

内 22-83

早稲田大学大学院理工学研究科

博 士 論 文 概 要

論 文 題 目

歩行中のヒト足部に着目した力学モデル解析と
その応用に関する研究

Study of the Dynamic Model Analysis of the Human Foot Complex during Gait
and its Applications.

申 請 者

高嶋 孝倫

Takamichi TAKASHIMA

生命理工学専攻 バイオメカニクス研究



2003 年 1 月

人類の二足歩行の起源として諸説があるが、約400年前の化石にはその痕跡が見られるという。そのことにより開放された手は様々なモノを創り上げてきた。今日の文化はまさに偉大なる創造物の結晶である。しかし、それと引き替えに重力に抗して起立した人体構造には特に脊椎、そして足部に大きな負担を強いられる事になった。さらに闊歩性二足歩行という人類独特の移動様式において歩行周期の後半には足部は片持ち梁構造となり、さらなる負担が強いられる。この負荷に抗する機構として最も顕著な特徴はアーチ構造にあり、生体足部の支持組織によって構成される抗重力機構として捉えられる。

支持要素に何らかの疾病、あるいは障害を生じた際には、このアーチ構造は破綻をきたす。扁平足や外反母指といった、現在も数多く見受けられる足部疾患は足部の支持要素に何らかの問題を生じている。足部疾患の代表的治療法は対症療法である。原因疾患そのものに対する治療も当然行われるであろうが、足部に対しては変形の予防や矯正といった手段が選択されるケースが多い。いわゆる保存療法であり、著者が専門とする装具療法も保存療法に含まれる。装具は生体外部より、生体内部の疾患部へと力を加える事を原則とする。従って生体（この場合は足部）に加えられるカベクトルの位置、大きさ、方向が装具の効果を決定する上で重要なポイントとなる。現状ではこのカベクトルを決定する装具のデザインは患者の観察による判断と義肢装具士の経験とによってなされているのが現状であり、足底装具の形状など疑問の余地は大いにあると考えている。

また、足部疾患のみならず、誰しにも訪れる老化もアーチの機能低下を引き起こす原因である。アーチの低下、及び同時に起こる足関節駆動筋の筋力低下によって立位・歩行時に不安定性が生じる事はいうまでもなく、少しでも低下した機能を補填する方策についての多様な角度からの検討が必要であろう。

そこで本研究は、足に病変を有する患者のための足底装具や靴型装具の評価法の確立、及び装具療法の効果に対する判断基準の確立などに具現化される足部障害者への寄与を目的とする。具体的な目標として、第一にアーチ部の負荷を定量化し、計測実験、及び逆動力学解析によって歩行中の足部における変形や内部の力学的挙動を明らかにする。第二にその結果を受け、アーチ支持要素のモデル化によるアーチ支持機構による粘弾性特性の同定を目標とした。また、これらの結果を基に、足底装具の評価検討、および、足部を失った切断者の義足足部の新デザインなどへの応用を本研究の成果として示した。

本論文は以下に示す8章にて構成される。第2章では足関節以下の足部について機能解剖学的・関節機構学的な観点から構造と各部の名称・用語について記述した。ここでは正常歩行運動を含めるものであり、歩行解析の歴史的背景や現在の歩行解析技術の基盤ともいえる剛体リンクモデルを用いた解析手法についても触れる。第3章から5章にかけて歩行中のアーチ構造をモデル解析した過程を示した。

本研究が最終的には臨床応用を目的とすることから、モデル解析に用いるモデルはなるべく単純化したい。ここで問題はリンクモデルの軸位とリンク数であった。先行研究にも歩行中のアーチ変形に関する詳細な記述は見あたらず、第3章で記述したX線ビデオを応用しての足部連続撮影を実施した。この結果、歩行中のアーチ角度変化は舟状骨部を中心として起こる事が確認された。そこで、足部の表面からも容易に触知できる舟状骨粗面をアーチの回転中心とした矢状面2リンク1軸モデルを提案した。

第4章にてニュートンオイラーの運動方程式に基づく逆動力学解析からアーチ部の関節モーメントを導出した。運動方程式のパラメーターを得るためにモーションキャプチャーによる生体計測を繰り返した。一般的な歩行解析においては足部は1個の剛体であり、アーチ部のモーメントに着目した解析は見あたらない。また、第3章の副次的な結果として、赤外線反射マーカを体表に貼付して計測されたアーチ角度変化とX線による骨直接撮影から算出された角度変化とがほぼ等価であることが確認され、モーションキャプチャーの有効性を示した。

歩行中の足部について Elftman(1939)はいち早く構造変化が生じる事を示唆している。立脚相初期においては路面をしっかりと捉えるために足部は柔軟構造となり、それに反して立脚相終盤の路面を蹴って前方へ推進する時期においては強固な構造へと変化するというものである。これには骨盤の回旋や距骨下関節の動き、横足根間関節の捻れなどが関与するという説であるが、この説は関節機構学に基づく理論と足部の解剖からの推定であり、実験によって確認されたものではなかった。第4章で示したアーチの角度変化は Elftman が強固になるという立脚相後半においても下降変化を続けており、変形という観点からはこの説を否定せざるを得ない。しかし、アーチ部のみではなく周辺の関節群の運動と連動する事は諸説より明確である。そこで、第5章において歩行中のアーチは足部内の諸関節との連動性が高いことを踏まえ、また、足部変形はアーチ以外の部分にも生じている事実からもこれら諸関節を導入した三次元モデルを構築し、連動性という観点から解析を行った。

さらに、第6章では前章までの結果を受けて、アーチ部に回転バネ-ダッシュポッド系粘弾性要素を有するモデルを提案し、シミュレーション解析を行った。歩行周期を足部の力学的状態から4相に分割し、各層における粘弾性率を最小二乗法によって同定するものである。同定された弾性係数は足アーチの機械的インピーダンスを表したものと考えられる。6名の被験者における解析結果として、足部の弾性率は立脚相終盤に有意に最大値を示し、粘性率は立脚相初期に有意に最大値を示した。アーチの存在理由として様々な議論があり、足底接地時の不整路面对応や衝撃緩衝、あるいは踏み切り時のスプリング効果といった説であり、この結果はまさにこれらの仮説を裏付けるものと考えられる。

また、前述の Elftman の説にも弾性係数の変化は整合する。角度変化のみを観

測すると立脚相終盤では、理論的には足部の強度は硬化するにも拘わらずアーチ角度は降下を続け、矛盾がみられた。しかし、この時期にはアーチモーメントはかなり上昇しており、足部の弾性係数が増加しアーチが硬化したにも拘らず、増加したモーメントによってアーチの降下変形が生じたものと考察した。

立脚相終盤にはもう一つ別の定説が関与する。Hicks(1954)が説いた Windlass Action Mechanism である。MP 関節が踏み切り期に屈曲する動作に連動して、足指に付着する足底腱膜によってアーチを巻き上げて挙上する機構が存在するというものである。従って、この現象は立脚相終盤において新たに加わる弾性要素であり、筋のような能動的な要素ではないが、MP 関節運動と連動した準能動的な要素である。この効果も加わり、立脚相終盤に高い弾性係数を示したものと考えられ、Hicks の説を定量的に検証するものであった。

上記に示したモデル解析手法により、歩行中の足部で生じている力学的挙動を量的な変化として捉える事が可能となった。定量化された物理量は過去の定説にも準ずるものであった。

第7章ではこの解析手法の具体的な応用例として(1)足底板効果の解析、(2)歩行中の足部解析結果に基づく義足足部のデザインを提案した。

第1に本研究における足部のモデル解析手法を適用することにより、足部変形を生起する力、即ちモーメントの定量化によって装具の定量的評価を可能とした。足底装具の評価においては足の内部を力学的に捉える評価法として例を見ない手法によるものである。これによって定量化されたアーチモーメントは足部変形の要ともいえる物理量である。これによりさらに機能的な装具、さらには新しいデザインによる装具の開発にも有効であると考えられる。将来的には本研究で示した手法を基にした簡便な評価機器の開発といった方向へも発展性が予想される。

第2に歩行中の足部変形は外側アーチに比較して内側アーチの変形量が比較的大きいという本研究の一つの結果を受け、切断者の義足足部への応用を示す。動歩行を行う義足歩行者がよりスムーズに安全に歩行できるためには、重心の水平移動がスムーズでなくてはならず、足部の変形はこれに寄与しているものと考えられた。ここで示した義足足部の設計コンセプトも同様であるべきとの考えを基盤としての設計である。この様に、足部そのものの解明が成されて初めて疾病に対する治療法や、正確な装具療法、さらには安全で機能的な義足足部が確立される事を考えれば足部研究の重要性は大きい。ここで示した応用例は今後さらなる可能性を見せると考えられる応用例の片鱗にすぎない。

本研究で提案した足部解析手法を応用する事により、今後、固体間における足部構造の相違や歩行条件による変化など、ヒトの足部を対象とした様々な研究に応用可能である。地球上で初めて立ち上がった人類が、400 万年の歳月をかけて突然変異と淘汰を繰り返して進化させた足と歩容の解明に、僅かではあるが貢献できたと信じたい。