義足歩行

Walking with Lower Extremity Prosthesis

高橋 高治¹⁾

KOHJI TAKAHASHI¹⁾

¹⁾ Saitama Medical School Junior College: 38 Moroyama Iruma-gun Saitama 350-04 Japan. TEL +81 492-95-1111.

ABSTRACT: The final goal of rehabilitation for lower limb amputation is to establish walking by using lower extremity prosthesis. Depending on limited conditions of individual amputees and prostheses, we often find it difficult to attain to satisfactory results. With a special attention to the function of prosthesis, this lecture introduces prostheses widely used, those with some modifications, and those in the developing stages. In the case report of above-knee prosthesis, walking efficiency was examined to clarify how the quality of parts of prosthesis affects walking.

Key words: lower extremity prosthesis, walking with lower extremity prosthesis, efficiency

J. Exerc. Physiol. 9(1): 47-54, 1994. Recieved Dec. 20, 1993.

要旨 下肢切断のリハビリテーションは最終的には義足を装着して歩行を獲得することが目的である。しかし、切断者、義肢の限られた条件により必ずしも目的を達成できるとは限らない。ここでは、義肢の持つ機能に着目し、現在多く使用されている義肢、変わりつつある義肢や開発途上の義肢について述べる。合わせて症例を通して義肢部品の持つ機能が歩行に与える影響について大腿義足の膝継手を取り上げ歩行効率の面から考察を加えた。

キーワード: 義足, 義足歩行, 効率

1) 埼玉医科大学短期大学 理学療法学科: 埼玉県入間郡毛呂山町毛呂本郷 38 (〒350-04) TEL 0492-95-1111.

受付日 1993年12月20日

I はじめに

下肢切断のリハビリテーションの目的は、先天性あるいは後天性の原因により失われた下肢に対して義足などの代償具を用いて移動手段を獲得し、可及的早期に社会生活を送れるように援助する事である。切断の原因及びそのリハビリテーションの方法が近年の医療技術や工学の進歩により変わりつつある。特に切断原因では欧米に多かった糖尿病や閉塞性動脈硬化症などの循環障害による切断が我国でも増加しつつある。また義肢についてもソケットや義足構成部品、製作方法など進歩発展をしており、その恩恵に預かる切断者が増加しつつある。今回は義肢の現状について触れ、義肢の持つ機能が義足歩行に与える影響を症例を通して述べる。

II 義肢の最近の動向

1) ソケット

インターフェースとしてのソケットの変化は従来の概念を覆すものもある。ソケットは、断端の機能を義足に効率よく伝えと共に体重を支持する役目をもっており、また近年では懸垂機能を兼ねるものが多くなっている。

下腿義足では、PTB KBM PTSソケットが作製されるのが常識となっており、最近、1986年にISNYソケットの考案者のOssurr Kristinsson

がICEROSS (図1) のアイデアを米国の Fillaure 社に持ち込んだのが始まりで、TSB (Total surface bearing) 式下腿義足が開発された。この義足のソケットの特徴は断端全面で均一に体重を支持し、かつ吸着するのが従来のソケットと異なるところである。使用される内ソケットはシリコンで作製され、柔らかいソケットを靴下を履くように装着させるところから Roll on socket の名称が付けられており、徐々にその機能性と適応の広さから作製されつつある。

大腿義足のソケットでは四辺形ソケットが主流で、長年座骨支持ソケットの概念が受け入れられてきた。しかし、その概念を撃ち破り、坐骨はソケットの中に収納されたいわゆる坐骨収納型ソケット (Ischial-Raminal-Containment Socket: IRCソケット) が発表された²⁾。その代表的なソケットが1985年 Lehn, long, Sobolich らによるCAT-CAM (Controlled Adducted Trochanter, Controlled Alignment Method) ソケットで、Narrow M-L socket などその他にも幾つかの異なる名称があり現在普及しつつある (図2)。このソケットは四辺形ソケットと異なり、大腿骨が内転位に保持されるため側方への安定性に優れ、また、断端全面で体重が支持されるので膝継手のコントロールがしやすく、より生理的な歩行に近い感覚で歩けるのが特徴である。ソケットの材質の面からみると、装着時にソケットの形状の変わらないハードソケットから柔らかいフレキシブルソケットが使用されるようになってきた。このソケットは歩行

図1 ICEROSS 式シリコンソケット

図2 IRC ソケット

中の断端の形状変化に柔軟に適合することにより快適な装着感を得ることが利点の一つで、TCソケットやISNYソケットはその代表的なものである(図3)。ソケットは路面の状況や継手の角度などを断端に伝える役目も持っているが、切断者に十分な情報を伝えることは困難である。そこでこれらの情報をセンサーによって捕らえ、断端部の皮膚に電気刺激や振動刺激としてフィードバックし義足をコントロールしやすくしようとする感覚義足が試作されている³⁾。

股義足ソケットでは、現在受け皿式やティル

ディングテーブル式股義足は処方されることがほとんどなく著者は実物を見た事がない。現在ではカナディアン股義足が主体でその改良タイプのソケットが切断者に応じて作製されるようになってきた(図4)。最近注目されるのは、サンディエゴのRGPとオクラホマのSabolich 義肢センターにおいて、大腿義足ソケットで述べたCAT-CAMソケットの理論が股義足ソケットに応用され、坐骨結節で支持するより坐骨枝の方が内外方向の安定性、回旋方向の安定性に重要であると述べ、4年間に67例に装着している⁴⁾。今後、装着感、快適性、懸垂性の面から材質などを含めてより優れたソケットの開発が期待される。

A. TCソケット

B. ISNYソケット

図3 TCソケットとISNYソケット

2) 継手

継手は失われた生体の関節機能を代償するもので股継手、膝継手、足継手がある。継手は支持性と可動性の機能を持つが現時点では能動的な機能を持つ継手は開発途上にあり実用段階に至っていない。現在、製作される義肢の多くは骨格構造義肢で、特に高位切断者になるほど義肢全体の重量などから殻構造義肢は不利である。

股継手は、小型なこと、大きな曲げモーメントに耐える強度を持つこと、ソケットの下に出っ

図4 股義足ソケットの各種タイプ

張らないこと、前額面、矢状面、及び水平面のアライメント調節が出来ること、歩幅調節が出来ることなどが条件である。一般的には単軸継手であるが最近リンク式継手も設計されてきている(図5)。この継手の瞬間回転中心の軌跡はソケット内にあり、正常股関節に近いところにあるのが特徴である。いずれにしても股義足では、股継手、膝継手、足継手及び足部とコントロールされる継手が多くなるため切断者に応じたそれぞれの組合せが重要である。

膝継手は、立脚相の安定性と遊脚相の円滑な

●—重心 ●—荷重線 ●—図の各屈曲位置における回転中心

図5 Blatchford 社製4節リンク股継手の瞬間回転中心の軌跡

義足の振り出しを受け持ち、そのための種々の機構を持つものがある。立脚相における膝継手の中折れを防ぐ機構として最もポピュラーなものに荷重ブレーキ膝(安全膝)がある。これは切断者が義足に体重をかけることにより継手がロックされるもので面摩擦式やクランプ式などがある(図6)。しかし、確実にこの機構を生かすためには義足のアライメントと正しい義肢のコントロールを習得する必要があるこれのみでは中折れ防止することはできない。遊脚相制御は歩行速度に関係し、継手の摩擦抵抗を変えることで行なうが、大きく定摩擦膝と可変摩擦膝に分けられる。前者は遊脚相を通して継手の摩擦抵抗が一定で、後者は遊脚相初期と後期で抵抗が変化しようになっている。接続されたシリンダー内のピストンの動きを、オイルや空気の流れを弁の開閉によって制御する方法が多くとられている。最近では義足に内蔵されたマイクロコンピューターで弁の開閉を自動的にコントロールし、歩行速度に追従して膝継手の抵抗を変化させ、歩行速度を任意に変えられるインテリジェント大腿義足が兵庫リハビリテーションセンターで15年間の歳月をかけ開発され、近く実用化を向かえる⁶⁾。

足継手および足部では、高機能足部(エネルギー蓄積型足部)の開発が目ざましくスポーツなど切断者の余暇活動への参加を可能にしている。これらの足部は、1970年代後期よりアメリカで開発が始められ、当初は下腿義足装着者の運動特にスポーツができるようにという目的があった。

図6 安全膝継手

従来のSACH足の簡単な構造、軽量及び保守性を活かしつつ、立脚相の後半で蓄えられたエネルギーを立脚相の後期から遊脚相にかけての踏切期に一気に放出し、走る、飛ぶなどの運動を可能にした。今日では下腿義足のみでなく大腿義足にも使用されるようになってきている。ちなみにソウルで行われたパラリンピックの短距離競技の100m競争の大腿切断者の優勝記録タイムが15秒68、下腿切断者のそれが11秒73であった。

3) その他

義肢の装着時期は可及的早期に行なわれるのが望ましい。術直後義肢装着法は、優れた方法として一時期脚光を浴びたが、現在その適応には厳重論がある。現在では早期義肢装着法が一般的となっているが、それには仮義肢の作製が必要である。しかし、早期の断端は周径など断端の変化が激しく、常に最適状態を維持するのは大変である。簡便で誰が作製しても同じ効果が得られるものが望ましい。エアバッグ義足、河村らの開発した超軽量化大腿義足（ソケットは調節式）⁸⁾⁹⁾、著者¹⁰⁻¹²⁾の開発したTC-S式調節ソケット（図7）などがあるがいずれも一長一短がある。また、断端の骨に直接金属を埋め込み義肢を直結する方法

が研究されているが、まだ解決すべき問題が多く成功すればその恩恵は計り知れない。

今後、我国でも増加しつつある高齢者や全身状態が不良な切断者が、簡便に装着できる懸垂機能を持った大腿義足ソケットの開発や、小児や成長期にある切断者に成長する義肢の開発が期待されるところである。

4) 義足歩行の評価

義足歩行の状態を客観的に知ることはよりよい義足の開発、切断者の機能の拡大にとって極めて重要である。ソケットと断端の適合状態を見る方法として、ソケット内の内圧を測定したり、断端に造影剤を塗布し義足を装着した状態でX線で見する方法やCTスキャンにより断面を見る方法などがある。また、義足が身体の一部としていかに受け入れられているかを測定する方法として床反力計やビデオ、グラビコーダー等が最も多く使用されている。しかし、エネルギー効率の面から義足の適合状態を検討した報告は、片麻痺など他の疾患に比べると比較的少ないようである。興味ある報告の一つに歩行中の、Prebo反応時間を見ることで適合状態を類推できるとしている報告がある¹³⁾。

以上のように義足歩行の検討は種々の方法により行われている。今回、大腿義足の膝継手の摩擦が歩行スピードに与える影響について、エネルギー効率の面から検討し、併せて健常者とも比較してみたので参考に呈示する。

III 症例の検討

1) 対象と方法

被検者は切断者1名、健常者1名の計2名である。

切断者は、21歳、男性、左大腿切断、断端長19cm、身長160cm 体重53kgである。

1991年11月11日 骨肉腫にて左大腿切断術施行、

1992年1月4日 仮義足作製、

1992年4月30日 本義足作製した。

仮義足、本義足共に部品は膝継手はブラッチホード社製空気圧制御膝、足部はマルチフレックスである。ソケットのタイプは、仮義足はTC-S

図8 TC-S式調節ソケット

型、本義足には TC 型が作製された。

健常者は、20 歳、男性、身長 167cm、体重 58 kgである。

切断者の快適歩行速度に設定された膝継手の摩擦抵抗で10mの直線歩行路を、快適歩行速度、最もゆっくり歩ける最低速度、それよりやや速く、最も速く歩ける最高速度、それよりやや遅くの5通りの歩行速度でそれぞれ3回歩きその平均値を求めそれぞれの歩行速度を決定した。この歩行速度をトレッドミルで再現し、3分間の安静を保持させた後、快適歩行速度(3.8km)、ややゆっくり(2.9km)、最も遅く(2.4km)、快適歩行速度(3.8km)、やや速く(4.2km)、最も速く(4.9km)の順で3分間づつ歩かせた。歩行中は連続して心拍数と呼気ガスを測定し、各々の歩行速度での最後の1分間をサンプリングして検討した。健常者も同じ歩行速度で行った。また、参考として、切断者のみ膝継手の摩擦を最も速くの4.9kmで歩き安い摩擦に設定し、その状態で最も速く(6km)（これ以上速く歩けない）とやや遅く(3.8km)についても測定した。それぞれ、歩行中の酸素摂取量(VO_2)、心拍数(HR)、歩数を測定した。 VO_2 の測定は自動的に測定可能な OXICON BETA (MIJN HARDT B.V.)を用いた。HRは、胸郭部と第5肋間に電極を接着し(CM5)、心電図監視装置（フクダ電子 ECU-10）をもちいて記録した。

2) 結果

表1を参照しながら各結果について述べる。歩行スピードと METS との関係についてみると歩行スピードが増すにともなって増加を示した。

1分間当たりの酸素摂取量は切断者において快適歩行速度、やや早い歩行速度に差は殆どなく、最も速い速度において増加していた。健常者では歩行速度が増すにしたがってなだらかな増加を示した。つぎに歩行速度と1分間あたりの酸素摂取量を歩行速度で除した値 ($VO_2/speed : ml/kg/m$)についてみると、切断者はやや速い歩行速度において最も低い値を示したが、健常者では歩行スピードが増すにしたがって減少していた。1分間当たりの酸素摂取量を1分間のstep数で除した値 ($VO_2/steps : ml/kg/step$)では、切断者は最も速い歩行速度において増加を示したが他の歩行速度においては変化がなかった。健常者では快適歩行速度、やや速い歩行速度で低値を示した。膝継手の摩擦を早足に設定した時の結果は、それぞれ表2に示すように 3.8km/h 4.9km/hでの $VO_2/step$ の酸素摂取量は快適歩行速度に設定した状態と変わりがなかったが METS, $VO_2/speed$, $VO_2/分$ はいずれも低い傾向にあった。

3) 考察

一般にエネルギー効率から歩行速度を見ると Brezinaら¹⁴⁾¹⁵⁾は、80-90m/minが最も効率がよいという。今回の歩行速度は切断者の快適歩行速度に設定し、かつ、トレッドミルにて速度を再現したため必ずしも一致するとはいえないが健常者についてはほぼその傾向が認められた。すなわち、80m/minに近い4.9km(82m/min)114歩/分、において最も酸素摂取量が少なかった(表1)。これに対して、切断者では快適歩行速度よりもやや早い速度、70m/min(4.2m)110歩/分が最も低く、

表1 歩行スピードと酸素摂取量との関係

speed	METS		$VO_2/kg/ml/min$		$VO_2/ml/m$		$VO_2/ml/step$	
	A/K	Normal	A/K	Normal	A/K	Normal	A/K	Normal
rest	0.9	1.4	3.3	4.8	-	-	-	-
2.4 km/h	3.4	2.8	12.0	9.7	0.3	0.25	0.16	0.14
2.9 km/h	3.9	3.0	13.7	10.7	0.29	0.22	0.16	0.13
3.8 km/h	5.0	3.5	16.7	12.0	0.28	0.2	0.16	0.12
4/2 km/h	5.1	3.8	17.0	13.3	0.24	0.19	0.16	0.12
4/9 km/h	6.3	4.2	22.1	14.8	0.27	0.18	0.18	0.18

A/K: above-knee amputation Normal: 健常者

表2 切断者の歩行スピードと酸素摂取量との関係

speed	METS	VO ₂ /kg/ml/min/m	VO ₂ /ml/step	VO ₂ /ml
rest	0.9	3.3	-	-
3.8 km/h	4.7	16.4	0.26	0.16
4.9 km/h	6.2	21.6	0.26	0.18
6.0 km/h	7.2	27.3	0.27	0.21

Bard¹⁶⁾が述べるごとく歩行速度がエネルギー効率に依存するとすれば快適歩行速度に設定した膝継手の摩擦の主観的感覚とエネルギー効率とは必ずしも一致しないのかも知れない。この点については今後検討が必要である。平上¹⁷⁾は、大腿切断者の快適歩行速度は、55.8±0.1m/min、Waters は52±11m/min、平田¹⁴⁾は43.4m/minであったと述べており、今回の症例はこれよりやや速い。大腿切断者の快適歩行速度については、諸家の報告によるとこれより遅い報告が多く膝継手や年齢などによるものの影響があるものと思われる。尚、下腿切断者はこれよりも低く、健常者については今回の結果とはほぼ同様の値を報告している。

分時酸素摂取量では切断者は健常者よりそれぞれ12.3%–14.9%平均13.3%の増加傾向にあった(表1)。平上によると歩行速度が70m/分程度の時、大腿切断者は19.2ml/kg/minに対して正常者では10.7ml/kg/minで、健常者に比べ大腿切断者は78%増加したと報告しており、今回の被検者では、同じ70m/分における酸素摂取量は、大腿切断者は17.0ml/kg/min、健常者が13.3ml/kg/minで、12.8%の増加であった。しかし、その他の研究者の報告にも必ずしも一致を見ないと述べており、その理由として切断者および義足と切断者の適合状態やアライメントなど種々の条件を指摘しており、著者も同意見である。歩行スピードとMETSについては、平上は、大腿切断者、下腿切断者は、健常者に比べ約1METS高い負荷量であったと述べているが、今回の被検者では歩行スピードが増すに伴ってその差が大きくなり、快適歩行速度の63.3m/分で1.5METS、測定上の経済速度である70m/分で1.3METS健常者に比べて増加していた。波多野の報告に健常者の歩行速度が70m/分の時3METS、100m/分の時4METSに相当すると述べているが70m/分の時5.1METS、

100m/分の時6METSであった。

大腿切断者について、継手の摩擦を快適歩行速度と、最も速く歩行できる4.9kmに設定した時の3.8kmと4.9kmにおけるそれぞれの比較では後者の設定においてやや低く、膝継手の摩擦を歩行スピードに合わせて設定する事の有効性がうかがえる。

以上のように、大腿切断者の義足歩行において膝継手の遊脚相制御が歩行スピードや歩行効率の面から見ていかに重要であるか、またその適合状態を主観的評価のみに頼らず客観的評価を行う事が、より快適に身体の一部として受け入れられる義肢の制作や開発にとって重要であるかがうかがえる。

IV まとめ

1. 義足の各種構成部分について最近の動向について述べた。
 2. 大腿切断者、健常者の歩行時の酸素摂取量を比較し、膝継手の持つ役割を検討した。
 3. 健常者では、80m/minに近い4.9km(82m/min)114歩/分、において最も酸素摂取量が少なかった。
 4. 切断者では快適歩行速度よりもやや早い速度、70m/min(4.2m)110歩/分が最も酸素摂取量が少なかった。
 5. 本症例の快適歩行速度は諸家の報告する大腿切断者の快適歩行速度より速かった。
 6. 分時酸素摂取量は切断者は健常者より12.3%–14.9%、平均13.3%の増加傾向にあった。
 7. 切断者の快適歩行速度は、エネルギー効率の面からみた快適歩行速度と一致しなかった。
- 以上から、大腿切断者の義足歩行において膝継手の遊脚相制御が歩行スピードや歩行効率の面

から、適合状態を主観的評価のみに頼らず客観的評価を行う事も重要である。

稿を終わるに当たりご協力いただいた被検者、ならびに当科中山先生に深く深謝いたします。

引用文献

- 1) 田沢英二：TSBソケット形状とシリコーンサクシونسリーブ懸垂の概念。日本義肢装具学会誌, 2: 145-150, 1991.
- 2) 田沢英二：坐骨収納型ソケットの概念とその歴史。日本義肢装具学会誌, 4: 293-301, 1990.
- 4) 澤村誠志：ソケットの適合と処方について。日本義肢装具学会誌, 3: 165-173, 1989.
- 5) 青山 孝：これからの股義足。日本義肢装具学会誌, 3: 203-208
- 6) 中川昭夫・他：インテリジェント大腿義足のフィールドテスト。日本義肢装具学会誌, 1: 15-19, 1992.
- 7) 川村一郎：海外における新しい義足足部の動向。日本義肢装具学会誌, 2: 111-118, 1987.
- 8) 川村次郎：義肢編。義肢装具学, 医学書院, 1992.
- 9) 前川昭次・他：訓練用下腿義足。日本義肢装具学会誌, 2: 167-172, 1991.
- 10) 岩名達夫・他：周形調節型ソケット (TC-S型) の試作。日本義肢装具学会第三回大会講演集, 4: 61-62, 1988.
- 11) 石倉祐二・他：周形調節型ソケット (TC-S) の試作。日本義肢装具学会第三回大会講演集, 4: 117-118, 1988.
- 12) 高橋高治・他：調節式大腿吸着ソケット (TC-S型ソケット) の試作。理学療法学, 14 (学会特別号) : 40, 1987.
- 13) 佐直信彦・他：正常歩行中の Prove - 反応時間。日本義肢装具学会第3回大会講演集, 4: 169-170, 1988.
- 14) 佐藤方彦監修：5・2 作業効率人間工学基準数値式便覧。技法堂出版, 1992, pp212-220.
- 15) 中村隆一・他：歩行時のエネルギー代謝 基礎運動学 第3版。医歯薬出版, 1988, pp322-324.
- 16) Bard G, Halston HJ : Measurement of energy expenditure during ambulation with special reference to evaluation of assistive devices. Arch Phys Med Rehabil, 40: 416-420, 1959.
- 17) 平上二九三・他：下肢切断者の歩行速度とエネルギー消費量との関係。日本義肢装具学会誌 1, 65-71, 1985.