

福祉機器・生活支援機器における先端エンジニアリングの導入

～人を越える義肢装具はできるか～

The introduction of the advanced technology in welfare device / the life support device

○松田靖史 川村慶（川村義肢(株)）

Yasushi MATSUDA, KAWAMURAGISHI Co.,Ltd

Kei KAWAMURA, KAWAMURAGISHI Co.,Ltd

Key Words: Prosthesis&Orthosis, Assistive Device, Black Box

1. 補装具としての義肢装具

障害を持つ人が社会に戻る手段の一つとして福祉機器や生活支援機器や補装具の利用がある。これらは単に法律や慣習による用語の違いであり同じ物を示す。しかしそれぞれの言葉の意味には大きな違いがあって興味深い。

“福祉”という言葉が元来持つ意味は幸福であり、公的扶助やサービスによる生活の安定や充足を意味する。現在の日本ではこの公的扶助の部分のみ注目されているがそうではない。福祉機器とは単なる日常生活に戻る機器ではなく利用者を幸福に導く手立てであり機器支援である。

同様のことが生活支援機器にも言える。“生活”とは衣食住が足り生きることでなく「生存して活動する」ことであり「世の中で暮らしていく」ことである。支援機器は障害を持つ人が生きる支援をするのではなく社会活動を行う支援、世間で共生する支援が本来の目的である。

補装具は“補い”“装う”“道具”である。補うとは不足を満たす／埋め合わせる／欠けた部分を繕う意味であり、古語オギヌウ＝つぎをあてて縫い繕う意である。つまり補装具とは身体における欠損や機能しない部分を外部からあてがう道具と言える。

補装具として、杖・義眼・補聴器・義肢（義手・義足）・装具・車いす・スイッチ類（2006年より重度障害者用意志伝達装置のインターフェイスとして加えられた）などが認められている。

1-1 義肢の歴史

義肢とは切断や外傷により四肢（手足）を失った場合に用い、主に義手と義足に大別される。義足は切断した下肢に装着する。義足は立位と歩行を目的とし個々の断端（切断した身体端部）の形状に適合したソケットと呼ばれるインターフェイスを製作し歩行能力によって構成部品を選択し組み立て調整し完成する。

義肢は古くから活用されている。また足の切断術自体も古くから行われており、インドの医学書「リグーベダ」の中に義眼や義歯や義肢の用いられたことが明記されているのが最も古い記録である。これは紀元前1500年から800年のものと言われている。1858年、イタリアのナポリの近くにある紀元前三世紀頃のカプアの墓から発掘された義足は「カプアの棒義足」と言われこれの模作は英国王立外科学会に所属されている。1862年、パリ近郊で発掘されたイオニア人の花瓶にも下腿の棒義足が描かれているが、これも紀元前四世紀頃のものと思われる（Fig1）。この花瓶はルーブル博物館の所蔵品である⁽¹⁾。

日本国内で義足を用いた最古の記録は、幕末から明治初期に立女方（たておやま）として活躍した歌舞伎役者三世

沢村田之助（1845-1878）と記録されている。19歳の頃より脱疽にかかり1867年（慶応3年）横浜でアメリカ人医師 Hepburn（ヘボン式ローマ字を考えた人）に左下腿切断をうけ、活人形師松本喜三郎の作った義足を用いたが、実用にならなかった。翌年4月アメリカ製の義足が届いたのでこれを装着し、また舞台に出たという（Fig2）。このことより現在の義足にも言えることであるが義足や義手において優先されるべき事項は見た目や歩く機構や掴む機構ではなく、人の身体と直接に触れ合うソケットの形状と機能の適合こそが重要な要素であるといえる。



Fig. 1 Ancient Prosthesis



Fig. 2 Prosthesis history of Japan

義手は外見の再現を考えた装飾用と残存筋や肩の運動を力源とし日常生活や軽作業を助ける動作をする能動用があり両者とも人間の手の形状に似ている。特定の作業に特化した作業用がある（Fig3）、作業用義手は目的優先のため必ずしも人体の形状をしている必要はない。

義手の歴史は義足に比べると遅れている。それは人の高度な知能により利き手交換や道具による代替が行えるためである。義手で有名なのがゲッツフォンベルリヒンゲン（1480～1562）の鉄製義手である（Fig4）。彼はバイエルンの一地方シュワーベン（Schwaben）の貴族の出で1480年ヤークストハウゼンに生まれ騎士となり1504年ランツフートの戦いで小

銃に撃たれ負傷し右手を失ったが甲冑製作者により鉄製の義手を製作した。この義手は現存し手首や指の関節は自由に屈曲伸展が可能で、スイッチによりバネで元に戻る機構である。



Fig. 3 working below elbow prosthesis



Fig. 4 Goetzens's mechanical hand

1-2 装具の歴史

義肢装具の装具とは手足自体の形状は失っていないが麻痺による運動機能の不良や緊張性の変形を防止するなどの機能面の補助で使用し、身体の外側に装着する補装具である。目的は装具によって様々であり病気や怪我の治療のためや後遺症により失われた機能を代償するために用いられることが多い。

装具はもともと骨折の「副子(添え木・副木)」から発生したものである。BC3000, パピルスには骨折用の副子や包帯固定の方法が記載されている。医学の祖ヒポクラテス(BC460-377)には固定だけではなく牽引装具も製作した記録が残されている (Fig5)。

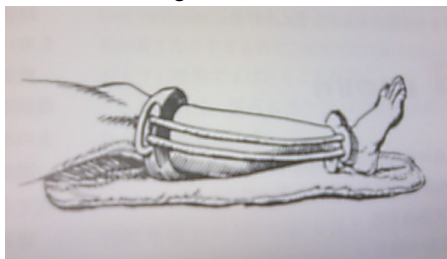


Fig. 5 Extension Orthosis

近年の装具療法でもこの時代からの考え方は変わっていない。固定により安定を得る手法や撓りを持たせる事で関節の動きに追随させる手法である。

2. 近代の義肢装具

長い間、手足の無い部分に機械構造による機能の無いスペースを埋めるだけの義肢であり外側からの支えだけではない装具であった。製作は金属などの材料加工技術者により原材料から完成品まで手作りの作業によって作られており、多くは鍛冶屋や大工の加工技術をベースとし一貫して作られていた。その間に一般工業分野での技術には大きな進化が起こり補装具もその恩恵を受ける事となった。最たる技術の進化は、従来使われてきた補装具の材料である金属や皮革や布帛に加えて人工化学樹脂が使われたことで

ある。強度があり繊維強化が可能な熱硬化性樹脂と、形状適合の容易な熱可塑性樹脂の出現は補装具の人体形状適合性を飛躍的に高め、並行する医学と工学の進歩により生活様式に合った機能を持つ補装具へ変化してきた。

2-1 近代の義肢

義肢においてはこれら樹脂材料により人体の切断端と義足の接合はなめらかになり、強度のある樹脂で人に似せた各部分を持ち金属軸を備えた外観上は人体に近い義足が一般に使われるようになった、これを殻構造義足と呼ぶ (Fig6 左)。また 1920 年頃には義足を大腿部・膝関節部・足関節部の3つの部分に分解 (モジュール化) し膝部分と足部分を工場で大量に生産するシステムが完成された。これにより義足を構成する多くの部分は工業製品と置き換えられ、常に一定の品質が保証されるようになった。このモジュール方式の義足を骨格構造義足と呼ぶ (Fig6 右)。



Fig. 6 The kinds of lower-limb prostheses, exoskeleton(L),endoskeleton(R)

多くの福祉機器が進化するきっかけは残念なことであるが戦争であることが多い。第一次世界大戦時(1914~1918)のこの進化により製作者は大工や甲冑鍛冶師や人形師の職人から工学に基いたエンジニアの仕事へと代わり、材料はより高機能なエンジニアプラスチック、アルミニウム合金や金属チタニウムや金属マグネシウムへ、また鉄の鍛造技術からガラス繊維や炭素繊維強化樹脂の成形技術へ、そして構造は単なる軸継ぎ手から荷重ブレーキやリンク機構へ変化し機能を持ち始めた (Fig7)。この時代で杖代わりの補装具から人の体型や歩行を考慮した“義(代わり/替えの意)肢”となったといえよう。



Fig. 7 The variations of the knee-joint

2-2 近代の装具

装具は従来より整形外科的保存療法の一つとして捕らえられて来たが、第二次世界大戦(1939~1945)以後は医療の発展とともに運動学や生体工学、リハビリテーション工学の普及によって装具療法として重要な位置を占めるようになってきた。

熱可塑性樹脂による身体に添った構造のプラスチック製

下肢装具や軽量で加工性が良いジュラルミン製の両側金属支柱式下肢装具が多く使われるようになった (Fig8).



Fig. 8 The variations of Ankle Foot Orthosis

3. 工業技術と現在の補装具

第二次世界大戦以降には補装具の利用者が戦病兵や戦傷者ではない割合が増えてきた。特に 1970 年代からはアメリカとヨーロッパを中心に栄養の偏りや運動不足が起因となる糖尿病による血液循環不良からの下肢切断が増え、脳閉塞やクモ膜下出血など脳血管障害による半身麻痺(片麻痺)の発症率が高くなり、それらに対応した義肢装具の需要が増えている。義肢装具の技術革新も二度の世界大戦や産業改革や自動車技術の水平展開ではなく、航空機技術やロボット工学や IT 産業の技術が利用されつつある。

また現在の医療では怪我や麻痺による運動機能障害を持つ人の動作解析技術が構築され、それより導かれた理論を元に動力こそ持たないが油圧や四節リンクなどの機械要素を義肢装具に組み込み身体の動きに制限を加えたり制御する義肢装具が使われている。

3-1 現在の義肢

人間工学と生体工学の発達により、人間の生体構造を模した以前の義肢部品には無い構造を持つ義肢部品が現在では多く用いられる。

人体の膝関節の構造は Fig9 右に示すごとく 2つの大きな骨(大腿骨と脛骨)の前に膝蓋骨が覆う単純な形であり、大腿骨と脛骨は滑り転がり軸受けの機能を果たしている。動作時に逆向きへ曲がるのを防止するのが膝蓋骨の役目であり他に 4本の靭帯が制限をかけている。この機構を人工物で置き換える技術は容易ではなく似通った動作の再現として四節リンク機構を 2つ組み合わせ合わせた膝継ぎ手利用されている (Fig 9)。

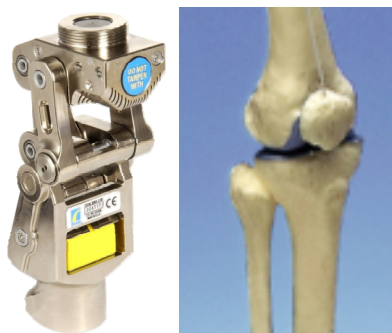


Fig. 9 Knee-joint, Artificial(L), Living-body(R)

人体の足関節から足部の構造(踝から先を示す)は, Fig10 右に示すごとく 26 個の骨から複雑に構成されている, 足関節である踝は 1つの機械軸ではなく 4つの骨により反り返りと捩れと旋回の機能を果たしている。踝から先の踵や手指同様の四節を持つ趾骨の構造は膝と同じく滑り転がり軸受けである。歩行や跳躍の衝撃を 26 個の足部の骨と 2本の下腿部の骨に付く筋肉で緩衝し、また違う部位の筋肉を用

いて蹴り出しの機能を果たしている。この仕組みと同等の能力を人工物で再現するには構造上の問題と出力(動力である筋肉)の問題はまだ解決しえていない。現在では材料の持つ撓りを用いて似た動作を得ている。30~50t 級の引っ張り強度を持つ炭素繊維強化樹脂 4 枚で構成された足部は踵接地の際にブレードに加えられた荷重を撓みのエネルギーとして蓄積し爪先接地から体重が前方に移動する際にエネルギーを放出し歩行の支援となっている (Fig10)。

単純なヒトの膝を機械構造で再現するには多くの部品点数が必要で、逆に多くの骨を持つヒトの足部を再現するには少ない部品点数である点が興味深い。

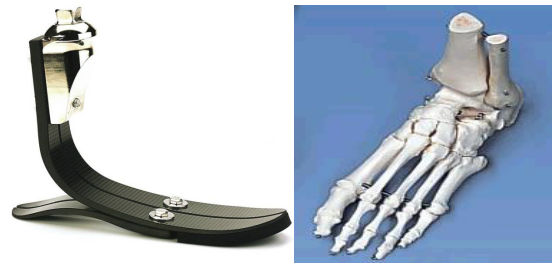


Fig. 10 Parts of foot, Artificial(L), Living-body(R)

3-2 現在の装具

装具の利用者が従来の骨折時の固定や麻痺による下垂足の支えだけで良かった時代から、義肢同様に装具も歩行支援の機能が求められるのが現代の装具の特徴である。

世界中で高齢者が増加し、少子化による将来の生産力の減少が予見される現代では、障害者の多くを国家や地域で世話し介助することは事実上不可能であり、可能な限り多くの人に自力で移動し自立を望むのは現代社会の命題ともなっている。

また医療の見地からも過去の固定だけの装具では廃用性の麻痺や関節部の拘縮や硬化など負の側面も明らかになっており義肢同様の制限要素を持つ機械構造で歩行を制御する装具が増えている。つまり現代の下肢装具で必要とされる主な機能は、十分な固定力に加え、底背屈制御(底屈: 爪先が伸びる動き, 背屈: 爪先が反り返る動き)である。

装具は人体の外側に装用されるためにスペースの制限があり、歩行による加速度の影響下にある体重を支える機構でなければならない。Fig11 左は金属バネを用いた爪先挙上(背屈補助)の特徴を持つプラスチック製下肢装具である、Fig11 右は歩行の動作解析より導かれた 4つの相に足関節の動きを分け、踵接地の底屈時の衝撃を油圧のダンパーで吸収し、背屈時には微細な補助を金属バネで行い、中間位から先の蹴り出しは制限をかけない一連の制御を行うピストン&シリンダー式の油圧制限機構を持つチタニウム製の両側金属支柱式の下肢装具である。



Fig. 11 The latest Ankle Foot Orthosis, DACS-AFO(L), Gait-Solution(R)

4. 最新の義肢装具

単に支えてしかなかった古代の義肢装具から、機械要素による制御、そして油圧空圧による制御となり、最新では電子制御も導入されている。

Fig12左は角度センサーとAIを備えたエネルギー蓄積開放式の義足足部である。予め義足使用者の身体条件を入力するだけで、その後は日常の歩容（歩幅や歩隔や速度）と足関節の角度を記憶し、義足使用者の現在の状況“座位から立ち上がる”“坂道を上がり始める”“階段を降り始める”などを判断し、その体勢にあった足関節角度に自動で設定する。今までの義足使用者が路面の変化にいつも注意を払い俯いて対応していた動作を足部自身が判断し反応し動作する。

Fig12右は学習機能に特化するAIと磁性流体により粘性抵抗の調整機能を備えた義足の膝継ぎ手である。足部と同様に義足利用者の特徴を判断しなめらかな制御や膝折れの防止の制限を膝継ぎ手に加える。磁性流体は Stick-Slip 現象や不規則な動きが無く無段階に調整を行う⁽²⁾。

特筆すべきはこれらの高機能な義肢部品が注目を集める高活動な義肢ユーザーに向けた製品ではなく高齢者もしくは加齢による虚弱者に向けた製品である点である。



Fig. 12 The cutting-edge Prosthesis Parts, PROPRIO-FOOT(L), RHEO KNEE(R)

5. 人間を超える義肢装具

前出の最新の義肢部品には動力は付いていない。従来の義足とロボットを分ける基準は「人間の身体に付き、動力がない」のが義足であった。しかし最先端の義肢では動力付き膝を持つ義足が実用化されている。完全な自己制御ではなく健足の動きをコピーする段階ではあるが、利用者本人にはコントロールしやすい膝継ぎ手である (Fig13)。



Fig. 13 Powered-Prosthesis, POWER KNEE

足部ではCFRPを主材料とすることで生身より速く走る切迫者も現れた。両脚義足のスプリンター、オスカー・ピストリウス (Fig14) は2007年7月、ローマで行われた陸上競技にて健常者7人と男子400mレースに出場し、トッ

プと0秒18差の46秒90で2位に入った。結果としては北京オリンピックへの出場は適わなかった。

人間工学から考えると、トレーニングを積んだ競技者でも全速での走行時、下腿部の筋肉（ヒラメ筋群）は100～150m分の乳酸しか貯める事ができない。しかしエネルギー蓄積開放足部の付いた義足を見に着けたオスカーは静止立位時から飛び上がる事こそ不可能であるが、走行時に乳酸過多で下腿部から下が動かなくなることはない。

既に単一機能だけで考えれば人工物である義足は生身の人間の持つ機能を遥かに越えていると言える。

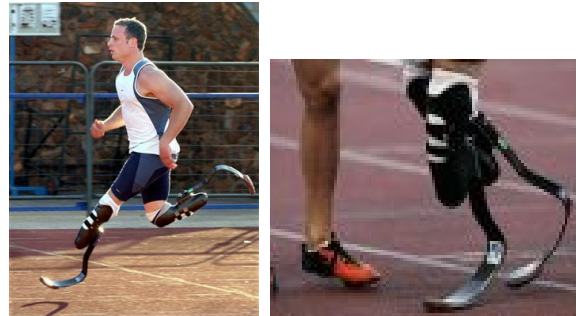


Fig. 14 Oscar Pistorius, & his prosthesis

6. まとめ

工学や医療の面から見るこれらの高機能な補装具は各方面から常に注目を集めるが、実際のユーザーが欲する義肢や装具とはいかなるものであろうか？

Fig15は義肢装具士ロドルフォ・マルロ・オルティスバスケス氏が長い経験則から開発したマルロアナトミカルソケットである。従来の義足では不可能であった安定した椅子座位、深い前屈み姿勢、あぐら座位が容易に可能である。また身体ラインに沿うことからタイトな衣装を着ることも可能である。



Fig. 15 M.A.S.Socket

Skillful-workman Marlo Ortiz's Socket

真に必要な支援技術や福祉機器とは、日常生活で健常者と同じに生活と活動ができること、それだけである。

日常生活に不利な欠損した部分がある事は明白な事実であるが、利用者の用途や目的に添った技術を選び、利用者の実生活に沿う最適な形で具現化することがこれからの社会福祉における支援工学であると考えられる。

参考文献

- (1) 川村義肢(株) HP <http://www.kawamura-gishi.co.jp>
- (2) オズール社 (OSSUR) HP <http://www.ossur.com>