

スマートデバイスを用いた子どもの足部骨格マルチセンシングシステムの開発

代表研究者 山下 知子 東都大学 幕張ヒューマンケア学部 臨床工学科 助教
共同研究者 佐藤 満 群馬パース大学 リハビリテーション学部 理学療法学科 教授

1 背景

小学生の足部は外反母趾や扁平足などの足部の変形、発達不全が増加している。外反母趾の発生率は18-65歳で23%と報告されている^[1]。子どもの足部の変形の増加の原因に遺伝的影響、歩行や運動の影響、靴などの外力、怪我や病気の影響が注目されるが、足部骨格の発達状況が大きい。特に扁平足は外反母趾や足部の痛みにつながるため対策が求められる^[2]。

足部は内側縦アーチ、外側縦アーチ、遠位足根骨の高さにある横アーチの3つのアーチが交差して構成されている^[3,4]。足部の扁平化は中足部の内側縦アーチの筋骨格構造が関係しており、内側縦アーチを構成する舟状骨が中心的役割を担っている^[5]。そのため、内側縦アーチの評価にはカメラ、ノギスによる舟状骨の高さが調べられる^[6,7,8]。また、フットプリントも用いられているが^[9,10]、フットプリントは床面への接地状態を反映するものであり、骨格の評価には十分つながらないこと^[11]、一貫性のない結果であること^[8,12]が課題である。

一方、歩行のメカニズムの観点から、踵接地から立脚中期において、舟状骨は内側に倒れる(回内)ように動作することで歩行中の衝撃を吸収している。舟状骨の高さに加え、横方向にも動く特性から舟状骨は3次元的に変位する。そのため、足部骨格構造を3次元的に計測する手法として、デプスカメラ^[13]やKinect^[14]が検討されている。しかし、これらの研究は中足部の扁平化、外反母趾などに関連するものではなく、主に足長や足囲など従来の靴の製作に必要な情報にフォーカスしており、足部骨格構造には着目していない。舟状骨の動きは個人差が大きく、柔軟性が過度である扁平足・回内足は足部の変形に密接に関連することが予測されるが、これまでに調べられていない。

筋骨格系に対する発達の観点から、幼少期の足部は軟骨で構成され、成長に伴い骨化が進み20歳頃までに骨化が完成する^[15]。中でも10歳前後が足部の骨格形成の基礎を担う時期であり、そのため、筋力や骨格系の発達状況の経時的な評価が求められるが、小児の足長や足幅、踵や中足部の柔軟性など子どもの足部の発達状況は十分に明らかではない。

そこで本研究では、足部骨格マルチセンシングシステムを開発し、足部骨格構造3次元データと足底部の接地状況から小学生の足部の発達特性を明らかにすることを目的とした。

2 方法

2-1 対象者の概要

対象者は小学生124名(男子67名、女子57名)である。小学4年次(9~10歳)と6年次(11~12歳)に足部計測を行った。計測は1つの小学校において行われ、同意が得られたすべての小学生を対象とした。除外基準は、それぞれの計測に参加できなかった人、足部の骨折などの整形外科的問題を有している人とした。

本研究は、東都大学の研究倫理審査委員会の承認を得て行った(承認番号:R0309)。さらに、実験フィールド先の小学校の同意を得るとともに、対象となる小学生の保護者に同意を得た。

2-2 足部骨格マルチセンシングシステム計測

本研究では足部骨格構造の3次元計測に、我々が開発した足部骨格マルチセンシングシステムを用いた。図1に本システムの計測風景を示した。本システムは素足の対象者の足部周囲を撮影することで計測を行う。足部周囲の動画データからSfM(Structure from Motion)技術を活用して足部骨格構造の3次元モデルを構築している。本システムの精度は距離は1.7mm、角度は0.1度であり、特徴量は全て3次元の座標データを取得し導出している^[16,17]。

本研究で開発した3次元足部骨格指標を図2に示す。図2(a)より、Foot length (FL:足長)は第2指先端

から踵骨隆起部までの距離, Instep height (IH: 足部高)は距骨頭から床面までの距離, Navicular height (NH: 舟状高)は舟状骨から床面までの距離である。

図 2(b)より, Transverse arch width (TAW: 前足部アーチ幅)は第 1 中足骨頭から第 5 中足骨頭までの距離である。

図 2(c)より, Great toe- first metatarsal head- heel angle (GFH: 拇趾角度)は第 1 指先端, 第 1 中足骨頭, 踵骨隆起部のなす角, Axis of the Bone Distance (ABD: 骨軸距離)は第 2 指先端と踵骨隆起部を結んだ線を中心線として, 距骨頭の座標点を床面に投影した際の中心線からの距離である。

図 2(d)より, First metatarsal head- heel- second toe angle (FHS: M1-M2 角度)は第 1 中足骨頭, 踵骨隆起部, 第 2 指先端のなす角, Second toe- heel- navicular angle (SHN: 舟状骨横変位角度)は第 2 指先端, 踵骨隆起部, 舟状骨のなす角である。

これら 8 点を 3 次元足部骨格指標とした。GFH を外反母趾の評価で用いられる HV 角^[18], FHS を M1-M2 角 (第 1・2 中足骨角)^[19]としている。加えて, 8 点の指標のうち距離の指標は足長の影響を受ける。そこで本指標では, 足長で正規化し, 100 を乗ずることとした。



図 1 足部骨格マルチセンシングシステムの計測風景

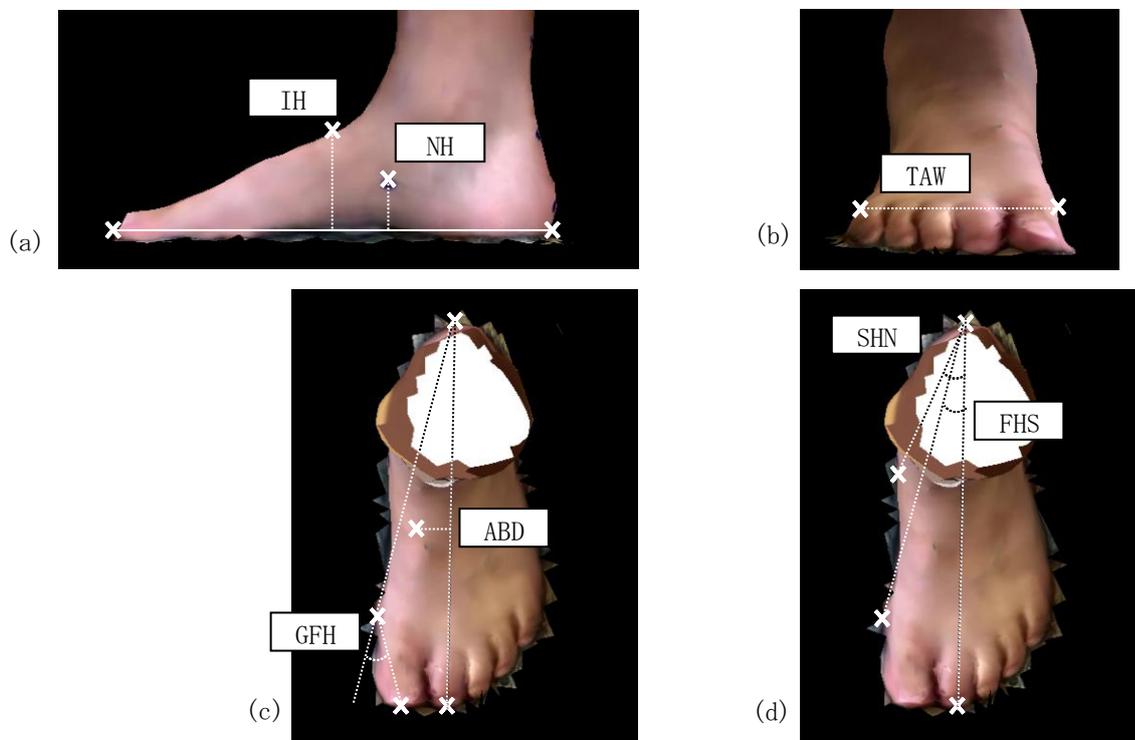


図 2 3 次元足部骨格指標

2-3 デジタルフットプリント計測

足裏の床面への接地状況はデジタルフットプリント計測器 twin99(Midi Captures 社)を用いた。計測は静止立位にて行った。図 3 に計測風景とデジタルフットプリント計測による解析項目を示した。デジタルフットプリントでは Heel length(HL:踵幅(線分 e-f))と床面への接地状況から足部の扁平化を調べるための Chippaux- Smirak index(CSI)の計 2 点をフットプリント指標とした。CSI は前足部 Forefoot(第 1 中足骨頭から第 5 中足骨頭:線分 a-b), 中足部 Midfoot(足部の最小幅:線分 c-d)から求める指標((Midfoot/Forefoot)×100)であり, 100 に近づくほど, 足部が扁平化していることを示す。HL も足長の影響を受けるため, 足長で正規化し, 100 を乗ずることとした。

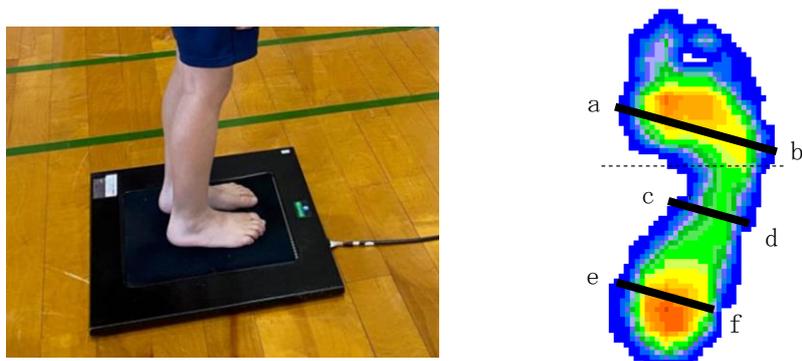


図3 フットプリントの計測風景と評価指標

2-4 統計解析

統計解析には SPSS(version28, IBM 社)を用いた。4 年次, 6 年次の各計測値の解析には対応のある t 検定, NH rate, SHN の四分位別の書く計測値の解析には一元配置分散分析を用いた。p 値は 0.05 以下を有意差があると判定した。

3 結果

3-1 計測値の 2 年間の変化

表 1 に計測項目の小学 4 年次と 6 年次の平均値と標準偏差, 統計解析結果を示した。表 1 より, 2 年間で FL, IH, TAW, HL は有意に増大した。FL は男子 2.00cm, 女子 1.58cm 増大した。IH は男子 0.66cm, 女子 0.55cm, TAW は男子 0.91cm, 女子 0.71cm, HL は男子 0.26cm, 女子 0.33cm 増大した。IH rate, TAW rate は増大したが, HL rate は低下した。

一方, 内側縦アーチを構成する舟状骨に関連する指標では NH (男子のみ), NH rate は有意に低下した。NH は男子 0.25cm, 女子 0.14cm 低下した。NH rate は男子 2.49%, 女子 1.40% 低下した。SHN angle, ABD, ABD rate は低下した。

IH rate, TAW rate, HL rate, NH rate の 4 年次の 25%タイル値を 6 年次で超えていない割合は以下の通りであった。

- IH rate : 男子 9.0%, 女子 19.3%
- TAW rate : 男子 11.9%, 女子 8.8%
- HL rate : 男子 40.3%, 女子 29.8%
- NH rate : 男子 75.6%, 女子 45.6%

表1 計測値の2年間の変化

	Male			Female		
	9-10 years old	11-12 years old	p value	9-10 years old	11-12 years old	p value
FL [cm]	20.71±1.13	22.72±1.33	<0.001	20.39±1.19	21.97±1.04	<0.001
IH [cm]	5.58±0.46	6.24±0.56	<0.001	5.39±0.48	5.93±0.50	<0.001
TAW [cm]	8.01±0.60	8.91±0.55	<0.001	7.97±0.66	8.68±0.46	<0.001
NH [cm]	3.46±0.49	3.21±0.64	<0.001	3.13±0.53	2.99±0.54	0.095
HL [cm]	5.58±0.46	6.24±0.56	<0.001	5.39±0.48	5.93±0.50	<0.001
IH rate [%]	26.96±1.90	27.5±2.18	0.01	26.47±2.01	27.04±2.16	0.018
TAW rate [%]	38.67±2.41	39.32±2.02	0.023	38.76±2.27	39.44±2.12	0.067
NH rate [%]	16.75±2.43	14.13±2.77	<0.001	15.30±2.48	13.65±2.61	<0.001
HL rate [%]	28.97±2.44	27.55±3.06	<0.001	29.54±2.67	28.91±2.38	0.082
SHN [degrees]	24.83±2.89	22.44±2.81	<0.001	25.11±2.67	23.37±2.39	<0.001
ABD [cm]	0.94±0.50	0.89±0.45	0.355	1.15±0.46	1.02±0.43	0.027
ABD rate [%]	4.55±2.40	3.93±1.93	0.015	5.60±2.24	4.67±1.98	<0.001
GFH [degrees]	30.18±3.97	29.73±4.22	0.384	31.30±4.14	31.62±4.43	0.554
FHS [degrees]	12.59±1.15	13.19±1.13	<0.001	13.31±1.32	13.83±1.12	0.003
CSI [%]	44.51±10.92	44.19±9.23	0.731	42.84±10.38	41.35±10.15	0.083

3-2 NH rate・SHN angle との関係

表2に6年次のABD, GFH, FHSの導出結果を4年次のNH rateとSHN angleの四分位別に示した。表2より、4年次のSHN angleが大きいほど6年次のABD, FHSが有意に増大した。一方、NH rateの高さによる変化は確認できなかった。

表2 NH rateとSHN angle 四分位別の結果

SHN	<25%	<50%	<75%	>=75%	F value, p value
ABD[cm]	0.67±0.4	0.9±0.38	0.96±0.4	1.29±0.43	F(3,120)=10.97, p<0.001
GFH[degrees]	29.8±5.7	29.4±4.2	31.7±3.8	31.8±3.6	F(3,120)=2.346, p=0.076
FHS[degrees]	12.8±1.0	13.3±0.9	13.7±1.3	14.2±1.1	F(3,120)=7.616, p<0.001
NH rate	<25%	<50%	<75%	>=75%	F value, p value
ABD[cm]	1.01±0.48	0.96±0.42	0.94±0.38	0.86±0.43	F(3,120)=0.773, p=0.511
GFH[degrees]	31.5±4.1	29.7±4.4	30.4±3.9	29.7±5.0	F(3,120)=1.46, p=0.229
FHS[degrees]	13.7±1.2	13.2±1.1	13.4±1.2	13.4±1.2	F(3,120)=0.938, p=0.424

4 考察

本研究では小学生の中足部の発達に着目し 2 年間の縦断的追跡調査を行った。特に足部の表面構造から 3 次元計測を行い、扁平足の指標として注目される舟状骨の高さ(NH)に加え、横方向の変位(SHN angle)、足部骨格の横方向の変位(ABD)に着目した。舟状骨や足部骨格の横方向の変位にフォーカスしている先行研究は我々が調べたところ確認されなかった。

2 年間の追跡調査より、全体の平均値からは成長に伴い FL は男子 1.10 倍、女子 1.08 倍、IH は男子 1.12 倍、女子 1.10 倍、TAW は男子 1.11 倍、女子 1.05 倍に増大していることが確認できた。加えて、SHN angle, ABD, ABD rate は低下していることから、平均値ではよい方向に発達していることが明らかになった。本結果より、我々が開発した足部骨格マルチセンシングシステムは足部の発達の観察が可能であることが示唆された。

一方、HL は他の指標と比べ増大率は低く、FL で正規化した HL rate も低下していたことから、踵幅は 9 歳頃からあまり変化しないことが推定できる。踵は人間の体重の約 7 割を受けているため、踵骨が小さいまま成長すると踵骨の痛みの発生につながる。踵骨の骨形成は 8~9 歳に活発に進むため、積極的な骨形成のための適切な運動とバランスのよい食生活が重要となることが確認できた。

足部の扁平化はスポーツ障害、将来の歩行機能の低下を招く^[2,20]。内側縦アーチに着目した結果より、成長に伴い NH, NH rate は低下していた。先行研究では、NH は 6~13 歳まで有意に増加し、9 歳の NH は男子 2.89cm、女子 2.79cm、12 歳の男子 3.48cm、女子 3.39cm と報告されている^[21]。本研究では、9-10 歳の男子 3.46cm、女子 3.13cm、11-12 歳の男子 3.21cm、女子 2.99cm と有意に低下した。4 年次の SHN angle の第 1 四分位に該当する 6 年次の NH は男子 3.63cm、女子 3.14cm、第 2 四分位該当児童は男子 3.30cm、女子 3.15cm であった。すなわち、舟状骨の横変位角度が小さく舟状骨が出っ張っていない児童は 6 年次に舟状骨の高さは増大していることが確認でき、先行研究との比較では、ほぼ同等の値となった。本先行研究は横断的に異なる対象者を計測し、本研究は縦断データで同一の対象者を比較している違いがあるが、発達に影響を及ぼす因子があったことが推察される。本研究対象者は発達過程で Covid-19 の流行による極端な運動抑制を経験しているため、運動による刺激の低下が発達に影響している可能性がある。

個別の結果では、6 年次の IH rate と NH rate が 4 年次の 25%タイル値を超えていない児童は 13.7%(17 名)であり、足部の扁平化が進行していることがわかった。外反母趾は性別^[1,22]、扁平足^[20]、変形膝関節症^[23]、フットウェア^[24]など、いくつかの要因が関連するが、発生メカニズム、足部の解剖学的特徴がどのように影響するかは明らかではない^[25]。以上の結果より、2 年間の変化の中で足の甲が高くないこと、扁平化が進行している外反母趾のリスクが高い児童が約 1 割存在することが確認できた。

閉鎖運動連鎖(Closed Kinetic Chain)の観点から、中足部の骨格構造は歩行などの荷重位では踵が外側に曲がり、舟状骨が内側に倒れ高さが低下することで衝撃を吸収している。解剖学的には舟状骨は荷重により真下に移動するのではなく、内側(回内)方向に回転するように変位することから、SHN angle の増大は舟状骨の回内運動の増大を意味する。この回内運動の柔軟性は個人差が大きく、柔軟性が過度であり舟状骨の降下量が大きい場合は、足部への負荷量が大きいと考える。そこで、4 年次の SHN angle, NH の四分位別に中足部、外反母趾に関連する ABD, GFH angle, FHS angle を導出した。表 1 の平均値では ABD, GFH angle, FHS angle は 2 年間で変化は確認できなかった。しかし、表 2 より 4 年次の SHN angle が大きく、舟状骨が出っ張っている群ほど、6 年次の ABD, FHS angle は有意に増大する結果となった。一方、GFH angle では有意な変化は認められなかった。

SHN angle が増大する解剖学的理由は、扁平足の要因と考えられる距骨下関節複合体と踵骨、舟状骨周辺の靭帯の弛緩が主要な要因^[26]であると考えられる。SHN angle の増大は舟状骨の回内運動の増加を意味する。舟状骨には内側・中間楔状骨が連結しており、第 1 中足骨(M1)と第 2 中足骨(M2)間の不安定化が起り、M1-M2 角の可動性が大きくなる可能性がある^[27]。つまり、内側に倒れる回内足が外反母趾の診断で用いられている M1-M2 角と同等と設定している FHS angle の増大につながり、外反母趾との関連が大きいことが示唆された。本結果は回内が発生する足部は外反母趾の発症率が高いと報告されている先行研究と一致する^[28]。また、従来の内側縦アーチの指標の NH では外反母趾や回内の評価は困難であることが示唆された。40 歳以上を対象とした先行研究でも GFH を予測する上で重要な指標として NH, NH rate ではなく、SHN angle が挙げられている^[16]。小学生を対象とした本研究でも同様の傾向が確認された。したがって、SHN angle は舟状骨の回内の指標として有用である。

5 結論

本研究では、足部の扁平化に着目し、足部骨格 3 次元データと、足底部の接地状態から小学生の足部の発達特性について調査を行った。その結果、成長に伴い、足長、足の厚み、前足部幅、踵幅は有意に増大したが、舟状骨高は低下していた。足部が薄く、扁平化が進行し、将来の足部変形リスクが高い児童が約 1 割存在した。加えて、踵幅の増大率は他の指標と比べ小さく、踵骨の骨格形成時期の 8-9 歳での適切な運動と栄養が重要であることがわかった。

本開発指標については、従来の足部変形の指標である舟状骨の高さ(NH)ではなく、横方向への変位角度(SHN angle)が大きいほど、外反母趾に関連する指標への影響が大きいことが示唆された。

【参考文献】

- [1] Nix S, Smith M, Vicenzino B. Prevalence of hallux valgus in the general population: a systematic review and meta-analysis. *J Foot Ankle Res.* 3, 21, 2010.
- [2] Mølgaard C, Lundbye-Christensen S, Simonsen O. High prevalence of foot problems in the Danish population: a survey of causes and associations. *Foot (Edinb).* 20(1), 7–11, 2010.
- [3] DV Flores, CM Gómez, MF Hernando, MA Davis, MN Pathria. Adult Acquired Flatfoot Deformity: Anatomy, Biomechanics, Staging, and Imaging Findings. *RSNA J.* 39(5), 1233-1568, 2019.
- [4] Muller S, Carlsohn A, Muller J, Baur H, Mayer F. Static and dynamic foot characteristics in children aged 1-13 years: a cross-sectional study. *Gait Posture.* 35(3), 389–94, 2012.
- [5] Van Boerum DH, Sangeorzan BJ. Biomechanics and pathophysiology of at foot. *Foot Ankle Clin.* 8(3), 419–430, 2003.
- [6] Aenumulapalli A, Kulkarni MM, Gandotra AR. Prevalence of flexible flat foot in adults: A cross-sectional study. *J Clin Diagn Res.* 11(6), AC17-AC20, 2017.
- [7] Elvan A, Simsek IE, Cakiroglu MA, Angin S. Association of quadriceps angle with plantar pressure distribution, navicular height and calcaneo-tibial angle. *Acta Orthop Traumatol Turc.* 53(2), 145–149, 2019.
- [8] Mall NA, Hardaker WM, Nunley JA, Queen RM. The reliability and reproducibility of foot type measurements using a mirrored foot photo box and digital photography compared to caliper measurements. *J Biomech.* 40(5), 1171–1176, 2007.
- [9] Gilmour JC, Burns Y. The measurement of the medial longitudinal arch in children. *Foot Ankle Int.* 22, 493–498, 2001.
- [10] Staheli LT. Evaluation of planovalgus foot deformities with special reference to the natural history. *J Am Podiatr Med Assoc.* 77, 2–6, 1987.
- [11] Yamashita T, Yamashita K, Sato M, Ata S. Differences in Foot Features Between Children and Older Adults Assessed using a Three-Dimensional Foot Scanning System: A Cross-Sectional Observational Study. *Adv Biomed Eng.* 11, 172-178, 2022.
- [12] Lee YC, Lin G, Wang MJ. Comparing 3D foot scanning with conventional measurement methods. *J Foot Ankle Res.* 7(1), 44, 2014.
- [13] Kobayashi T, Ienaga N, Sugiura Y, Saito H, Miyata N, Tada M. A simple 3D scanning system of the human foot using a smartphone with depth camera. In: *Proceedings of 3DBody Tech.* 2018.
- [14] Rogati G, Leardini A, Ortolani M, Caravaggi P. Validation of a novel Kinect-based device for 3D scanning of the foot plantar surface in weight-bearing. *J Foot Ankle Res.* 12, 46. 2019.
- [15] Staheli LT, Chew DE, Corbett M: The longitudinal arch. A survey of eight hundred and eighty-two feet in normal children and adults. *J Bone Joint Surg Am.* 69(3), 426-428. 1987.
- [16] Yamashita T, Yamashita K, Sato M, Kawasumi M, Ata S. Foot-surface-structure analysis using a smartphone-based 3D foot scanner. *Med Eng Phys.* 95, 90–96, 2021.

- [17] Yamashita K, Yamashita T, Sato M, Kawasumi M, Takase Y. Development of a quantitative measurement system for three-dimensional analysis of foot morphology using a smartphone. *Annu Int Conf IEEE Eng Med Biol Soc.* 2019, 3171–3174, 2019.
- [18] Miller JW. Distal first metatarsal displacement osteotomy. Its place in the schema of bunion surgery. *J Bone Joint Surg Am.* 56(5), 923–931, 1974.
- [19] Schneider W, Csepan R, Knahr K: Reproducibility of the radiographic metatarsophalangeal angle in hallux surgery. *J Bone Joint Surg Am.* 85(3), 494–499, 2003.
- [20] King DM, Toolan BC. Associated deformities and hypermobility in hallux valgus: an investigation with weightbearing radiographs. *Foot Ankle Int.* 25(4), 251–255, 2004.
- [21] Waseda A, Suda Y, Inokuchi S, Nishiwaki Y, Toyama Y. Standard growth of the foot arch in childhood and adolescence - derived from the measurement results of 10,155 children. *Foot Ankle Surg.* 20(3), 208–214, 2014.
- [22] Menz HB, Roddy E, Thomas E, Croft PR. Impact of hallux valgus severity on general and foot-specific health-related quality of life. *Arthritis Care Res.* 63(3), 396–404, 2011.
- [23] Roddy E, Zhang W, Doherty M. Prevalence and associations of hallux valgus in a primary care population. *Arthritis Rheum.* 59(6), 857–862, 2008.
- [24] Menz HB, Morris ME. Footwear characteristics and foot problems in older people. *Gerontology.* 51(5), 346–351, 2005.
- [25] Galica AM, Hagedorn TJ, Dufour AB, Riskowski JL, Hillstrom HJ, Casey VA, et al. Hallux valgus and plantar pressure loading: the Framingham foot study. *J Foot Ankle Res.* 6(1), 42, 2013.
- [26] Kido M, Ikoma K, Imai K, Maki M, Takatori R, Tokunaga D, Inoue N, Kubo T. Load response of the tarsal bones in patients with flatfoot deformity: in vivo 3D study. *Foot Ankle Int.* 32, 1017–1022, 2011.
- [27] Myerson MS. Adult acquired atfoot deformity: treatment of dysfunction of the posterior tibial tendon. *Instr Course Lect.* 46, 393–405, 1997.
- [28] Hagedorn TJ, Dufour AB, Riskowski JL, et al. Foot disorders, foot posture, and foot function: the Framingham foot study. *PLoS One.* 8(9), e74364, 2013.

〈 発 表 資 料 〉

題 名	掲載誌・学会名等	発表年月
足部骨格 3D 計測システムを用いた小学生の足部骨格の追跡研究	第 2 回日本フットケア・足病医学会関東・甲信越地方会	2023 年 5 月
小学生の足部骨格 3D 計測による外反母趾の発生メカニズム	第 62 回日本生体医工学会大会	2023 年 5 月