

学位論文題名

足底圧の動的変化を指標とした健常成人の歩行制御  
および片麻痺歩行に関する研究

学位論文内容の要旨

本論文では、ヒトの二足歩行における体重移動の制御を、足底の圧力変動から論じた。測定の対象は健常歩行と片麻痺歩行とした。健常成人については、解剖学的に規定した足底の領域から歩行時の圧力変動を調べた。次に、病的歩行とくに片麻痺歩行を対象とした臨床評価の指標として足底圧変動を用いた。そして、このときの有用性を検討した。

ヒトが歩行を行う際には、足底が唯一の荷重基底面である。他の動物と比較して細くて長いヒトの足底は、足底面上を前方に体重移動する動作には機能的な形態であると言える。また、足部に求められる安定性と運動性はアーチ構造によって同時に機能している。しかし、歩行時の足底圧変動には、足部の形態や構造のみならず歩行方略などの動的な因子が影響している可能性がある(Cavanagh et al.,1997; Morag et al.,1999)。動的な因子としては、神経機構が機能して働く体重移動の制御が挙げられる。歩行に関与する神経機構には視覚情報処理や注意・判断といった高次脳機能、姿勢反射・反応、あるいは上下肢や左右の交互運動を自律的に制御する脊髄のパターン生成回路などが関与する。そして、その制御の結果は足底に反映されると考えた。

足底圧を指標として歩行を分析する上で、その方法論から検討した。体重移動を測定する方法には、重心動揺計や床反力計がある。しかし、重心動揺計は歩行などの動的な場面における重心移動を測定することはできない。床反力計では身体の重心から足底の圧力中心(center of pressure, COP)に向かうベクトルに対する力学的な作用を、動的な場面であっても測定できる。しかし、足底表面の圧力変動をとらえることはできない。足底圧は、F-SCAN システムなどの時間的にも空間的にも高い精度をもった装置により計測することができる。しかし、既存の足底圧分布の測定装置から得られた結果は、歩行周期を通じた変化の特徴を簡潔に表現することができない。このため、足底圧を指標とした歩行制御に関する議論にまでは至っていない現状がある。

そこで、本研究では足底面内における足底圧変動を波形として示す方法をとった。まず、足底の各領域から得られる歩行中の圧力曲線を求めた。そして、COP の移動方向に相当すると考えられる踵骨隆起と第 3 中足骨頭(前後方向)との、そして横アーチの体重支持部位に相当する第 1 および第 5 中足骨頭間(側方)との、圧力曲線の差波形を求めた。これにより、それぞれの方向について、二つの領域の相対的な圧力差とその時間的な変動が示される。すなわち、歩行時の足底圧変動を時間的な精度を保ったままに、空間情報をも簡潔に表現することができると考えた。この方法は、身体装着型の測定装置であることが利点である。測定は歩行環境に左右され

にくく、連続した歩行、あるいはトレッドミルの上での測定も可能である。

健康成人についての課題は、自然歩行場面において前後・側方それぞれの足底圧変動の様相を分析することであった。そして、これらが速度変化や方向転換といった実験条件を、どのように反映するのかを検証した。

自然歩行場面での足底圧変動について、前後方向は踵側の足底圧が第3中足骨側を上回る「後向」に相当すると考えられる踵骨隆起と第3中足骨頭(前後方向)との、そして横アーチの体重支持部位に相当する第1および第5中足骨頭間(側方)との、圧力曲線の差波形を求めた。これにより、それぞれの方向について、二つの領域の相対的な圧力差とその時間的な変動が示される。すなわち、歩行時の足底圧変動を時間的な精度を保ったままに、空間情報をも簡潔に表現することができると考えた。この方法は、身体装着型の測定装置であることが利点である。測定は歩行環境に左右されにくく、連続した歩行、あるいはトレッドミルの上での測定も可能である。

健康成人についての課題は、自然歩行場面において前後・側方それぞれの足底圧変動の様相を分析することであった。そして、これらが速度変化や方向転換といった実験条件を、どのように反映するのかを検証した。

自然歩行場面での足底圧変動について、前後方向は踵側の足底圧が第3中足骨側を上回る「後足部荷重期」から、第3中足骨側の足底圧が踵側を上回る「前足部荷重期」へと移行することが明確に示された。各領域の圧力曲線から位置づけると、前後方向はCOPの移動に伴う圧変化を反映すると確認された。同様に、側方の変動も2相に分けることができた。ここでは第5中足骨側への足底圧が第1中足骨側を上回る時期を「外側バランス」と呼び、第1中足骨側への足底圧が第5中足骨側を上回る時期を「内側バランス」と呼んだ。側方の変動は歩行周期を通じて、外側バランスから内側バランスへと移行するのが被験者を通じた特徴であった。ただし、個人差が大きく、また歩数ごとにも変動が大きかった。

トレッドミル上での歩行では、速度に対する足底圧の変化を分析した。速度が増すに伴って、歩行率は増加し、立脚時間は短縮した。歩行速度が比較的遅い場合には、前足部荷重期よりも後足部荷重期が長くなる。そして、走行では前足部に対する足底圧は歩行よりも大きくなった。しかし、前足部への足底圧や前足部荷重期と後足部荷重期の時間的比率は、時速4kmから時速8kmの歩行速度の変化には影響を受けなかった。以上のように、前後方向の変動からすると、遅い歩行と通常の歩行、そして走行は体重移動の制御のされ方が異なると考えられた。また、側方の変動に関する個人差と、歩数ごとの変動は、速度によっても変化しなかった。ただし、トレッドミルで連続した歩数を解析すると、内側バランスと外側バランスが周期的に繰り返す相反機構を認めた。この相反機構は側方への過度の体重移動の制御に関与していると考えられた。

側方の足底圧変動は、自然歩行やトレッドミル上での歩行では、連続歩数における相反機構の他に一定の傾向は認めなかった。しかし、方向転換を連続させる回転歩行では、内足のときには外側に、外足のときには内側に相対的に足底圧が偏倚した。また「前足部荷重期」から、第3中足骨側の足底圧が踵側を上回る「前足部荷重期」へと移行することが明確に示された。各領域の圧力曲線から位置づけると、前後方向はCOPの移動に伴う圧変化を反映すると確認された。同様に、側方の変動も2相に分けることができた。ここでは第5中足骨側への足底圧が第1中足骨側を上回る時期を「外側バランス」と呼び、第1中足骨側への足底圧が第5中足骨側を上回る時期を「内側バランス」と呼んだ。側方の変動は歩行周期を通じて、外側バランスから内側バランスへと移行するのが被験者を通じた特徴であった。ただし、個人差が大きく、また歩数ごとにも変動が大きかった。

トレッドミル上での歩行では、速度に対する足底圧の変化を分析した。速度が増すに伴って、歩行率は増加し、立脚時間は短縮した。歩行速度が比較的遅い場合には、前足部荷重期よりも後足部荷重期が長くなる。そして、走行では前足部に対する足底圧は歩行よりも大きくなった。しかし、前足部への足底圧や前足部荷重期と後足部荷重期の時間的比率は、時速4kmから時速8kmの歩行速度の変化には影響を受けなかった。以上のように、前後方向の変動からすると、遅い歩行と通常の歩行、そして走行は体重移動の制御のされ方が異なると考えられた。また、側方の変動に関する個人差と、歩数ごとの変動は、速度によっても変化しなかった。ただし、トレッドミルで連続した歩数を解析すると、内側バランスと外側バランスが周期的に繰り返す相反機構を認めた。この相反機構は側方への過度の体重移動の制御に関与していると考えられた。

側方の足底圧変動は、自然歩行やトレッドミル上での歩行では、連続歩数における相反機構の他に一定の傾向は認めなかった。しかし、方向転換を連続させる回転歩行では、内足のときには外側に、外足のときには内側に相対的に足底圧が偏倚した。また、このときにも歩数ごとの変化に相反機構を認めていた。したがって、側方の足底圧変動は、体重の移動方向の変化を反映していると考えられた。

足底圧変動を臨床評価の指標として応用するために、片麻痺歩行の分析を行った。健康成人のパターンと比較して検討を行った結果、麻痺側の足底圧の変動は四つのタイプに分類することができた。タイプIでは、前後方向は前足部側に、側方は外側に足底圧が偏倚した。タイプIIでは、前後方向には健康成人と同様に二相性の圧力変動を認めるが、側方は外側に偏倚した。タイプIIIも前後方向は健康成人と同様に二相性の圧力変動を認めるが、側方は内側に偏倚した。タイプIVは前後および側方も健康成人と同様の足底圧変動を認めた。しかし、足底圧の動的変化を分析するときの徴表とすることができると考えた。また、片麻痺歩行における足底圧変動の分析では、体重移動のみならず、足底接地の仕方を評価することができた。

次に、片麻痺歩行を呈する症例について、発症からの治療経過を報告した。歩行速度や歩数といった遂行能力と、足底圧変動との対応について検討した。足底圧変動の分析は、個別の対象者における歩行の特徴も表すことができた。このとき、歩数ごとの変動を解析することにより評価の信頼性を得ることができた。また、治療経過における変化を把握する際にも足底圧変動は有用な指標となった。

最後に本論文の結論を述べる。歩行中の足底における圧力変動は、前後・側方に圧力曲線の差波形を求めることで特徴的に表された。特に前後方向の圧力変動は、COPの移動に伴う圧力変化を反映した。また、側方の圧力変動は体重の移動方向の変化を反映すると考えられた。そ

して、この知見をもって片麻痺歩行を分析することにより、足底圧変動は歩行病態を臨床において評価する指標として有用であると考えられた。

# 学位論文審査の要旨

主 査 教 授 室 橋 春 光  
副 査 助 教 授 山 田 憲 政  
副 査 助 教 授 保 延 光 一  
副 査 名 誉 教 授 加 藤 正 道

学 位 論 文 題 名

## 足底圧の動的変化を指標とした健常成人の歩行制御 および片麻痺歩行に関する研究

本論文は、歩行における足底の前後と左右の圧力差分の動的変化を指標として、健常成人における歩行のありかたを検討するとともに、片麻痺患者における歩行障害特性の解明を試みたものである。

歩行障害におけるリハビリテーションにおいては、従来、治療者の経験に基づいて訓練プログラムが組まれてきた。適切な訓練を行うためには、歩行特性の客観的データに基づいて治療戦略をたてることが望まれる。しかし、臨床場面では、歩行特性を簡易に測定しうる手法を必要とする。本研究では、足底5カ所に圧力センサーを直接装着してその値の差分変動を算出する手法を用い、健常成人における歩行特性を分析するとともに、片麻痺患者に協力を求めて歩行障害特性を分析し、歩行訓練プログラムの開発・工夫に資することを目的とした。

本論文は、5章より構成されている(第1章:序論、第2章:本研究の課題設定、第3章:健常成人の足底圧の動的変化(実験)、第4章:片麻痺歩行の足底圧における動的変化(症例検討)、第5章:総括)。

第1章ではヒトの足部の機能解剖的特性と歩行制御システムが概括され、運動力学的視点からの歩行分析の方法が検討されている。

第2章では、本研究の方法が詳述されている。歩行時に重要な役割を果たす足底の5つの部位(第1、3、5中足骨頭部、踵骨隆起部、及び母趾部)に圧力センサーが直接装着された。そして足底内の動的な圧力変動を把握するため、前後方向(第3中足骨頭部-踵骨隆起部)及び左右方向(第1中足骨頭部-第5中足骨頭部)の圧力値の差分を算出し足底圧変動波形として表示する方法が採用された。これは、病的歩行を示す患者に対して歩行特性を簡易に測定することを可能にする1つの方法であり、臨床的評価のための有用な指標となりうる。

第3章では、健常成人を対象とした歩行実験の結果が示されている。実験は、自然歩行、トレッドミル歩行、回転歩行の3条件で実施された。自然歩行実験では、前後方向の足底圧変

動波形において後足部荷重期と前足部荷重期からなる2相の曲線が明瞭に認められた。他方、左右方向では足底圧変動波形において外側に圧力分布が偏る時期と内側に偏る時期からなる2相性の曲線が認められる場合もあったが、被験者間及び被験者内のばらつきが大きく明確ではなかった。トレッドミル歩行実験では、歩行速度の変化に対応して前後方向における体重移動動態が変化することが示された(Kiriyama et al.,2004)。他方、左右方向では第1中足骨部と第5中足骨部の圧力値の間には負の相関が認められ、かつ周期的に変動した。このことは、歩行中に外側偏移と内側偏移が繰り返される相反的な機構が存在することを示唆している。回転歩行実験では、前後方向における足底圧変動波形の最大振幅値は、直線歩行時よりも回転時の方が減少した。また左右方向では内足時には外側偏移が、外足時には内側偏移が主となった。側方の足底圧変動波形は、従来の方法では測定できなかった歩行時の側方体重移動を反映するものと解釈された(Kiriyama et al.,2005)。

第4章では、片麻痺患者に協力を求め、足底圧変動波形の臨床的評価への応用について検討した。その結果、前後方向と左右方向の足底圧変動波形における2相性の有無に関して4つのタイプに分類することが可能であった。このうち、左右方向においては2相性を認めないが前後方向において明瞭な2相性を認めた一患者について詳細に検討した。その結果、治療経過に対応して後足部荷重期と前足部荷重期の変化点延長および外側偏移期の延長が認められた。このことは、足底圧変動波形が片麻痺患者の病態把握及び治療評価に有効であることを示唆した。

本論文では、歩行における足底圧の動的変化を分析するため、特定部位間における圧力値の差分を算出する手法が開発され、健常成人における歩行の運動力学的特性が考察された。また歩行障害の臨床評価への応用に道を開いたという点で、学術的ならびに臨床的価値を有する。この手法は、簡易に実施できることから臨床的価値には高いものがあると期待する。

歩行制御メカニズムの検討のためには、中枢機能をより直接的に反映する指標の同時的利用も今後必要であり、また臨床的応用を具体化するためにはさらなる臨床データの収集と分析を必要とする。これらは今後の課題として残るが、上述の成果をあげた点で著者は北海道大学博士(教育学)を授与される資格があるものと認める。