

機関番号：82626

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2008～2010

課題番号：20570229

研究課題名（和文） モールディングインソールによる歩行安定化メカニズムの解明

研究課題名（英文） How do insoles improve stability in high-heel walking?

研究代表者

河内 まき子 (KOUCHI MAKIKO)

独立行政法人産業技術総合研究所・デジタルヒューマン工学研究センター・上席研究員

研究者番号：80126052

研究成果の概要（和文）：インソールがハイヒール歩行の安定感を向上させるメカニズムを理解する目的で、女性8名を対象にインタビューを行ない、ヒール形状、アーチパッドの有無、中敷の摩擦が異なる5種の靴条件で、靴内足底圧、運動、床反力、バランスボード上でのバランス維持を計測した。インタビューの結果抽出された履き心地の評価視点のうち、足底全体への体重分散感とヒールのぐらつき感が、安定感に関連していた。体重分散感は足裏の接触面積と、ヒールのぐらつき感はヒール傾斜角度と関連していた。インソールによる歩行安定化メカニズムとして3つの仮説を検討した結果、足裏の荷重支持面積増大による足構造への負荷低減が、主なメカニズムだと考えられた。

研究成果の概要（英文）：The purpose of this study was to understand how insoles improve the stability in high-heel walking. Eight females participated in experiments using five different shoe conditions: heel shape, footbed shape, and friction of sockliners. Subjective evaluations of wearing and walking in the shoes were collected through interview. In-shoe foot pressure, motion, ground reaction force while walking were measured in each condition. Balancing ability on a balance board was also measured. Results showed that feelings of weight distribution and sensations of the wobbling heel were perceived causes of stability perception. Feelings of weight distribution were related to the weight-bearing area under the foot, and sensations of the wobbling heel were related to the lateral inclination (inversion) of the heel. Three hypotheses were examined. Results of the experiments indicated that the main mechanism of insoles for improving the stability was reduced load on foot structure caused by increased support area.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	1,700,000	510,000	2,210,000
2009年度	1,400,000	420,000	1,820,000
2010年度	600,000	180,000	780,000
年度			
年度			
総計	3,700,000	1,110,000	4,810,000

研究分野：生物学

科研費の分科・細目：自然人類学

キーワード：生体機構、人間工学

1. 研究開始当初の背景
衝撃吸収や安定性向上による傷害低減など

の靴の機能を十分に発揮するには、靴型と足の形状が適合している必要があるが、足型の

個人差に比べて靴型のバリエーションは圧倒的に小さいため、現状では適合靴を見つけるのはそれほど容易ではない。これを工業的に解決する手段としてインソールがある。インソールにはサイジング（靴の足囲サイズを小さくして足囲に合わせる）、ポスティング（かかと部に内-外側に傾斜したくさびを挿入する）、モールドイング（足の形に合わせる。ヒールカップなど）の機能がある。スポーツシューズを対象とした先行研究によれば、これらの機能はそれぞれ、靴内ずれの抑制、運動時の足のアライメントの修正による傷害予防、適合感の向上に寄与する。また、個人の足裏形状に対応したモールドイングインソールは、足裏接触面積を増加させ、足底圧分布を変え、コンフォートに大きな影響を与えることがわかっている。しかしながら、なぜ接触面積が大きいとコンフォートが向上するかはわかっていない。

2. 研究の目的

インソールにより靴のコンフォートが向上するメカニズムについて、以下の3つの仮説をたてた。インソールにより接触面積が大きいほど (A) 足裏と靴底のまさつが大きくなり、足と靴の相対位置関係が設計時における想定からずれにくいため（まさつ仮説）。(B) 足底圧力が分散されるので圧力集中が低減するため（圧力分散仮説）。(C) 体性感覚器で足からの情報を受容しやすく、足の運動を制御しやすくなるため（体性感覚・運動制御仮説）。コンフォートや安定性の実現がとくに重要かつ困難と思われるハイヒールを対象としてこれらの仮説を検証することが、本研究の目的である。

3. 研究の方法

(1) アーチパッドの作成

ヒール高7cmでヒール形状だけが異なる実験靴AとBを用意した（図1）。形態的不適合が官能検査結果に与える影響を最小化するため、足囲部のサイズ調節が可能なオープントゥの足首ベルト付きサンダルとした。実験靴の靴底中足部に硬化前のインジェクションタイプのシリコン（森田製作所）を置き、上から踏みつけて立たせることにより、両足立位時の足裏と靴底のすきまを埋める個別対応アーチパッドを作成した。アーチパッドは柔軟性はあるが、圧縮による変形はほとんどない。アーチパッド、まさつ係数の異なる2種の中敷、2種の実験靴を用いて複数の実験条件を用意し、以下の方法で研究をした。

(2) 評価グリッド法によるインタビュー

評価グリッド法によるインタビューでは、被験者に複数の条件を比較させ、好きな順に順

位をつけさせた上で、2つの条件のうち一方の順位が高い理由を詳しく質問する。これにより、コンフォートというあいまいな概念を具体的な評価視点に分解することができる。また、これらの視点や靴の設計要因との間の主観的因果関係（評価構造）を明らかにすることができる。

(3) 歩行中の物理現象の計測

歩行中の靴内足底圧、運動（マーカの3次元位置）、床反力を計測し、コンフォートの評価視点が計測可能な物理現象と実際に関連するかどうかを明らかにする。好みの順位が異なる条件間でこれらの物理現象を表す変数を比較することにより、まさつ仮説、圧力分散仮説を検証する。

(4) バランス維持能力の評価

バランスボード上でのバランス維持能力を定量化する。足底からの接触情報の量が異なる条件間で、バランス維持能力を比較することにより、体性感覚・運動制御仮説を検証する。

(5) 被験者

女性8名を対象とした。平均年齢39(29-57)歳、平均身長156(154-159)cm、平均体重49(41-56)kgであった。すべての実験で同じ被験者を対象とする予定であったが、実験によってはやむを得ない事情で、参加できない被験者があった。すべての実験は、所属機関の人間工学実験倫理審査委員会の承認を得て実施した。

(6) 統計的方法

バイオメカニカルな研究では通常被験者数が少ないため、対象とする変数が足の形態や歩容の個人差に左右される場合、対応ありのt検定で有意差を見つける事が難しい。そこで、複数の試行のデータをすべて使い、足ごとに条件間の比較をし、どの足でも同様の傾向が認められるかどうかで靴条件の違いの効果を評価することにした。

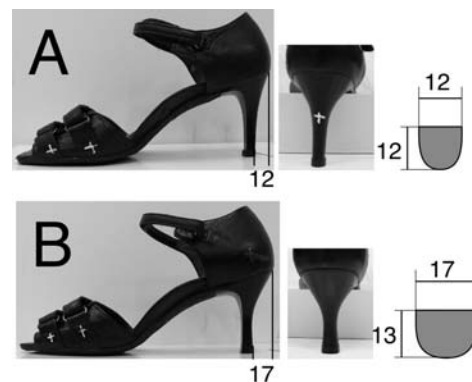


図1. 実験靴。ヒール高70（単位：mm）

4. 研究成果

(1) 評価グリッド法によるインタビュー

7名を対象に、表1の5条件の靴を履き比べさせ、好きな順に順位をつけさせた。1位と4位、2位と5位、1位と3位の違いの評価視点と、それらの間の因果関係をインタビューにより抽出した。必要に応じて、上記以外の組合せについても質問した。所要時間は約2時間であった。

7名の結果を要約すると、最も重要な心理的ベネフィットは「楽である/疲れにくい」、「安定感」、「ころびにくい」、「自然に歩ける」であった。これらをもたらず感覚ベネフィットとして、①足裏の局所的圧迫/接触による不快感、違和感がない、②足裏全体へ体重が分散している、③ヒールの外倒れ感/ぐらつき感がない、④足と靴の相対運動感(靴内での足のずれ)がないという4つの要因が抽出された。

アーチパッドにより評価が低くなった場合(4名)の理由は、踏まず前方部に靴底が接触していることによる違和感であった。アーチパッドにより評価が高くなった場合(3名)の理由は「足裏全体に体重が分散している」ためであった。ヒールの外倒れは靴AとBの違い(ヒール形状)に関連していた。中敷のまさは靴内の前ずれ感と関連していた。

表1. 評価グリッドのための靴条件

条件	靴	アーチパッド	中敷
1	A	A	無し
2	B	B	無し
3	B-	B	無し
4	B+	B	有り
5	B++	B	有り

*中敷の上にアーチパッド

**アーチパッドの上に中敷

表2. 靴内足底圧計測のための靴条件

条件	靴	アーチパッド
1	A	A
2	A+	A
3	B	B
4	B+	B
5	B外	B

*全員に共通

表3. 運動計測のための靴条件

条件	靴	アーチパッド	中敷
1	A	A	無し
2	A+	A	有り
3	B	B	無し
4	B+	B	有り
5	B-	B	無し

(2) 感覚と物理現象の関連

インタビューで抽出された4つの感覚的要因と靴の設計要因の間の因果関係が被験者の思い込みなのか、実際の物理的現象を反映しているのかを検証するため、7名を対象に表2の5条件で歩行中の足底圧(F-scan mobile, 500Hz)を、8名を対象に表3の5条件で歩行運動(Vicon, 200Hz)と床反力(AMTI, 1000Hz)を計測した。局所的圧迫/接触感とピーク足底圧分布、体重分散感と足裏の靴底への接触面積およびピーク足底圧、ヒール外倒れ感と前頭面内でのヒール傾斜角度、靴内での前ずれ感と足と靴の相対運動量の関連を調べた。歩調は各被験者が決め、条件間で一定となるようメトロノームで制御した。靴を履く順序はランダムとした。

①踏まず前方の局所的接触感とピーク圧

歩き始めと歩き終わりの5歩ずつを除く10歩分のピーク足底圧を可視化し、個人内で条件BとB+、条件AとA+の違いを観察した。この結果、局所的圧迫感/接触感とピーク圧、圧分布の間に一定の関連は認められなかった。アーチパッドによる違和感は、F-scan mobileでは測れない程度の圧/接触(<70kPa)でも生じるか、圧/接触の評価が接触に対する感度や好みに依存するためと思われる。

②体重分散感と接触面積

歩き始めと終わりの5歩ずつを除く10歩分のデータにつき、足裏と靴底の接触面積を閾値以上の圧が出たセルの数として定量化した。指を除く足裏を図2左の6部位に分割し、中足内・外側、前足内・外側の4部位について、足ごとに条件B、B+、B外の3条件下での平均値の差を分散分析で検定した。また、条件BとB+、条件BとB外につき、足ごとに差をt-検定で検定した。

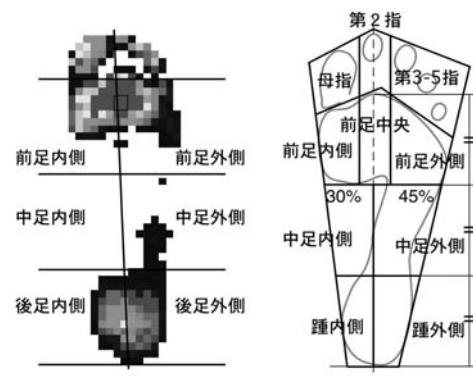


図2. 足裏の分割。左：接触面積計算用。右：ピーク圧計算用 (Cavanagh et al., 1987による)

分散分析の結果は、7名14足の4部位すべてについて有意であった。t-検定の結果、過

半数の足で同じ方向の差が以下の部位に認められた：B外はBに比べて中足外側部(N=13)と前足外側部(N=11)の接触面積が大きく、前側内側部(N=9)の接触面積が小さかった。B+はBに比べ中足内側(N=11)の接触面積が大きかった(P<0.05/7=0.0071：Bonferroniの修正)。条件B外とB+はBよりも体重分散感が強かったが、実際に接触面積も大きかった。以上から、体重分散感は接触面積と有意な関係を持つと結論できる。

③体重分散感とピーク圧

足裏を図2右の10部位に分けて歩行時のピーク圧を求め、足ごとに条件間の差を検定した。条件BとB+の検定結果では、以下の2部位で過半数の足で同じ方向の差が認められた(P<0.05/7=0.0071)：B+はBに比べ踏まずと(N=7)、第2指(N=7)でピーク圧が高い。条件BとB外の検定結果では、以下の4部位で過半数の足で同じ方向の変化が認められた：B外はBに比べ踵外側(N=9)、中足外側(N=9)、前足中央(N=12)、母指(N=7)でピーク圧が高かった。体重分散感との間に接触面積ほど明瞭な関連は認められなかった。

④ヒール外倒れ感とヒール傾斜角度

歩行中のヒールの外倒れ角度を定量化し、外倒れ感との関連を調べた。足と靴に図3のマーカをつけ、歩行運動と床反力を計測した。ヒールと前足部で別の床反力計を踏む様に指示した。各試行につき、床反力垂直分力の2つのピーク間の谷底(MSV)の時点におけるマーカ位置を用いて図4に示す靴座標系を定義し、そのY軸を床面に投影した直線に対して垂直な平面を基準面とした。立脚期各時点におけるヒールの内外側傾斜角度を、マーカS1とS2を結ぶ直線を基準面に投影した直線の、鉛直からの傾斜として定義した(外倒れが負)。各条件下で5試行を計測し、踵接地、前足部接地(立脚期の10-11%付近)、立脚期41%(反対足の離地付近)、踵離地(立脚期の70-75%付近)の4時点におけるヒール傾斜角度を計算した。両足立位時についても計算した。

製造時のばらつきにより、靴だけを床面においた状態で、ヒール傾斜角度は外倒れ4.6度～内倒れ0.6度の範囲にばらついていた。歩行時の官能評価では、8名全員が、靴Aはぐらつき感か外倒れ感がある、または安定感がないという理由で、靴Bの方を好んだ。検定の結果、両足立位時に靴A右は靴B右よりも平均して3.6度ヒールが外倒れしていた(P<0.01)。左側には靴ABで有意差がなかった。歩行時では、8名の被験者のうち6名で、1つ以上の時点で靴A右が靴B右よりもヒールが外倒れしていた(p<0.05/8=0.0063)。有意差が認められた人数は、踵接地時で5名、

前足接地時で6名、立脚期41%で5名、踵離床時で3名であった。以上から、ヒールの外倒れ感は、実際のヒール外倒れを反映していると結論できる。ヒールの外倒れや内倒れは、ヒール接地部を回転中心とした回転モーメントをひきおこし、これが不安定感やぐらつき感の原因となるのであろう。

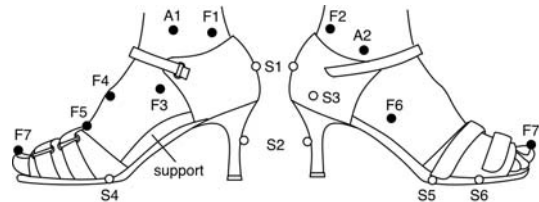


図3. 足につけたマーカ。A1：内果最突、A2：外果最突、F1：アキレス腱内側、F2：アキレス腱外側、F3：舟状骨、F4：第1中足骨底、F5：第1中足骨頭付近、F6：第5中足骨粗面、F7：親指先端。この他に、大腿骨外側上顆、内側上顆にもつけた。

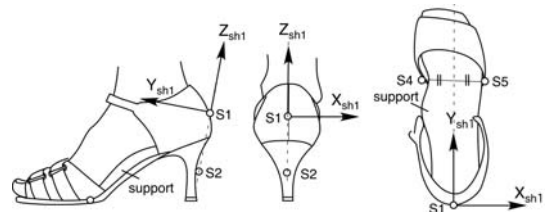


図4. 靴マーカ位置とヒール傾斜角度定量化のための靴座標系(右足)。

⑤靴内前すべり感と靴内前すべり量

図5に示す靴座標系を定義した。立脚期を踵接地から前足部接地まで(区間1)、前足部接地から踵離床まで(区間2)、踵離床から爪先離床まで(区間3)に分け、各区間における舟状骨(図3、F3)と第一中足骨底につけたマーカ(図3、F4)のYZ平面内における累積移動量(以下、靴内ずれ)を足と靴の相対運動(靴内での足の前すべり)の指標とした。足ごとに、条件B、B+、B-(表1参照)の結果を分散分析により比較した。また、全試行の平均値を各被験者の代表値として、7名のデータを使い、条件間の差を対応ありのt-検定により検定した。

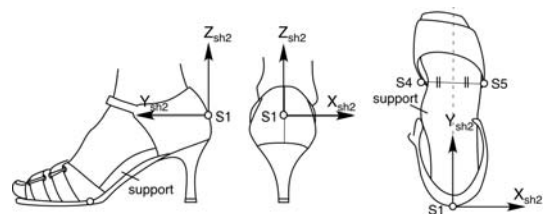


図5. 靴内前すべり量定量化のための靴座標系

マーカ位置が舟状骨と第一中足骨底で、結果はほぼ同じであった。左右14足の分析の結

果、3つの靴条件間に有意差が認められたのは舟状骨マーカでは区間1で14足中3例、区間3で14足中1例であり、第一中足骨底マーカでは区間1で3例、区間3で2例であった。すなわち、官能評価では7名中5名がまさつが低い中敷を使用した条件B-では足が前に滑り落ちると申告したにもかかわらず、どの区間においても、条件B-で系統的に靴内すべりが大きいという結果は得られなかった。対応ありのt検定で条件間の差を検定したが、有意差はなかった。以上から、靴内すべり感、物理的な靴内すべり量を反映しているわけではないと結論できる。指をガラスに押し付けてガラスを移動させると、まず周辺部からすべり始め、固着領域とすべり領域の面積比率が一定以上になるとすべり感が生じ、指を押し付ける力を増すことが知られている(広光・前野, 2002)。足と中敷の場合も、すべり領域と固着領域の比率がある程度以上になると実際には前すべりしていなくても前すべり感が生じ、固着領域とすべり領域の面積比率が2種類の中敷で異なることが、中敷のすべり感の違いにつながるものと考えられる。

⑥アーチパッドとヒール傾斜角度

7名のうち5名が、アーチパッドがある方が安定感が増す感じがするという理由で、条件A+を条件Aより好んだ。アーチパッドが安定感を高くする理由が、ヒール外倒れを低減するためかどうかを調べるため、アーチパッドのない条件とある条件で(条件AとA+、条件BとB+)ヒール傾斜角度を比較した。両足立位時の平均値の対応ありのt検定の結果、左右靴ABの4つの検定結果のうち、有意差があったのは右足条件AとA+の比較結果だけであった($p < 0.05$)。歩行時の4時点におけるヒール傾斜角度の比較結果では、有意差が認められたのは右足靴Aの前足接地時で1名、左足靴Aの前足接地時で1名だけであった($p < 0.05/7 = 0.0071$)。以上から、アーチパッドにヒール外倒れを低減する効果は無いと言える。

(3) 靴条件とバランス制御

図6に示すバランスボードを作成した。回転角度は±約10度で、回転量を電圧として200Hzで出力する。

5名を被験者として、バランスボード上でのバランス維持能力を評価した。床反力計の上にバランスボードを載せ、踏み板が前後方向に傾斜する向きに、足軸間の距離が16cmになるように被験者を立たせ、できるだけ水平に踏み板を維持するように指示を与えて、角度と荷重中心(CoP)座標値を60秒間計測した。4種の靴条件で(はだし、B、B+、B外)各3試行を計測した。また、4条件下で、床

反力計の上に直接立たせてCoP位置を計測した。試行間には3分以上の休憩を入れた。どの試行についても傾斜角度とCoPの前後位置の相関は非常に高かった($r > 0.95$)。バランス維持能力の指標として、踏み板の角度、CoP前後座標値、CoP左右座標値の標準偏差と範囲(最大値-最小値)を計算した。各条件下での3試行のうち、CoP前後位置の標準偏差が最も小さい試行を、その被験者のその条件での代表値とした。5名×4条件=20のデータを使い、分散分析で靴条件による違いの効果を調べた。すべての変数で、靴条件の効果は有意でなかった。すなわち、足底からの接触情報の増加は、足首の底背屈角度の制御など、踏み板を水平に維持しようとするバランス能力の向上にはつながらないと考えられる。

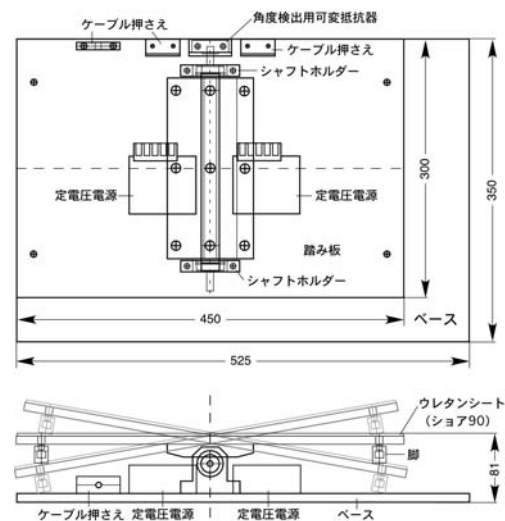


図6. バランスボード

(4) 考察

①官能評価と物理評価

評価グリッドによるインタビューの結果抽出された靴の設計要因(ヒール形状、中敷のまさつなど)と感覚的ベネフィットの間の主観的因果関係が被験者の思い込みにすぎないのか、実際の物理現象を反映しているのかを実験的に調べた結果、踏まず部への靴底接触による違和感を直接反映する物理量は認められなかったものの、体重分散感と一定以上の荷重がかかっている接地面積、ヒール外倒れ感とヒール傾斜角度、靴内すべり感と中敷のまさつ係数の間に明らかな関連が認められた。したがって、被験者による心理的評価は物理量で置き換えることが可能だと結論できる。歩行時のヒール傾斜角度は計測が難しいが、条件間の差が最も明瞭であった前足接地時のヒール傾斜角度は、両足立位時のヒール傾斜角度と高い相関をもつので($r = 0.933, df = 6$)、両足立位時の角度で代表することが可能と思われる。

②歩行安定感向上のメカニズム

評価グリッドによるインタビューの結果、主観的にはヒールのぐらつきは安定感と直接的関係が、足裏全体への体重分散感「自然に歩ける」を介して間接的関係があった（足裏に体重が分散される→自然に歩ける→安定感がある）。ヒールぐらつきの直接的原因であるヒールの外倒れに対し、アーチパッドは改善効果をもたなかったことから、アーチパッドによる安定感の増加は、接触面積（体重支持面積）の増加によると考えられる。インソールにより安定性が変わるメカニズムとして、(A)まさつ仮説（接触面積が大きいほど足裏と靴底のまさつが大きくなり、足と靴の相対位置関係が変わらないため）、(B)体重分散仮説（体重分散されるので圧力集中が低減するため）、(C)体性感覚・運動機能制御仮説（足からの情報を受容しやすく、足の運動を制御しやすくなるため）を考えた。実験の結果、アーチパッドの有無、中敷のまさつ係数の差により、靴内すべり感には差があっても足と靴の相対運動量には差がなかったことから、仮説(A)は支持されない。アーチパッドの有無やパッドの位置によって、足底と靴底の接触面積および体重分散感とコンフォートには明らかな差があることから、仮説(B)は否定されない。しかし、ピーク圧には体重分散感との間に明瞭な関係が認められなかったため、体重分散と圧力集中のうち、体重支持面積増加による体重分散が、安定感を増す要因だと考えられる。バランスボード上でのバランス維持能力は、はだしと着靴、パッドの有無や種類により差がなかったため、仮説(C)は支持されない。

③コンフォートの認知に関する知覚

ハイヒールのコンフォートの評価要因は、ヒールぐらつき感、靴内前すべり感、体重分散感、靴底の接触による違和感の4つであった。ヒールぐらつき感は、ヒール接地部を回転中心とした回転による足首の腱や靭帯の伸張の内外側差に由来すると思われる。靴内前すべり感は、靴底への足裏の固着領域とすべり領域の比率に由来し、局所すべり領域が増大するときに局所すべり領域の直上にあるマインナー小体が発火するためと考えられる（広光・前野、2002）。体重分散感（圧覚）や触覚に由来すると思われる。しかし、外側パッドにより中足外側部で体重を支えることによりコンフォートが大幅に改善したことから、MP関節の背屈により短縮したアーチを中足部で十分サポートしないため足底腱膜や靭帯が引き伸ばされることも、体重分散感に関連しているのではないかと推測される。

④ハイヒールのコンフォート向上

ハイヒールのコンフォートに関連する要因のうち、体重分散感（インソールの形状と素材により変化させることができる。コンフォートを低下させずに接触面積を増やすには、踏まずの前部にはインソールが接触しないようなデザインにする、中足外側部に体重をかけさせるようにするなどの指針を作る事が可能であろう）。

靴内すべり感については、摩擦係数が低すぎるとすべり感が大きくなり、中敷のまさつ係数が高いと「べたべたして不快」のような印象を与える可能性がある。実験的に、不快感とすべり感の関係が最適になるような素材を見つけることは可能であろう。

ヒールの外倒れ（内倒れ）は、安定感と密接に関連している。条件Aと条件A+で立位時、歩行時のヒール傾斜角度は変わらないという実験結果から、ヒール部のカウンタとヒール接地部の位置関係がヒールのベースを中心とした回転モーメントを起こすような構造になっている靴の履き心地を、アーチパッドで改善することは難しいであろう。今回用いた実験靴は実験用に試作したものであるが、市販の靴にも今回の実験靴にみられたようなヒール傾斜角度の製造時のばらつきがあるならば、品質管理も重要だと思われる。

5. 主な発表論文等

（研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線）

〔学会発表〕（計2件）

① Makiko Kouchi, Masaaki Mochimaru, Factors for evaluating high-heeled shoe comfort, 10th Footwear Symposium. 2011, June 30, Tübingen, Museum.

② 河内まき子、持丸正明、靴の履き心地の定量化、第64回日本人類学会大会、2010年10月2日、伊達市、だて歴史の杜カルチャーセンター

6. 研究組織

(1) 研究代表者

河内 まき子 (KOUCHI MAKIKO)

独立行政法人産業技術総合研究所デジタルヒューマン工学研究センター・上席研究員

研究者番号：80126052

(2) 研究分担者

持丸 正明 (MOCHIMARU MASA AKI)

独立行政法人産業技術総合研究所デジタルヒューマン工学研究センター・センター長

研究者番号：90358169