コンセプト

AFOがどのように歩行改善に寄与したかを検証するためには、AFOが歩行時に生じる補助モーメントあるいは制動モーメントを推測できる必要がある。本研究では歩行運動の進行方向と最も関係がある底背屈特性に引き続き注目し、実験的に検討する。iAFOの足継手であるMRブレーキ機構は速度依存性を持つことがわかっているが、より正確に力学特性を計測するために、正確な（角度）変位を広範囲の（角）速度で、回転運動として加えることが必須である。今回は、疲労試験機を用いて試料AFOに等角速度で変位を加えることのできる試験機を設計製作することとする。

3.2 試作

3.2.1 試験機の機構

本装具試験機は、油圧サーボ式疲労試験機（Hydropuls PSA、東京衡機製造）に付加工作を施し製作した。この疲労試験機は下側ステージのロッ

ドが鉛直上下に直線往復運動を行う。そこで、このロッドにラック&ピニオン機構を取り付け、油圧サーボ式疲労試験機の直線運動を回転運動に変換した。ラックに上下往復運動を行わせると、ピニオンが軸回りに回転往復運動を行う。ピニオンと止めネジ締結された回転軸は、軸の偏心・偏角を許容するカップリングを介して軸径を変換され、トルク計（KB2 2-080、クボタ）に接続される。そして試料AFOの足部が取り付けられる回転台につながり、カップリングを介して回転台の反対側にあるポテンシオメータ（#6187、BI tech）に接続される。試験機構の模式図を図1に、製作された試験機を図2に示す。トルク計およびポテンシオメータの出力は同時にA/D変換器（REX5054B、ラトックシステム）を通してPC（DynabookSS3480、東芝）に記録される。

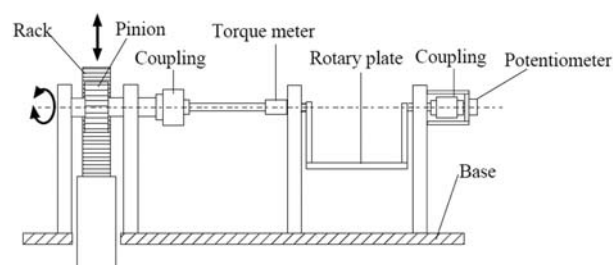


図1 試験機の構成
Fig.1 Schema of test machine

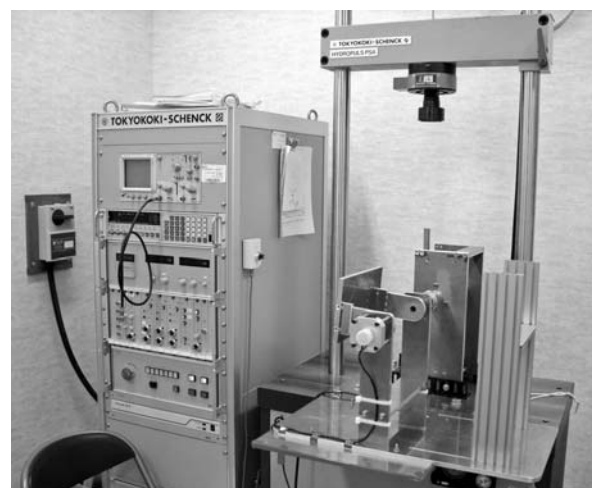


図2 油圧疲労試験機を利用した装具特性試験機
Fig.2 Total view of AF0 test machine

3.2.2 試料の取付方法

まず、試料AFOの足継手軸が試験機の回転軸と一致するように回転台の底板の位置をスペーサで調節した後、AFOの足部を回転台に、両側支柱を支柱固定板にそれぞれ固定する。計測系では回転台の底板が鉛直になる位置を0度とし、回転台が向かって時計回りに回転する方向（図3の設置方法で背屈）

を正、反時計回りに回転する方向を負とした。抵抗モーメントすなわちブレーキトルクは、正回転に抗して発生する場合を正とした。

3.2.3 動作テスト

安全性および設計通りの動作の実現を確認するため、装具をセットしない状態で稼動させた。その後、装具足部を回転台に取り付けるためのクランプを装具なしで取り付け計測した。この計測データは装具特性の計測後、回転台およびクランプの自重によるモーメント（角度位置の2次近似式で表す）の影響を取り除くために用いた。

4 iAFO足継手まわりの力学的応答

4.1 試料とした iAFO

試料は、基本的に前報告²⁾と同じ機構を持つAF Oであるが、主たる回転抵抗発生部である管中間の狭隘路（狭窄）の長さを与え得る磁束をそれぞれ大きくする工夫を加えた。磁石が狭窄と完全に離れ最も粘性抵抗が小さい状態をモードIとし、永久磁石が狭窄上に重なり最も粘性抵抗の大きい状態をモードIVとする。その中間に2段階のモードIIおよびIIIを設けた。なおMR流体にはMRF-140CG（Lord）を使用した。

角度範囲は約-20度から約20度までとし、角速度は約1 [deg/s]のほか、5、10、30、56 [deg/s]の計5種を設定した。またサンプリング周波数は100 [Hz]とした。得られたデータに対して往復運動における周期毎の差異がほとんどないことを確認した後、1試行分の角速度が正の部分抽出し、ローパスフィルタを通した。その際、カットオフ周波数は、10 [deg/s]以下の時1 [Hz]、30 [deg/s]および56 [deg/s]の時は5 [Hz]とした。

4.2 結果と考察

図4にモードIVの角速度別の角度-ブレーキトルク特性を示す。

図4より、いずれの角速度においても回転開始からしばらくは角度にほぼ比例したブレーキトルクが見られ、その後、一定値を示すことがわかる。一定になる角度・トルクは角速度が大きいほど遅い傾向があった。これは、MRブレーキ以外の構造材、おそらくあぶみとあぶみ中央部が接する足底ゴム材が先に弾性変形し、モードごとの継手による保持トルクを超えるまでたわみを続けたことによると推測される。

次に、すべてのトルクカーブがほぼ一定になると

認められる+10度における角速度とブレーキトルクの関係性をモードごとにプロットし、線形近似直線を加えた図を図5に示す。各直線の傾きと切片ならびに適合度は表1のとおりである。これらは全モードにおいて高い線形性を示した ($R^2 > 0.97$)。これは、前記の弾性変形によるトルクが継手保持トルクを超え、継手が回転をしている最中の特性であり、本来のMRブレーキ機構のビンガム塑性を反映していると考えてよい。

ここで再び図4を見ると、トルクが負の値から始まっていることに気づく。実際のブレーキトルク発生後の特性をみるため、全モードについて、トルクが0になる点を原点にして改めて角度-ブレーキトルク関係を図示すると図6のようになる。これらから、各モードの最大トルクはであり、そこにいたる角度比例部分の係数を計算すると約0.33 [Nm/deg]であった。

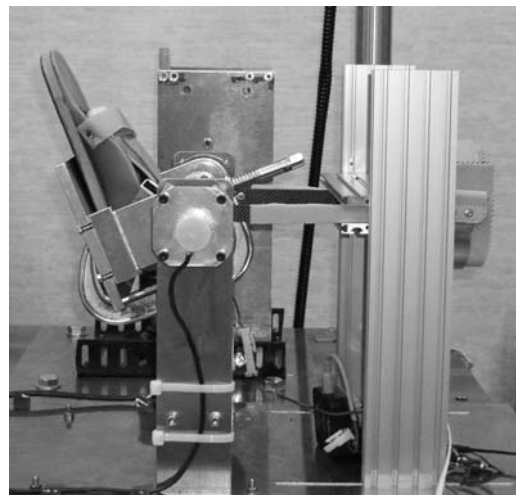


図3 試料AFOを取り付けた状態
Fig.3 AFO specimen set to test machine

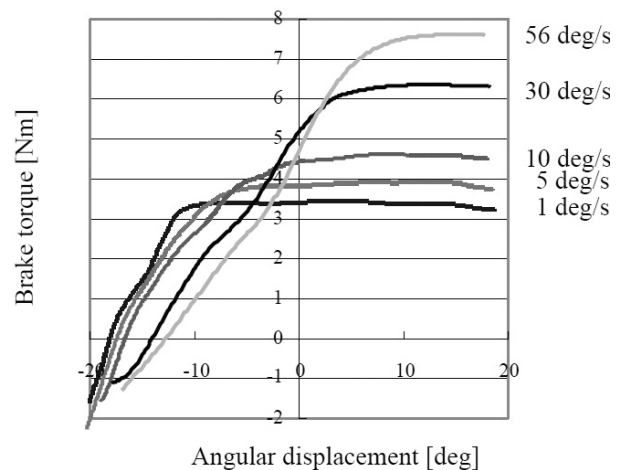


図4 モードIVの角度-ブレーキトルク関係
Fig.4 Ankle angle - brake torque curves

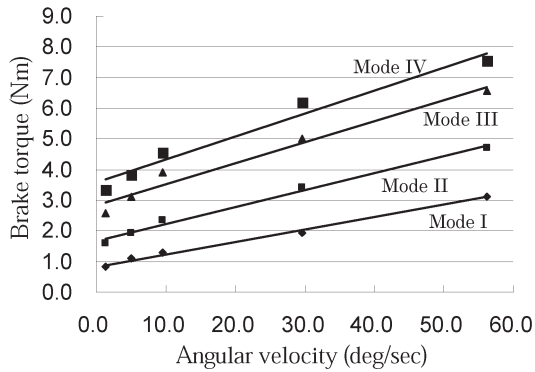


図5 角速度とブレーキトルクの関係
Fig.5 Relationship of angular velocity and resistant moment at 10 deg

表1 回帰直線の傾き・切片・適合度
Table 1 Parameters of regression line

Mode	slope $\times 10^2$	intercept	goodness of fit
I	4.03	0.83	0.97
II	5.50	1.68	0.97
III	6.85	2.48	0.99
IV	7.53	3.56	1.00

5 まとめ

粘弾性特性を持ち、その特性も磁場強度によって変化させることのできる装具足継手について定量的評価を行うための機器を製作し、実際に試作 iAFO の足継手まわりの底背屈特性を評価することができた。

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深く感謝する。

参考文献

- 1) 赤澤ほか：「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-」、福まち工研報告H14、176-179、2002
- 2) 赤澤ほか：「インテリジェント短下肢装具 iAFOの開発研究」、福まち工研報告集平成16年度、174-179、2004
- 3) <http://www.nedo.go.jp/activities/portal/gaiyou/p05026/h18jisshi.pdf>(ただし、プロジェクト全体の概要)

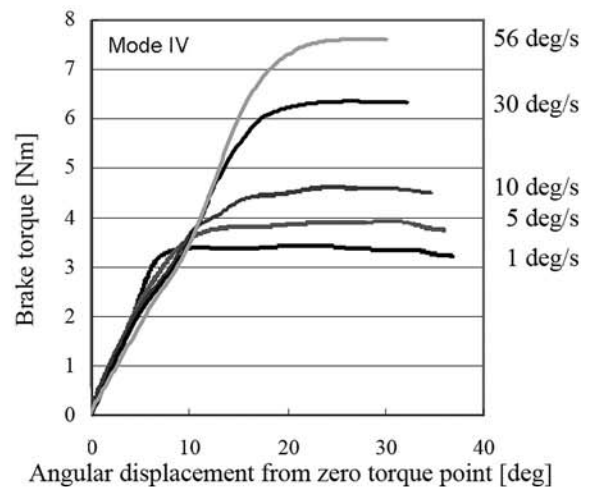
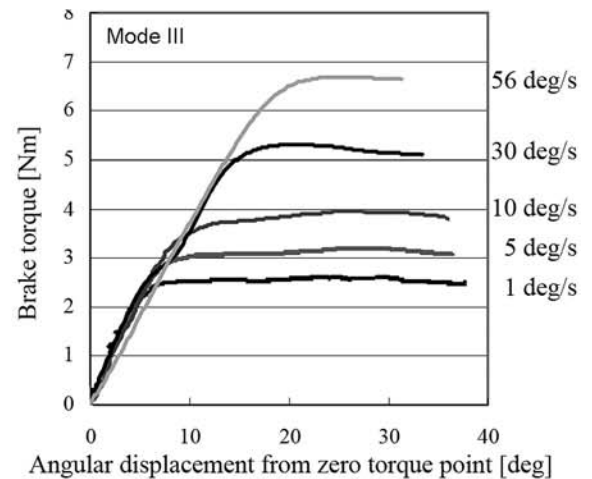
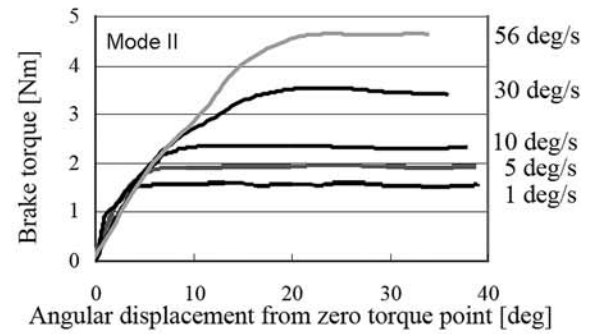
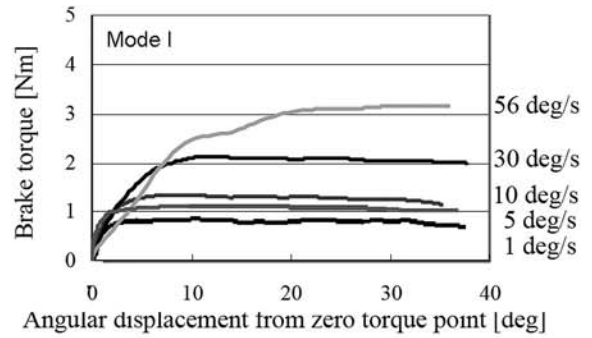


図6 トルク発生開始からの角度-トルク関係
Fig.6 Angle - brake torque relationship