

靴着用時の足部の変形と拘束に関する研究 —成人女子を対象として—

大阪成蹊短期大学 細長喜久代
指導 共立女子大学教授 小林茂雄

緒論

靴による足の変形については、靴は人間が二足歩行を行う際に、裸足の欠点を補う役目を果たしている一方、靴を履くことにより足に障害が起きるような変形を与えているという二面性をもつことが報告されている。しかし、靴を履いたとき、靴の中で足がどのように変形するかを定量的に測定・分析した研究はみあたらない。さらに拘束についても、足の側部や上部については、どのような拘束を受けているかを定量的に測定する方法は確立されていないのが現状である。このように靴は足に対して変形と拘束の両面で重要な影響を及ぼしている。

そこで本論文の目的は、靴着用時に生じる足部の変形および拘束に対する物理学的、生理学的、あるいは心理学的負担を軽減するため、人間工学的立場から基本的な研究資料を提供することにある。

本論文は、緒論、本論、結論により構成されており、本論は第I編（1章～3章）と、第II編（1章～4章）に分かれ、第I編「足部形態特性の研究」においては、足部骨格を含めた裸足および靴着用時の足部形態を捉える方法と、靴着用による足の変形の予測法を提案している。また、第II編「足部拘束力の計測法および評価法の提案」においては、靴着用時の拘束力の計測法および拘束下における滑り摩擦の計測法を考案し、靴着用時の拘束を垂直圧と総摩擦距離から評価する新しい方法を提案している。

第I編 足部形態特性の研究

第1章 着靴による足部形態変化

裸足と着靴の形態的相違から、着靴による足部の変形を明らかにする方法を見出すため、裸足と靴着用時の足との計測値の差（靴着用時の足の値－裸足値）＝ Δ として足部の変形を捉え、さらにこれを統計的に解析して足部変形の特徴を分析する方法を考案した。

そこで、被験者20歳代女性59名左右足合わせて118例、50歳代女性50名左右足合わせて100例について、裸足と靴着用時の足のX線写真を撮影した。これを資料として足部形態の長・幅径計測項目および骨格に対する角度計測項目、合わせて18項目を図1の

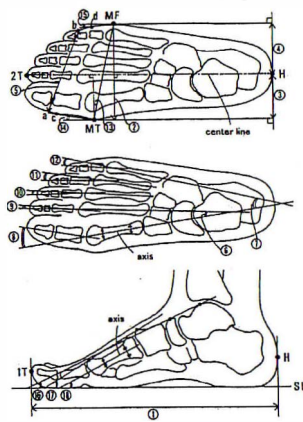


図1 18計測項目の設定

ように設定し計測を行い、その結果を分析した。

被験者ごとの18計測項目から成る裸足と靴着用時の形態的相違について、因子分析により考察し、さらに裸足と靴着用時の足の形態差を、18計測項目値のみによって見わけることができるか否かを、表2に示すように判別分析により検定した。若年層は裸足も靴着用時の足も正判別度が95%以上であった。しかし中年層では裸足については正判別度が92%であったが、靴着用時の足では70%以下であった。これから中年層は若年層に比べ、着靴による足部の変形が少ないことがわかった。

表1 若年層、中年層の裸足形態と靴着用時の足形態の判別分析

| Young group | | | | Middle group | | | |
|-------------|-----------|------------|------------------------|--------------|-----------|------------|------------------------|
| | Bare foot | Shoed foot | Correct discrimination | | Bare foot | Shoed foot | Correct discrimination |
| Bare foot | 113 | 5 | 0.958 | Bare foot | 99 | 1 | 0.990 |
| Shoed foot | 1 | 117 | 0.992 | Shoed foot | 37 | 63 | 0.630 |

第2章 着靴による足部形態変化の予測

18計測項目のうち、裸足で実測可能な8項目の生体計測部位の計測値から、裸足のX線計測値を含む18項目の寸法を予測することができるかについて検討した。前章の若年層、中年層の8生体計測値、裸足18項目計測値、18 Δ 項目計測値の3集団について、分割数3を指定して、それぞれの集団について、分類型クラスタ分析を行った。そして3集団の分析における被験者の所属クラスタ(I, II, III)がそれぞれ共通するという条件で、被験者の裸足形態を分類した。その結果、計測項目の違いによる被験者の所属クラスタの移行を追跡することにより、足部形態変化の特徴を分類することができることを明らかにできた。

そこで8生体計測値集団の3クラスタ(I, II, III)の218例に、正準判別分析を施して第1, 2正準変量 z_1, z_2 を求めると

$$z_1 = a_{11}X_1 + a_{12}X_2 + \dots + a_{18}X_8 + b_1 \quad (1)$$

$$z_2 = a_{21}X_1 + a_{22}X_2 + \dots + a_{28}X_8 + b_2 \quad (2)$$

で表される。正準変量係数 a_{ij}, b_i はクラスタ(I, II, III)の相違を(z_1, z_2)によって最もよく表現できる係数で、表2に示すとおりである。そして、その知見を判別分析することによって、裸足生体計測値からX線計測値を予測することが可能であることを明らかにした。

3章 裸足形態分類法の提案

これまでの若年層、中年層218例に高年層144名を加え362例について、裸足の18項目計測データを用いて分割型クラスタ分析を試みた。このとき指定する分割数の違いにより発生する問題を吟味するために複数の分割数を指定して裸足計測値をクラスタ分析した。さらにクラスタ分析結果に多次元尺

表2 生体計測値の正準変量係数 z_1, z_2

| 8N | No. Parameter | Canonical variate | | |
|----|----------------------|-------------------|----------|---------|
| | | a_i | z_1 | z_2 |
| 1 | ① Foot length | a_1 | 0.0355 | -0.0363 |
| 2 | ② Foot breadth | a_2 | -1.1611 | 2.9792 |
| 3 | ③ MT breadth | a_3 | 1.3852 | -2.8832 |
| 4 | ④ MF breadth | a_4 | 1.4740 | -2.9949 |
| 5 | ⑤ Toe breadth | a_5 | -0.0331 | -0.1043 |
| 6 | ⑥ Foot breadth angle | a_6 | 0.0509 | 0.0250 |
| 7 | ⑦ 1st toe side angle | a_7 | -0.0040 | 0.1433 |
| 8 | ⑧ 5th toe side angle | a_8 | 0.0345 | -0.0678 |
| | | b | -31.7826 | 12.8165 |

度解析法を適用し、異なる分割数 (3, 4, 6) で分割されたクラスタ (I, II, III), (I, II, III, IV), (I, II, III, IV, V) がどのように対応するかを類似距離から求め、クラスタを再構成し被験者の裸足形態を分類した。

その結果、分割数3の各クラスタに所属する362例が、分割数4, 6のクラスタでは、どのクラスタに移行するかを足例ごとに追跡し、移行例の多い代表的タイプを見出すと、図2に示す6タイプで全体の70.7%をカバーできた。これら6タイプに所属する足例の形態特徴を調べると、前足部脛・腓側が直線的で癖のない形状 I-I-I タイプ、第5趾が脛側に傾き前足部腓側に特徴のある形状 II-II-II タイプ、第1趾骨基節骨が大きく腓側に傾いている形状 III-III-III タイプ、およびそれらの予備型と考えられる形状 II-IV-VI タイプなどが見出された。

この分類方法から、クラスタを構成する若年、中年、高年層の足例について、裸足形態の年齢別特徴と共通点を明らかにした。

第II編 足部拘束力の計測法および評価法の提案

第1章 歩行時の靴と足との滑り摩擦力計測法

靴と足部の間に滑り摩擦によって発色する薄いツーストタイプの感圧フィルムをセンサとして利用し、図3に示すようなシリンダ上を荷重W(g)をつけたベルトが擦過する歩行時の靴内の滑り挙動を模した装置を試作し、シミュレータ実験を行った。フィルムセンサをシリンダ表面とベルト裏面に添付し、荷重擦過後、フィルムセンサの発色の濃淡を視感反射率Y%として測定すると、発色度Y%と荷重WとのY-W回帰曲線が求められた。そこで歩行時に発色したセンサの発色度Y%を回帰曲線に

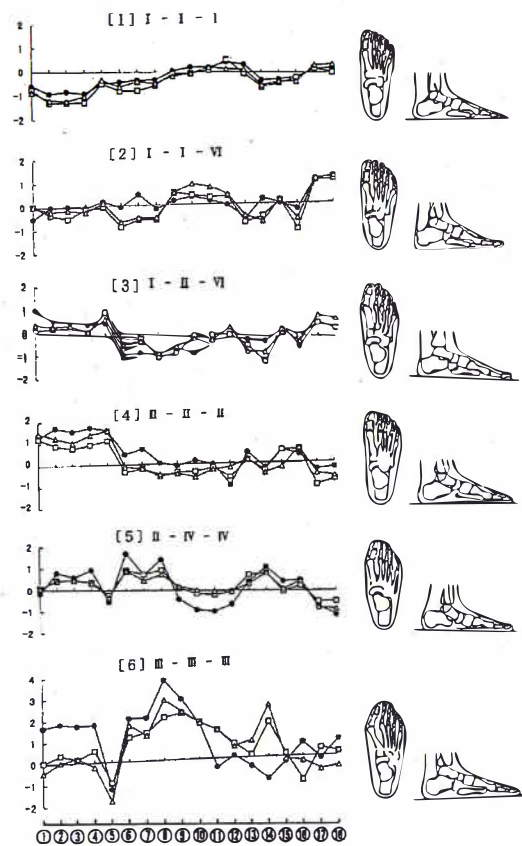


図2 18計測項目の平均ベクトルプロフィールと抽出された代表的裸足形態6タイプ ●:若年層, ■:中年層, □:高年層

代入することにより、滑り摩擦力から歩行時の拘束力を垂直圧 $p(\text{g/cm}^2)$ として導出する計測法を提案できた。なおシミュレータのW値は垂直圧 p 、滑り摩擦力 F との間に $p = W/4$ 、 $F \approx 2W$ の関係をもつ。

実際の歩行実験の、第5趾、第5中足骨頭、第1中足骨頭での単位面積あたりの垂直圧 p および単位面積あたりの滑り摩擦力 f の測定結果を表3に挙げる。

| Part | Y (%) | p (g/cm^2) | f (g/cm^2) |
|---------|-------|-------------------------|-------------------------|
| 5th toe | 21.31 | 405 | 506.25 |
| MT | 26.80 | 145 | 181.25 |
| MF | 31.59 | 67.5 | 84.38 |

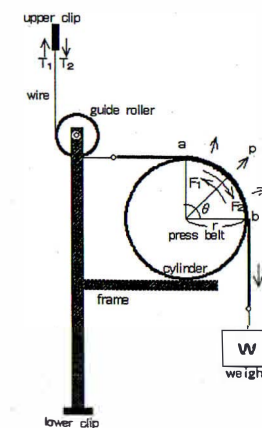


図3 靴内の滑り摩擦挙動のシミュレータ

第2章 靴内環境要因が前足部拘束力に及ぼす影響

歩行時の靴内環境要因が足部の拘束力に及ぼす影響を捉えるために、前章で提案した滑り摩擦力計測法を用いて、前足部にかかる拘束力の大きさと、以下のような諸因子との関係を、実験計画法の直交表を利用して分析した。計測部位は、MT、第1趾(1A)、第2趾(2B)、第3趾(3B)、第4趾(4B)、第5趾(5A)、MFの7部位である。

A 靴の素材: $A_1 =$ 革, $A_2 =$ 塩化ビニル

B 靴サイズ (長さ, 幅, ヒールの高さ):

$B_1 = 23.5\text{cm}$, EE, 3.5cm

$B_2 = 24.0\text{cm}$, EE, 3.5cm

C 足サイズ (足長, 足幅):

Case 1, $C_1(K) = 23.3\text{cm}$, 8.8cm

$C_2(O) = 24.0\text{cm}$, 9.0cm

Case 2, $C_1(H) = 23.0\text{cm}$, 9.4cm

$C_2(O) = 24.0\text{cm}$, 9.0cm

D 足状態: $D_1 =$ ストッキング着用, $D_2 =$ 裸足

E 動作: $E_1 =$ 歩行(20歩), $E_2 =$ 階段昇降(10段)

D 足状態: $D_1 =$ ストッキング着用, $D_2 =$ 裸足

分散分析の結果、各要因の純効果にしろる寄与率は大きめの靴を履くと (Case 2)、通常の靴を履いた人よりも滑り摩擦の自由度が大きくなり第1趾脛側および第5趾腓側でWが局所的に増大する。逆に小さめの靴を履くと (Case 1)、第1, 2, 3, 4趾よりも第1中足骨頭および第5中足骨頭部にその影響が集中することがわかった。

さらに分散分析結果を用いて、7部位のそれぞれに集中して生じる要因の組合せ効果が、最大の時のWの大きさとその要因の種類を表4

のように求めた。その結果、各要因が同時に働く部位の最大拘束力Wは、第1, 4趾, 腓側中足骨で約1kgであったが、第5趾については約4kgの力が作用したようである。これを垂直圧 ($p = W/4$) に換算すると約1 kg/cm²になる。このように要因の組み合わせの関係を明らかにした。

表4 Wが最大となる要因組合せ

| Part | Case 1 | | | Case 2 | | |
|------|--|-------------------------|-------------------------|--|-------------------------|-------------------------|
| | Combination of levels | Maximum population mean | 95% confidence interval | Combination of levels | Maximum population mean | 95% confidence interval |
| MF | (C ₁ , D ₂ , E ₂) | 0.662 | ±0.164 | (C ₁ , D ₂) | 0.573 | ±0.183 |
| 1A | (A ₁ , C ₂ , D ₁ , E ₁) | 1.184 | ±0.187 | (B ₂ , C ₂ , D ₁ , E ₁) | 1.036 | ±0.204 |
| 2B | (C ₂ , D ₁ , E ₁) | 0.899 | ±0.248 | (A ₂ , B ₁ , C ₂ , E ₁) | 0.951 | ±0.251 |
| 3B | (C ₂ , D ₂ , E ₁) | 0.698 | ±0.103 | (D ₂ , E ₁) | 0.646 | ±0.105 |
| 4B | (C ₂ , E ₁) | 0.964 | ±0.224 | (B ₁ , C ₂ , E ₁) | 1.165 | ±0.232 |
| 5A | (B, C ₂ , D ₂) | 3.885 | ±0.824 | (A ₁ , B, C ₂ , D ₂) | 3.971 | ±1.089 |
| MF | (B ₁ , C ₂) | 0.985 | ±0.217 | (A ₂ , C ₂) | 1.031 | ±0.136 |

第3章 靴と足の滑り摩擦挙動とストッキング効果

歩行時の前足部が拘束を受けた状態で起こるズレ挙動に注目し、靴と足部との表面的な滑り摩擦挙動と、足部に筋歪みを生ずるようなせん断ズレについて、ストッキングを履いている場合は靴とストッキング、ストッキングと足部間のズレに分けてシミュレータ実験を行っている。すなわち、第II編の第1章に示したシミュレータ装置を改造し、カーボン紙と薄白紙をペアーにしたツーシートタイプセンサを試用した。そして歩行数に対応する滑り摩擦量を総摩擦距離L_Nと定義して、その計測法を検討するとともに、滑り摩擦挙動をストッキングの有無別にモデル化し、シミュレーションの結果をもとに滑り摩擦挙動の評価法を提案した。

この評価法を用いて、裸足歩行とストッキング歩行の2種の実験を2名の被験者について行った結果を表5に示す。計測点は第1趾の場合を示している。センサのY (%)からL_Nを求めると、被験者Bは素足歩行では総摩擦距離が72cmであったに

もかわらず、ストッキング歩行では、16cmとなりストッキングによる摩擦量およびせん断変形量の軽減効果が明瞭に認められた。それとともに被験者によってはその効果には差異があることも明らかにできた。

表5 被験者A, Bの500歩歩行時の総摩擦距離

| Number of steps | Element | Part 1st toe | |
|-----------------|----------------|---|----|
| | | Total frictional length L _N (cm) | |
| 500 | Subject | A | B |
| | Barefoot | 17 | 72 |
| | Shoes-Stocking | 65 | 57 |
| | Foot-Stocking | 11 | 16 |

第4章 歩行時の靴による前足部拘束力と履き心地の良し悪しとの関係

靴の履き心地の判別が、靴着用時の前足部の拘束力を用いてどの程度推測できるかを検討した。まず42人の被験者が所持する靴の中で、最も履き心地の良い靴と最も履き心地の悪い靴を対象として、それぞれの被験者について前足部7部位にかかる垂直圧pを求めて平均し、両者の特性を比較検討した。第3, 4趾, 第5趾腓側および第5趾中足骨頭部では、不快グループのpは67~372g/cm²で、快グループは31~166g/cm²で、2倍以上の値を示した。また不快グループの最大値は第5趾腓側で990g/cm²、第5趾中足骨頭部で958g/cm²であったが、快グループはその半分以下であった。

さらに履き心地の良い靴と悪い靴を、計測された垂直圧 p によって判別が可能かについて検討した。表6に示すように、快・不快グループを一括した84サンプルにつ

表6 履き心地の良い靴と履き心地の悪い靴の判別分析

| | Comfortable | Uncomfortable | Correct discrimination |
|---------------|-------------|---------------|------------------------|
| Comfortable | 36 | 6 | 0.857 |
| Uncomfortable | 10 | 32 | 0.762 |

いて、7部位のpを用いて判別分析を行い、各サンプルの判別得点zを求めると、快グループではz > 0と正判別した者は85.7%、不快グループではz < 0と正判別した者は76.2%で、よく判別された。なお誤判別したサンプルの半数以上はz ≈ 0の近傍にあり、快・不快の曖昧領域が存在するように思われたが、判別分析の判別得点から拘束力が履き心地を十分に判別できることを明らかにした。

結論

これまでの各章のまとめと今後の課題について述べている。これらを概括すると、I編においては靴着用による足部形態変化Δを用いて、裸足ばかりでなく靴着用時の足の形態的諸特性を明らかにしており、また第II編においては靴着用時の拘束を垂直圧と総摩擦距離から評価する新しい方法を提案している。

[学位論文]

細長喜久代：靴着用時の足部の変形と拘束に関する研究 —成人女子を対象として— 2004年10月、共立女子大学大学院 家政学科研究科 人間生活学専攻、博乙第9号、博士(学術)

[学術誌への発表]

- 第I編 第1章 細長喜久代, 岡部和代, 山名信子：着靴による足部形態変化の分析, 繊維誌, 37, 242-248 (1996)
- 第2章 細長喜久代, 岡部和代, 銭谷八栄子, 山名信子：着靴による足部形態変化の探索法, 衣服誌, 40, 125-131 (1997)
- 第3章 Kikuyo Hosonaga, Kazuyo Okabe, Yaeko Zenitani and Nobuko Yamana: Foot Morphology through Classification Analysis, Jpn. J. Clo. Res. 41, 97-105 (1998)
- 第II編 第1章 細長喜久代, 銭谷八栄子, 稲垣勝彦：靴と足との滑り摩擦計測法, 家政誌, 50, 503-508 (1999)
- 第2章 細長喜久代, 銭谷八栄子, 稲垣勝彦：歩行時の靴内環境要因が前足部の拘束力に及ぼす影響, 家政誌, 51, 1057-1065 (2000)
- 第3章 細長喜久代, 稲垣勝彦：歩行時における靴と前足部との滑り摩擦挙動に及ぼすストッキングの影響, 家政誌, 53, 1105-1112 (2002)
- 第4章 細長喜久代：歩行時の靴による前足部拘束力と履き心地の良し悪しとの関係, 家政誌, 53, 23-29 (2002)