

題目

足部アーチ構造の変化に関連する要因分析に関する研究

報告者

中尾英俊

2020年3月

徳島大学大学院先端技術科学教育部

システム創生工学専攻 博士後期課程3年

目次

| | |
|------------------------------------|----|
| 第1章 序論..... | 1 |
| 1.1 研究背景..... | 1 |
| 1.1.1 足部アーチ構造..... | 1 |
| 1.1.2 足部・足関節の変形..... | 3 |
| 1.1.3 足部アーチ構造の変形による医学的問題..... | 4 |
| 1.1.4 足部アーチの変形に関連する要因..... | 5 |
| 1.1.5 医療分野における AI 利活用の可能性..... | 5 |
| 1.2 研究目的..... | 6 |
| 1.3 論文の構成..... | 7 |
| 第2章 足部データの収集と測定方法..... | 8 |
| 2.1 データ収集の方法..... | 8 |
| 2.2 足部アーチの評価方法と信頼性評価..... | 10 |
| 2.3 本研究の足部測定方法と信頼性評価..... | 12 |
| 2.3.1 信頼性評価を行う足部測定項目..... | 12 |
| 2.3.2 足背高 (DH) と足長 (FL) の計測方法..... | 13 |

| | | |
|-------|--|----|
| 2.3.3 | 足部画像による TFL の算出方法 | 14 |
| 2.4 | 信頼性評価の結果..... | 15 |
| 2.5 | 信頼性評価の考察..... | 16 |
| 第 3 章 | 健常者の足背高測定による足部アーチ評価とアーチ高に影響を及ぼす因子..... | 18 |
| 3.1 | 足背高測定を行う対象と方法 | 18 |
| 3.1.1 | 689 名の対象者 | 18 |
| 3.1.2 | 足部アーチの評価方法について | 18 |
| 3.1.3 | アンケート調査..... | 19 |
| 3.1.4 | 足部形状の評価..... | 21 |
| 3.1.5 | 足部アーチ高による群分け方法..... | 21 |
| 3.1.6 | 統計学的検討 | 21 |
| 3.2 | 足背高およびアーチ高比による測定の結果 | 21 |
| 3.2.1 | 全対象者の基本属性および性別による比較について | 21 |
| 3.2.2 | DH と AHR の相関と性別比について | 22 |
| 3.2.3 | DH および AHR の 3 群比較..... | 23 |
| 3.2.4 | DH および AHR と有意差が生じた項目との相関関係..... | 25 |

| | | |
|-------|---|----|
| 3.2.5 | 全対象者の足部アライメント 3 群と有意差が生じた項目との相関..... | 26 |
| 3.3 | 足背高測定の考察..... | 28 |
| 3.4 | アーチ高比の限界..... | 30 |
| 第 4 章 | SVM-RFE を用いた足部アーチ高比の低下を有する人の関連要因分析..... | 31 |
| 4.1 | SVM による医療分野における要因分析..... | 31 |
| 4.1.1 | サポートベクターマシン..... | 31 |
| 4.1.2 | 現在報告されている SVM の医療分野での活用例..... | 32 |
| 4.1.3 | 医療分野における SVM の活用可能性..... | 33 |
| 4.2 | ローアーチの関連要因を SVM-RFE にて解析を行う方法..... | 34 |
| 4.2.1 | 1178 名の対象者およびアンケート調査および足部形状の測定..... | 34 |
| 4.2.2 | 足部アーチ計測による 2 群分類..... | 34 |
| 4.2.3 | 基本属性の統計学的検討..... | 34 |
| 4.2.4 | SVM-RFE を用いた足部低アーチの要因分析..... | 35 |
| 4.3 | 対象者の基本属性と SVM-RFE による解析の結果..... | 37 |
| 4.3.1 | 対象者の基本属性と足部測定項目値の男女間の比較..... | 37 |
| 4.3.2 | 足部低アーチの基準値と割合..... | 38 |

| | | |
|-------|--------------------------------------|----|
| 4.3.3 | 年代別割合 | 39 |
| 4.3.4 | SVM-RFE による識別評価 | 40 |
| 4.3.5 | 年代別による説明変数と足部低アーチとの相関 | 42 |
| 4.3.6 | アーチ高率および足背高と SVM-RFE の関連項目との相関 | 44 |
| 4.4 | SVM-RFE による関連要因の抽出に関する考察 | 48 |
| 4.4.1 | SVM-RFE による足部低アーチの関連要因の抽出 | 48 |
| 4.4.2 | 関連要因の考察 | 48 |
| 4.5 | SVM-RFE による関連要因の限界 | 49 |
| 第 5 章 | 足部測定値の年代別比較 | 51 |
| 5.1 | 足部測定値の年代別比較について | 51 |
| 5.2 | 年代別比較を行う対象 | 51 |
| 5.3 | FL-AHR および TFL-AHR による測定方法 | 52 |
| 5.4 | 男女間および年代別比較の結果 | 52 |
| 5.4.1 | 足の測定値, 男女間比較 | 52 |
| 5.4.2 | 男女別, 足部測定項目の年代間の多重比較 | 53 |
| 5.5 | 年代間比較の考察 | 61 |

| | |
|-------------------|----|
| 5.6 年代間比較の限界..... | 62 |
| 第6章 結論..... | 63 |
| 参考文献..... | 66 |

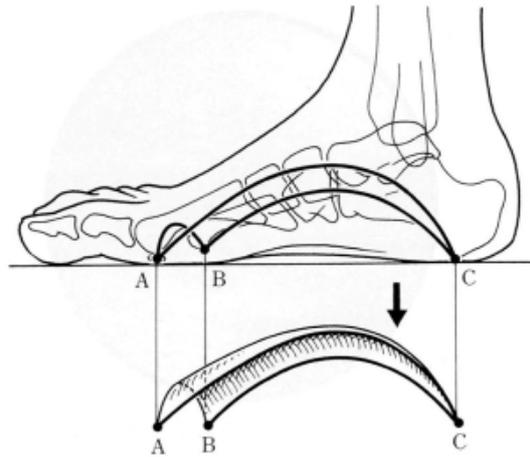
第 1 章 序論

1.1 研究背景

1.1.1 足部アーチ構造

ヒトの足はアーチ構造を有することで、長時間の立位や歩行が遂行できる構造となっている。足は 3 つのアーチ構造からなり、踵骨から第 1 中足骨頭までを内側縦アーチ、踵骨から第 5 中足骨頭までを外側縦アーチ、第 1 中足骨頭と第 5 中足骨頭にいたる横アーチが形成されている (図 1)。

内側縦アーチは踵骨、距骨、舟状骨、3 個の楔状骨、第 1~3 中足骨からなり、距骨下関節、距舟関節、リスフラン関節を構成する。内側縦アーチは、踵骨載距突起部、舟状骨部、中足骨部の 3 つに分類でき外側アーチよりも高く、頂点は舟状骨部になる。外側縦アーチは内側に比べてアーチは低く、踵骨、立方骨、第 4.5 中足骨からなる。立方骨が踵骨と中足骨の間に楔状にはまり込んでいる強固な構造で、かつ強力な靭帯が保護しているため内側に比べ剛性が高い。横アーチは、第 1 中足骨頭から第 5 中足骨頭までの中足骨レベル、第 1 楔状骨から立方骨までの楔状骨レベル、舟状骨から踵骨前端までの後足部レベルに分類される(図 2)。



➤A-B:横アーチ(Transverse arch)

➤A-C:内側縦アーチ(Medial longitudinal arch)

➤B-C:外側縦アーチ(Lateral longitudinal arch)

図1:足部アーチの分類 (文献[1]より引用)



図2:足部の骨格構造

1.1.2 足部・足関節の変形

足部アーチ構造は通常、歩行など荷重負荷の際、適度に撓むことで衝撃を吸収する。また足部で地面を蹴る際の推進力を発揮するには、剛性を得るためアーチ構造を高める。このように足部は多様な状況に対し安定した運動が行えるよう協調的な作用をもつ運動器といえる。このアーチ構造が過剰に低下もしくは高まった変形状態になると、その機能が果たせず医学的諸問題が生じやすい。

足部変形には足部の内側縦アーチが過剰に低下している状態である扁平足があり、扁平足に伴う諸症状を扁平足障害という。さらに踵骨の外反が伴う外反扁平足や横軸である横アーチの低下を示す開帳足、さらに母趾先端が外側に向く外反母趾などがある(図3)。また足背が高く荷重負荷によっても足部アーチが変化しない強固な状態をハイアーチと呼ぶ。

これら足部の変形は必ずしも痛みを伴わず、変形の程度は様々であるが様々な関連症状を引き起こす。また関節リウマチ等でみる過度な扁平足は関節破壊による構築学的な変形となり、進行例では骨性強直に至り可動性は著しく低下している。



図 3: 足部変形の代表例

1.1.3 足部アーチ構造の変形による医学的問題

临床上、多くみられる扁平足は、年代によって小児期、思春期、成人期の3期に分類している[2]。小児期における扁平足は一般に無症状であり、基礎疾患を有する例を除けば治療対象は少ないとされる。思春期では、体重増加やスポーツ活動にともない発症しやすく、足の内側部痛が運動や歩行によって増強する。疼痛が著しいものでは腫脹を伴う炎症性扁平足の状態になる。成人期の扁平足障害では、思春期扁平足からの移行だけでなく、肥満や加齢による筋力低下や腱・靭帯の脆弱化によって、成人期から症状が進行する場合がある。

扁平足はスポーツ選手に多い下肢の疲労骨折との関連が報告されている。この疲労骨折に関わる内的要因について検討した報告では、ランニング時に足部アーチが低下し下腿骨に圧縮や回旋ストレスが大きくなり、発症要因となっていることを示している[3]。Wardenらも疲労骨折の危険因子にアライメント異常が関係し、その要因に足部アーチの低下が大きいと報告している[4]。

また骨組織だけではなく筋組織への影響について、アメリカの海軍訓練生 449 人を対象とした前向きコホート研究では、筋骨格系障害の危険因子に扁平足、ハイアーチ、足関節の可動域制限および後足部の変形が含まれていた[5]。さらに足部アーチの低下が膝前面に生じる痛みの発生の可能性が高まるとする報告もあり、足部アーチへのインソールの使用によって治療または予防できることが示唆されている[6]。ハイアーチで生じやすい問題はスポーツ外傷にて頻度が高い足関節捻挫の発生率が増加することや[7]、ハイアーチによって足の痛みが生じやすいことが報告されている[8]。

1.1.4 足部アーチの変形に関連する要因

足部アーチの変形は様々な要因によって生じるが、環境因子などの外的要因と年齢や身長などの内的要因に大別できる。足部低アーチに関連する内的要因について、Attamark らは、18 から 83 歳までのトルコ人 516 名（男性 253 名、女性 263 名）を対象とした研究において体重、身長、BMI、足長の影響はなく踵の幅と扁平足においてのみ有意な関係を示したと報告している[9]。Faria らは、閉経後の女性 81 人を対象とした足部アーチ構造と体重、年齢、および下腿三頭筋腱スティッフネスとの関係を調査した研究にて、下腿三頭筋スティッフネスは足の構造変化の有無による差はなかったが、肥満と足部アーチ低下に有意な関係があることを示した[10]。また Aurichio らは、女性 227 人、男性 172 人の高齢者の足部アライメントと BMI との関係を調査した研究で、男女ともに肥満者は足部アーチが低下しやすいことを示した[11]。しかし、これらの報告は足部低アーチに関する報告が多く、年齢も限定的であり幅広い年齢を対象とはしていない。

1.1.5 医療分野における AI 利活用の可能性

一般に関節変形を診断、評価する際、MRI や X 線画像などが用いられており、これらの検査方法は医師による診断ツールとして重要な意義を持つが、測定には高額な費用と身体

的負荷などの問題点も併せ持っている。さらに、医療従事者による診断や評価などは、主観的判断が混入するため、評価者や施設間で判定結果に差が生じるという問題点もある。このため、ビッグデータを活用した人工知能や機械学習による客観的評価の重要性が高まっている。

機械学習の一つでもある Support Vector Machine (SVM) はパターン認識・識別を行う代表的な手法であり、この SVM を用いた 2 クラス分類問題による応用例として、医学分野において評価、診断システムの開発に関する報告が近年増加している。今後、AI を用いた非侵襲かつ簡易で、しかも客観的な診断・評価結果を得るシステムが構築できる可能性は高い。

1.2 研究目的

本研究の目的は、足部アーチ構造の変化に関連する要因を抽出することである。これまでの報告では対象とする年齢が限局的であったことから、対象を幅広い年齢層とし、足部アーチ評価データから標準値 (Standard) と High および Low の 3 群に分け、年齢や身長などの基本属性および足部の既往等に関するアンケート結果が足部アーチ構造の変化に影響するかどうか検討する。さらに、足部アーチの低下の有無について計測し、年齢や身長などの基本属性との相関を分析する横断研究をベースに、非線形回帰分析手法である SVM を用い、足部アーチの低下に関わる要因について分析を試みる。

本研究の成果をより多くの部位に発展的に活用することにより、今後、リハビリテーション分野において、汎用かつ信頼性の高い医学的評価システムの開発につながるものと考えている。

1.3 論文の構成

本研究では、幅広い年代を対象に足部アーチ評価から足部アーチの変形に関連する要因を検討することである。

第2章では足部データの収集方法とデータ解析手法について述べる。足部データとして足長、足背高、足部画像から足部アーチ高比を算出するとともに、身長や体重などの基本属性項目および足部の既往歴などのアンケート調査を行い、最終的に1185名の足部データを収集した。また、本研究で用いた足部の測定方法に関する信頼性評価について述べる。

第3章では、18歳から83歳までの689名を対象に、足背高 (Dorsum Height : DH) とアーチ高比 (Arch Height Ratio : AHR) の測定値を High, Standard, Low の3群に分け、基本属性、足の測定値、アンケートの結果を統計学的に比較した結果、足部の既往歴や現在のスポーツ活動の有無が足部アライメントに関与しないことを示した。DHの3群による多重比較では、体重およびBMI (Body Mass Index) の増加がDHと正の相関を有することを示した。

第4章では、0歳から97歳までの幅広い年齢層に属する1178名の足部データを用いて、ローアーチがどのような要因と関連しているのかを、機械学習手法であるSVM-RFE (Support Vector Machine – Recursive Feature Eliminations)を用いて解析した。関連要因として、「年齢」、「身長」、「体重」、「BMI」、「足長」の5つの候補を考えたが、SVM-RFEに基づく解析の結果、「年齢」、「足長」、「体重」の順にローアーチに関連していることが分かった。

第5章では、足部の各測定値を男女ごとに年代別の比較を行った結果、DHは年代による差は少ないが、足長は年代による差が大きいことを示した。また、骨格形成の違いから高齢者のほうが足長が短いことが分かった。

第6章では本研究の結論と得られた課題について述べる。

第2章 足部データの収集と測定方法

2.1 データ収集の方法

本研究で対象となる足部データは合計 1185 名となり、測定期間は平成 30 年 12 月～平成 31 年 2 月まで、測定回数は合計 30 回以上となった。測定風景の一例を図 4 に、測定協力者の一例を図 5 に示す。

対象および測定場所について、大学生の測定は主に大阪河崎リハビリテーション大学にて実施した。社会人の測定は、不二製油株式会社（1000 名以上在籍する企業、泉佐野本社、大阪支社の 2 社にて実施）、四條畷学園大学での理学療法士向けの研修会「あしべん」への参加者、大阪医療福祉専門学校の支援事業でもある大阪府内で開催されているマラソン大会（なにわ淀川ハーフマラソン、寛平マラソン大会）での健康支援サポートにて募集した。地域高齢者の測定は貝塚市で実施されたボランティアフェスティバル、貝塚市と大阪河崎リハビリテーションの共同調査として実施された「つげさんあたまとからだを知るヘルスチェック」、また、岸和田市社会福祉総合センターにて行われている健康教室への参加者、田尻町健康フェスタにて健康調査の一環として募集した。また乳幼児および子供の測定は、貝塚市のダンススタジオフラッシュの協力と、上記に記した貝塚市健康ボランティアフェスティバルおよび田尻町健康フェスタにて合計数十名の参加があった。

上記に示す各地での健康調査のボランティアとして実施した測定は、多岐にわたるイベントにて収集した。収集データは、乳幼児から大学生、社会人、スポーツ選手、地域高齢者などを含む 0 歳 10 か月から 97 歳までの 1185 名と幅広い年齢層のデータとなったが、アンケートにより神経障害を有すると答えた 7 名は、統計学的検定から除外した。この結果、最終的に 1178 名（男性 485 名、女性 693 名）のデータを用いて解析を行った。

なお本研究は、大阪河崎リハビリテーション大学研究倫理審査委員会の承認を得て行った（承認番号 OKRU29-A019）。またヘルシンキ宣言に基づき、研究の目的および方法を十

分に事前説明し，書面にて同意を得た上で測定を行った．未成年者の同意に関しても保護者に書面にて同意を得た．



アンケート調査



足部の計測

図4：計測(アンケートおよび足部計測)の風景



・ 田尻町健康フェスタ



・ 淀川ハーフマラソン



・ 不二製油株式会社



・ 貝塚市体育館

図 5：計測協力者

2.2 足部アーチの評価方法と信頼性評価

扁平足やハイアーチなどの足部障害を有する場合、下肢アライメント評価の一つである足部アーチの形状評価を実施する。足部アーチ評価は、高いレベルでの一貫性と妥当性を備え、簡単かつ低侵襲によるテクニックを行う必要があり、歩行などの動的な肢位ではなく立位や座位など静的な肢位にて行う。

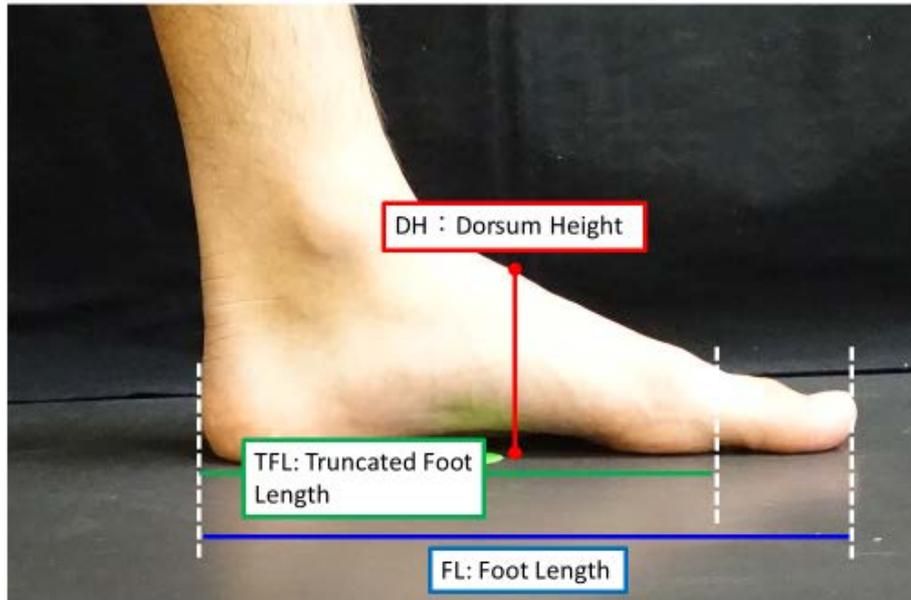
足部アーチ形状を評価する方法には様々な方法があり、代表的な方法として X 線撮影法を用いた横倉法[12]や Cavanagh&Rodgers らによるフットプリントによる足底の接触面積を用いる方法[13]、また Bony Arch Index (BAI) は骨形態による足部内側縦アーチの形状評価として、複数の報告がなされている[14, 15, 16]。体表から測定する方法として、大久保によるアーチ高率は、足長に占める舟状骨粗面の高さの割合 (舟状骨高/足長×100) を算

出する[17]. この方法は X 線像を用いる横倉法と関連しており, 信頼性の高い評価方法とみなされている.

上記の評価方法のうち, 体表から計測する方法は特別な装置を用いる必要がなく, また被検者に対して侵襲がないため汎用性が高い. 本研究では Williams らによる床面から足背までの高さを評価する足背高 (Dorsum Height: DH) と足長に対する足背高の割合 (%) を求めた足長によるアーチ高比 (Arch Height Ratio: AHR), また足趾の長さを除いた足長 (Truncated Foot Length : TFL) によるアーチ高比の測定方法から引用する[18] (図 6). この DH と足長を用いた AHR, TFL を用いた AHR の信頼性については肯定的な評価がなされている.

本研究で用いた足背高と足長によるアーチ高比の信頼性評価について, McPoil らによると検者内信頼性 (ICC) は荷重量が体重の 10%では ICC0.98, 体重の 90%では ICC0.99 とどちらも高い信頼性が報告されている[19]. また Williams らは, アーチ高比の妥当性に関して, X 線画像による信頼性評価を行い荷重量が体重の 10%では ICC0.704, 体重の 90%では ICC0.749 と報告している.

足部測定について Williams らは Plexiglas Plate という機器を使用した測定方法を用い, 本研究の測定方法とは使用機器が異なる. また Williams らは 2 名の理学療法士にて測定したのに対し, 本研究では足長および DH の測定は, 理学療法士監視のもと十分に測定方法を練習した 2 名の大学学生により実施した. さらに本研究では足部への荷重量を設定していないため, これまでの報告とは信頼性が異なることが予測される. しかし, 静止立位では, アーチ高の変化が少ないと報告がされており[20], 立位にて 4 点支持のウォーカーケインを把持させ, 安定した肢位で実施した本研究の信頼性は高いことが予測され検討する必要がある.



- $FL-AHR = DH/FL$
- $TFL-AHR = DH/TFL$

図 6：足部アーチ高比の評価方法

2.3 本研究の足部測定方法と信頼性評価

2.3.1 信頼性評価を行う足部測定項目

本研究の信頼性評価の対象は大学生 17 名である。性別は男性 12 名、女性 5 名、全体の平均年齢は 21.0 ± 0.6 歳となった。男性 12 名の平均身長 171.3 ± 6.4 cm、平均体重 65.9 ± 6.8 kg となり、女性 5 名の平均身長 161.1 ± 5.8 cm、平均体重 52.3 ± 4.2 kg となった。

信頼性評価を行う足部測定項目は FL, DH, 足部画像を用い算出した TFL に、FL によるアーチ高比 (FL-AHR) と、TFL によるアーチ高比 (TFL-AHR) となった。この信頼性評価は、学生 2 名が測定した FL および DH について検者内および検者間信頼性評価を行い、理学療法士 1 名にて算出した TFL, FL-AHR, TFL-AHR については検者内信頼性評価

を実施した。また DH は荷重量による違いを検討するため荷重量について、自由荷重、体重の 10%荷重、体重の 90%荷重の 3つの条件について評価した。なお、統計解析には SPSS for windows を用いた。

2.3.2 足背高(DH)と足長(FL)の計測方法

本研究で用いた DH の測定方法は大学学生 2 名が測定を行い、測定肢位は立位とし、測定肢は 15cm 台に足部を乗せた状態にて行った。測定時の足関節角度および荷重量の設定はなく自由な荷重状態とした。測定はまずプラスチック製の足型計測器にて足長を計測し、次に足長中心をメジャーにて確認した後、デジタルノギス(シンワ社製)にて足背高を計測した。足背高は 1 名が足背位置に定規を両手にて固定し床面となるべく水平位を保つように留意し、もう 1 名が固定した定規の高さまでをデジタルノギスにて計測した(図 7)。



足長計測



足背高計測

図 7: 足部形状(足長および足背高)測定の方法

2.3.3 足部画像による TFL の算出方法

TFL の算出に用いた足部画像の撮影は、2 台のデジタルカメラ（SONY 社製，RX-0）を使用した。測定肢位は立位にて計測肢を 1 歩前方にステップした位置とし、2 台のカメラは、ステップ側の足部の内側矢状面および上方水平面の画像を同時撮影した。撮影時には上方水平面画像により第 2 趾が内外転中間位になるよう画像にて確認し撮影した。なお、内側矢状面のカメラは 10cm 台上から撮影した(図 8)。

TFL の算出は、足部の内側矢状面のデジタル画像を画像編集ソフト Photoshop のものさし機能を用い、Photoshop による足長（FLPS：Foot Length by Photoshop）として踵骨後端から足趾先端までの距離を計測し、Photoshop による母趾長（HLPS：Hallux Length by Photoshop）として 1 中足趾節関節中心から足趾先端までの距離を計測し、既に直接計測している足長（FL）の値を用い「 $HLPS \times FL / FLPS$ 」にて母趾長（HL）を算出し、FL から HL を引いた値を TFL とした(図 9)。



図 8：足部画像の撮影方法

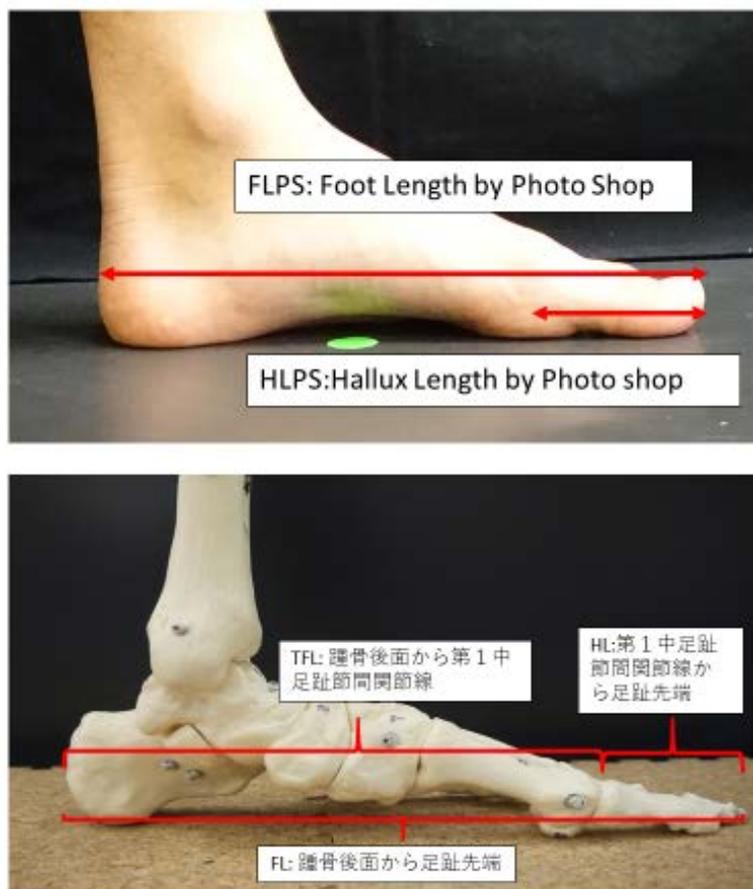


図9：Photoshop を用いた TFL の算出

2.4 信頼性評価の結果

足部測定 of 検者内信頼性 (ICC1.1) および検者間信頼性 (ICC2.1) を表 1 に示す. FL は両測定者ともに ICC0.9 以上, DH の自由荷重, 10%荷重では ICC0.7 以上となり良好な結果となったが, 90%荷重では 1 名の検者において ICC0.57, もう一名が ICC0.76 と結果に差が生じた. 検者間信頼性は, FL が ICC0.98, 自由荷重 DH の ICC0.70, 10%荷重 DH の ICC0.71, 90%荷重 DH の ICC0.51 となり, 自由荷重と 10%荷重の信頼性はほぼ同様であった.

次にデジタル画像を用い計測した TFL と, 足部アーチ高率として TFL を用いたアーチ

高率 (TFL-AHR) と全足長を用いたアーチ高率 (FL-AHR) の検者内信頼性について表 2 に示す。結果, TFL の ICC0.92, TFL-AHR の ICC0.96 と信頼性は高く, FL-AHR の ICC0.76 よりも高い信頼性結果が得られた。

表 1：足部測定項目の検者間信頼性評価

| Foot Measurements | FL | DH(Free of Weight Bearing) | DH(10% of Weight Bearing) | DH(90% of Weight Bearing) |
|-------------------|------|----------------------------|---------------------------|---------------------------|
| Intra rater(1.1) | | | | |
| rater1 | 0.98 | 0.76 | 0.76 | 0.57 |
| rater2 | 0.95 | 0.70 | 0.87 | 0.76 |
| Inter-rater(2.1) | 0.98 | 0.70 | 0.71 | 0.51 |

FL: Foot Length DH: Dorsum Height
n=17

表 2：TFL,FL-AHR,TFL-AHR の検者内信頼性評価

| Intra rater(1, 1) | |
|-------------------|------|
| TFL(mm) | 0.92 |
| TFL-AHR(%) | 0.96 |
| FL-AHR(%) | 0.76 |

TFL: Truncated Foot Length
n=17

2.5 信頼性評価の考察

本研究で用いた自由荷重および体重の 10%荷重の DH, FL-AHR, TFL-AHR はともに ICC0.7 以上と信頼性は良好であり, 測定方法として問題がないと思われる。しかし Plexiglas Plate を使用した Williams ら[18]の測定では ICC0.9 以上であり, 本研究の方法よりも信頼性が高く, 機器を使用する測定の方が精度において優れていた。

また, 体重の 90%荷重では一名の測定者にて ICC0.51 と Williams による 90%荷重での ICC0.99 と結果に大きな差が生じた。本研究の信頼性評価における肢位は体重計を測定肢

に乗せ、足を前後に広げたランジポジションとしたため、通常の立位姿勢とは違い左右の支持面が狭くなり、ランジポジションでは姿勢の安定性を得るための動的要求が高まり足部の位置が不安定となった。よって荷重量 90%の負荷量による DH を測定するには、本研究で行った肢位は不向きであり、荷重量が自由荷重もしくは 10%であれば信頼性の問題が少ないことが示唆された。

第3章 健常者の足背高測定による足部アーチ評価とアーチ高に影響を及ぼす因子

3.1 足背高測定を行う対象と方法

3.1.1 689名の対象者

本研究での対象は企業に対して健康調査として依頼、また、大阪府で開催されているマラソン大会や泉州地域での健康フェスタなど多岐にわたるイベントに参加し「足のヘルスチェック」として募集した。収集したデータは、主に大学生、社会人、スポーツ愛好家、地域高齢者などからなる18歳から83歳までの689名（男性370名、女性319名）となった。

3.1.2 足部アーチの評価方法について

足部アーチを評価する方法として、Williams & McClay および McPoil らの方法を参考に [18, 19], 足長中点の床から足背までの高さである足背高 (Dorsum Height: DH) と、足長 (Foot Length : FL) に対する DH の割合 (%) を求めたアーチ高比 (Arch Height Ratio : AHR) を算出した (図7)。DH は測定方法を十分に練習した2名の大学生が検査者として測定を行い、測定肢位は立位とし、測定肢の足部を10cm 台に乗せた状態にて測定を行った。測定時の足関節角度および荷重量の設定はなく、自由な荷重状態とした。まずプラスチック製の足型計測器にて足長を計測し、次に足長50%位置をメジャーにて確認した後、デジタルノギス (シンワ社製) にて DH を計測した。DH は1名が足長50%地点の足背位置に定規を固定し、もう1名が定規の高さまでをデジタルノギスにて計測した。なお本研究では右足部のみを解析の対象とした。

3.1.3 アンケート調査

アンケート調査は自記式とし、調査項目は「年齢」、「性別」、「身長」、「体重」、「足部・足関節の既往歴の有無」、「足の既往に伴う歩行困難の有無」、「現在行っているスポーツ活動の有無」とした(図 10).

足に関するアンケート調査

年齢 _____ 歳

性別 男・女

身長 _____ cm

体重 _____ kg

神経障害（運動や感覚のまひ症状）の有・無

該当するご職業に○をお願いします

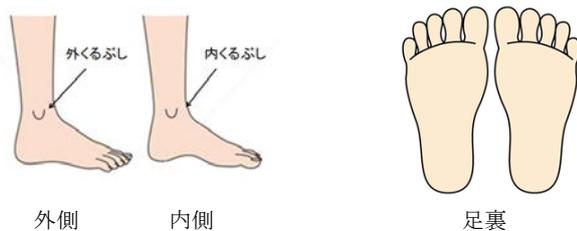
- 1.会社員 2.自営業 3.医療関係 4.主婦 5.学生 6.パート 7.無職 8.その他 ()

Q1 足（足首）の怪我や痛みについて以下の問1~3についてお答えください

問1 現在までに足（足首より下）の痛みや怪我が生じたことがありますか？ 1.はい・2.いいえ

問2 その足の痛みは歩くのが困難になるほどの痛みでしたか 1.はい・2.いいえ

問3 「はい」とお答えした方にお伺いします。
・怪我もしくは痛みの箇所はどのあたりですか？図に○をつけてください。
また右足、左足、両足の中から、選んで記載してください 1.右・2.左・3.両足



Q2 普段、行っている主なスポーツについて○をつけてください。（一つだけ選択）

- 1.野球 2.テニス 3.ゴルフ 4.マラソン（ハーフ含む） 5.サッカー 6.ソフトボール 7.卓球
8.バレーボール 9.バスケットボール 10.ラグビー 11.格闘技系 12.水泳 13.スキー
14.その他 () 15. なし

アンケートは以上です。ご協力ありがとうございました。

これより先の項目は、担当者が記載します。

ID _____ 足長 右 _____ cm 左 _____ cm

足背高 右 _____ cm 左 _____ cm

図 10：アンケート調査票

3.1.4 足部形状の評価

足のアーチ形状を評価する方法は、足背高を指標とした DH と足長に対する足背高の割合（%）を求めた AHR を算出した。

3.1.5 足部アーチ高による群分け方法

足のアライメント測定を行った全対象者を性別にて比較した。測定した DH と AHR の値をもとに、平均値+1 標準偏差以上を高値（High：以下 H 群）、平均値±1 標準偏差内を標準（Standard：以下 S 群）、平均値-1 標準偏差以下を低値（Low：以下 L 群）として対象者を 3 群に分け、それぞれの特徴を基本属性、足の測定項目、アンケート結果から検討した。

3.1.6 統計学的検討

統計学的検定として、全対象者の基本属性と属性項目の男女間の違いを知るため対応のない t 検定を用いた。DH と AHR の値を H 群、S 群、L 群の 3 群間で比較するため 1 元配置分散分析後、Turkey 法による多重比較を行い、アンケート結果の比較は χ^2 検定を行った。多重比較および χ^2 検定の結果、有意差が生じた項目と全対象者および性別による DH および AHR と項目との関係を知るために Pearson の相関を行い、統計解析には IBM SPSS Statics ver25.0 を使用し有意水準は 5%とした。

3.2 足背高およびアーチ高比による測定の結果

3.2.1 全対象者の基本属性および性別による比較について

測定者 696 名（うち除外 7 名）の基本属性および性差による比較結果を表 3 に記載した。対象 689 名の性別の内訳は男性 370 名、女性 319 名となり、基本属性項目の性別にて

比較した結果、男性は身長、体重、Body Mass Index (BMI)、足長、DH が高値となり、女性は年齢が高値となり有意差を認めたが、AHR では有意差が認められなかった。

表 3：性差による基本属性の比較結果

| 対象者の基本属性 | 全対象(689) | 最小値 - 最大値 | 男性(370) | 女性(319) | p 値 ^{注)} |
|--------------------------|------------|-------------|------------|-----------|-------------------|
| 年齢 (歳) | 38.6±17.9 | 18-84 | 36.3±16.4 | 41.3±19.1 | <0.001 |
| 身長 (cm) | 165.1±9.5 | 139.0-190.0 | 171.7±6.7 | 157.5±5.9 | <0.001 |
| 体重 (kg) | 61.0±11.5 | 36.7-101.0 | 67.7±9.5 | 53.1±8.1 | <0.001 |
| BMI (kg/m ²) | 22.2±3.0 | 17.5-34.1 | 22.9±3.0 | 21.3±2.8 | <0.001 |
| 足長 (mm) | 239.4±15.9 | 200-280 | 249.0±12.5 | 227.3±9.5 | <0.001 |
| DH (mm) | 60.5±6.6 | 42.0-82.0 | 63.2±5.8 | 57.5±6.1 | <0.001 |
| AHR (%) | 25.3±2.7 | 17.5-34.1 | 25.3±2.6 | 25.2±2.8 | 0.657 |

最小値 - 最大値以外は平均値±標準偏差

注) 性差について t 検定を用いた

3.2.2 DH と AHR の相関と性別比について

DH と AHR の相関について、有意な正の相関 ($r=0.815$, $p<0.001$) を示したが、群分け基準について、表 3 より DH では性差が生じたため、群分けする際に男性と女性それぞれの基準値を設定した。基準値は平均値から 1 標準偏差を増減した値とし、男性は 57.4mm 以下を L 群、69.0mm 以上を H 群とし、女性は 51.4mm 以下を L 群、63.6mm 以上を H 群とした。AHR では性差がなかったため、男女混合の平均値によって基準値を設定した、AHR の値が 22.9% 以下を L 群とし 27.9% 以上を H 群とした。DH および AHR の測定値よりそれぞれ 3 群に分類し、その人数と性差の比率を表 2 に記載した。3 群の人数内訳は DH の H 群 111 人 (16.1%)、S 群 467 人 (67.8%)、L 群 111 人 (16.1%) となった。AHR は H 群 104 人 (15.1%)、S 群 484 人 (70.2%)、L 群 101 人 (14.7%) となった。

3.2.3 DH および AHR の 3 群比較

1 元配置分散分析, および多重比較の結果は表 4 に記載し, アンケート 2 値データの比較結果は表 5 に記載した. DH における 3 群の基本属性項目は年齢, 体重, BMI すべて H 群が高値を示し, H 群と L 群との差が有意となった. AHR では年齢, 身長, 足長に有意差を認めた. 年齢と足長は H 群が高値を示し, 身長は L 群が高値を示した. BMI は H 群が高い傾向を示した. 足の状態に関する 2 値アンケート調査の結果, DH, AHR ともにいずれの項目においても群間に有意差が認められなかった.

表4：DH および AHR の3群比較（基本属性、足の測定値）の結果

| DH | High(113) | Standard(478) | Low (113) | ANOVA | Post-hoc Turkey HSD |
|--------------------------|------------|---------------|------------|----------------------|---------------------------|
| | a group | b group | c group | | |
| | Mean ±SD | Mean ±SD | Mean ±SD | | |
| 年齢 (age) | 42.4±20.8 | 38.1±17.6 | 36.6±15.0 | F=3.342; p=0.036 | a-c(*) |
| 身長(cm) | 165.4±9.9 | 165.4±9.4 | 164.0±9.3 | F=0.874; p=0.418 | |
| 体重(kg) | 62.9±12.4 | 61.1±10.8 | 58.1±10.4 | F=4.573; p=0.011 | a-c(*) |
| BMI (kg/m ²) | 22.8±3.5 | 22.2±3.5 | 21.5±2.5 | F=5.381; p=0.005 | a-c(*) |
| 右足長(cm) | 239.0±15.2 | 239.8±16.0 | 238.1±16.2 | F=0.552; p=0.594 | |
| DH (cm) | 69.9±4.2 | 60.1±4.3 | 51.6±3.8 | F=495.3; p=0.000 | a-b(***)a-c(***) b-c(***) |
| AHR (%) | 29.3±1.8 | 25.1±1.6 | 21.7±1.7 | F=524.4; p=0.000 | a-b(***)a-c(***) b-c(***) |
| AHR | High(104) | Standard(484) | Low (101) | ANOVA | Post-hoc Turkey HSD |
| | a group | b group | c group | | |
| | Mean ±SD | Mean ±SD | Mean ±SD | | |
| 年齢 (age) | 45.8±20.5 | 37.6±17.7 | 36.0±13.8 | F=10.479; p=0.000 | a-c(*) b-c(*) |
| 身長(cm) | 163.0±10.0 | 165.0±9.3 | 167.6±9.3 | F=6.202; p=0.002 | a-c(*) b-c(*) |
| 体重(kg) | 60.79±11.4 | 60.8±11.5 | 61.7±11.5 | F=0.245; p=0.782 | |
| BMI (kg/m ²) | 22.7±3.2 | 22.2±3.0 | 21.8±2.9 | F=2.544; p=0.079 | |
| 右足長(cm) | 232.0±14.4 | 239.4±15.3 | 247.1±16.8 | F=24.719; p=0.000 | a-b(***)a-c(***)b-c(***) |
| DH (cm) | 69.1±5.1 | 60.3±4.8 | 52.6±4.5 | F=296.7; p=0.000 | a-b(***)a-c(***)b-c(***) |
| AHR (%) | 29.0±1.4 | 25.1±1.4 | 21.2±1.1 | F=924.822; p = 0.000 | a-b(***)a-c(***)b-c(***) |

平均±標準偏差

*: p<0.05 ***: p<0.001

表5：アンケート調査の3群比較の結果

| DH | High | | Standard | | Low | | p 値 |
|-------------------|-----------|-----------|------------|------------|-----------|-----------|-------|
| | あり | なし | あり | なし | あり | なし | |
| アンケート調査の結果 | あり | なし | あり | なし | あり | なし | p 値 |
| 足の既往歴 n(%) | 57 (50.4) | 56 (49.6) | 230 (48.1) | 248 (51.9) | 54 (55.1) | 44 (44.9) | 0.441 |
| 足の既往による歩行困難感 n(%) | 33 (29.2) | 80 (70.8) | 132 (27.6) | 346 (72.4) | 31 (31.6) | 81 (73.0) | 0.711 |
| 現在のスポーツ活動の有無 n(%) | 71 (65.1) | 38 (34.9) | 249 (53.1) | 220 (46.9) | 51 (52.0) | 47 (48.0) | 0.062 |
| AHR | High | | Standard | | Low | | p 値 |
| アンケート調査の結果 | あり | なし | あり | なし | あり | なし | |
| 足の既往歴 n(%) | 57 (50.4) | 56 (49.6) | 242 (50.0) | 242 (50.0) | 47 (46.5) | 54 (53.5) | 0.635 |
| 足の既往による歩行困難感 n(%) | 33 (29.2) | 80 (70.8) | 143 (29.5) | 341 (70.5) | 25 (24.8) | 76 (75.2) | 0.333 |
| 現在のスポーツ活動の有無 n(%) | 71 (65.1) | 38 (34.9) | 261 (54.9) | 214 (45.1) | 50 (49.5) | 51 (50.5) | 0.319 |
| χ^2 -検定 | | | | | | | |

3.2.4 DH および AHR と有意差が生じた項目との相関関係

多重比較にて有意差が生じた項目と全対象者および性別による DH および AHR との相関係数の結果を表6に示す。体重と全対象者の DH との相関は $r=0.413$ となり中等度の相関を認めた。BMI と全対象の DH との相関は $r=0.259$ となり弱い相関を認めた。

表 6：全対象者および性別による DH と AHR と基本属性項目との相関

| Pearson の相関係数 | | | | | | |
|--------------------------|---------------------|---------|-------------|---------|---------------|---------|
| | All Subjects(n=689) | | Male(n=370) | | Female(n=319) | |
| DH | r-score | p-value | r-score | p-value | r-score | p-value |
| 年齢 (y) | 0.041 | 0.277 | 0.075 | 0.152 | 0.156* | 0.005 |
| 体重 (kg) | 0.413* | <0.001 | 0.195* | <0.001 | 0.192* | <0.001 |
| BMI (kg/m ²) | 0.259* | <0.001 | 0.144* | <0.001 | 0.192* | <0.001 |
| AHR | r-score | p-value | r-score | p-value | r-score | p-value |
| 年齢 (y) | 0.191* | <0.001 | 0.156* | 0.003 | -0.231* | <0.001 |
| 身長 (cm) | -0.131* | 0.001 | -0.253* | <0.001 | -0.170* | 0.002 |

3.2.5 全対象者の足部アライメント 3 群と有意差が生じた項目との相関

多重比較にて有意差が生じた項目と DH および AHR の 3 群との相関関係を表 7 に示す。体重と DH では、H 群との相関は $r=0.503$ 、S 群との相関は $r=0.535$ 、L 群との相関は $r=0.517$ (図 11)。BMI と DH では、H 群との相関は $r=0.230$ 、S 群との相関は $r=0.289$ 、L 群との相関は $r=0.413$ となり L 群のみ中等度の相関を示した(図 12)。年齢と AHR の相関は H 群のみ $r=0.200$ となり弱い相関を示した(図 13)。DH と年齢、AHR と身長については相関関係を示さなかった。

表 7：DH および AHR の 3 群と差が生じた項目との相関

| Pearson の相関係数 | | | | | | |
|--------------------------|---------|---------|----------|---------|---------|---------|
| | High | | Standard | | Low | |
| DH | r-score | p-value | r-score | p-value | r-score | p-value |
| 年齢 (y) | -0.058 | 0.564 | 0.001 | 0.982 | 0.152 | 0.110 |
| 体重 (kg) | 0.503* | <0.001 | 0.535* | <0.001 | 0.517* | <0.001 |
| BMI (kg/m ²) | 0.230* | 0.015 | 0.289* | <0.001 | 0.413* | <0.001 |
| AHR | r-score | p-value | r-score | p-value | r-score | p-value |
| 年齢 (y) | 0.200* | 0.032 | 0.062 | 0.166 | -0.14 | 0.159 |
| 身長 (cm) | -0.169 | 0.069 | -0.105 | 0.020 | 0.097 | 0.331 |

*: 有意差あり

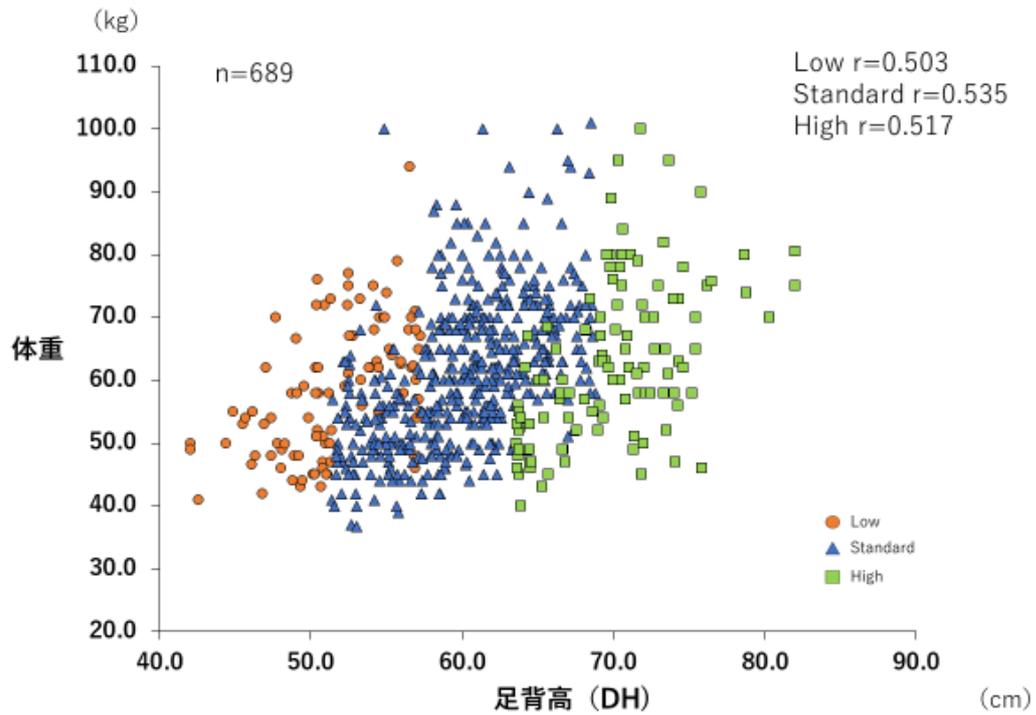


図 11：足部アライメント 3 群の足背高と体重の相関

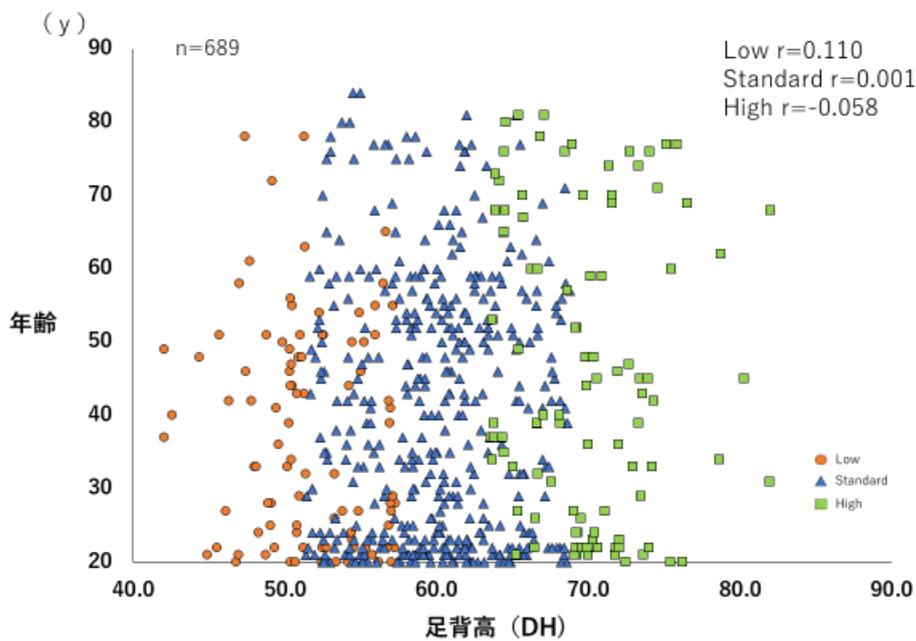


図 12：足部アライメント 3 群の足背高と年齢の相関

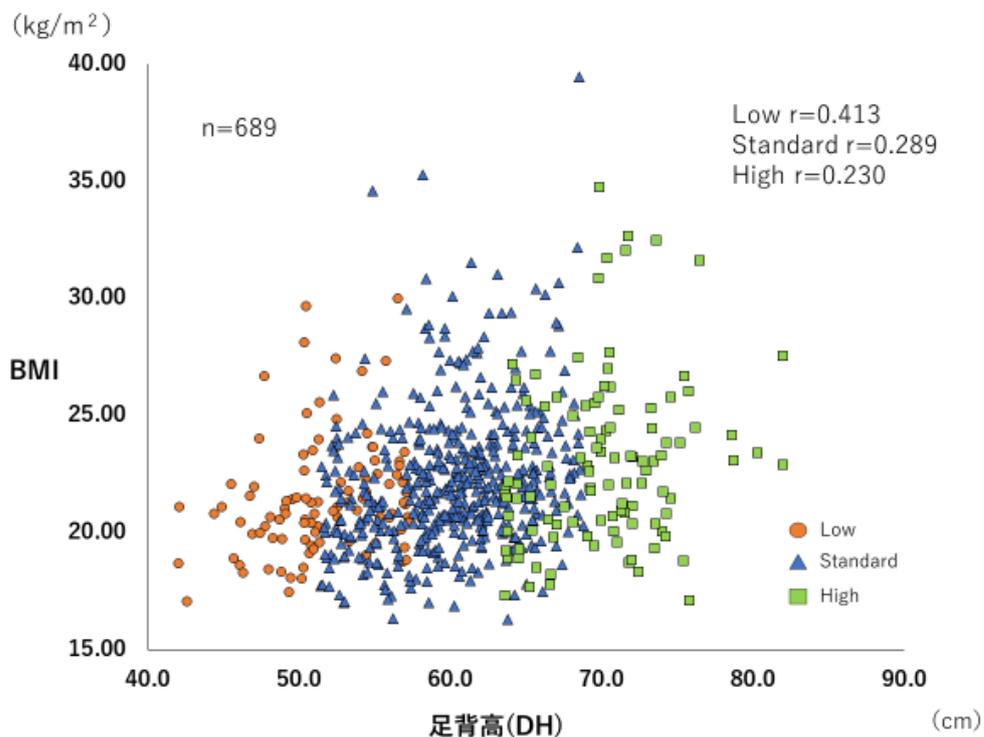


図 13：足部アライメント 3 群の足背高と BMI の相関

3.3 足背高測定の考察

本章では対象が 689 名、平均年齢 38.6 ± 17.9 歳（18～83 歳）と幅広い年齢を対象とした足部アライメントの横断調査を実施した。日本人の DH と AHR の結果を海外のデータと比べると、McPoil ら [19] の欧米人の健常者 850 名、年齢 26.7 ± 6.4 歳のデータでは、DH は男性 68.5 ± 5.4 mm、女性 60.5 ± 4.5 mm、全対象者の AHR は $25.3 \pm 0.2\%$ であったのに対して、本研究結果は DH が男性 60.5 ± 6.6 mm、女性 57.5 ± 6.1 mm、全対象者の AHR が $25.3 \pm 2.7\%$ となり欧米人と日本人の差は DH では大きく、AHR では差が小さいことが分かった。

DH と AHR は、 $r=0.815$ と強い相関を示した。このことから足アーチ高の評価は、いずれか 1 つの方法のみ行えばよいと考えられるが、DH は足背までの高さだけを測定した方法であるため性差が生じた。よって、Low および High となる基準値が男女でそれぞれ異なる

ることが分かった。

次に DH と AHR の結果から Standard, High, Low の 3 群にて基本属性、足の形状およびアンケート結果を比較し、足部のアライメント変化に関わる要因について考察する。DH による多重比較の結果、H 群は L 群に比べ、年齢、体重、BMI が高いことが示された。Standard, High, Low の 3 群と体重との相関関係は、全対象者と中等度の相関を示し、体重の増加はアライメントに関係なく足背高が高まることが分かった。過剰な体重は、後足部の安定性を失わせ扁平足の要因となることが報告されているが[21]、本研究では H 群の方が L 群に比べ平均体重が大きかったことから、体重の増加は足背高を高める影響が強くなると考えられた。

また、DH と BMI の間に弱い相関を示し、年齢はほとんど相関を示さなかったが、Faria ら[10]は中年女性 81 名を対象とした報告にて、BMI とアーチ構造の関連性について調査した結果、BMI の増加と扁平足との間に中等度の相関を示し、年齢の増加と扁平足との間に弱い相関を示したことを報告している。さらに扁平足を起こす危険因子について BMI のオッズ比 1.39、年齢のオッズ比 1.07 との報告がされている[22]。このように BMI と年齢は、扁平足に関与しているとされているが、本研究の結果はこれらと一致しない。

一方、Lopez ら[23]の報告では、有意差を示していないものの高アーチ群では年齢と BMI が高い傾向にあることを示されている。このように体重および BMI の増加は、足部内側縦アーチの構造的変化に影響し、足部アーチ高の増減に関与すると考えられるが、本研究の結果から、必ずしも足部が扁平化につながるとは限らないことが示唆された。また、AHR における L 群が他群と比べ身長と足長が有意に高くなったことについて、身長と足長は正の相関をしているとされ[24]、足長にて正規化している AHR はその影響が大きいことが考えられた。

アンケート結果について、足部に関する既往歴の有無およびスポーツ活動の有無について有意差は認められなかった。有意差がなかった足の既往歴に関して、扁平足障害の一つで

ある足底筋膜炎のリスク因子に関するレビューでは、既往歴等が影響している報告がないとしている[25]。また、スポーツ選手の扁平足に下肢障害がリスク因子として影響がないことが報告されている[26]。

3.4 アーチ高比の限界

本章での AHR の測定では、3 群比較の結果、足長において各群に有意差が生じ H 群が最も小さく、L 群が最も大きい値を示した。足部アーチの評価方法として AHR は足長による影響が大きいことが考えられ、方法の妥当性についてさらなる検討が必要である。

第4章 SVM-RFEを用いた足部アーチ高比の低下を有する人の関連要因分析

4.1 SVMによる医療分野における要因分析

4.1.1 サポートベクターマシン

本研究で取り扱うサポートベクターマシン (SVM: Support Vector Machine) は、機械学習に基づく分類手法の一つであり、パターン認識や回帰分析に適用可能である。SVMは1960年代に Vapnik ら[27]が考案した Optimal Separating Hyperplane を源流とし、1990年代になってカーネル学習法と組み合わせた非線形の識別手法へと拡張された。カーネルトリックにより非線形の識別関数が構成できるように拡張した SVM は、現在、最もパターン認識性能の優秀な学習モデルとして知られている。

SVMは2クラス分類問題の代表的な手法であり、未知データに対して高い予測精度を持つ分類器(関数)が構築できることが様々な分野にて報告されている(表8)。また、2クラス分類問題だけでなく回帰問題や教師なし学習などへも拡張されている。この2クラス分類問題(binary classification problem)とは与えられた入力データが2つのカテゴリーのどちらに属するかを識別する問題である。このカテゴリーのことをクラス(class)と呼ぶ。クラスを推定する処理を行う部分は分類器(classifier)と呼ばれ、その後、使用者に提示するための後処理が施行される。前処理や後処理は個々のシステムの用途によって異なり、画像を扱うシステムと遺伝子解析とではデータの前処理はまったく異なる。

表 8：クラス分類問題の応用例

| 分野 | タスク例(入力/リスク例) |
|--------|-------------------------------|
| 自然言語処理 | スパムメールフィルタ(メールテキスト/スパムと通常メール) |
| 医学 | がん転移予測(遺伝子発現量や臨床情報/将来的な転移の有無) |
| 金融 | 信用リスク予測(顧客情報/債務不履行可能性の高低) |

文献(28)より改変引用

4.1.2 現在報告されている SVM の医療分野での活用例

サポートベクター回帰による都道府県別肺がん死亡率の関連要因を調査した研究では [29], 日本人の男女別肺がん死亡率のデータを目的変数, 各都道府県の各種生活環境指標を説明変数として非線形回帰分析手法により関連要因を探索した. 方法は, 47 都道府県の男女別肺がん死亡率について, 健康, 食物, 環境分野の 36 種の説明変数との関係を SVM による解析した. 結果, 男女別肺がん死亡率の高い都道府県について, これまでの「喫煙」, 「脂質」, 「肺がん検診」の他, 新たな要因として男性では「魚介類」, 「味噌」, 「肉類」の接種などの 6 種, 女性では「緑茶」, 「野菜」の接種などの 6 種の関連要因が明らかになり SVM による関連要因分析が有効であることがわかった.

SVM に基づく医療データからの事例発見をテーマとした報告では [30], 提案手法の有効性を評価するために髄膜炎データベースを使用している. SVM は各クラスの典型事例, 境界事例および誤分類事例を発見し, これらを重要ではない属性を省いて出力する. この研究での提案手法は, 線形判別手法と素朴手法に比較して, 重要属性の選択に優れていた. また線形判別手法に比較して, 2 クラスの線形分離が比較的容易である場合には, 境界事例と誤分類事例の発見に関しては領域専門家に類似することが分かった.

データマイニングによる緑内障診断システムの設計をテーマとした報告 [31] では, 眼底写真を画像解析し得られた画像データを SVM により学習することで, 緑内障の診断ルールの作成を行った. この診断ルールは一般的な眼科医以上の診断精度が得られたほか, レーザス

キャナ等の危機を用いた診断精度と同程度以上の結果となった。本診断ルールを用いることで、多数への緑内障診断システムが実現できることを予感させるものであった。

サポートベクターマシンを用いた肺腫瘍の鑑別をテーマとした報告では[32], 特徴量を腫瘍内部の濃淡ヒストグラムの度数分布とし, 5クラスの肺腫瘍を分類し良悪性鑑別を行った。SVMを用いた5クラスの分類は難しいことから, 決定木を用い識別問題を分けて考え, 最適な構造モデルの検討を行った。結果, 充実性で分類した後に各クラスへの識別を行う手法が有効であった。

4.1.3 医療分野における SVM の活用可能性

医療分野における SVM の活用方法について, これまで紹介した報告を参考にすると, 肺がんの要因を探る研究では, 肺がんの関連要因を多数の項目から検討し抽出している。SVM に基づく医療データから事例発見する研究とデータマイニングによる緑内障診断システム病名の診断のシステム設計の研究では, 診断に導くためのルール作りに SVM を活用している。また肺腫瘍の画像の特徴量からクラス分類を行う手法を用い, SVM により鑑別を行った。これらの報告から医療分野における SVM が診断や関連要因の分類器としての精度が高いことが示され, 現在の医療分野の研究では, 人工知能による特徴抽出や識別処理において人の手を介す必要がある SVM など機械学習による研究が必要であることを示している。藤田によると[33], 医用画像は一般画像のように正解ラベル付きの大量のデータを収集することは容易ではなく, 一般画像等でディープラーニングを学習したものを転用する転移学習という手法を利用したものも多いと述べている。今後, AI によるコンピュータ支援診断システムの開発が早急に進むと考えられるが, 膨大なデータ収集が難しい医療分野においては SVM を用いた研究報告の蓄積が重要と考えられる。

4.2 ローアーチの関連要因を SVM-RFE にて解析を行う方法

4.2.1 1178 名の対象者およびアンケート調査および足部形状の測定

SVM-RFE(Recursive Feature Eliminations)による解析対象となる足部データは、1178 名(男性 485 名, 女性 693 名)のデータを用いた。また、アンケート調査は自記式とし、調査項目は「年齢」, 「性別」, 「身長」, 「体重」, 「神経障害(感覚・運動麻痺)の有無」とした(図 10)。

足のアーチ形状を評価する方法として、Williams & McClay および McPoil の方法を参考に、足長中点の床から足背までの高さである足背高(Dorsum Height: DH)と、足長(Foot Length: FL)に対する DH の割合(%)を求めたアーチ高比(AHR: arch height ratio, $DH/FL \times 100$)を算出した。

4.2.2 足部アーチ計測による 2 群分類

足の形状測定による足部アーチ低下および非低下とする 2 群への分類方法は、Butler らの[34]報告を参考に、アーチ高比の値をもとに「平均値 - 1.5 × 標準偏差」以下を足部アーチ低下群(Low-Arch: 以下 L 群)とし、「平均値 + 1.5 × 標準偏差」以上を足部アーチ非低下群(Non Low-Arch: 以下 N 群)としてクラス分類を行った。

4.2.3 基本属性の統計学的検討

統計学的検定として、全対象者の基本属性の性差比較は対応のない t 検定を用いた。各説明変数とアーチ高比の関係性は、Pearson もしくは Spearman の相関係数を用いた。統計解析には IBM SPSS Statics ver25.0 を使用し有意水準は 5%とした。

4.2.4 SVM-RFE を用いた足部低アーチの要因分析

4.2.4.1 SVM

SVM は、Vapnik らによって提案された汎化能力の高い統計的パターン認識手法である [27]. 以下では、SVM による 2 値のクラス分類に対する最適分離平面の決定について簡単に説明する. なお、以下ではベクトルを太字のアルファベットで、スカラーを通常のアルファベットで表記する. 2 値のクラス正解ラベル ($y \in \{+1, -1\}$) を持つ n 次元のデータ $\mathbf{x}_i (i = 1, \dots, m)$ に対する正解ラベルの決定関数を(1)とする.

$$f(x) = \text{sgn}(\langle \mathbf{w}, \mathbf{x} \rangle + b) \quad (1)$$

ここで、 $\mathbf{w} \in R^n$, $b \in R$, \langle, \rangle は内積を表す. $\text{sgn}(u)$ は $u > 0$ で 1 を、 $u \leq 0$ で -1 を出力する符号関数である. 式(1)は n 次元空間 R^n を $\langle \mathbf{w}, \mathbf{x} \rangle + b = 0$ で定義される超平面で 2 つに分離し、一方に 1, 逆を -1 に対応させているといえる. 入力データが線形分離可能ならばすべてのデータが,

$$y_i \cdot (\langle \mathbf{w}, \mathbf{x}_i \rangle + b) \geq 1 \quad (i = 1, \dots, m) \quad (2)$$

を満足するような \mathbf{w}, b が存在する. これより、式(2)に属さない領域がマージンの領域となり分離平面からデータ \mathbf{x}_i までの距離(マージン) $d(\mathbf{w}, b; \mathbf{x}_i)$ は,

$$d(\mathbf{w}, b; \mathbf{x}_i) = \frac{|\mathbf{w} \cdot \mathbf{x}_i + b|}{\|\mathbf{w}\|} \quad (3)$$

から求められる. ここで、マージンとは分離平面に最も近い入力データの距離である. 式(2)によって分離される領域のマージンは $1/\|\mathbf{w}\|$ である. このマージンを最大にすることにより、与えられたデータに対し最適な分離平面を得ることができる.

目的関数:

$$L(\mathbf{w}) = \|\mathbf{w}\|^2 \rightarrow \text{最小} \quad (4)$$

制約条件:

$$y_i \cdot (\langle \mathbf{w}, \mathbf{x}_i \rangle + b) \geq 1 \quad (i = 1, \dots, m) \quad (5)$$

上述の最適化問題の解は以下で与えられる。

$$f(\mathbf{x}) = \text{sgn} \left(\sum_k y_k \cdot \alpha_k \cdot \langle \mathbf{x}, \mathbf{x}_k \rangle + b \right) \quad (6)$$

$\alpha_k > 0$ となる \mathbf{x}_k はサポートベクター (Support Vector) と呼ばれている。また

$$\mathbf{v} = \sum_k \alpha_k y_k \mathbf{x}_k \quad (7)$$

は重みベクトルという。

4.2.4.2 カーネル関数

前節では学習データを線形分離可能である場合について考えたが、実際には線形分離不可能な場合が多数存在する。学習データを非線形変換することにより高次元空間に写像し、その空間において識別をする手法が考えられる。しかし学習データを非線形変換し高次元に写像するには、莫大な計算量が必要となる。SVMの学習、判別において、入力データに対し必要な演算は内積計算のみである。そこで、高次元空間の内積計算をカーネル関数 ($K(\mathbf{x}, \mathbf{x}_i)$) の計算だけに抑えるカーネル手法を適用し、識別関数を

$$f(\mathbf{x}) = \text{sgn} \left(\sum_k y_k \cdot \alpha_k \cdot K(\mathbf{x}, \mathbf{x}_k) + b \right) \quad (8)$$

とする。広く一般に用いられるカーネル関数としては、Polynomial カーネル関数や Radial basis カーネル関数などがある。なお、本研究では SVM のカーネル関数として、Radial basis カーネル関数を使用した。

4.2.4.3 SVM-RFE

パターン認識・識別には一般に多くの特徴量が用いられるが、特徴量のうち、認識・識別

に有効な特徴量を選択することを特徴選択 (Feature Selection) という。RFE(Recursive Feature Eliminations)は代表的な特徴選択の手法であり[35], 本研究では, SVM の特徴選択に RFE を適用した SVM-RFE を足部アーチ低下の要因分析に用いた。

SVM では入力 \mathbf{x} に対する識別関数は式 (6) で与えられ, 重みベクトル \mathbf{v} は式 (7) で与えられる。重みベクトル \mathbf{v} は最適分離超平面に垂直なベクトルであり, 各次元は学習データから抽出された特徴に対応しており, その要素 v_k の二乗 $(v_k)^2$ が大きいほど, 識別に与える影響が大きい。逆にいうと, $(v_k)^2$ の値が小さければ, $(v_k)^2$ を削除しても最適分離平面は大きく変化しないと考えられる。RFE では,すべての特徴量の集合から始め,重みベクトル \mathbf{v} から $(v_k)^2$ が最小となる特徴量を次々と削除していくことにより特徴選択を行う。本研究での SVM-RFE の実装には, 機械学習ライブラリ dlib を用いた[36]。

4.3 対象者の基本属性と SVM-RFE による解析の結果

4.3.1 対象者の基本属性と足部測定項目値の男女間の比較

対象者 1178 名に対し, 男女間で基本属性と足部測定項目値を比較し, 表 9 に記載した。この結果, 男性は, 身長, 体重, Body Mass Index (BMI), 足長, DH が女性より有意に高値となった。女性は, 年齢が男性より有意に高値であった。足部アーチ高比は男女間で有意差が認められなかった。

表 9：対象者の基本属性および足部測定値

| Characteristics | Male (n=485) | Female (n=693) | p-value |
|--------------------------|--------------|----------------|---------|
| Measurements | Mean±SD | Mean±SD | |
| Age (y) | 43.3±21.7 | 55.2±22.7 | 0.000* |
| Height (cm) | 169.5±9.1 | 153.8±9.4 | 0.000* |
| Weight (kg) | 65.7±10.7 | 51.4±9.1 | 0.000* |
| BMI (kg/m ²) | 22.8±3.1 | 21.6±3.0 | 0.000* |
| Foot Measurements | Mean±SD | Mean±SD | |
| FL(mm) | 247.0±14.6 | 223.3±12.8 | 0.000* |
| DH (mm) | 62.9±5.9 | 56.3±5.8 | 0.000* |
| AHR (%) | 25.5±2.6 | 25.2±2.7 | 0.097 |

BMI=body mass index FL=foot length DH=dorsum height

AHR=arch height ratio

*: statistically significant, p<.05

4.3.2 足部低アーチの基準値と割合

L 群と N 群を分類する基準値であるアーチ高比の「平均値 - 1.5 × 標準偏差」以下の割合は、21.29%であった。この基準値にて群分けした結果を表 10 に示す。全対象の 17.6%にあたる 207 名（男性 74 名，女性 133 名）が L 群となった。

表 2：L 群および N 群の性別割合

| Rt-Foot | Male (n=485) | Female (n=693) |
|----------------|--------------|----------------|
| L-group, n (%) | 74 (15.3) | 133 (19.2) |
| N-group, n (%) | 411 (84.7) | 560 (80.8) |

4.3.3 年代別割合

対象者の年代別の割合を表 11 に示す。70～79 歳が 254 名 (21.6%) と最も多く、次いで 20～29 歳が 243 名 (20.6%)、60～69 歳 (12.7%) の順となった。最も少ないのは 90 歳以上で 12 名 (1.0%) となった。

L 群における年齢別の割合は、20～29 歳の 55 名 (26.8%)、次いで 70～79 歳の 32 名 (15.6%)、40～49 歳の 28 名 (13.7%) の順が多かった。最も少ないのは 0～9 歳で 0 名 (0%) であった。

N 群における年齢別の割合は 70～79 歳の 222 名 (20.9%)、次いで 20～29 歳の 188 名 (19.4%)、60～69 歳の 129 名 (13.3%) の順が多かった。最も少ないのは 90 歳以上の 9 名 (0.9%) であった。なお、アンケートでの年齢項目が未記入であった 2 名は、表から除外した。

表 3：L 群および N 群の年代別割合

| Age group | All Subjects n (%) | L-group n (%) | N-group n (%) |
|-----------|--------------------|------------------|------------------|
| 0～9 | 20(1.7) | 0(0.0) | 20(2.1) |
| 10～19 | 70(5.9) | 7(3.4) | 63(6.5) |
| 20～29 | 243(20.6) | 55(26.8) | 188(19.4) |
| 30～39 | 98(8.3) | 24(11.7) | 74(7.6) |
| 40～49 | 116(9.8) | 28(13.7) | 88(9.1) |
| 50～59 | 126(10.7) | 27(13.2) | 99(10.2) |
| 60～69 | 150(12.7) | 21(10.2) | 129(13.3) |
| 70～79 | 254(21.6) | 32(15.6) | 222(20.9) |
| 80～89 | 85(7.2) | 8(3.9) | 77(7.9) |
| 90～97 | 12(1.0) | 3(1.5) | 9(0.9) |

4.3.4 SVM-RFE による識別評価

SVM-RFE の実装には、機械学習ライブラリ `dlib` の `rank_features` 関数を用いた。SVM-RFE への入力は、「年齢」、「身長」、「体重」、「BMI」、「足長」の 5 項目であり、これらはすべて数値データであるが、項目間で平均やスケールが異なっているため、最初にデータの標準化を行い、各項目の平均を 0 に、分散を 1 に変換した。次に、`dlib` の `rank_features` 関数において、Radial basis カーネル関数を用いることにより、5 項目の特徴量間の順位付けを行った。結果を表 12 に示す。表 12 では、足部低アーチへの影響の大きい順に各特徴量を並べている。また、3 カラム目の数値は、順位 1 位からその時点までの特徴量をすべて用いたときの貢献度（L 群と N 群の 2 つのクラスに分類する際の特徴量の貢献度）を示している。表 12 から、足部低アーチへの影響がもっとも大きいと考えられるのは「年齢」であり、クラス分類への貢献度は 0.650 である。次に、影響度の大きい特徴量は、順に「足長」、「体重」であり、「年齢」、「足長」、「体重」の 3 つの特徴量をすべて用いるとクラス分類への貢献度 1.0 となり、これら 3 つの特徴量が低アーチの関連要因と推察される。残りの「BMI」や「身長」を付け加えても、クラス分類への貢献度は低下してきているため、「BMI」や「身長」は低アーチへの関連が低いと考えられる。

SVM-RFE による関連要因判定の妥当性を検証するために、関連要因と判定された「年齢」、「足長」、「体重」の 3 項目の特徴量から SVM によりアーチを評価する実験を行った。本研究で用いた SVM ではカーネル関数として Radial basis 関数を用いており、SVM による評価においては、誤分類の許容度を定めるコストパラメータ C と Radial basis 関数のパラメータ γ の 2 つの値を決定しておく必要がある。評価実験では、 $C=0.2$ とし、 γ を 0.1 から 1.0 まで変化させたときの感度と特異度を 5 分割交差検定により求めた。結果を表 13 に示すが、残念ながら感度、特異度ともに高い値を得ることはできなかった。

本研究では、「年齢」、「身長」、「体重」、「BMI」、「足長」の 5 項目を足部アーチ高の説明変数としたが、上記の評価実験により、アーチ高にはこれら以外の要因が関連していること

が示唆された。ただし、5項目のうちでは、「年齢」、「足長」、「体重」の3つがアーチ高に密接に関連する要因であることを SVM-RFE により示すことができた。

表 12：足部低アーチに影響度の大きい特徴量

| Order | Characteristics | Class separation contribution |
|-------|-----------------|-------------------------------|
| 1 | Age | 0.650 |
| 2 | Foot Length | 0.657 |
| 3 | Weight | 1.000 |
| 4 | BMI | 0.948 |
| 5 | Height | 0.963 |

表 13：SVM-RFE による関連要因の妥当性分析

| γ | Sensitivity | Specificity |
|----------|-------------|-------------|
| 0.1 | 0.390 | 0.599 |
| 0.2 | 0.575 | 0.412 |
| 0.3 | 0.485 | 0.628 |
| 0.4 | 0.415 | 0.595 |
| 0.5 | 0.460 | 0.649 |
| 0.6 | 0.455 | 0.666 |
| 0.7 | 0.400 | 0.655 |
| 0.8 | 0.395 | 0.708 |
| 0.9 | 0.420 | 0.683 |
| 1.0 | 0.415 | 0.707 |

4.3.5 年代別による説明変数と足部低アーチとの相関

年代別の AHR および DH と説明変数との相関について表 14 に示す。AHR では年齢は 90 歳以上のみ $r = -0.612$ と強い負の相関を認めた。身長は 9 歳以下のみ $r = -0.632$ と強い負の相関を認めた。体重は 40~49 歳にて $r = 0.231$ 、90 歳以上にて $r = 0.595$ の相関を認めた。BMI は 40~49 歳のみ $r = 0.211$ と弱い相関を認めた。右足長は 9 歳以下にて $r = -0.526$ 、50~59 歳にて $r = -0.353$ 、80~89 歳にて $r = -0.296$ と負の相関を認めた。DH では、年齢は 10~19 歳が $r = 0.298$ と相関を認めたが、それ以外の年代では相関が認められなかった。身長、体重、BMI、FL においてはほとんどの年代において中等度の正の相関を認めた。

表 14：年代別のアーチ高比および DH と基本属性・足長の相関

| AHR | | | | | | |
|--------------|---------|-------------|-------------|-------------------------|------------------|--|
| Age Group(y) | Age (y) | Height (cm) | Weight (kg) | BMI(kg/m ²) | Foot Length (mm) | |
| | r | R | r | r | r | |
| ～9 | -0.082 | -0.632 | -0.577 | -0.29 | -0.526 * | |
| 10～19 | -0.01 | -0.158 | -0.101 | 0.108 | -0.232 | |
| 20～29 | -0.083 | -0.03 | 0.029 | 0.062 | -0.164* | |
| 30～39 | 0.155 | -0.031 | 0.023 | 0.061 | -0.242 | |
| 40～49 | -0.106 | 0.147 | 0.231 * | 0.211 * | -0.182 | |
| 50～59 | 0.084 | -0.236 | -0.11 | 0.054 | -0.353 * | |
| 60～69 | 0.064 | 0.142 | 0.209 | 0.082 | -0.102 | |
| 70～79 | 0.001 | 0.062 | 0.112 | 0.094 | -0.141 * | |
| 80～89 | 0.171 | 0.007 | 0.005 | 0.097 | -0.296 * | |
| 90～ | -0.612 | 0.154 | 0.595* | 0.028 | 0.195 | |

| DH | | | | | | |
|--------------|---------|------------|------------|-------------------------|------------------|--|
| Age Group(y) | Age (y) | Hight (cm) | Weight(kg) | BMI(kg/m ²) | Foot Length (mm) | |
| | r | R | r | r | r | |
| ～9 | 0.290 | 0.835** | 0.624** | 0.149 | 0.833** | |
| 10～19 | 0.298* | 0.518** | 0.499** | 0.335** | 0.537** | |
| 20～29 | -0.068 | 0.515** | 0.464** | 0.202** | 0.467** | |
| 30～39 | 0.036 | 0.535** | 0.496** | 0.249** | 0.394** | |
| 40～49 | -0.149 | 0.536** | 0.543** | 0.407** | 0.368** | |
| 50～59 | 0.045 | 0.313** | 0.349** | 0.230** | 0.296** | |
| 60～69 | -0.045 | 0.497** | 0.484** | 0.205** | 0.366** | |
| 70～79 | 0.003 | 0.407** | 0.368** | 0.141 ** | 0.323** | |
| 80～89 | 0.130 | 0.350** | 0.316** | 0.127 | 0.231* | |
| 90～ | -0.523 | 0.378 | 0.197 | -0.175 | 0.025 | |

statistically significant, *: p<.05 ** :p<.001

4.3.6 アーチ高率および足背高と SVM-RFE の関連項目との相関

SVM-RFE により関連要因として判定された「年齢」、「足長」、「体重」の各項目と、各年代の中でも極端に人数が少ない 9 歳以下と 90 歳以上を除いた 1146 名のアーチ高比と DH との相関について表 15 に示す。年齢とアーチ高比は $r = 0.117$ (図 14)、DH は $r = -0.136$ (図 15)と弱い相関を示した。足長とアーチ高比は $r = -0.230$ (図 16)、DH は $r = 0.387$ (図 17)となり相関を認めた。体重と AHR は $r = 0.029$ (図 18)、DH は $r = 0.448$ (図 19)となり、DH と体重は正の相関を認めた。

表 15：アーチ高比および DH と SVM-RFE による関連項目との相関

| Foot Measurements | Age (y) | FL (mm) | Weight (kg) |
|-------------------|----------|----------|-------------|
| | r | r | r |
| AHR (%) | 0.117** | -0.230** | 0.029 |
| DH (cm) | -0.136** | 0.387** | 0.448** |

FL=foot length, AHR=arch height ratio, DH=dorsum height.

statistically significant, **:p<.001

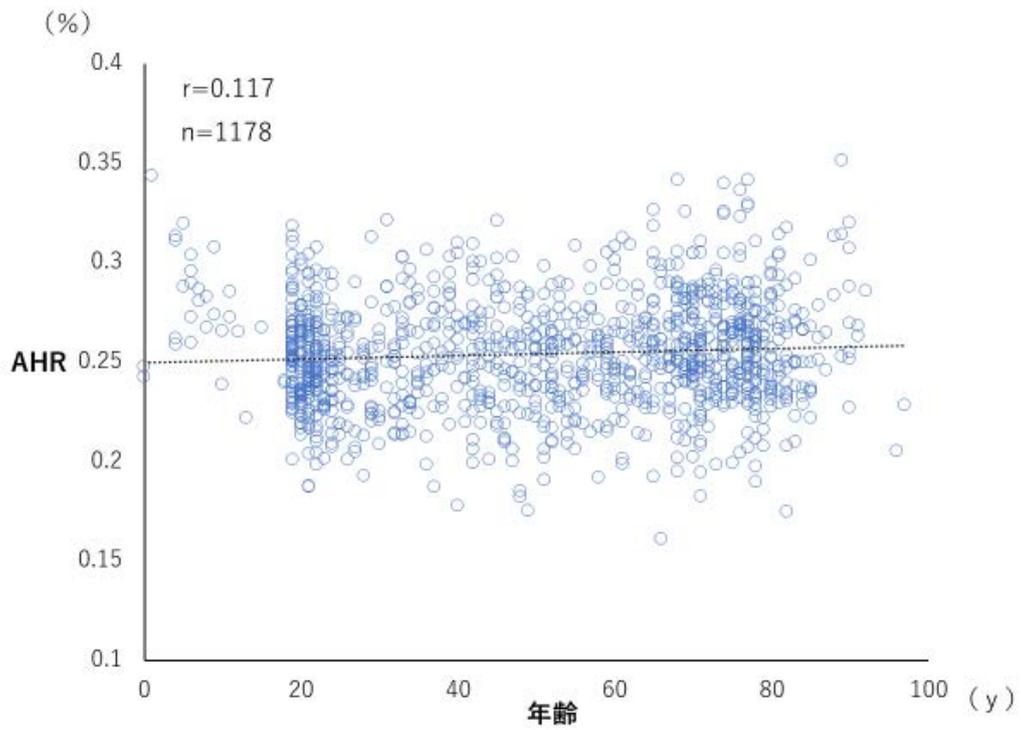


図 14：アーチ高比 (AHR) と年齢の相関

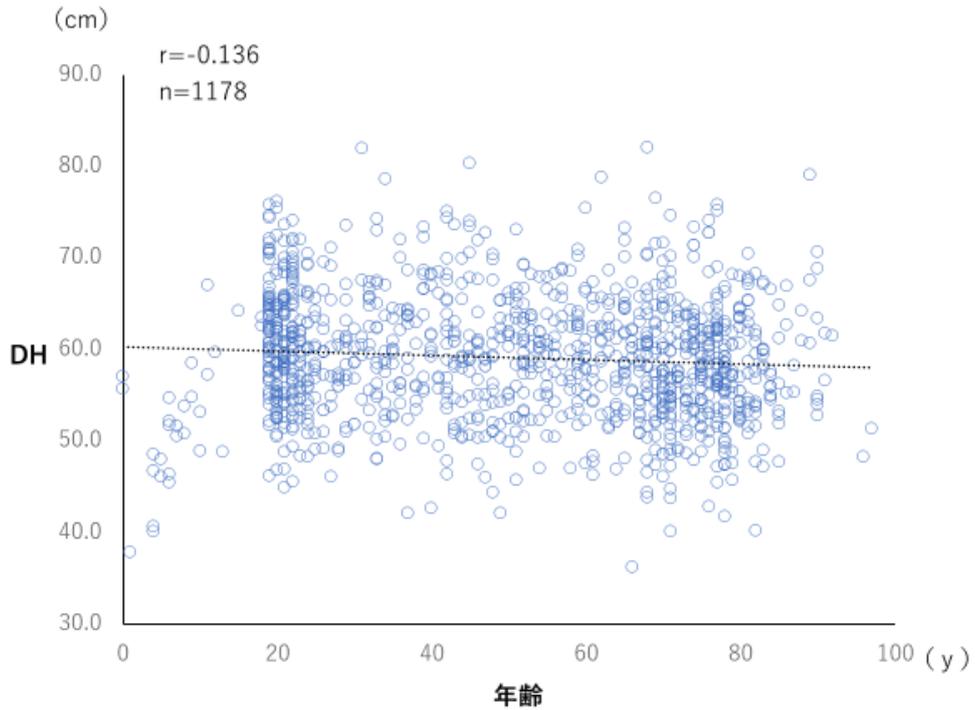


図 15：足背高 (DH) と年齢の相関

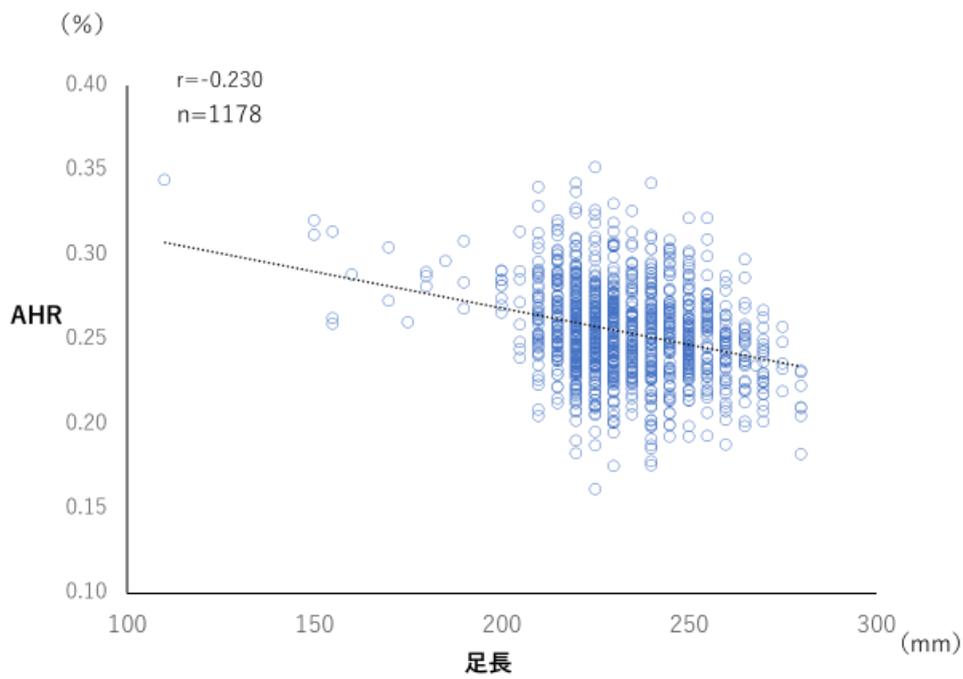


図 16：アーチ高比 (AHR) と足長の相関

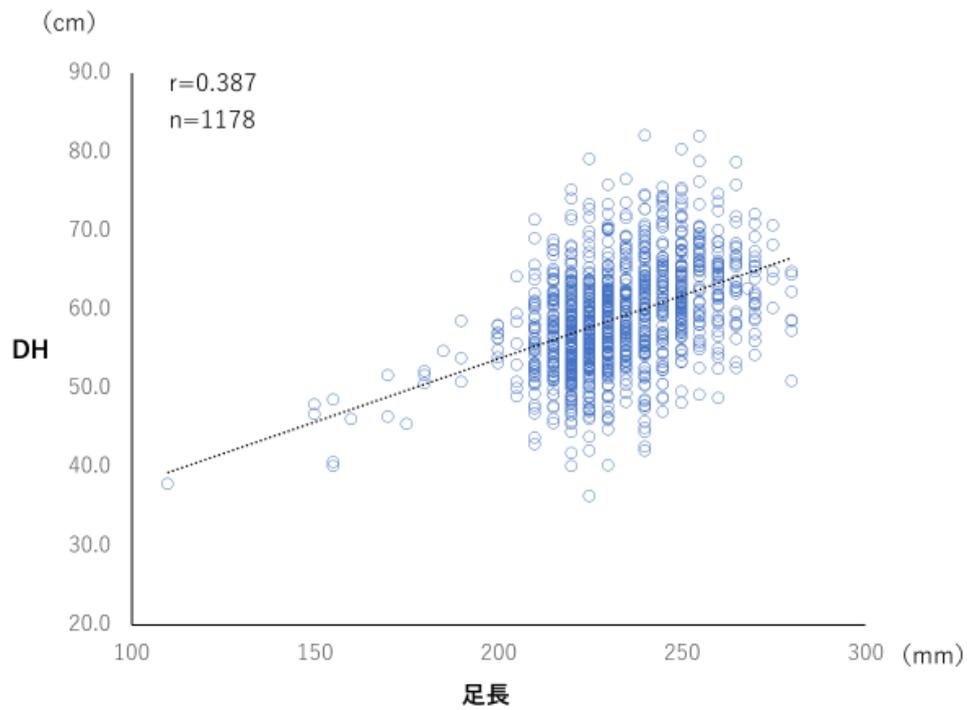


図 17：足背高 DH と足長の相関

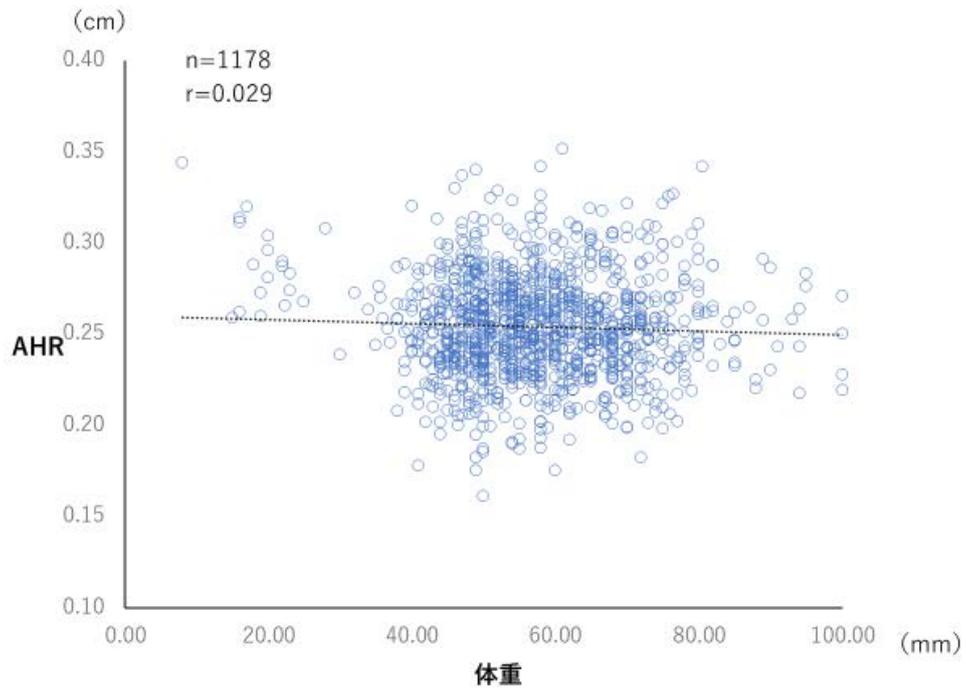


図 18：アーチ高比（AHR）と体重の相関

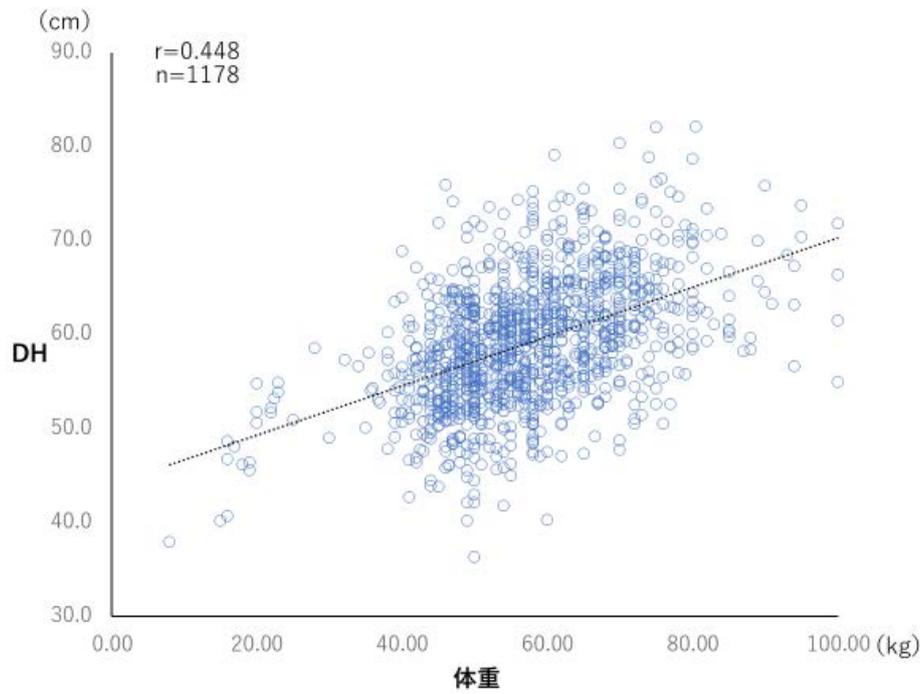


図 19：足背高（DH）と体重の相関

4.4 SVM-RFE による関連要因の抽出に関する考察

4.4.1 SVM-RFE による足部低アーチの関連要因の抽出

本研究は、0～97 歳の幅広い年齢の 1000 名以上を L 群と N 群の 2 群に分類し、SVM-RFE による特徴選択プロセスを用い、足部低アーチに関わる関連要因を分析した。この結果、「年齢」、「足長」、「体重」の順に足部低アーチの関連要因と判定された。

相関係数により、変数間の線形的な関係の強弱を測ることはできるが、残念ながら非線形な関係までは捉えることができない。相関係数が 0 に近く相関がないとされる場合でも、変数間になんらかの関係が存在する場合がある。本研究で足部低アーチの関連要因分析に用いた SVM-RFE では、変数間の非線形な関係まで捉えることができるという特徴を持っている。以下では SVM-RFE により関連要因と判定された各項目について、年代との相関を調べることにより分析を行う。

4.4.2 関連要因の考察

SVM-RFE による関連要因の順位として最も高くなった「年齢」の項目と足部低アーチに関して、年齢の高いことが足部低アーチ変形の有病率の増加に関連している報告や[22]、また 65 歳以上では足に関する問題が増加しやすいことが報告されている[37]。しかし、年齢の上昇が有病率に関連しないと報告する報告や[9]、年齢の上昇と足部アーチ高に関係性がないとする報告がある[38]。SVM-RFE では「年齢」が最も大きい関連要因となり、各年代との相関関係を検討したが多くの年代において有意差は示さなかった。9 歳以下と 90 歳以上を除く年代との相関では、弱いもののアーチ高比と年齢に正の相関を示し、DH では負の相関を示した。これは年齢とともに DH は低下しやすい傾向を意味するが、アーチ高比においては DH を足長にて正規化しており、特に 50 歳代と 80 歳代のアーチ高比と足長とは負の相関を示すことから、中年期以降、足長が短縮しやすい傾向にあり、年齢とアーチ高比が正

の相関を示したものと考えられる。

「足長」について、10～19 歳、60～69 歳、90 歳以上を除く年代において、アーチ高比と有意な負の相関を認めたことから、足長が長いほどアーチ高比が低下し、結果としてアーチ高比は足長に依存しやすいことが分かった。Williams & McClay らは、足長ではなく踵骨隆起から第 1 中足趾節関節までの距離を取る Truncated Foot Length (TFL) を採用したアーチ高比の方が信頼性と妥当性が高いことを報告している [18]。この TFL を用いた方法は、母趾の長さを省くことによって、個人差が大きい母趾長の影響を最小限にできるため、今後、本研究では用いていない TFL によるアーチ高比によって、説明変数との相関を再分析する必要があると考える。

「体重」について、AHR では 40～49 歳、60～69 歳でアーチ高比と有意な正の相関関係を認め、DH ではほぼすべての年代にて有意な正の相関関係を示した。相関関係だけをみると体重や肥満度が大きいほど DH、AHR ともに高まりやすい事が考えられるが、Riche らは過体重により後足部の安定性を失わせ扁平足変形の危険因子となるとしている [21]。しかし、体重の増減が扁平足に影響がないことも報告されている [9]。本研究では肥満度を表す「BMI」と、BMI に係る「身長」が関連因子に含まれていない。足部の扁平化に BMI の増加が影響するとの報告や [39]、思春期の男女において扁平足の独立関連因子が BMI と報告している [40]。本研究では、SVM-RFE によって、身長、BMI ではなく体重が関連要因と判定されたことは、身長に関わらず、体重の影響が足部アーチに関わる要因であることが示唆された。

4.5 SVM-RFE による関連要因の限界

本研究の限界として、幼児期、小児期の扁平足の発症率 25～65% から考えると、9 歳以下の低下群が 0% になった [41, 42]。先行研究ではフットプリントや 3D 計測器が用いられており、本研究でのアーチ高比とは測定方法が異なるため結果に影響した可能性がある。ま

た，小児期以下では低アーチを示す例が極端に少なかったことから，関連要因に「年齢」が挙げられたとも考えられる．今後は小児期と成人期では骨格形成の違いもあり，分けて要因分析を行う必要がある．

また，本研究では低アーチの説明変数が5項目と少なく，妥当性を示す感度，特異度ともに高い値が得られなかったことから，これら5項目だけでは関連要因として検討するには不十分であることが分かった．今回，足部評価に用いられていなかった SVM-RFE によって識別評価を行い，関連要因を抽出し，それらの要因と低アーチの関連について述べたが，今後より具体的な根拠を示すため，さらに多くの対象者および説明変数による解析を行い関連要因について検討する必要がある．

第 5 章 足部測定値の年代別比較

5.1 足部測定値の年代別比較について

第 4 章にて、SVM-RFE による足部アーチの低下の関連要因として重要度が高かったのが年齢の項目であり、足長 (FL) と足部アーチ高比 (AHR) について年代別に比較する必要がある。また、関連要因として年齢の次に足長が挙げられたことから、足部アーチ高比は足長に対する足背高の割合であるため、足趾変形等により足長が短縮する場合などの影響を考慮した方法を用いる方がよい。Williams らは外反母趾や Crow Toe 変形など足趾変形が足長短縮に影響するため、足趾の長さを省いた TFL (Truncated Foot Length) によるアーチ高比を推奨している。本研究では足長によるアーチ高率 (FL-AHR) と TFL によるアーチ高率 (TFL-AHR) の両測定方法を用い、年代別による足部測定値の比較を行う。

5.2 年代別比較を行う対象

対象となる足部データは、860 名 (男性 356 名、女性 504 名) となった。すべての対象者と男女別による年齢、身長、体重、BMI の平均値について表 16 に記載する。すべての対象者の平均年齢は 56.8 ± 20.8 歳となり、男性 52.8 ± 19.7 歳、女性 56.9 ± 20.0 歳となった。すべての対象者の平均体重は 58.2 ± 11.2 kg、平均身長 160.6 ± 10.0 cm となった。なお、年代別、20~29 歳までの 20 代から、80~89 歳までの 80 代までの 7 群とした。

表 16：対象者の属性

| Characteristics | All Subjects(n=860) | | Male(n=356) | Female(n=504) |
|-------------------------|---------------------|-------------|-------------|---------------|
| | Mean±SD | Min—Max | Mean±SD | Mean±SD |
| Age(y) | 56.8±20.8 | 20-89 | 52.8±19.7 | 56.9±20.0 |
| Height(cm) | 160.6±10.0 | 135.9-190.0 | 168.9±8.0 | 154.7±6.4 |
| Weight(kg) | 58.2±11.2 | 34.5-100.0 | 66.5±10.0 | 52.4±7.9 |
| BMI(kg/m ²) | 22.4±3.1 | 14.9-39.5 | 23.2±3.1 | 21.8±3.0 |

5.3 FL-AHR および TFL-AHR による測定方法

足部形状評価は大学学生 2 名が直接測定した足長 (FL) および足背高 (DH) と足長に対する足背高の割合である足部アーチ高比 (FL-AHR), さらにデジタル画像にて理学療法士が計測した TFL と足長に対する DH の割合の TFL-AHR の 5 項目を年代間にて比較する。なお, 統計学的検討として, 最初に足部形状評価の項目について Shapiro-Wilk 検定を行った。男女間の足部形状評価項目の差については足長と TFL は t 検定を用い, DH, FL-AHR, TFL-AHR は Mann-Whitney 検定を用いた。多重比較は足長と TFL は一元配置分散分析後 Turkey の検定を行い, DH, FL-AHR, TFL-AHR は Kruskal-Wallis 検定を行い多重比較した。

5.4 男女間および年代別比較の結果

5.4.1 足の測定値, 男女間比較

足の測定値の男女間比較を表 17 に示す。FL, DH, TFL, FL-AHR において有意差 ($p < 0.001$) が認められ, 男性の平均値が高くなった。しかし TFL-AHR のみ男女間の有意差がなかつ

た。

表 17：足の測定値の男女間比較

| Foot Measurements | Male | Female | p-value |
|-------------------|------------|------------|---------|
| | Mean±SD | Mean±SD | |
| FL(mm) | 246.6±12.5 | 224.2±9.7 | <0.001 |
| DH(mm) | 63.1±5.6 | 55.9±5.4 | <0.001 |
| HBL(mm) | 189.8±13.7 | 170.0±11.7 | <0.001 |
| FL-AHR | 0.256±0.02 | 0.255±0.02 | <0.001 |
| TFL-AHR | 0.334±0.03 | 0.328±0.03 | 0.160 |

t検定：FL, TFL

Mann-Whitney検定：DH, FL-AHR, TFL-AHR

5.4.2 男女別，足部測定項目の年代間の多重比較

男女別 FL, TFL の年代間の多重比較の結果を表 18 に示す。男女ともに FL において有意差が認められたのは、20 歳代に比べ 70 歳代が低下、30 歳代に比べ 50 歳代、60 歳代、70 歳代が低下、40 歳代に比べ 70 歳代が低下した。女性のみ FL において有意差が認められたのは、20 歳代に比べ 80 歳代が低下、40 歳代に比べ 80 歳代が低下、50 歳代に比べ 70 歳代、80 歳代が低下した(図 20, 21)。

次に、男女ともに TFL において有意差が認められたのは、20 歳代に比べ 60 歳代、70 歳代、80 歳代が低下、30 歳代に比べ 60 歳代、70 歳代、80 歳代が低下、40 歳代に比べ 70 歳代、80 歳代が低下、50 歳代に比べ 70 歳代、80 歳代が低下した(図 22, 23)。女性のみ有意差が認められたのは、40 歳代に比べ 60 歳代、50 歳代に比べ 60 歳代が低下した。

男女別の DH, FL-AHR, TFL-AHR について年代間の多重比較の結果を表 19 に示す。男女ともに DH, FL-AHR は年代間において有意差が認められなかった(図 24, 25, 26, 27)。TFL-AHR において有意差が認められたのは、男性では 20 歳代に比べ 70 歳代が高く、50 歳代に比べ 60 歳代、70 歳代、80 歳代が高くなった。女性では 20 歳代に比べ 70 歳代、

40 歳代に比べ 60 歳代, 70 歳代, 80 歳代が高く, 50 歳代に比べ 60 歳代, 70 歳代, 80 歳代が高くなった (図 28, 29).

表 18 : 男女別 FL, TFL の年代別多重比較

| Age Groups | | Foot Measurements | | | Foot Measurements | | |
|--|---------|--------------------------|---------------------|---|-------------------|---|--|
| | | FL(mm) | | TFL(mm) | FL(mm) | | TFL(mm) |
| Age | | Male | Mean±SD | Mean±SD | Female | Mean±SD | Mean±SD |
| 20-29 | a group | n=70 | 251.4±12.7 | 194.4±11.2 | n=73 | 228.1±10.3 | 174.6±10.7 |
| 30-39 | b group | n=30 | 256.3±11.6 | 200.5±10.0 | n=51 | 228.7±9.4 | 177.7±8.6 |
| 40-49 | c group | n=46 | 249.2±9.9 | 193.1±8.6 | n=52 | 226.7±9.2 | 176.4±8.8 |
| 50-59 | d group | n=65 | 247.5±10.8 | 193.1±10.4 | n=52 | 227.3±9.5 | 177.5±8.8 |
| 60-69 | e group | n=52 | 244.4±11.6 | 187.2±15.5 | n=105 | 224.9±9.1 | 167.3±12.3 |
| 70-79 | f group | n=66 | 237.2 ±11.3 | 177.6±13.7 | n=107 | 221.2±9.5 | 166.6±11.1 |
| 80-89 | g group | n=27 | 242.5±9.1 | 183.6±13.1 | n=64 | 220.7±8.1 | 164.9±10.7 |
| ANOVA | | | F=14.764 P=0.000 | F=20.087 P=0.000 | | F=8.564 P=0.000 | F=19.338 P=0.000 |
| Post-hoc Turkey HSD | | *:a-f b-d b-e b-f c-f | | *:a-e a-f a-g b-e b-f b-g c- f c-g d-f d- g | | *: a-f a-g b-f b-g c-f c-g d-f d-g | * a-e a-f a-g b-e b-f b-g c-e c-f c-g d-e d-f d-g |
| FL: Foot Length TFL: Truncated Foot Length | | | | | | | *:p<0.05 |

表 19：男女別 DH, FL-AHR, TFL-AHR の年代別多重比較

| Age Groups | | Foot Measurements | | | | | | | |
|---|---------|-------------------|--------------|----------------|----------------------------|--------|--------------|----------------|--|
| | | Male | DH (cm) | FL-AHR | TFLAHR | Female | DH (cm) | FL-AHR | TFL-AHR |
| | | | Mean ±SD | Mean± SD | Mean± SD | | Mean± SD | Mean± SD | Mean± SD |
| 20-29 | a group | n=70 | 63.0± 4.8 | 0.251± 0.02 | 0.324± 0.02 | n=73 | 56.4± 5.3 | 0.247± 0.02 | 0.324± 0.03 |
| 30-39 | b group | n=30 | 65.4± 6.4 | 0.256± 0.02 | 0.327± 0.03 | n=51 | 57.1± 5.8 | 0.250± 0.02 | 0.322± 0.03 |
| 40-49 | c group | n=46 | 64.8± 5.6 | 0.260± 0.02 | 0.336± 0.03 | n=52 | 54.6± 5.8 | 0.241± 0.02 | 0.310± 0.03 |
| 50-59 | d group | n=65 | 61.8± 4.9 | 0.250± 0.02 | 0.321± 0.03 | n=52 | 55.6± 4.4 | 0.245± 0.02 | 0.314± 0.03 |
| 60-69 | e group | n=52 | 63.9± 6.0 | 0.262± 0.02 | 0.342± 0.04 | n=105 | 56.0± 5.4 | 0.250± 0.02 | 0.335± 0.03 |
| 70-79 | f group | n=66 | 62.1± 6.0 | 0.262± 0.02 | 0.351± 0.04 | n=107 | 55.2± 5.4 | 0.250± 0.02 | 0.336± 0.03 |
| 80-89 | g group | n=27 | 61.5± 5.6 | 0.254± 0.02 | 0.335± 0.03 | n=64 | 56.7± 5.0 | 0.257± 0.02 | 0.342± 0.03 |
| p-value | | | 0.018 | 0.018 | <0.001 | | 0.310 | 0.054 | <0.001 |
| Multiple Comparison | | | n.s. | n.s. | *: a-f d- e d-f d- g | | n.s. | n.s. | *:a-g c-e c-f c-g d-e d-f d-g |
| DH:Dorsum Height FL-AHR:Foot Length Arch Height ratio TFL: Truncated Foot length Arch Height Ratio Kruskal-Wallis | | | | | | | | | *:p<0.05 n.s.:not significant |

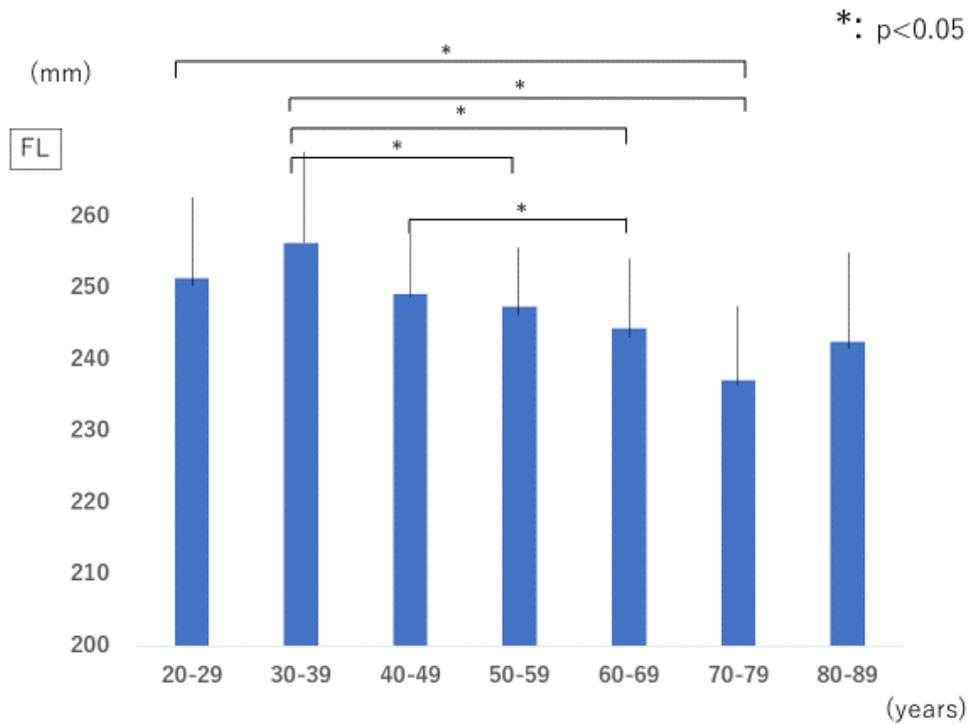


図 20：男性の足長の年代比較

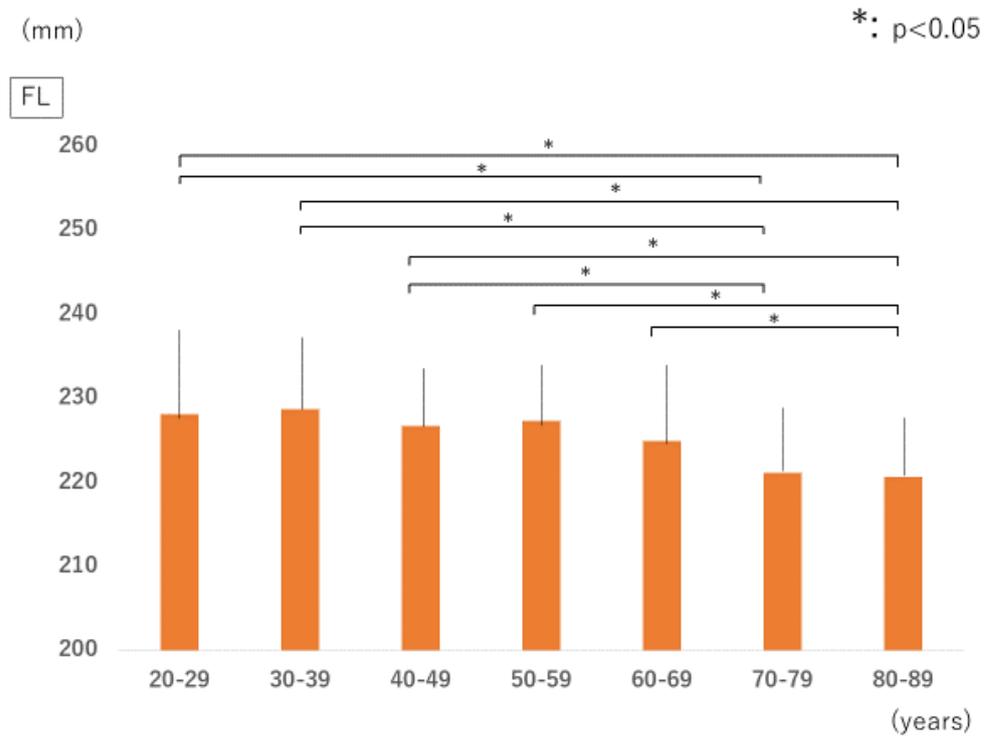


図 21：女性の足長の年代比較

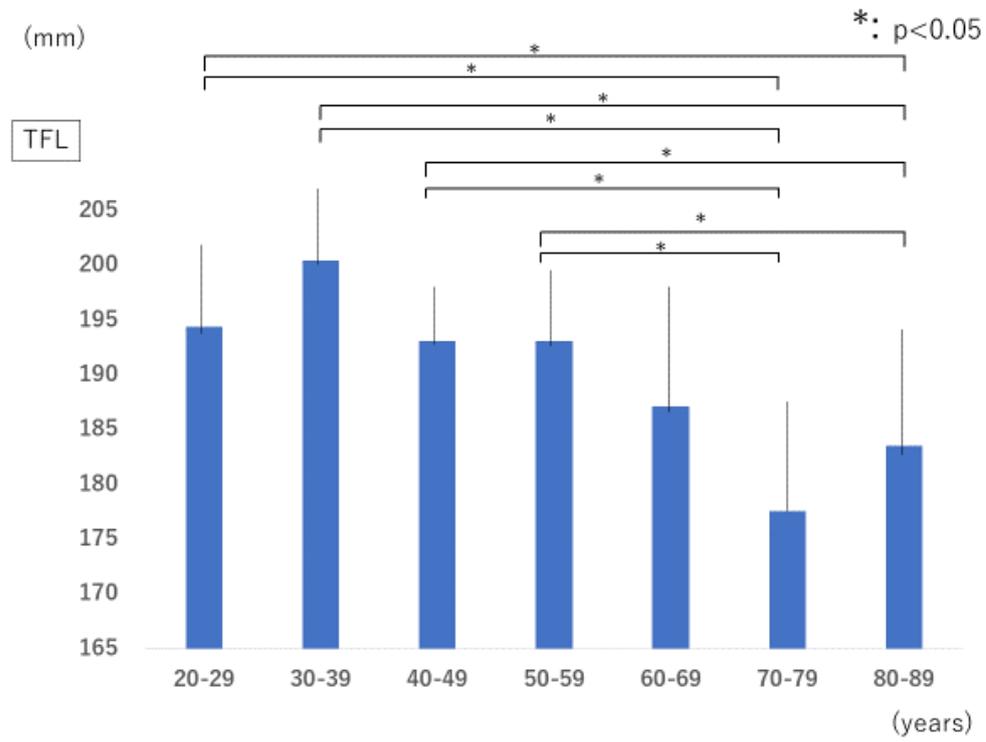


図 22：男性の TFL の年代別比較

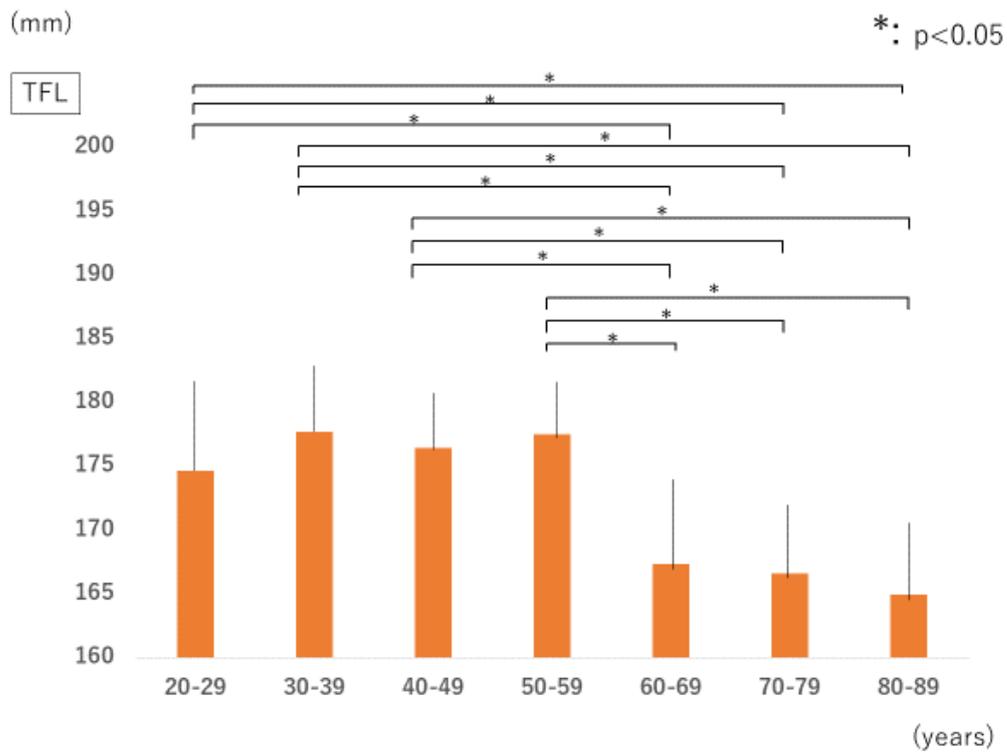


図 23：女性の TFL の年代別比較

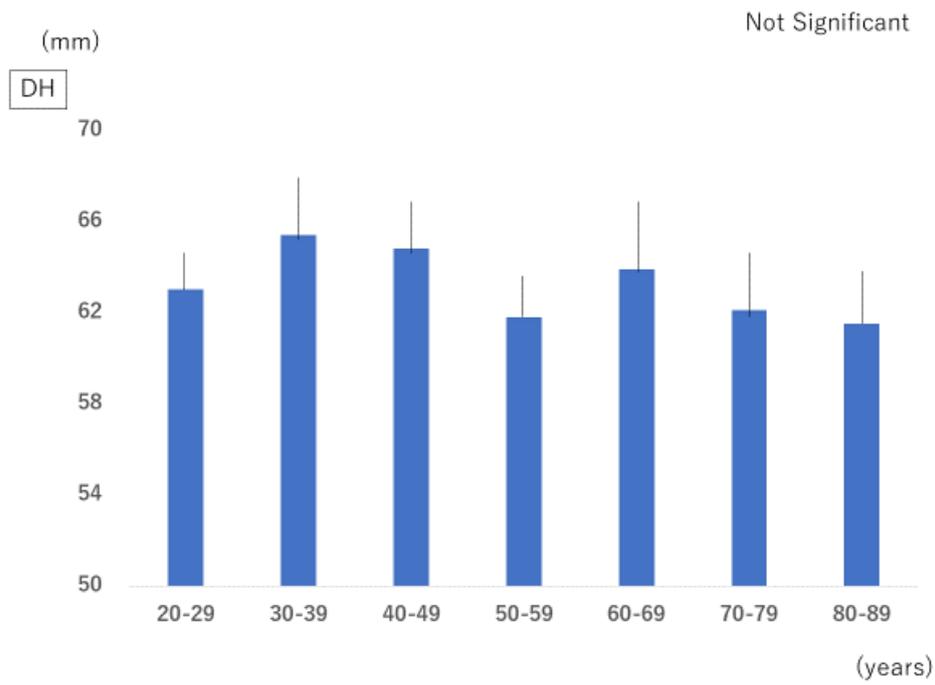


図 24：男性の DH の年代別比較

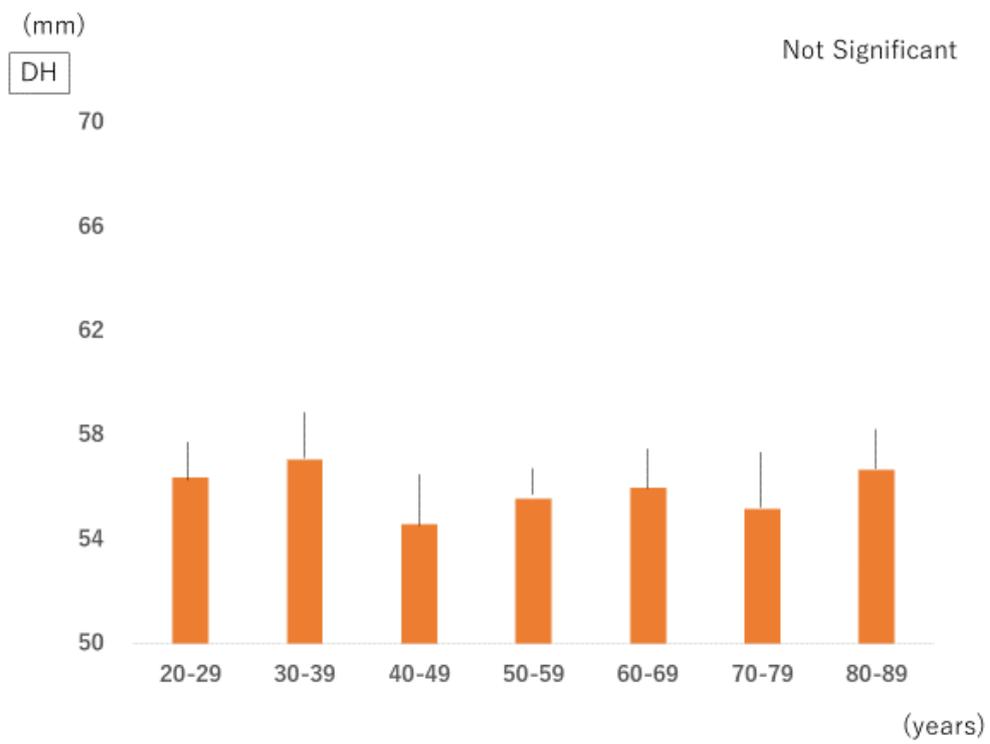


図 25：女性の DH の年代別比較

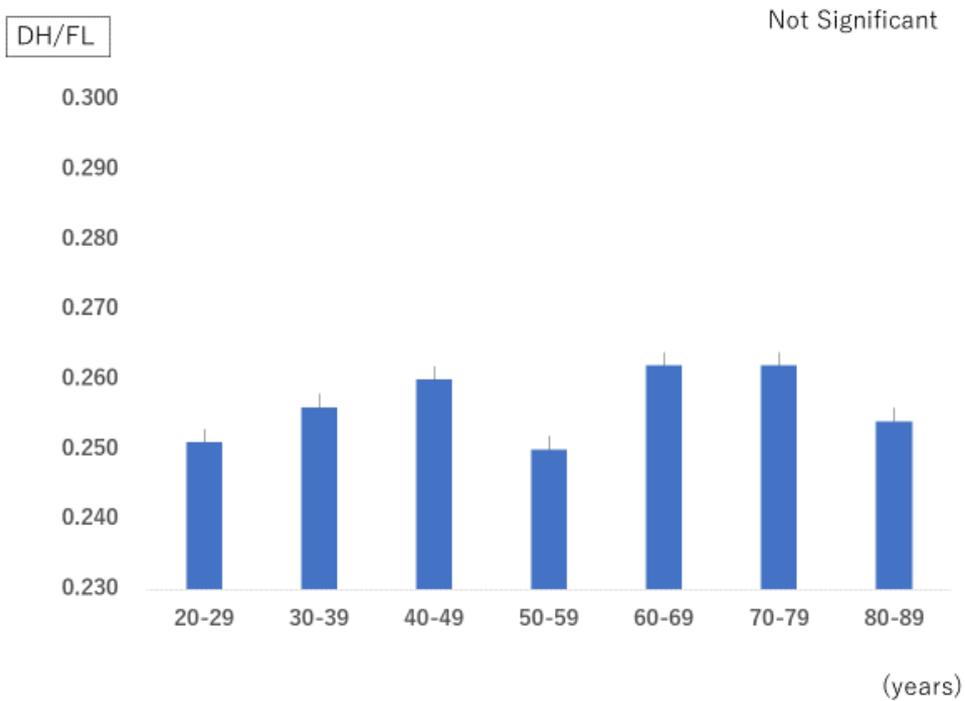


図 10：男性の FL-AHR の年代別比較

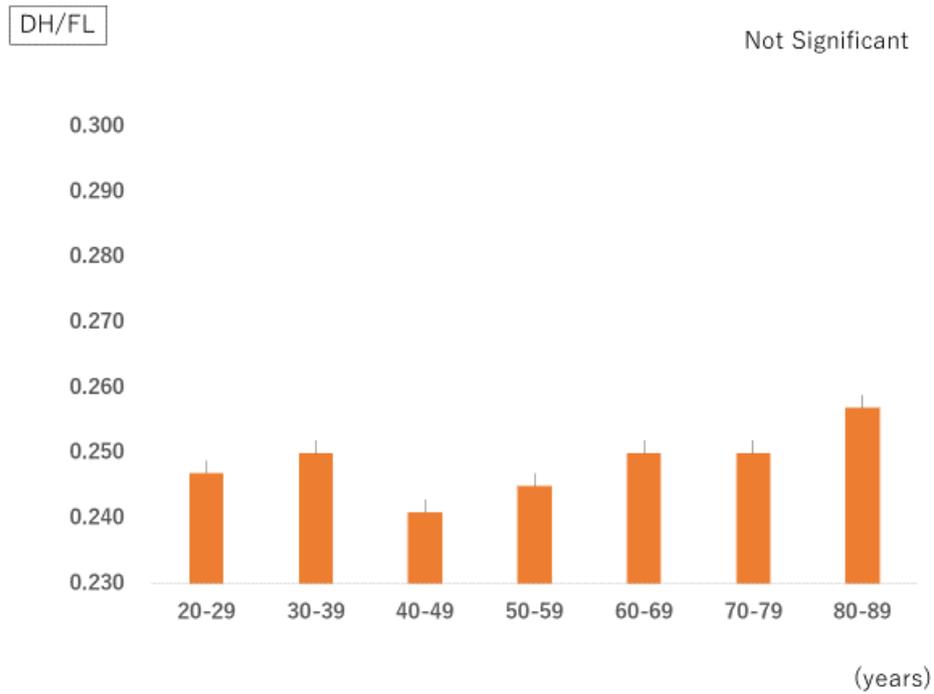


図 11：女性の FL-AHR の年代別比較

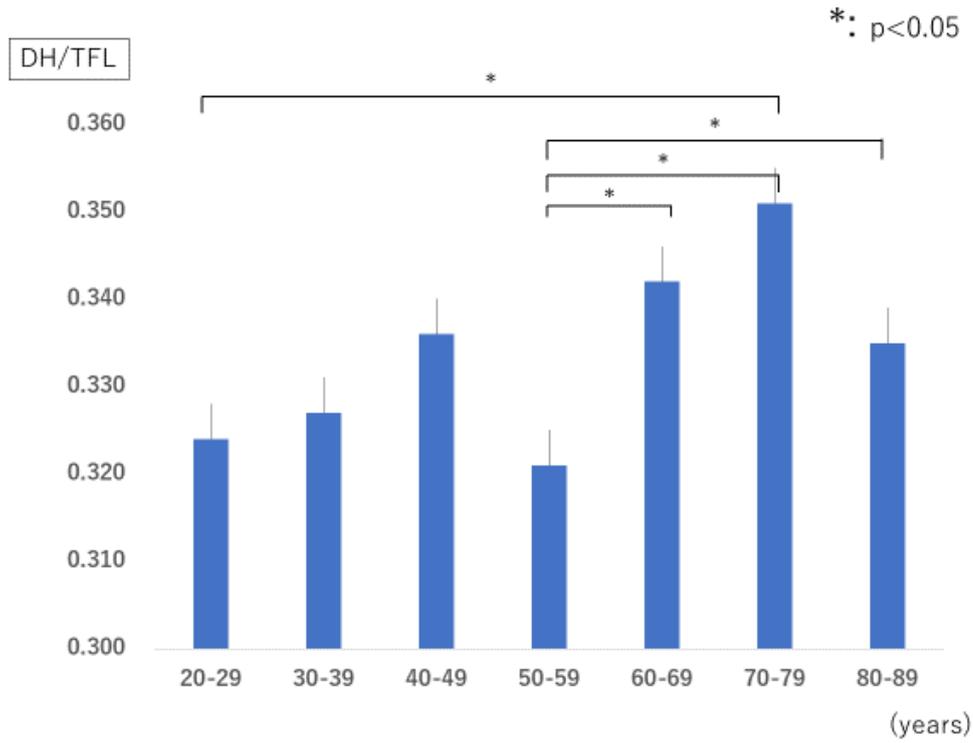


図 28：男性の TFL-AHR の年代別比較

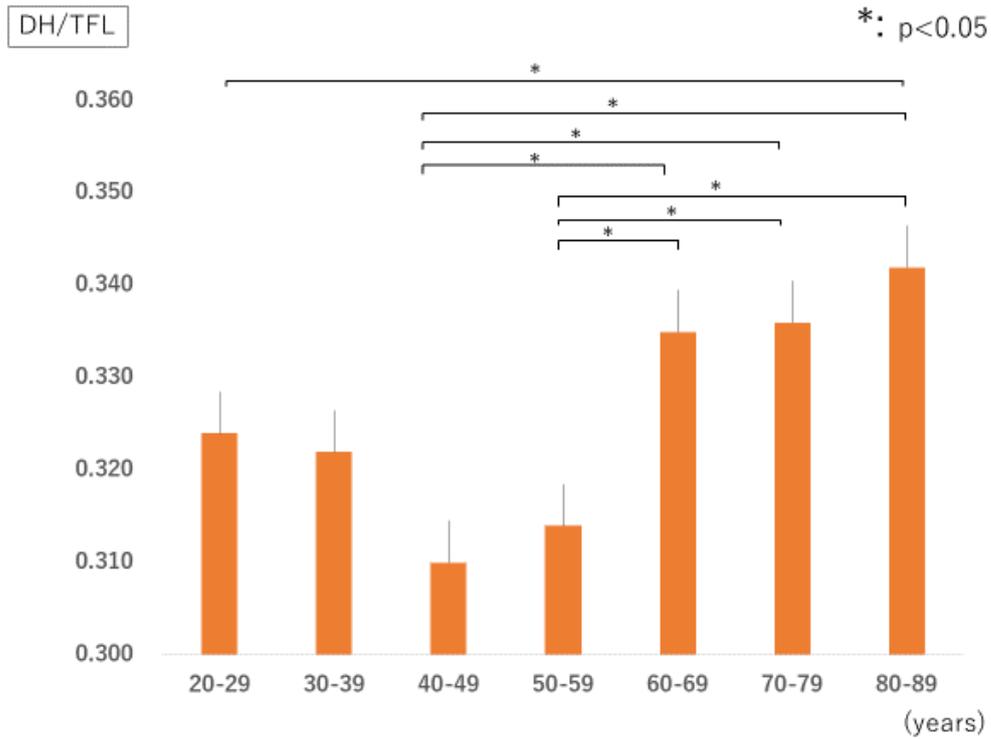


図 29：女性の TFL-AHR の年代別比較

5.5 年代間比較の考察

足部計測値を男女別の年代間にて比較した結果、男性の FL は 20～30 歳代に比べ 70 歳代以降において短い傾向を示した。女性の FL および男女の TFL は 20～50 歳代に比べ 60 代、70 代の方が短いことが示唆された。

足長に影響を及ぼす要因のひとつに足部、足趾の骨格構造の変形が考えられる。体格は軟部組織によって大きく左右されるが、足部は主として骨格構造によって足型が決まるとされている[43]。足部の変形の多くは前足部に発症し、中でも発症頻度が高い変形に外反母趾がある[44]。外反母趾の発症は 20 歳未満でも発症することが報告されているが[45]、Hardy らは外反母趾の危険因子に女性、年齢、膝痛であることを報告し、女性 2,365 名を対象とした国内の報告では、高齢になるほど外反母趾の有病率が増加することが報告されている[46]。

しかし、TFL は足趾の長さを除外した足長であるが、本研究では男女ともに TFL においても女性では 60 歳以降、男性では 70 歳以降の年代において短いことが示された。これは、年代間の骨格形成の違いが考えられる。厚生労働省が示す国民健康・栄養調査では[47]、男性の平均身長について 2012 年（平成 24 年）の 26～29 歳 171.6cm、30～39 歳 171.2cm、60～69 歳 165.5cm、70 歳以上 162.1cm に対し、1975 年（昭和 50 年）の 26～29 歳 166.2cm、30～39 歳 163.8cm、60～69 歳 158.1cm、70 歳以上 155.2cm となり、年代別の伸び率は 26～29 歳 3.2%、30～39 歳 4.5%、60～69 歳 4.6%、70 歳以上 4.4%と各年代において身長は伸びている。女性の平均身長について 2012 年（平成 24 年）の 26～29 歳 157.8cm、30～39 歳 158.4cm、60～69 歳 152.8cm、70 歳以上 148.2cm に対し、1975 年（昭和 50 年）の 26～29 歳 153.4cm、30～39 歳 152.7cm、60～69 歳 146.1cm、70 歳以上 142.2cm となり、年代別の伸び率は 26～29 歳 2.8%、30～39 歳 3.7%、60～69 歳 4.5%、70 歳以上 4.2%と男性同様に各年代において身長は伸びている。身長と足長の相関について馬場は[24]、男性が 0.69、女性が 0.64 の高い相関を示していることを報告しており、年代による骨格の違いが

足長の差の要因として考えられた。また FL, TFL ともに年代間に同様の差があることから、アーチ高比の評価方法としてすべての年代において FL を用いた方法でも問題がないと考えられる。

次に DH と FL-AHR は年代間において有意差が認められなかったが、TFL-AHR の男性では 20 歳代と 70 歳代、50 歳代と 60~80 歳代に有意差を認め、TFL-AHR は 60 歳代以降の年代が高い傾向が示唆された。女性では 20 歳代と 80 歳代、40 歳代と 60~80 歳代、50 歳代と 60~80 歳代に有意差を認め、男性と同様に 60 歳代以降で高い傾向を示した。

DH の高さの変化に年齢による影響が少ないことが分かった。年齢と足部アーチ構造との関係について、Zifchock ら[38]は年齢の増加によって足部アーチの低下と剛性に影響はないことを報告、また弓岡ら[48]は地域高齢者 217 名、平均年齢 74.2 歳の足部変形の有病率に関する調査では、扁平足が 1.4%であったことを報告している。また、第 3 章でも述べたが、Faria ら[10]は年齢の増加と扁平足は相関すると報告し、Pita-Fernandez ら[22]は扁平足の危険因子として年齢のオッズ比が 1.07 としている。しかし、本研究では DH, FL-AHR では年代間の有意差がなく足部アーチ高率は年代によって大きく変化しないことが示唆された。TFL-AHR で有意差を認めたのは、年代による TFL の差の影響と考え、足背高の高さが年代間による変化が小さいのに対して、TFL は年代が増すにつれ小さくなることが影響していると考えられる。

5.6 年代間比較の限界

本章は横断研究であるため、年代ごとの検討であり加齢による要因を示すには縦断的な調査が必要である。また、本章は画像を用いた間接的な計測方法であり、直接的な方法とは差が生じる可能性がある。よって計測方法の違いによって結果の内容が異なることも考えられる。

第6章 結論

本研究では、幅広い年齢を対象に足部アーチ高比から足部アーチの変形に関連する要因を検討した。最初に対象者が18歳から83歳までの689名に対して、足背高 (Dorsum Height: DH) とアーチ高比 (Arch Height Ratio: AHR) それぞれの測定値から High, Standard, Low の3群に分け基本属性、足の測定値、アンケートの結果を統計学的に比較した結果、足部の既往歴や現在のスポーツ活動の有無が足部アライメントに関与しないことが分かった。DHの3群による多重比較では、年齢、体重、BMIがL群に比べH群が高いことが示され、体重およびBMIの増加がDHと正の相関をすることが分かった。よって体重およびBMIの増加がハイアーチに関連することが示唆された。本研究で行ったアーチ高評価であるDHおよびAHRは強い相関を示したが、AHRは足長の影響が大きく、今後はより精度の高い足部内側縦アーチの評価方法を用い、ハイアーチとローアーチに関わる要因の分析を行う必要が示唆された。

次に0歳から97歳までの幅広い年齢層に対する1000名以上の足部データを収集し、ローアーチがどのような要因と関連しているのかを、機械学習に基づく手法であるSVM-RFEを用いて解析した。関連要因として「年齢」、「身長」、「体重」、「BMI」、「足長」の5つの候補を考えたが、SVM-RFEに基づく解析の結果、「年齢」、「足長」、「体重」の順に足部内側縦アーチの低下に関連していることが分かった。また、これらの要因について各年代において相関関係がなく、年代における特徴は見いだせなかった。「足長」はその大きさによって、アーチ高が低下しやすい傾向が示され全足長の測定では外反母趾の影響があることが示唆された。「体重」は複数の年代にて正の相関を認め、体重の増加によって足背高は高まりやすいことが示唆された。しかし、関連要因5項目からなる説明変数では妥当性を示す感度、特異度において高い値を得られなかった。

SVM-RFEによる解析の結果、年齢が最も大きい関連要因となったため、男女別に年代別

の比較を行った。また次に足長と外反母趾等などの影響を除いた TFL (Truncated Foot Length) の両方を用い AHR を測定した。結果, DH は年代による差がなく, 足長と TFL は年代による差が生じ, 骨格形成の違いから高齢者の方が足長が小さいことが分かった。

これらの研究をまとめると, AHR の形状に影響を与える要因として, BMI と体重の増加がハイアーチに影響することが分かった。ローアーチには主に年齢の要因が挙げられたが, DH は年齢による違いがなく, 足長は高齢者の方が短い傾向を示したことから, 年齢の影響は足長に大きく DH には影響が少ないことが分かった。

謝辞

本論文を作成するにあたり、多くの方々にご協力ならびにご指導をいただきました。ここに心より感謝の意を表します。

研究活動に関しましては、最初から最後まで丁寧なご指導を賜った徳島大学大学院社会産業理工学研究部の北研二教授に対し、心より感謝いたします。また、泓田正雄教授、獅々堀正幹教授、吉田稔准教授、松本和幸助教には適切にご指導、ご助言を賜り感謝いたします。

また、本研究では1000名以上の足部データが収集できました。データ収集へのご協力と本論文へのご助言を賜った奈良学園大学の橋本雅至教授、大阪河崎リハビリテーション大学の今岡真和助教、岡健司講師、肥田光正講師、職員の皆様、不二製油株式会社の前淵元宏氏、伊吹昌久氏、大阪府貝塚市高齢介護課の河野雅子氏、大阪府岸和田市社会福祉協議会の徳久貴男氏、大阪医療福祉専門学校の菊池淳講師、城西国際大学の森藤武准教授、理学療法士の伊佐地弘基氏、生島直樹氏に心より感謝いたします。

最後に、本論文が作成できたのも家族からの日々の協力と励まし、また、親族、友人によるご支援のおかげであり、心より感謝いたします。

参考文献

1. Kapandji IA, 荻島 秀男, 嶋田 智明. カパンディ関節の生理学 II 下肢: 医歯薬出版. P221.
2. Hohmann G. Fuss und Bein : ihre Erkrankungen und deren Behandlung; ein Lehrbuch. 4. Aufl. ed: Bergmann; 1948.
3. Sullivan D, Warren RF, Pavlov H, Kelman G. Stress fractures in 51 runners. *Clinical orthopaedics and related research*. 1984(187):188-192.
4. Warden SJ, Burr DB, Brukner PD. Stress fractures: pathophysiology, epidemiology, and risk factors. *Current osteoporosis reports*. 2006;4(3):103-109.
5. Kaufman KR, Brodine SK, Shaffer RA, Johnson CW, Cullison TR. The effect of foot structure and range of motion on musculoskeletal overuse injuries. *The American journal of sports medicine*. 1999;27(5):585-593.
6. Lakstein D, Fridman T, Ziv YB, Kosashvili Y. Prevalence of anterior knee pain and pes planus in Israel defense force recruits. *Military medicine*. 2010;175(11):855-857.
7. Williams DS, 3rd, McClay IS, Hamill J. Arch structure and injury patterns in runners. *Clinical biomechanics (Bristol, Avon)*. 2001;16(4):341-347.
8. Burns J, Crosbie J, Hunt A, Ouvrier R. The effect of pes cavus on foot pain and plantar pressure. *Clinical biomechanics (Bristol, Avon)*. 2005;20(9):877-882.
9. Atamturk D. [Relationship of flatfoot and high arch with main anthropometric variables]. *Acta orthopaedica et traumatologica turcica*. 2009;43(3):254-259.
10. Faria A, Gabriel R, Abrantes J, Bras R, Moreira H. The relationship of body mass index, age and triceps-surae musculotendinous stiffness with the foot arch structure of postmenopausal women. *Clinical biomechanics (Bristol, Avon)*. 2010;25(6):588-593.
11. Aurichio TR, Rebelatto JR, de Castro AP. The relationship between the body mass index (BMI) and foot posture in elderly people. *Archives of gerontology and geriatrics*. 2011;52(2):e89-92.
12. 水野 祥太郎. ヒトの足の研究－扁平足問題からの展開－. 医歯薬出版、東京. 1973.
13. Cavanagh PR, Rodgers MM. The arch index: a useful measure from footprints. *Journal of biomechanics*. 1987;20(5):547-551.
14. Cowan DN, Jones BH, Robinson JR. Foot morphologic characteristics and risk of exercise-related injury. *Archives of family medicine*. 1993;2(7):773-777.
15. Lees A, Lake M, Klenerman L. Shock absorption during forefoot running and its relationship to medial longitudinal arch height. *Foot & ankle international*. 2005;26(12):1081-1088.

16. Wen DY, Puffer JC, Schmalzried TP. Injuries in runners: a prospective study of alignment. *Clinical journal of sport medicine : official journal of the Canadian Academy of Sport Medicine*. 1998;8(3):187-194.
17. 大久保 衛, 島津 晃, 上野 憲司, 他. メディカルチェックにおける足アーチ高測定方法の検討. *臨床スポーツ医学*. 1989;6(別冊):336-339.
18. Williams DS, McClay IS. Measurements used to characterize the foot and the medial longitudinal arch: reliability and validity. *Physical therapy*. 2000;80(9):864-871.
19. McPoil TG, Cornwall MW, Vicenzino B, Teyhen DS, Molloy JM, Christie DS, et al. Effect of using truncated versus total foot length to calculate the arch height ratio. *Foot* (Edinburgh, Scotland). 2008;18(4):220-227.
20. 梅木 義臣. 足内側アーチの静力学的研究. *日本整形外科学会雑誌*. 1991;65(10):891-901.
21. Richie DH, Jr. Biomechanics and clinical analysis of the adult acquired flatfoot. *Clinics in podiatric medicine and surgery*. 2007;24(4):617-644, vii.
22. Pita-Fernandez S, Gonzalez-Martin C, Seoane-Pillado T, Lopez-Calvino B, Pertega-Diaz S, Gil-Guillen V. Validity of footprint analysis to determine flatfoot using clinical diagnosis as the gold standard in a random sample aged 40 years and older. *Journal of epidemiology*. 2015;25(2):148-154.
23. Lopez-Lopez D, Vilar-Fernandez JM, Barros-Garcia G, Losa-Iglesias ME, Palomo-Lopez P, Becerro-de-Bengoa-Vallejo R, et al. Foot Arch Height and Quality of Life in Adults: A Strobe Observational Study. *International journal of environmental research and public health*. 2018;15(7).
24. 馬場 和朗. 日本人の足部形態に関する統計学的研究. *久留米医学会雑誌*. 1979;42(6):505-558.
25. Beeson P. Plantar fasciopathy: revisiting the risk factors. *Foot and ankle surgery : official journal of the European Society of Foot and Ankle Surgeons*. 2014;20(3):160-165.
26. Michelson JD, Durant DM, McFarland E. The injury risk associated with pes planus in athletes. *Foot & ankle international*. 2002;23(7):629-633.
27. Cortes C, Vapnik V. Support-vector networks. *Machine learning*. 1995;20(3):273-297.
28. 竹内 一郎, 烏山 昌幸. サポートベクトルマシン = Support vector machine: 講談社; 2015. xiii, 175p p.
29. 田辺 和俊, 鈴木 孝弘, 中川 晋一. サポートベクター回帰による都道府県別肺がん死亡率の関連要因に関する検討. *保健医療科学*. 2016;65(6):598-610.

30. 鈴木 英之進, 菅谷 信介, 津本 周作. サポートベクターマシンに基づく医療データからの事例発見. オペレーションズ・リサーチ : 経営の科学 = [O]perations research as a management science [r]esearch. 2001;46(5):243-248.
31. 西山 裕之, 平石 広典, 溝口 文雄. データマイニングによる緑内障診断システムの設計. 人工知能学会全国大会論文集. 2006;JSAI06:179-.
32. 山田 菜美, 橘 理恵, 木戸 尚治. サポートベクターマシンを用いた肺腫瘍の鑑別. 独立行政法人国立高等専門学校機構大島商船高等専門学校紀要 国立高等専門学校機構大島商船高等専門学校 編. 2009(42):73-80.
33. 藤田 広志. エキスパートによる RSNA 最新レポート 10 : CAD (コンピュータ支援診断) システムの最新動向. INNERVISION. 2004;19(3):28-31.
34. Butler RJ, Davis IS, Hamill J. Interaction of arch type and footwear on running mechanics. *The American journal of sports medicine*. 2006;34(12):1998-2005.
35. Guyon I, Weston J, Barnhill S, Vapnik V. Gene selection for cancer classification using support vector machines. *Machine learning*. 2002;46(1-3):389-422.
36. dlib library, <http://dlib.net/>
37. Robbins JM. Recognizing, treating, and preventing common foot problems. *Cleveland Clinic journal of medicine*. 2000;67(1):45-47, 51-52, 5-6.
38. Zifchock RA, Davis I, Hillstrom H, Song J. The effect of gender, age, and lateral dominance on arch height and arch stiffness. *Foot & ankle international*. 2006;27(5):367-372.
39. Shibuya N, Jupiter DC, Ciliberti LJ, VanBuren V, La Fontaine J. Characteristics of adult flatfoot in the United States. *The Journal of foot and ankle surgery : official publication of the American College of Foot and Ankle Surgeons*. 2010;49(4):363-368.
40. Tenenbaum S, Hershkovich O, Gordon B, Bruck N, Thein R, Derazne E, et al. Flexible pes planus in adolescents: body mass index, body height, and gender--an epidemiological study. *Foot & ankle international*. 2013;34(6):811-817.
41. Echarri JJ, Forriol F. The development in footprint morphology in 1851 Congolese children from urban and rural areas, and the relationship between this and wearing shoes. *Journal of pediatric orthopedics Part B*. 2003;12(2):141-146.
42. Chen JP, Chung MJ, Wang MJ. Flatfoot prevalence and foot dimensions of 5- to 13-year-old children in Taiwan. *Foot & ankle international*. 2009;30(4):326-332.
43. 河内 まき子. 日本人の足型の個人差の分析. *人類学雑誌*. 1989;97(3):373-388.
44. Shine IB. INCIDENCE OF HALLUX VALGUS IN A PARTIALLY SHOE-WEARING COMMUNITY. *British medical journal*. 1965;1(5451):1648-1650.
45. 星野 達, 井口 傑, 宇佐見 則夫, 他. 成長期の外反母趾. *関東整形災害外科学会雑誌*. 1993;24(5):551-553.

46. Hardy RH, Clapham JC. Observations on hallux valgus; based on a controlled series. The Journal of bone and joint surgery British volume. 1951;33-b(3):376-391.
47. 厚生労働省. 平成 24 年 国民健康・栄養調査. 2013:176-177.
48. 弓岡 まみ, 村田 伸, 岩瀬 弘明, 他. 高齢者の足部・足趾の形態と形態異常に関する調査研究. ヘルスプロモーション理学療法研究. 2017;7(2):79-83.