

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（延長）

代表研究者
共同研究者

山下 知子
佐藤 満

東都大学 幕張ヒューマンケア学部 臨床工学科 講師
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

小学生の扁平足や外反母趾などの足部の変形が社会的課題である。小学生の足部の変形の一例として、図 1(a)に外反母趾、(b)に扁平足を示した。子どもの足部の変形の増加の原因に遺伝、歩行や運動、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。特に中足部の扁平化は足部の痛みや外反母趾、将来の変形性膝関節症のリスク要因となるため対策が求められる^[1]。

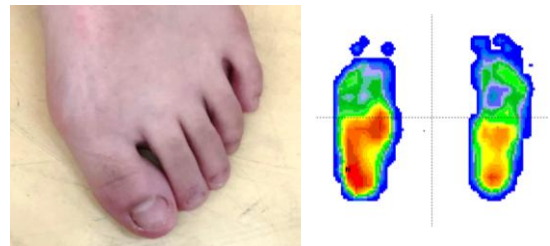
足部は内側縦アーチ、外側縦アーチ、遠位足根骨の高さにある横アーチの 3 つのアーチが交差して構成されている^[2,3]。足部は荷重が加わると、後足部の踵が外側に曲がり、中足部が内側に倒れる回内運動をすることで歩行中の衝撃を吸収している。すなわち、回内運動時には内側縦アーチ（土踏まず）は高さを下げる動作をする。扁平足の場合は非荷重時から内側縦アーチが下がっているため、回内運動が機能しない状態にある。その結果、歩行中の衝撃機能が弱まり、疲れやすい、足部の痛みの発生等につながる。

骨格構造の観点から、回内運動の中心的役割を担っているのは舟状骨である^[4]。そのため、カメラ、ノギスを用いて測定した舟状骨の床面からの高さが扁平足の評価指標となっている^[5,6]。フットプリントも用いられているが^[7,8]、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^[9]、一貫性のない結果であること^[10]が課題である。加えて、回内運動は舟状骨の高さが低下するだけでなく、内側に倒れる 3 次元的な動作であるため、上記の計測手法では扁平足の評価は困難である^[9]。舟状骨の動きは個人差が大きく、柔軟性が過度であり過回内の扁平足も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^[11]。内側縦アーチは 10 歳頃までに形状が完成し^[12,13]、発達とともに中足部の扁平化は改善すると報告されている^[14]。しかし、COVID-19 流行による外遊びや体育が阻害されたため、内側縦アーチの形成が進まず、扁平足の児童が増加している^[15]。運動機会の減少から、足部骨格だけでなく、筋肉量が少ない、骨量が少なく骨折しやすい、運動機能が十分に高まらないなど身体的発達、運動能力への影響が懸念されるが、これらを明らかにしている報告は見られない。

一方、中足部の骨格形成が不十分な扁平足の児童にはインソールによる支援が行われている。先行研究では、装着率が低い^[16]、定性的な評価^[17,18]、介入方法等から一貫性がないと報告されている^[19]。

そこで本研究では、足部の骨格を 3 次元計測するための足部骨格マルチセンシングシステムを開発し、運動機能の観点から小学生の足部骨格の発達状況、インソールによる介入効果を明らかにすることを目的とした。

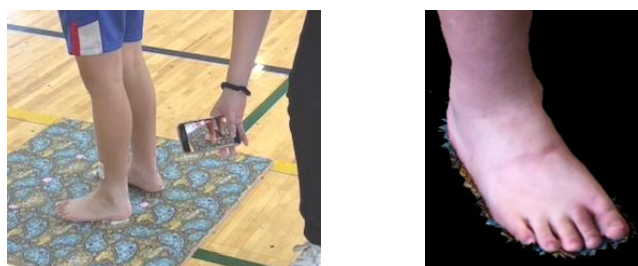


(a) 外反母趾 (b) 扁平足

図 1 小学生の足部の課題

2 足部骨格マルチセンシングシステムの開発

図 2 に本研究で開発した足部骨格マルチセンシングシステムの計測風景と出力結果である足部の 3 次元再構成データを示した。本開発システムはスマートフォンで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 Structure from Motion 技術 (SfM) を活用して足部骨格の 3 次元モデルを構築している。精度は実測データと比較し、距離 1.7mm、角度が 0.1 度である^[20]。特徴量はすべて 3 次元の座標データを取得し導出している。



(a)計測風景 (b)3次元再構成データ
図2 足部骨格マルチセンシングシステム

3 方法

3-1 対象者

①運動機能の観点からの足部骨格の発達状況の調査の対象者は小学生（8～10 歳）1,037 名である（男子 517 名，女子 520 名）．足部のアーチ形成には肥満が影響するため^[21]，ローレル指数別に解析を進めた．男子の痩せ（ローレル指数<115）は96名（18.6%），標準（115-145）は348名（67.3%），肥満（>145）は73名（14.1%）であった．女子の痩せは116名（22.3%），標準は340名（65.4%），肥満は64名（12.3%）であった．運動機能は小学校で実施されている新体力テストから，反復横跳び，50m 走，立ち幅跳びに着目した．

②インソールによる介入効果の調査（パイロットスタディ）の対象者は小学生32名である．②の対象者はフットプリントデータより，踵骨が小さい，扁平足，舟状骨が低下し横に出っ張っている等の児童とした（図3）．インソールによる介入期間は4ヶ月間とし，小学3年次（8～9 歳）と4年次（9～10 歳）に足部計測を行った．本研究では踵部のカップが深いインソールを用いた（コンフォートジュニア：シダス社）．

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：R0306）．計測はA市の全校（8校）の小学校において行われ，同意が得られたすべての小学年生を対象とした．実験フィールド先の小学校の同意も得て行った．除外基準は，それぞれの計測に参加できなかった児童，足部の骨折などの整形外科的問題を有している児童とした．

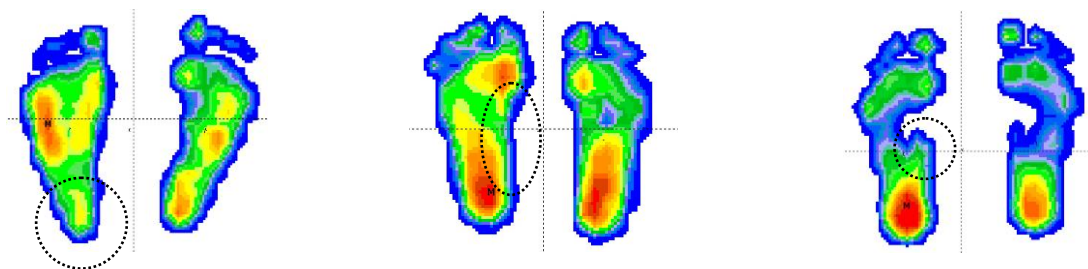


図3 インソール介入対象児童の足部の一例

3-2 足部骨格マルチセンシングシステム計測

本研究で着目している 3 次元足部骨格指標を図 4 に示した. 図 4(a)より, Navicular height (NH: 舟状骨高) は舟状骨から床面までの距離である. 図 4(b)より, Second toe-heel-navicular angle (SHN angle: 舟状骨横変位角度), Axis of the Bone Distance (ABD: 骨軸距離 (距骨頭部座標点を床面に投影させたときの踵-第 2 指先端ラインからの距離))である.

舟状骨の解剖学的動作は真下に動作するものではなく, 横方向にも動くため, 本開発システムでは従来の高さ方向に加え, 舟状骨を含めた足部の横変位に着目している. SHN は舟状骨が横に出っ張っているほど角度が大きく足部の回内運動の増大, ABD は骨格全体の内側への傾きを意味する.

3 点の使用のうち距離の指標は足長の影響を受ける. そこで本指標は, 足長で正規化し, 100 を乗ずることとした.

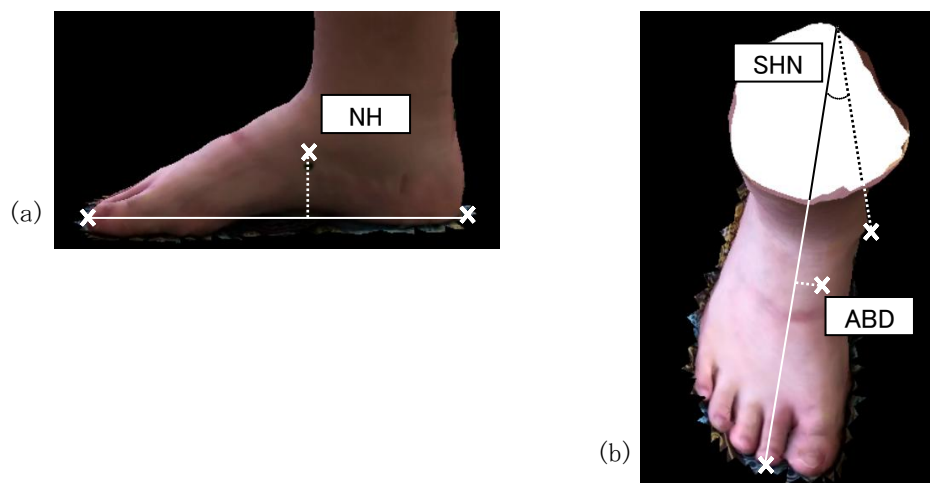


図 4 3次元足部骨格指標

3-3 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 5 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. 床面への接地状況からの評価指標として, SI (Staheli index)を用いた. SI は中足部 Midfoot (足部の最小幅: 線分 a-b), 後足部 Heel (踵の最大幅: 線分 c-d) から求める指標 (Midfoot (線分 a-b) $\times$ 100 / Heel (線分 c-d)) 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.

さらに, 足部中心線 (第 2 指-踵) を 7 等分した前方 1 領域目の足指部面積, 5 等分した前方 2 領域目を前足部面積の接地面積も評価指標とした.



図 5 フットプリントの計測風景と評価指標

3-4 下肢筋力の計測

下肢筋力の計測には足指力計測器^[22]を用いた。図 6 に足指力の計測風景を示した。足指力計測器では、足拇指と足第 2 指間の挟力を計測し、下腿の筋、特に前脛骨筋など膝から下の筋力の評価を行った。計測方法は、椅座位にて膝関節角度、足関節角度が約 90 度になるよう座り計測を行った。



図 6 足指力計測器

3-6 統計解析

統計解析には SPSS (version30, IBM 社) を用いた。ローレル指数別の運動機能の解析、足部の筋骨格系の四分位別の運動機能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した。

4 結果

4-1 ローレル指数と運動機能の関係

表 1 にローレル指数別の反復横跳び、50m 走、立ち幅跳びの結果を示した。表 1 より、男子は全種目、女子は 50m 走、立ち幅跳びでローレル指数間で有意に差があった。

表 1 ローレル指数と運動能力の関係

	男子				女子			
	痩せ	標準	肥満	p value	痩せ	標準	肥満	p value
反復横跳び[回]	38.7±7.7	37.3±7.9	34.5±8.4	0.003	35.5±7.7	34.6±7.3	33.3±5.9	0.112
50m走[秒]	9.7±0.8	9.8±0.9	10.6±1.4	<0.001	10.0±0.9	10.4±1.1	10.8±0.9	<0.001
立ち幅跳び[cm]	147.1±18.0	141.8±19.1	129.9±19.1	<0.001	138.6±16.9	130.8±19.1	122.7±18.3	<0.001

4-2 足部の筋骨格系と運動機能の関係

ローレル指数間で運動機能に差があったため、足部の筋骨格系と運動機能の関係は標準群 688 名（該当率 66.8%（男子 348 名、女子 340 名））に着目し解析を進めた。

図 7 に足指力、図 8 にフットプリントデータより足指と前足部の合計面積の四分位別に 50m 走の結果を示した。図 7, 8 より、足指力が高い、足指と前足部の接地面積が大きいほど 50m 走は有意に速いことがわかった。反復横跳び、立ち幅跳びでも同様の結果が得られた。

SI、NH rate（舟状骨高率）、ABD の足部の接地状況と骨格の観点からの有意差は確認できなかった。SHN では男子のみ有意差が確認できた。

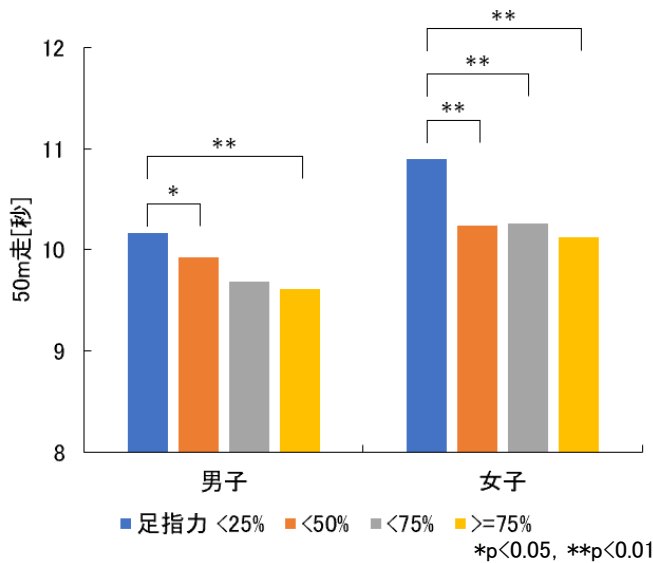


図7 足指力四分位別の50m走

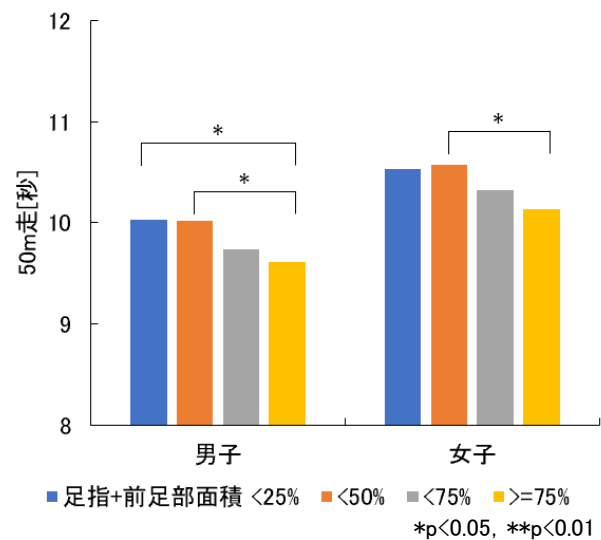


図8 足指+前足部面積四分位別の50m走

4-3 中足部の骨格構造と運動機能の関係

先行研究ではNH（舟状骨高）を中足部の扁平化の指標として採用している^[5,6]。そこで本研究ではNH rate（舟状骨高率）と反復横跳びの四分位別に足部骨格の横変位であるSHN（舟状骨横変位角度）、ABD（骨軸距離）を①舟状骨高率が高く、反復横跳びの回数が多いグループ（扁平足ではないグループ）、②舟状骨高率が低く、反復横跳びの回数が少ないグループ（扁平足グループ）の2群に分けて解析した。下記に結果を示した。

- 【男子】① SHN: 25.0度, ABD: 0.8cm
 ② SHN: 26.5度, ABD: 1.3cm
- 【女子】① SHN: 24.6度, ABD: 0.9cm
 ② SHN: 25.5度, ABD: 1.1cm

4-4 インソール介入による変化

図9に3年次から4年次の1年間のフットプリントの変化を示した。図9より、3年次と比較し、中足部の落ち込みが抑えられていることがわかった。さらに、(a)の児童は踵の幅、面積も増加、(b)の児童は足指の接地面積の増加の確認もできた。加えて、足指力の向上も確認できた。

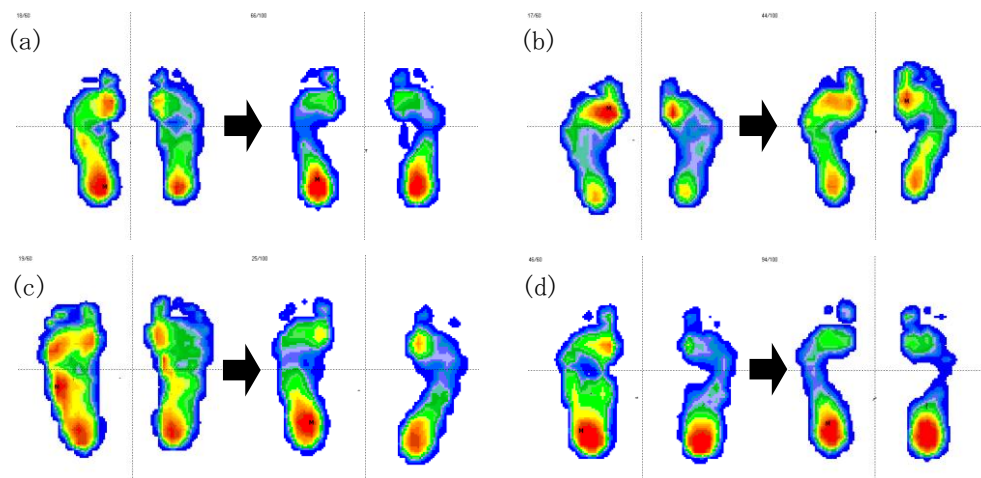


図9 インソール介入によるフットプリントの変化

5 考察

本研究では、①足部の筋骨格系の発達に重要な運動機能に着目し、小学生の足部骨格、下肢筋力（足指力）、足裏の床面への接地状況の横断調査、②インソール介入による効果について縦断調査を行った。

筋力や骨格系の発達に伴い、足裏のアーチ（前足部アーチ、内側縦アーチ、外側縦アーチ）の機能も向上する^[11]。足裏のアーチは 10 歳頃までに形状が完成する^[12]が、歩行・走行時の推進力を得るためのウィンドラス機構がどのように成長し、機能が向上するか明らかではない。

ウィンドラス機構の機能を低下させる要因に扁平足が挙げられる^[23]。本研究では、従来の扁平足の評価指標である舟状骨の高さの指標単体と運動機能の関係は確認できなかった。我々が着目している足部の横変位を示す SHN（舟状骨横変位角度）、ABD（骨軸距離）を組み合わせることで、足部の過回内と運動機能の関係を明らかにできた。舟状骨の解剖学的動作は真下に動作するものではなく、横方向にも動き、3 次元的に変位する。そのため、SHN の増大は舟状骨の回内運動の増大を意味している。すなわち、舟状骨が低く、内側に倒れている足部はウィンドラス機構が働かず、足部の剛性が高まらない結果、運動機能が低い傾向にあることがわかった。

図 7 からは足指力が高い群、図 8 からは足指と前足部の接地面積は大きいほど反復横跳び、50m 走、立ち幅跳びの成績が有意に高い結果となった。足指力は前後方向の姿勢制御を行う前脛骨筋や足底腱膜等の膝下の筋力に加え、足指の可動性・巧緻性を表している^[22]。そして、足部の剛性を高めるウィンドラス機構は足指の背屈により機能する。そのため、足指機能が高い児童は足部の剛性が高まり、運動機能が高いことが明らかになった。以上より、足部骨格、下肢筋力の定量的な計測により、ウィンドラス機構の機能性の発達状況の観察が可能となったと考える。

発達は決められた時期にしか行われぬ。小学 3、4 年生（8～10 歳）は踵骨、中足部の発達に重要な時期である。踵骨が小さい児童は靴の中で踵が左右に動き、曲がっている踵を靴で支えられず、より曲がると予測できる。また、踵骨の外反は中足部の発達に影響がある。そこで本研究ではカップがあるインソールを提供し、靴とのフィッティングを高めた。図 9 より、踵骨の動きを抑えることは、中足部の動きを抑えることにつながり、中足部の筋機能の向上につながった。その結果、素足の状態でも中足部の変化が確認できた。すなわち、舟状骨につながっている後脛骨筋の筋機能向上による内側縦アーチの形成につながったと考える。

筋骨格系の基礎が完成する小学校期に足部の定量的な計測・評価を行い、データに基づいた支援を行うことが、将来の外反母趾、変形性膝関節症の予防につながる可能性が明らかになった。

6 結論

本研究では筋骨格系の発達期にある小学生を対象に運動機能の観点から足部の発達状況の調査、中足部の骨格形成が不十分な扁平足の児童へのインソールによる介入調査を行った。本研究で開発したスマートフォンを用いた足部骨格マルチセンシングシステムにより、これまで検討できなかった足部の 3 次元の解剖学的動作の計測が可能となった。その結果、足部の変形を誘発する回内が大きい児童は運動機能が低い傾向にあることがわかった。

以上より、身体づくり、足部の変形予防の観点から足部の発達と運動機能と組み合わせた評価は、足部の機能の評価につながることを示唆された。

【参考文献】

- [1] 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.
- [2] Flores DV, Mejía Gómez C, Fernández Hernando M, Davis MA, Pathria MN. Adult Acquired Flatfoot Deformity: Anatomy, Biomechanics, Staging, and Imaging Findings. *Radiographics*. 39(5):1437-1460, 2019.

- [3] Müller S, Carlsohn A, Müller 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.
- [4] Van Boerum DH, Sangeorzan BJ. Biomechanics and pathophysiology of flat foot. *Foot Ankle Clin*. 8(3):419–30, 2003.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] Gilmour JC, Burns Y. The measurement of the medial longitudinal arch in children. *Foot Ankle Int*. 22(6):493–8, 2011.
- [8] Staheli LT. Evaluation of planovalgus foot deformities with special reference to the natural history. *J Am Podiatr Med Assoc*. 77(1):2–6, 1987.
- [9] 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.
- [10] Lee YC, Lin G, Wang MJ. Comparing 3D foot scanning with conventional measurement methods. *J Foot Ankle Res*. 7(1):44, 2014.
- [11] 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.
- [12] Rodriguez N, Volpe RG. Clinical diagnosis and assessment of the pediatric pes planovalgus deformity. *Clin Podiatr Med Surg*. 27(1):43–58, 2010.
- [13] Cappello T, Song KM. Determining treatment of flatfeet in children. *Curr Opin Pediatr*. 10(1):77–81, 1998.
- [14] Uden H, Scharfbillig R, Causby R. The typically developing paediatric foot: how flat should it be? A systematic review. *J Foot Ankle Res*. 15;10:37, 2017.
- [15] Yamashita T, Sato M, Ata S, Yamashita K. Predictors of flatfoot in 11–12-year olds: a longitudinal cohort study. *Biomed Eng Online*. 21;23(1):83, 2024.
- [16] Esterman A, Pilotto L. Foot shape and its effect on functioning in Royal Australian Air Force recruits. Part 2: Pilot, randomized, controlled trial of orthotics in recruits with flat feet. *Mil.Med*. 170:629–33, 2005.
- [17] Asgaonkar B, Kadam P. Effectiveness of valgus insole on pain, gait parameters and physiological cost index of walking in flat feet in 5–15 years. *INDIAN J PHYSIOTHER OCCUP THER*. 6:85–9, 2012.
- [18] Whitford D, Esterman A. A randomized controlled trial of two types of in-shoe orthoses in children with flexible excess pronation of the feet. *Foot Ankle Int*. 28:715–23, 2007.
- [19] Oerlemans LNT, Peeters CMM, Munnik-Hagewoud R, Nijholt IM, Witlox A, Verheyen CCPM. Foot orthoses for flexible flatfeet in children and adults: a systematic review and meta-analysis of patient-reported outcomes. *BMC Musculoskelet Disord*. 7;24(1):16, 2023.
- [20] 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.
- [21] Bordin D, De Giorgi G, Mazzocco G, Rigon F. Flat and cavus foot, indexes of obesity and overweight in a population of primary-school children. *Minerva Pediatr*. 53(1):7–13, 2001.
- [22] Yamashita K, Umezawa J, Nomoto Y, Ino S, Ifukube T, Koyama H, Kawasumi M. The role of toe-gap force for the evaluation of falling risk on the elderly. *IUPESM2006*. 14:405–408, 2006.
- [23] Lucas R, Cornwall M. Influence of foot posture on the functioning of the windlass mechanism. *Foot(Edinb)*. 30:38–42, 2017.

〈発 表 資 料〉

題 名	掲載誌・学会名等	発表年月
Predictors of flatfoot in 11- 12 year olds: A longitudinal cohort study	BioMed Eng OnLine. 23(83): 1-10	2024 年 8 月
小学生の足部の発達と基礎的運動能力との関連	第 3 回 日本フットケア・足病医学会 関東・甲信越地方会	2024 年 4 月
足部骨格 3D 計測システムとフットプリントによる小学生の足部の発達と運動特性の解析	第 63 回 日本生体医工学会大会	2024 年 5 月
足部骨格 3D 計測システム開発による小学生の内側縦アーチ発達不全の抽出	LIFE2024 (第 39 回ライフサポート学会)	2024 年 9 月