

障害者自立支援機器等開発促進事業（分担報告書）

NAL-Knee(S)の3次元動作解析と油圧測定

開発分担者 石松 隆和、佐尾山 武志
開発分担機関 長崎大学工学部 石松研究室

開発要旨

安心して階段を昇降するための膝継手の開発を行った。軽量かつ安価にするためにシリンダー、フレームなどの小型化を行った。出来た試作機に対して、3次元動作解析装置、床反力計および圧力センサを用いた実験により、スムーズにかつ左右対称な歩行を実現するための指標が得られた。モニター実施まで行うことが出来なかったが、さらに品質を高めて商品化することを目標としている。

A. 開発目的

現在製品化されている膝継手には様々な機能があるが、そのひとつにイールディングがある。イールディングとは油圧の抵抗を利用して急激な膝折れを防ぐ機構であり、義足使用者が安全に階段を下るときなどに使用される。このイールディングの機能に不満があるという意見を聞くことが多い。イールディングが動作しない、一定の角度範囲内でしか機能しない、という問題があり、義足使用者が安心して階段を下れない状況がある。

以前より開発してきた NAL-Knee は、大腿切断者が義足で階段昇降でき、平地も自由な速度で歩ける膝継手である。それには、動力もバッテリーも必要ないが、階段を上ることに重点を置き、機構が複雑で重く、高価格になっていた。本開発では、次の点を目指した。

- ・ 階段の下りを重視し、安定したイールディングを提供する
- ・ 軽量、安価

なお、以前より実現している、軽度屈曲ストップ機構、膝折れ防止、歩行速度追従性などの機能は引き続き持たせるようにした。

B. 開発する支援機器の想定ユーザ

中活動以上(速度を変えて歩き、歩行以上の活動を行う)の大腿切断者を想定している。

D. 試作した機器またはシステム

下部にリンク機構を備えている、油圧シリンダー式膝継手である。開発にてシリンダーを4回、フレームを5回試作改良した(図1)。膝継手の小型軽量化、コストダウンのために、バルブを3モードから2モードに変更し、またシリンダーを小型化している。その結果、旧NAL-Kneeと比較し、重さが1250gから1130gと120g減少し、長さが28.8cmから25.8cmとなり3cm短くなった(図2)。



図1 シリンダー



図2 新旧フレーム（左：新式、右旧式）

表1 バージョンによるシリンダーの違い

番号	シリンダーの違い
1	タンク 2 個、 $\Phi 18$ シリンダー
2	タンク 1 個、 $\Phi 20$ シリンダー
3	リリーフバルブの調整
4	バルブ形状、油路を拡大

E. 開発方法

テスト用の膝継手を作成した後、テスト被験者の方に装着し、その評価をフィードバックし、シリンダー、フレームの改良を行った。評価は次の実験を行い得た。

- ・ 室内 3 次元ビデオ解析装置による平地と階段の歩行分析
- ・ 室内階段歩行による油圧シリンダー内の油圧測定

テストにおいては、開発する膝継手の機能とテストの目的を十分説明した上で、協力者

の仕事、生活に不利とならないような日時を設定し、体力・健康上無理と判断した場合にはすぐにテストを中断し、無理なお願いはしないようにした。実験参加は任意であり断っても普通の業務においてなんら不利益は生じないことを説明した。階段歩行を伴うため、手すり、補助員の配置など安全に心がけた。試作品であっても人体を傷つけないように、ねじの出っ張り、とがった角など危険除去に配慮した。着替えおよび義足装着においては、人目に付かないよう別室等で行い、顔が映るビデオ、写真撮影においては、使用目的を説明したうえで本人の承諾を得た。

本実験での被験者は3人である（表2）。

表2 被験者

名前	H氏	O氏	M氏
性別	女性	女性	男性
年齢	20歳	31歳	44歳
自身の膝継手	徳林空圧	インテリジェント (ナブテスコ)	ハイブリッド (ナブテスコ)

(1) 室内3次元ビデオ解析装置による平地と階段の歩行分析

実験方法

石松研究室による ANIMA 社の3次元動作解析装置 MA3000 を用いて解析を行った。被験者には反射マーカを取り付けた。取り付け箇所は、上前腸骨棘、大転子、膝軸（膝継手軸）、果（足継手軸）、第五中骨骨頭（足部 MP 付近）である（図4）。室内に設置されたカメラによって関節角度等の計測を行った。カメラは合計16台あり、マーカを捕捉できる位置に適切に設置した。また床には4枚の床反力計が設置されており、同時に床反力を計測した（図3）。



図3 マーカ取り付け箇所



図 4 カメラとフォースプレート

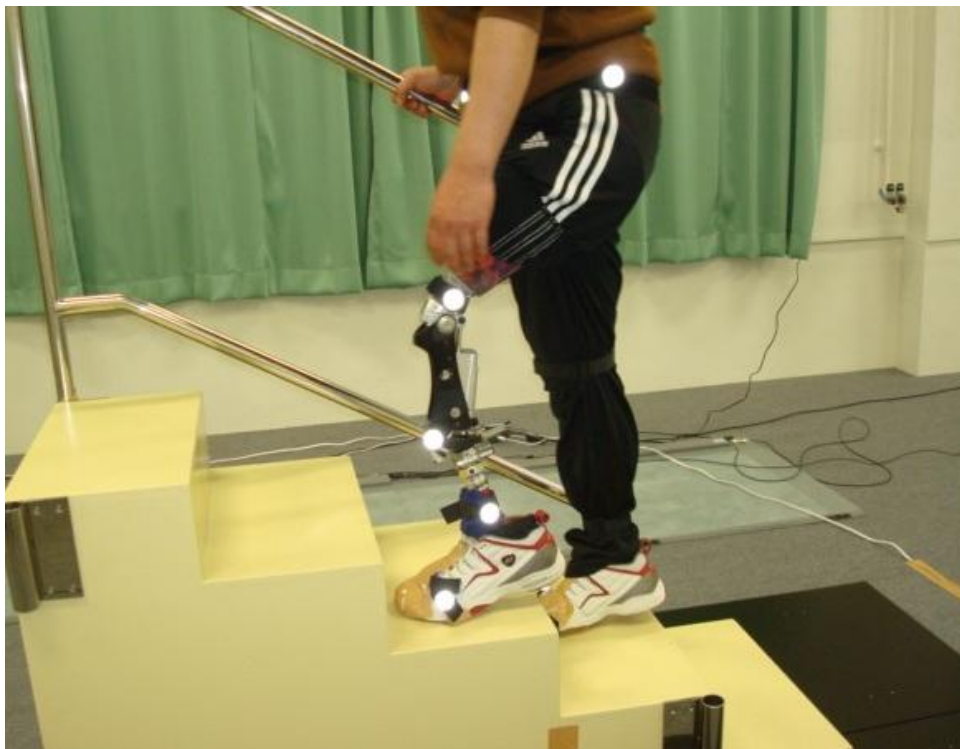


図 5 階段昇降のテスト

計測時にはケイデンスを指定した。自由歩行でのケイデンスを中間値とし、それより前後 20 のケイデンスで遅歩き、早歩きを指定した。

まず、3 号機のシリンダーに対して実験を行った。被験者は H さんである。平地歩行での計測を行った。自由歩行でのケイデンスは 88 であったので、ケイデンスは 68, 88, 108

の3つに対して行った。比較対象として、オットーボック空圧、ナブテスコ空圧、徳林空圧の膝継手についても同時に計測を行った。

続いて、4号機のシリンダーに対しても実験を行った。被験者は2名で、M氏とO氏である。二人とも自由歩行でのケイデンスが100であったために、ケイデンスは80、100、120の3つに対して行なった。平地歩行のほかに、階段昇降時のデータも計測した。

結果

NAL-Knee(S)装着時の床反力、膝角度のグラフを図6、7、8に示す。図の垂直線は膝が曲がり始めた箇所を示している。また、健側と義足の遊脚相最大屈曲角度の差（＝健側の屈曲角度から義足の屈曲角度を引いたもの）について、各膝継手に対してグラフを作成している。

階段昇降時の角度変化については図9に纏めた。

グラフには現れなかったが、O氏、M氏ともに階段上りのときにロックが効きづらいという現象が現れた。

考察

以上の結果により次のことが考察できた。

(a) 立脚相から遊脚相への移行について

NAL-Knee(S)装着時の床反力、膝角度のグラフを図6、7、8によると、膝が曲がり始めたときには、5～50kgfの床反力が発生していることがわかる。このときNAL-Knee(S)に床反力がかかっていることになる。NAL-Knee(S)は床反力がかかると自動的にイールディングモードになるよう設定しているが、そうすると、膝が曲がり始めたとき、すなわち立脚相後期のつま先離床のときにもイールディングモードとなり、膝が曲がらなくてスムーズに遊脚相に移行できないことになる。この現象に対しては、バネの張力で強制的にイールディングモードを解除することで解決できた。グラフはバネの張力を調整してスムーズに歩行できていることを示している。

(b) 平地歩行の対称性について

3号機のシリンダーを持つNAL-Knee(S)については、図6によると、左右の非対称性が見られる。これはシリンダーの油路が小さかったためにシリンダーの動きが悪く、非対称的な歩行になったものと思われる。油路を拡大した4号機のシリンダーを持つNAL-Knee(S)で実験を行った図7、8によると、非対称性は小さくなっており、歩行の対称性に対してはシリンダーの油圧抵抗が大きな要因となっていることが考えられる。

(c) 階段上りについて

階段上りに関しては非対称が見られる（図9）。

角度の要因でみると、健側は上るときに伸展するのに対し、義足側は一定角度での固定となっている。健側と同じように膝継手が階段を上るときに伸展するためには、義足にモーターを取り付けたり、もしくは義足ユーザが股関節伸展筋を大いに活用する歩行を行ったりすればいいと思われるが、前者は高価かつ重量が大きくなるデメリット

ットがあり、後者は高活動的なユーザが練習を行ったときに獲得される階段の上り方で全ての義足ユーザが獲得できる歩行ではない。

時間的要因でみると、義足側の立脚期が長くなっていることがわかる。これは今回の被験者が NAL-Knee(S)に慣れておらず、膝の固定を確認しながら階段を上っていったため、NAL-Knee(S)に対する信頼感が大きくなれば、確認作業がなくなるので、時間的非対称性は小さくなるものと期待できる。

ロックがかかりづらいという現象が発生したが、これは立脚相から遊脚相へのスムーズな移行のためにバネを利用したが、このバネのために逆にロックしなくなったものと考えられる。イールディングおよびロックの効きやすさと、平地の引っかかりは相反する事象であり、両方を改良するためには別の簡単なバルブ機構が必要である。

(d) 階段下りについて

階段上りと比べると非対称性が少なくなっていることがわかる（図 9）。

角度的要因でいくと、健側と義足側での最大屈曲角の差は 20～30 度ほどであるが、時間的要因でみると、健側の立脚期が長くなっているが、グラフの形状は階段の上りと比べて左右対称的となっている。これは、イールディングの機能が使いやすく被験者の義足ユーザの方に上手に使ってもらえた結果であろうと思われる。健側の立脚時間が長くなっているのは、やはり NAL-Knee(S)への信頼感が少なくイールディングが効くのか確認しながら階段を下りたためだと思われるので、NAL-Knee(S)に慣れることによりこの問題も解消されると思われる。

(2) 室内階段歩行による油圧シリンダー内の油圧測定

実験方法

シリンダー内に圧力センサを取り付け、シリンダーの内圧を測定した。使用したセンサは長野計器の圧力トランスミッタ KM31 を使用した。これにグラフテックのロガー GL220 と長野計器のデジタル指示計 GC68 を接続し、圧力データの保存および表示を行う。

被験者は M 氏である。平地歩行と階段昇降について計測を行った。



図 10 内圧計測装置
(左：KM31、中：GC68、右：GL220)

結果

最も圧力がかかる階段上りの膝屈曲でのロックにおいても圧力の最大は 8MPa となった。階段下りのときの最大圧力は 4.3MPa であった（図 11）。



図 11 階段下り時の最大圧力

考察

本シリンダーではリリースバルブが 20MPa で開くように設計されている。今回の実験により最大でも内圧は 8MPa であったので、安全率を考慮しても十分な設計になっていることが確認できた。

図 9 によると階段を上るときの膝継手の角度は最大でも 60 度未満であった。膝屈曲角度が大きい状態で膝継手をロックさせると、内圧はもっと高くなる。したがって、使用状況によっては内圧が高まることが予想される。また義足使用者の体重によっても内圧が変化することが予想されるので、使用状況のことを考慮し、体重制限を設定する必要がある。

G. 開発で得られた成果

平地、階段、坂を歩行できる大腿義足膝継手の試作品が完成した。立脚相から遊脚相への速やかな移行方法や歩行の対称性、シリンダーの強度等に必要な条件などを明示できたと認識している。

I. 考察

歩行中、階段昇降中の関節角度、床反力およびシリンダー内圧などのデータから、安全に階段を昇降するための条件などを得ることができたと思う。まだ製品化するまでにいくつかクリアしなければならないことがあるが、次のことが挙げられる。

・軽量化

現在、1130g であるが、出来れば 1000g 以下にすることが目標である。軽ければ軽いほど義足ユーザにとってはメリットとなる。

・コストダウン

既存のフレームなどを使用することによって、コストダウンが考えられる。部品の共通化などが課題となる。これは今仙技術研究所との連携が不可欠となる。

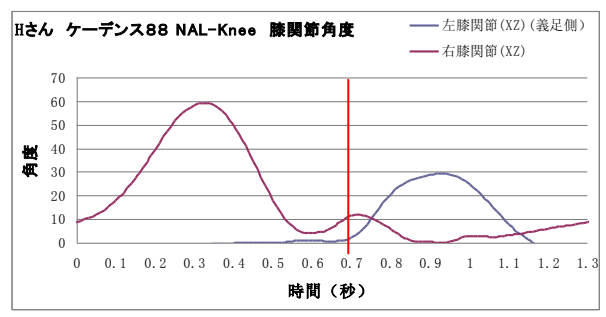
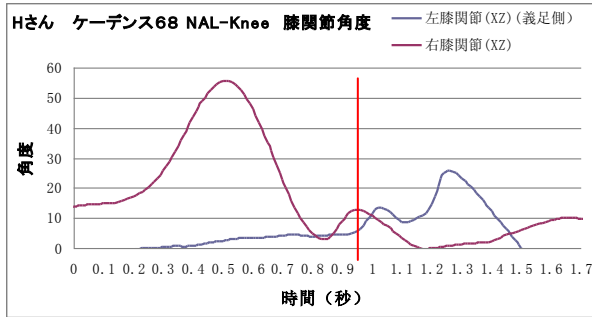
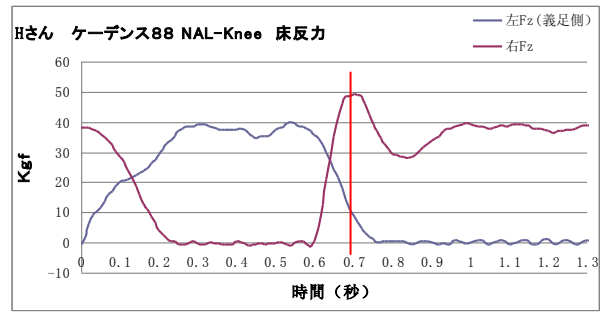
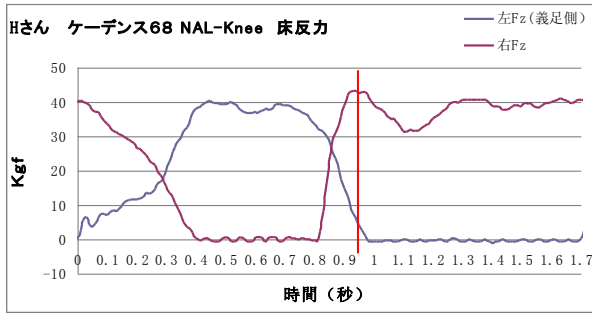
・安全性と商品性

現在実験機であったために強度テストなどは行っていない。また、がたつきや異音が認められ、商品レベルにまでは至っていない。

これらの課題をクリアし、商品化するのが大きな目標である。

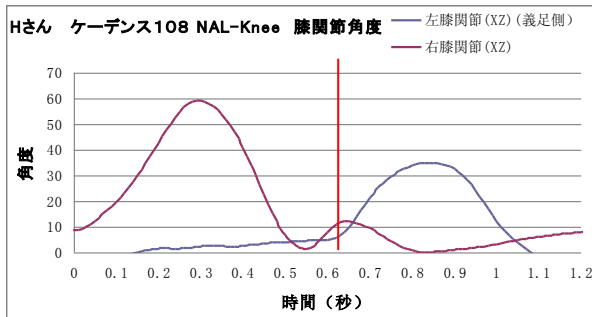
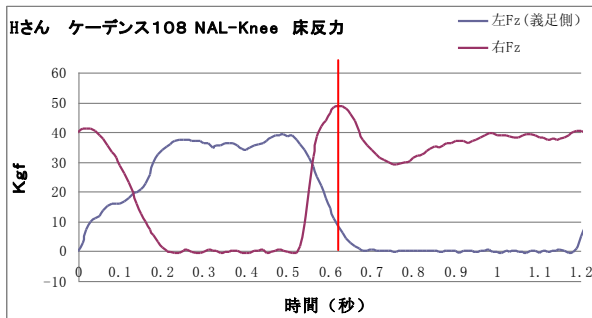
J. 結論

安価ながらも安心して階段を下ることのできる膝継手を製作するうえで必要な条件やデータを求めることが出来た。この実験の結果を踏まえて、製品化に向けて更なる研究を続けていく予定である。

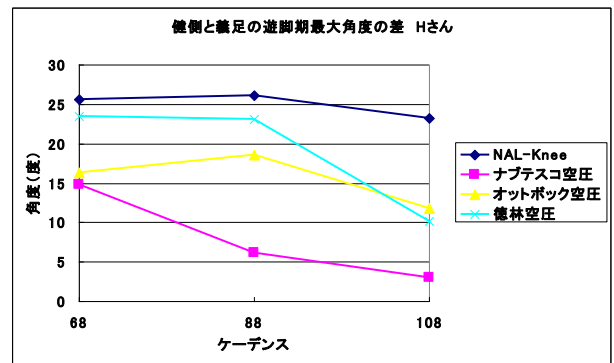


(a) ケイデンス 68

(b) ケイデンス 88

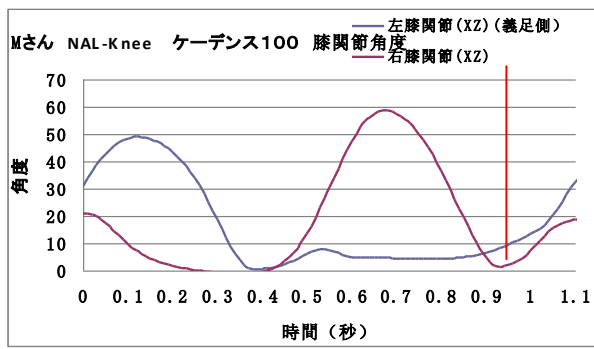
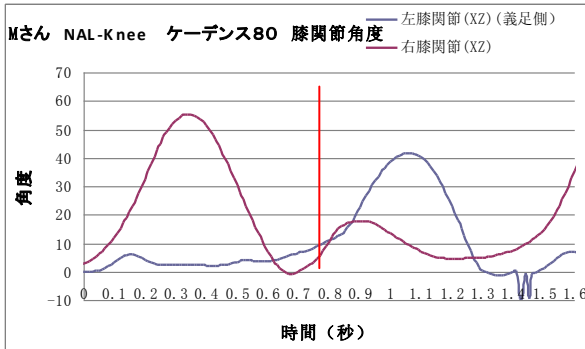
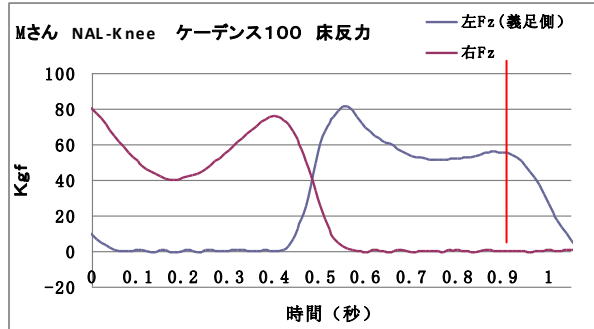
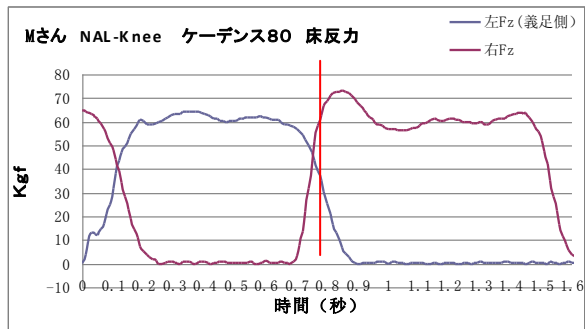


(c) ケイデンス 108



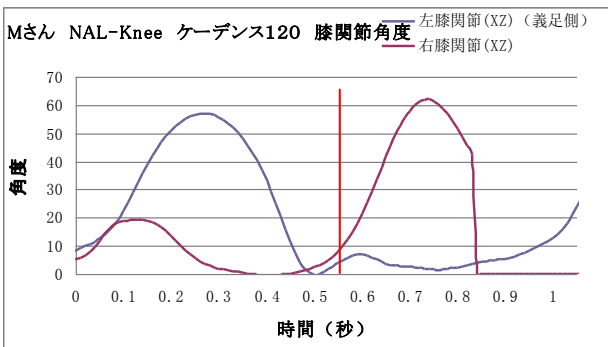
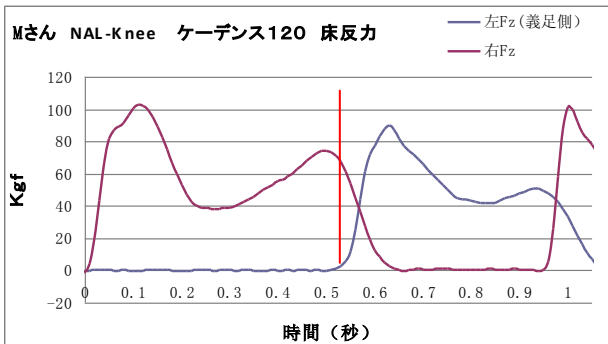
(d) 健側と義足の遊脚相最大膝角度の差

図 6 平地歩行時の角度変化 (H氏)

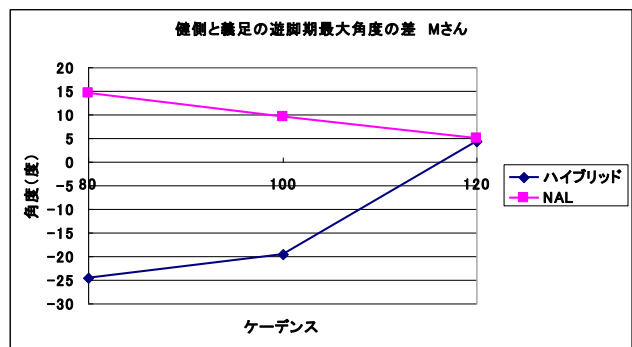


(a) ケイデンス 80

(b) ケイデンス 100

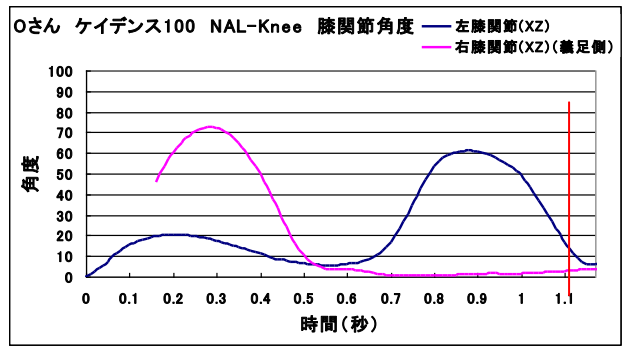
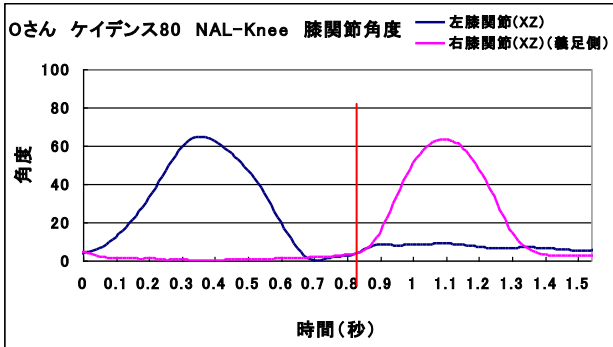
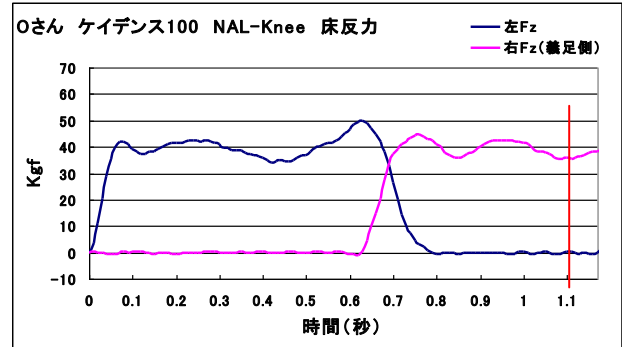
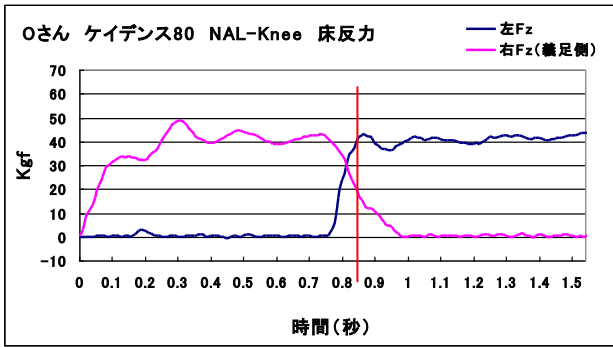


(c) ケイデンス 120



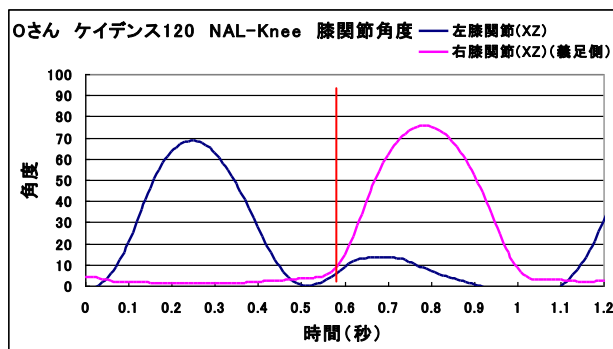
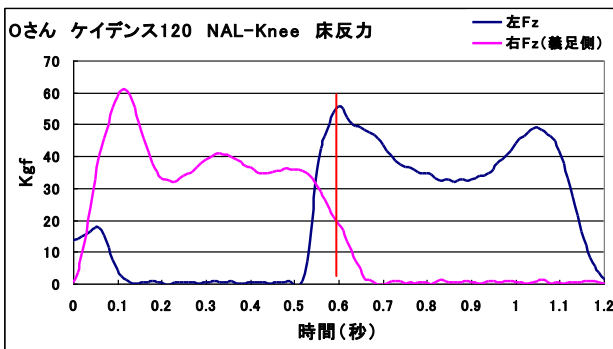
(d) 健側と義足の遊脚相最大膝角度の差

図 7 平地歩行時の角度変化 (M 氏)

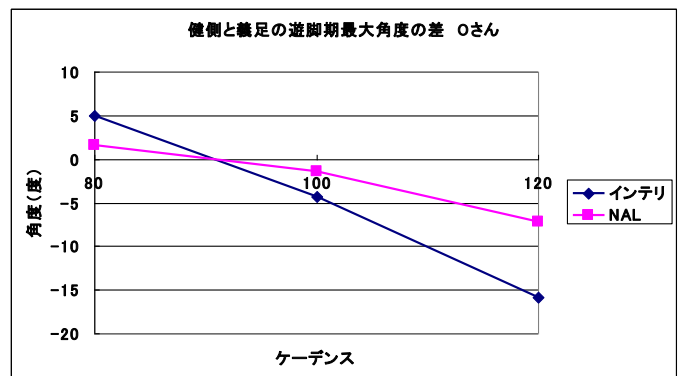


(a) ケイデンス 80

(b) ケイデンス 100

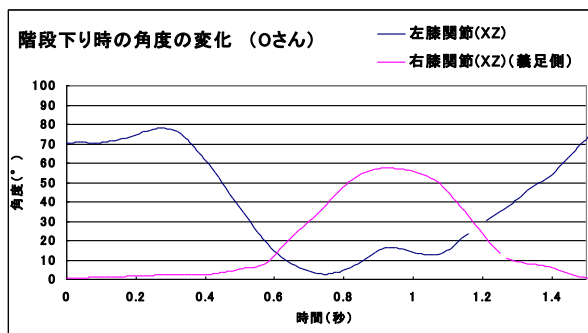
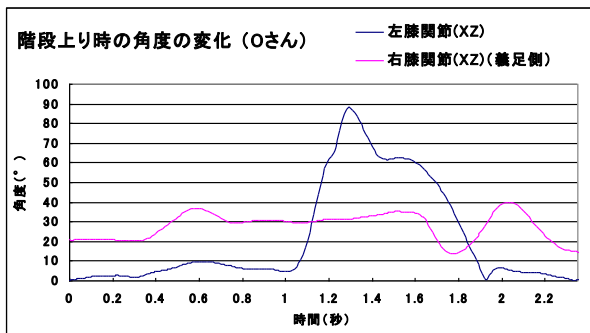


(c) ケイデンス 120



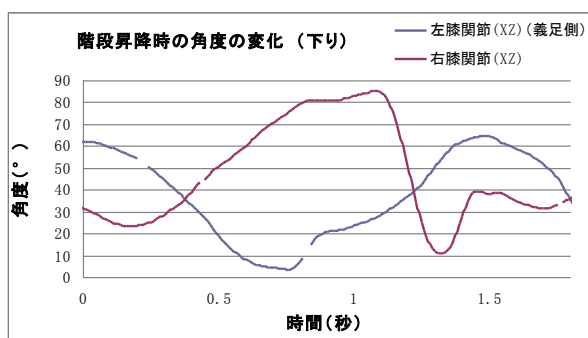
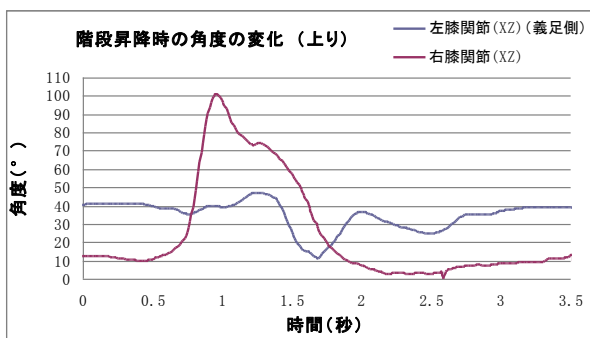
(d) 健側と義足の遊脚相最大膝角度の差

図 8 平地歩行時の角度変化 (0 氏)



(a) O氏の結果 (左：上り、右：下り)

図8 平地歩行時の角度変化 (O氏)



(b) M氏の結果 (左：上り、右：下り)

図9 階段昇降時の角度変化