

義足足部の機械的特性

相川孝訓* 山崎伸也** 東江由起夫*** 野坂利也****

Mechanical Property of Prosthetic Feet

Takanori AIKAWA*, Nobuya YAMASAKI**, Yukio AGARIE*** and Toshiya NOSAKA****

Typical 10 prosthetic feet were tested with Instron universal testing machine. Compression tests on heel and toe part of the foot were performed(refer to JIS T9212) at maximum load factor 600N. Test of sole part of the foot was added to the compression test. Deformation of heel, toe, and sole part were measured in order to check quantitative difference of mechanical properties of prosthetic feet. Weight was measured as another property. SACH foot was heavier and HF foot was the heaviest.

A curve of measured deformation data, calculation of value of leaning of curve and deformation in 600N loaded were examined. As a result toe part of SACH foot was firm, and sole of single axis foot was firm so that there was an ankle axis, and Multiflex Foot, Dynamic Plus (1D25), Carbon Copy II Light, HF Foot were firm at the heel part of the foot. Seattle Carbon Light Foot was the foot that heel was medium, and toe was soft. On the other hand Sure Flex III, J-Foot, S.A.F.E.II was generally soft. These characteristic data represented a properties of prosthetic feet rather accurately.

キーワード：試験評価、 静的変形量、 エネルギー

1. はじめに

現在、多くの義足足部が市販されており、いくつかの報告で足部の比較・検討が行われているが、それぞれの足部の特性について明確ではなく、臨床に役立つ足部の特性データが求められている。今回、代表的な足部10種類を取り上げ、義足足部の機械的特性を表す各種データを収集した。測定した基本データは、義足足部の静的な変形量である。同時に足部の重さについても測定した。また、足部の内部構造の確認のために

軟X線撮影も行った。これらの結果から足部の変形に関する機械的特性を求め、各足部の特徴を明らかにすることを試みた。

2. 方法

義足足部の静的な変形量の測定は、JIS T9212「義足足部・足継手」の規定を参考にして、万能材料試験機インストロンModel 1125 (容量 10t) と義足足部の変形量測定専用治具を用いて行った。この治具は

* 国立身体障害者リハビリテーションセンター研究所福祉機器開発部
** 国立身体障害者リハビリテーションセンター研究所補装具製作部
*** オットーボック・ジャパン
**** (有) 野坂義肢製作所

* Department of Assistive Technology, Research Institute, National Rehabilitation Center for the Disabled.
** Department of Prosthetics and Orthotics, Research Institute, National Rehabilitation Center for the Disabled.
*** Otto Bock Japan.
**** Nosaka Prosthetic & Orthotic MFG, Ltd.

JISによる義足足部の変形量の測定用に開発したもので、設定角度は 0°、10°、15°、20°、25°、30°が可能になっている。また試験機の容量は10tであるが、今回の最大負荷が600Nであるため、ロードセルは100kgの容量ものを使用した。試験負荷方向は、JIS規格に規定されているかかと15°、つま先20°の他に足底全体への負荷を追加した(図1)。足底全体への負荷を除き、足部は上下逆向きに各取付角度で足継手部分を固定して、上からのロードセルにより負荷をかけた。最大荷重は、規格の規定と同じ600Nとした。負荷速度は、標準の100mm/minとしたが、踵とつま先は500mm/minについても実施した。つま先部分は構造により荷重の作用点が異なるため、足部の内部構造の確認のために軟X線撮影を行い、作用点に大きなずれがないかどうかを確認した。これらのデータについて、荷重-変位曲線の比較を行った。同時に荷重負荷時と除荷時の蓄積エネルギー及び放出エネルギーを算出した。

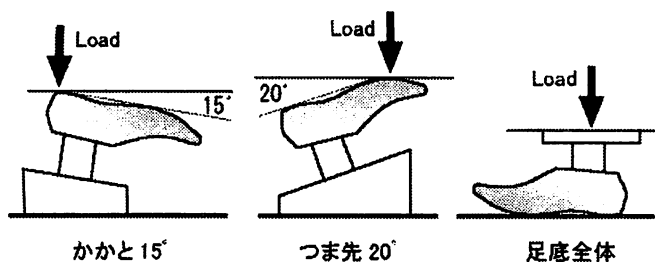


図1 義足足部の外力に対する変形量の測定方法

3. 結果および考察

3.1 足部の重さ

足部により構造が異なるので、同じ条件で測定することは困難であるが、基本的に各足部に同じ種類のアダプターを付けて条件を整えて測定した(表1)。足部のサイズは25センチで左足部を測定した。足部重量は、HFが810gで最も重く、単軸足が795gと次に重い。Sure Flex III、Seattle Carbon Light Foot、Multiflex Footはいずれも600g弱でこれらの足部の中では軽い部類に属していた。

表1 足部の名称と重さ(アダプターつき)

足部の名称	略称	製造会社名	重さの測定条件	重さ(g)
SACH(1S49)	SACH	Otto Bock		615
単軸足(1H38+2R10)	Single axis	Otto Bock		795
Multiflex Foot	Multiflex	Blatchford	足継手部付き	590
HF義足	HF	HF義足研究所		810
S.A.F.E. II	SAFE II	Campbell Childs, Inc		715
Carbon Copy II Light	CC IIL	Ohio Willow Wood Company		645
Dynamic Plus(1D25)	1D25	Otto Bock	K9153チタン付き	670
Seattle Carbon Light Foot	SCLF	M+ind		595
J-Foot	J-Foot	今仙技術研究所		645
Sure Flex III	SF III	Flex Foot		580

足部重量は使用上影響が大きい因子であり、事実HF足部の重さ810gは最も軽いSure Flex III足部の580gと比較して230gの差があった。

3.2 外力に対する変形量

外力に対する変形量の測定結果を図2~6に示す。かかとの外力に対する変形量の測定は、取付角度15°、垂直荷重最大600N、負荷速度は毎分100mmと毎分500mmについて実施した(図2、3)。横軸が変位、縦軸が荷重を表している。曲線の傾きが急になるほど硬くなり、傾きが緩やかなほど軟らかいことを示している。このグラフから、MultiflexやHFなどが傾斜が急でかかるとが硬いのに対し、SF IIIが最も傾斜が緩やかで、かかるとが軟らかい足部であることが分かる。また、単軸足は初め硬くてその後軟らかくなる特性を示し、他の足部と異なっていた。これは、単軸足が軸のある足部であるのに対して、他の足部はHFを除いて軸のない足部であることと関係しており、単軸足部の軸まわりの動きの特性が現れたためであると考えられる。

外力に対する変形量は、基本的に荷重が増えるに従って傾きが少しずつ急になるパターンを示した。荷重が少ないところと大きいところについて傾きの変化を計算すれば、足部の違いが求められると考えられる。そこで、かかとの曲線の傾き、即ち、ばね定数について計算した(表2)。外力に対する変形量のデータは負荷速度が毎分100mmと毎分500mmについて測定したが、基本的な傾向はほぼ同じであったため、今回は負荷速度が毎分100mmについてのみ計算した。2種類の数値は、荷重のかかり初めの0~100Nと、荷重が十分大きくなった400~600Nについて、それぞれ傾きの平均を求めたものである。

HF、Multiflex、1D25は400~600Nで大きな値を示し、荷重負荷時にかかるとが硬い足部であることが明らかとなった。逆にSF III、SAFE II、SACHは小さな値を示し、荷重負荷時にかかるとが軟らかい足部であることが分かった。ただ、荷重が小さいときの特性は差が小さく、CC IILや単軸足が比較的硬いのに対し、

表2 外力に対する変形量の曲線の傾きの平均

略 称	外力に対する変形量の曲線の傾きの平均 (かかと) (N/mm)		外力に対する変形量の曲線の傾きの平均 (つま先) (N/mm)		
	0-100N	400-600N	0-100N	100-200N	400-600N
SACH	25.9	51.6	11.2	64.2	113.8
Single axis	39.8	67.3	9.0	36.9	93.3
Multiflex	36.5	127.9	8.2	37.7	73.5
HF	29.6	133.2	6.0	31.2	73.7
SAFE II	23.0	50.8	10.0	15.7	48.2
CC IIL	42.4	78.2	11.6	28.7	51.2
1D25	32.1	98.5	10.0	24.4	54.2
SCLF	29.8	71.0	6.9	32.0	56.5
J-Foot	22.8	66.0	9.6	28.4	36.1
SF III	16.5	49.8	13.6	22.2	36.1

SF III、J-Foot、SAFE IIが比較的軟らかい特性を示した。

600N負荷したときのかかとの変位からかかとの沈み込み量を調べると (表3)、硬い足部で8mm~9mm、中位のもので15mm~16mm、軟らかいもので約22mmであった。この測定結果から、硬い足部はMultiflex、HF、1D25であり、軟らかい足部はSF IIIだけであった。

CC IILはかかとの硬さを変更できるようになっているが、実際に変更して測定すると、表に示されるように600N負荷したときのかかとの変位が7.6~9.6~13.7と硬いから中位程度まで変化し、硬さが変わることが確認できた。

つま先の外力に対する変形量は、取付角度20°、垂直荷重最大600N、負荷速度は毎分100mmと毎分500mmの測定条件のもとで測定した (図4、5)。つま先の外力に対する変形量はかかとの曲線と異なっており、荷重が小さいときには比較的軟らかく、その後、急に硬くなるものが多かった。

これは、荷重が小さいときから大きくなるに従って作用点に変化していくためと考えられ、実際の歩行時のつま先部への荷重の状態とは異なる。結果の検討には注意が必要であると思われる。

足部の種類によっては、SACH、HF、SCLFなどのように大きく変化するものと、SF III、SAFE IIなどの

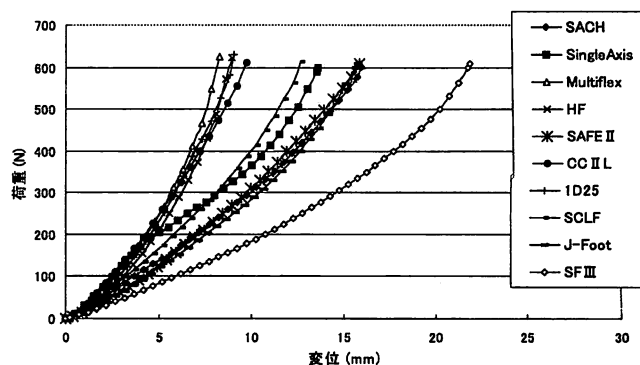


図2 外力に対する変形量 (かかと、負荷速度100mm/min)

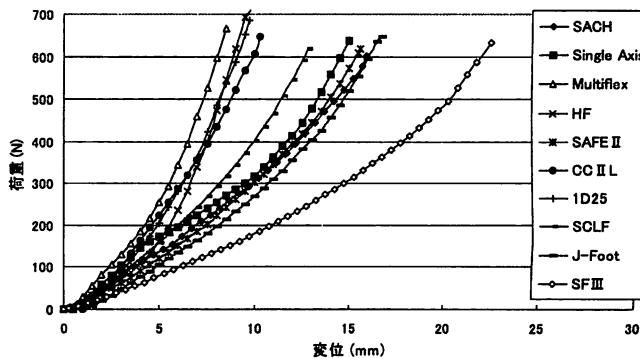


図3 外力に対する変形量 (かかと、負荷速度500mm/min)

表3 外力に対する変形量の測定結果のまとめ

略 称	600Nの時の変位 (mm)			足部間の相対的な硬さ		
	かかと	足底	つま先	かかと	足底	つま先
SACH	15.9	3.0	14.2	中位	やや硬い	硬い
Single axis	13.6	1.9	18.1	中位	硬い	中位
Multiflex	8.1	3.6	20.2	硬い	中位	中位
HF	8.8	3.6	25.8	硬い	中位	軟らかい
SAFE II	15.7	3.8	27.0	中位	中位	軟らかい
CC IIL	7.6-9.6-13.7	2.3-3.0-3.0	20.4	硬い~中位	やや硬い	中位
1D25	8.9	3.6	22.4	硬い	中位	中位
SCLF	12.5	3.8	25.3	中位	中位	軟らかい
J-Foot	15.6	6.2	24.7	中位	軟らかい	軟らかい
SF III	21.7	5.4	24.2	軟らかい	軟らかい	軟らかい

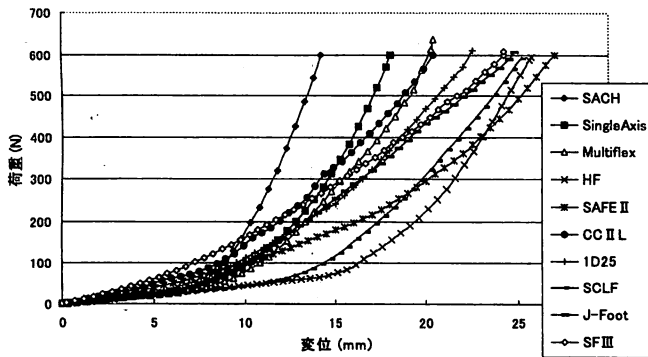


図4 外力に対する変形量
(つま先、負荷速度100mm/min)

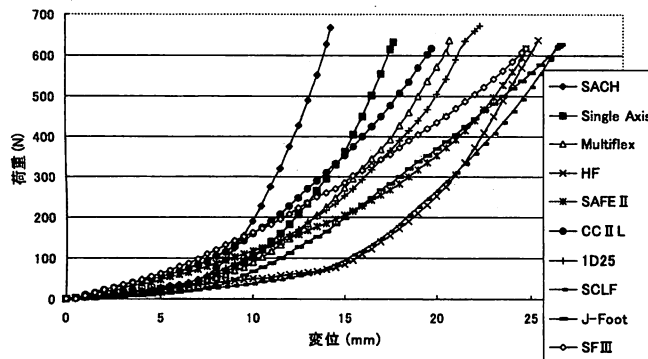


図5 外力に対する変形量
(つま先、負荷速度500mm/min)

余り変化しないものがあり、キールが足部の先端のどの部分まで入っているかなど、構造に起因するものと考えられる。

つま先の外力に対する変形量の曲線の傾きについての平均値(ばね定数)も、かかとと同様に表2に示される。かかとより傾きの変化が大きいため、1種類追加して3種類の値を求めてある。表2の右の部分は、荷重のかかり始めの0~100Nと、荷重が少し大きくなった100~200Nと、さらに大きくなった400~600Nについてそれぞれ傾きの平均を求めたものである。荷重が大きいために硬いかどうかは、400~600Nの値に表されるとおり、SACH、単軸足が大きな値を示しており、荷重負荷時につま先が硬い足部であることが分かる。逆に、SFⅢ、J-Footは小さな値を示しており、荷重負荷時に軟らかい足部であるといえる。また、荷重のかかり始めの0~100Nでは足部間の差はほとんどなく、荷重が少し大きくなった100~200NでSACHだけが比較的大きな値を示しており、荷重のかかり始めから硬いことが分かる。

つま先の外力に対する変形量の測定結果(表3)では、600N負荷したときの前足部の変位は、硬い足部で約14mm、軟らかいもので約27mmであった。この結

果から硬い足部はSACHのみで、軟らかい足部は、SAFEⅡ、HF、SCLF、J-Foot、SFⅢであると考えられた。

歩行時には、かかとから足底、つま先へと荷重点が変化していくことから、機械的特性としてもかかととつま先の中間の足底全体への負荷が必要ではないかと考え、足底の外力に対する変形量を測定した。今回使用した足部は大部分がかかとの高さが10ミリ程度高くなっているが、足部全体を水平面上において、この状態で負荷をかけて測定した。垂直荷重は最大600Nとかかと、つま先と同じにしたが、負荷速度は毎分100mmだけ測定して、毎分500mmは測定しなかった。これは、かかとやつま先に比較して足底全体としての剛性が高いため、毎分100mmでも傾きが急であり、毎分500mmでは測定が困難であったためである。

図6は足底の外力に対する変形量である。横軸が変位、縦軸が荷重である。変位のスケールはかかと、つま先のグラフより拡大してある。全ての曲線が、ほぼ直線近似できる曲線であった。足部による特性の差も小さかった。全体の印象として、単軸足部が最も傾斜が急で、SACH、CCⅡLが硬い足部であった。これに対しJ-Foot、SFⅢが傾斜が緩やかで、軟らかい足部であった。

足底の外力に対する変形量についても整理すると表3のようになる。足部全体での沈み込み量になるので、全体として変形量は小さな値になる。600N負荷したときの変位量は、硬い足部で2mm~3mm、軟らかい足部で5mm~6mmになる。単軸足部が最も小さく1.9mmになっている。これらの値は足底全体に荷重をかけたときに安定しているかどうかに関係していると考えられ、変形量が小さいものの方が荷重負荷時の沈み込みが小さく、安定していると考えられる。

以上の測定結果の考察から、かかと、足底部、つま先、について次のようにまとめることが出来た。

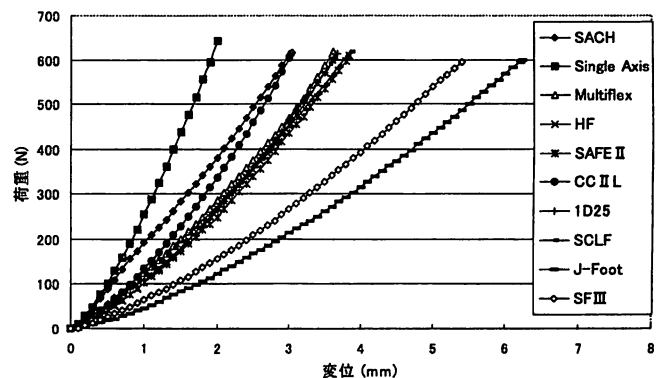


図6 外力に対する変形量
(足底、負荷速度100mm/min)

SACHはつま先が硬く、単軸足は軸があるために足底部が硬く、Multiflex、1D25、CCⅡL、HFはかかどが硬い足部である。ただし、HFはつま先が軟らかい点が多少異なる。SCLFはかかどが中位になりつま先は軟らかい。一方、SFⅢ、J-Foot、SAFEⅡは全般的に柔らかい足部である。

ここにまとめた内容は、今回測定した足部について言える特性であり、多くの足部は切断者の体重や活動度などにより特性の異なる足部を用意しており、同一名称の足部でも特性が異なっている場合がある点については注意する必要がある。

3. 3 エネルギーの蓄積および放出

荷重負荷時と荷重除荷時の外力に対する変形量の曲線から算出したエネルギーについて検討した。今回実施した試験は荷重負荷から荷重除荷への切り替えを手動で行ったため、荷重除荷曲線を全く同じ条件で求めることが出来ず、データに多少のばらつきがあったが、傾向を調べるために計算を行った。蓄積エネルギーは荷重負荷曲線の下の部分の面積として算出、放出エネルギーは荷重除荷曲線の下部分の面積として算出した。また、放出エネルギーと蓄積エネルギーの比を取って復元率とした。復元率の意味としては、値が1に近いほど放出エネルギーと蓄積エネルギーの差が小さく、蓄積されたエネルギーが大部分放出されることを表しているのに対して、復元率が0に近いと蓄積されたエネルギーが吸収あるいは消費され、放出エネルギーが蓄積エネルギーに比べて小さくなることを表している

表4はエネルギーの蓄積量、放出量、両者の差について示したものである。かかとの蓄積エネルギーが大きいのは、SFⅢ、SAFEⅡ、SACHなどであった。

SAFEⅡとSACHはかかどについては比較的似通った特性を示した。逆に蓄積エネルギーが小さいのはMultiflex、HF、1D25であった。

蓄積エネルギーと放出エネルギーが近い値、即ち、差が小さいものはHF、1D25、J-Foot、SFⅢなどであった。逆に差が大きいのは単軸足部で、他の足部と特性が大きく異なっていた。

つま先の蓄積エネルギーが大きいのは、SFⅢ、J-Foot、SAFEⅡなどで、かかどの時にエネルギー蓄積量が大きかったSACHは最も小さくなっていた。次に小さいのは単軸であり、古くからある足部の値が小さくなっていた。かかどでは比較的似通った特性を示していたSAFEⅡとSACHはつま先ではまったく異なった特性を示した。つま先の放出エネルギーについてはSFⅢ、J-Footが大きく、SACH、Multiflex、単軸が小さかった。蓄積エネルギーと放出エネルギーの差が大きいものは、SAFEⅡ、Multiflexであり、差が小さいものはSACHであった。SFⅢ、J-Footは比較的似通った傾向を示し、SAFEⅡもこれらに近い特性を示した。HF、CCⅡL、1D25、SCLFも、似通った傾向を示した。

足底についてエネルギーの蓄積量、放出量、両者の差についてであるが、足底部では足部全体で荷重を受けるため、変形量が小さくなり、エネルギーも全般的に小さかった。J-Foot、SFⅢは蓄積、放出エネルギーとも比較的大きな値を示した。

復元率即ち放出エネルギーと蓄積エネルギーの比について見ると、大きくSACH、単軸、その他の足部に分けられる。SACHはかかど、足底、つま先の復元率の値が比較的近い値になっており、構造に起因していると考えられた。単軸は足底の値がほぼ1に近く、つ

表4 エネルギー算出結果のまとめ

略称	かかと部のエネルギー (J)			足底部のエネルギー (J)			つま先部のエネルギー (J)			復元率		
	蓄積	放出	差	蓄積	放出	差	蓄積	放出	差	かかと	足底	つま先
SACH	40.2	32.1	8.1	9.0	6.6	2.4	19.3	14.8	4.5	0.80	0.74	0.77
Single axis	35.7	18.6	17.1	5.5	5.5	0.0	26.4	17.0	9.4	0.52	0.99	0.64
Multiflex	18.5	13.2	5.3	9.7	8.0	1.7	34.2	15.3	19.0	0.71	0.82	0.45
HF	19.0	15.6	3.4	9.1	8.1	1.0	34.9	23.2	11.6	0.82	0.88	0.67
SAFEⅡ	39.8	30.5	9.4	9.9	9.2	0.7	53.1	32.8	20.4	0.76	0.93	0.62
CCⅡL	24.7	18.3	6.4	7.7	6.2	1.5	41.4	27.1	14.3	0.74	0.80	0.66
1D25	21.0	17.2	3.8	9.6	8.2	1.4	43.5	28.9	14.6	0.82	0.86	0.66
SCLF	30.5	24.8	5.7	10.7	10.0	0.7	39.0	29.3	9.7	0.81	0.93	0.75
J-Foot	37.1	33.0	4.1	15.4	15.0	0.4	53.4	43.6	9.8	0.89	0.97	0.82
SFⅢ	50.6	46.0	4.6	13.6	13.0	0.6	58.0	43.6	14.4	0.91	0.95	0.75

つま先、かかとの順になっているが、つま先、かかとは0.5～0.6と小さな値を示した。即ち、単軸足部は足継手による足部の動きで荷重を受けているため、つま先、かかとではエネルギーの吸収、消費が大きいのに対して、足底接地時には荷重を受けるためのエネルギー吸収機構がないためにエネルギー消費が殆ど生じないと考えられた。

その他の足部は、足底、かかと、つま先の順に小さくなっている傾向は同一であるが、足部により異なっていた。

4. まとめ

義足足部の機械的特性として、JISを参照して、かかと、つま先、足底部の外力に対する変形量を測定した。さらに傾き（ばね定数）の算出、エネルギーの算出を行った。足部の重さも測定した。その結果、各足部の特性が求められ、各足部の特徴を良く表していた。

これらのデータは臨床的な使用感覚ともかなり一致しているが、多少のズレがある部分もあり、どの様な測定方法、測定条件が足部の特性を最も良く表すかについては、他のパラメータの検討と共に、今後、検討していく必要がある。

参考文献

- 1) 野坂利也、相川孝訓、他：義足足部の評価、日本義肢装具学会誌、第15巻特別号、68-69、(1999)