

裸足と靴着用の違いが歩行および走行時の動作 および接地様式に及ぼす影響

松田 繁樹*・増田 剛**・内藤 譲***

アブストラクト邦訳

本研究の目的は様々な速度条件下（歩行では2km/h、5km/h、走行では8km/h、12km/h）における歩行および走行時の裸足と靴着用の違いが動作および接地様式に及ぼす影響を明らかにすることであった。被験者は男子大学生25名であった（年齢：21.0 ± 1.2歳）。被験者は普段から着用している室内用シューズを履いた条件（靴条件）と裸足の条件（裸足条件）の2条件でトレッドミル上を歩行および走行した。動作については三次元動作分析を行った。ハイスピードカメラで撮影した映像から接地様式の分析を行った。動作においては、歩隔、遊脚期、立脚期、遊脚率、平均膝関節屈曲角度、最大膝関節屈曲角度、平均股関節屈曲角度、最大股関節屈曲角度、身体重心上下動で裸足条件と靴条件の間に有意差が認められた。接地様式においては2km/h、12km/hで裸足条件と靴条件に有意差がみられ、両速度とも中足部接地は裸足条件が多く、後足部接地は靴条件が有意に多かった。結論として、トレッドミル上の歩行および走行において裸足と靴着用の違いが多くの動作変数および接地様式に影響を及ぼす可能性が示唆された。また、接地様式の条件間差の有無は歩行および走行速度により異なることが明らかにされた。

Differences in Movement and Ground Contact Patterns between Barefoot and with Shoes during Walking and Running

Shigeki MATSUDA · Tsuyoshi MASUDA · Yuzuru NAITO

Abstract

This study examined the effects of the difference in movement and ground contact patterns between bare feet and with shoes during walking and running under different speeds (2 km/h, 5 km/h for walking and 8 km/h, 12 km/h for running). The study involved 25 male university students with an average age of 21.0 ± 1.2 years. Participants performed walking and running on a treadmill under two conditions: wearing their usual indoor shoes (shoe condition) and barefoot (barefoot condition). Three-dimensional motion analysis and a high-speed camera were used for data collection and analysis. Results revealed significant differences in various motion parameters between the barefoot and shoe conditions, including foot distance, swing phase duration, stance phase duration, swing phase ratio, average knee joint flexion angle, maximum knee joint flexion angle, average hip flexion angle, maximum hip flexion angle, and vertical movement of the body's center of gravity. Regarding the ground contact pattern, a notable distinction was observed between the barefoot and shoe conditions at 2 km/h and 12 km/h, respectively. Midfoot contacts were significantly more frequent in the barefoot condition, and rearfoot contacts were significantly

* 滋賀大学
** 草津市教育委員会事務局スポーツ推進課
*** 岐阜聖徳学園大学

more frequent in the shoe condition at both walking and running speeds. In conclusion, our findings indicate that the difference between bare feet and shoes when walking or running on a treadmill can significantly influence multiple motion variables and ground contact styles. Additionally, the variation in ground contact style between the barefoot and shoe conditions appears to be speed-dependent during both walking and running.

キーワード：ベアフット、シューズ、ランニング、動作分析、接地パターン

I. 序論

現代のランニングシューズが発明されたのは1970年代頃であり、現代ではほとんどの人が昔よりクッション性の高い靴を履いて移動している。しかし、靴を履いて移動することのデメリットも指摘されている。Lieberman et al. (2010) は靴を履いて後足部（踵側）で地面を蹴るランナーは裸足で前足部（つま先側）で地面を蹴るランナーよりも地面からの衝撃力が大きいこと、そして、そのことにより現代の多くのランナーが経験している衝撃に関連した怪我の一部は靴の影響があるかもしれないと指摘している。歩行および走行中の裸足と靴着用の違いについては様々な観点から検討されており（Franklin et al., 2015）、その中に動作や接地様式について検討した研究もある。例えば、動作変数については、DeWit et al. (2000) は普段から靴を着用して走っているランナーは裸足で走ったときにストライドが短くなり、ピッチが高まることを報告している。DeWit et al. (2000) の報告のように、裸足での歩行および走行は靴着用時よりもストライドが小さくなり、ピッチが高まることは多くの研究で明らかになっている（Lythgo et al., 2009; Oeffinger et al., 2009; Moreno-Hernandez et al., 2010; Wolf et al., 2008; Keenan et al., 2011; Wirth et al., 2011）。わが国においても、水島ら（2016）が児童を対象に行った研究において、裸足時は靴着用時よりもストライドが小さく、ピッチが高くなったと報告されている。その他、裸足時は靴着用時より、初期接地時の足関節底屈の増加（Zhang et al., 2013; Oeffinger et al., 2009）、接地時間の減少（水島ら, 2016）、両脚支持時間の減少（Lythgo et al., 2009）、立脚時間の減少（Lythgo et al., 2009; Moreno-Hernandez et al., 2010; Zhang et al., 2013）、およびストライド時間の減少（Lythgo et al., 2009; Wolf et al., 2008）などが起こると報告されている。

歩行および走行中の裸足と靴着用の違いとして接地様式についても検討が進められている。Lieberman et al. (2010) は普段シューズで走っているランナーが裸足で走った際は後足部接地（RFS: Rear-foot Strike）から前足部接地（FFS: Fore-foot Strike）および中足部接地（MFS: Mid-foot Strike）に接地様式が変わることを報告している。わが国でも水島ら（2016）が児童を対象に靴着用時と裸足時の接地様式の違いを検討している。その結果、靴着用時は多くの児童がRFSであること、裸足時はFFSおよびMFSの割合が増加することを報告している。

このように裸足と靴の違いに関する研究は様々な観点から進められているが、動作分析を行っている研究はそれほど多くなく、靴着用が下肢の生体力学に及ぼす影響は不明な点が多くある（Keenan et al., 2011）。また、先行研究ではサンプルサイズが小さいことや、対象集団や測定条件（裸足と靴下、裸足と運動靴、裸足とサンダルなど）が様々であること、靴の条件が統制されていないことなど、各研究で不足している点があり、比較可能な研究が十分そろっていない。また、我が国で行われた研究は非常に少なく、我が国では研究が進んでいない状況である。海外とは靴着用の文化や生活様式が異なるため、我が国でも同様の検討を行う必要がある。加えて、歩行および走行時の靴と裸足の違いを検討した先行研究では、多くの研究で被験者の自由な選択により速度が決定されている（Franklin et al., 2015）。速度が上がるにつれて、接地様式が変わる可能性があることと報告されているため（Lieberman et al., 2010; Keller et al., 1996）、それに伴って動作が変わる可能性もある。速度条件の違いも考慮に入

れ、裸足と靴着用の違いが動作および接地様式に及ぼす影響を検討する必要がある。本研究の目的は様々な速度条件下（歩行では2km/h、5km/h、走行では8km/h、12km/h）における歩行および走行時の裸足と靴着用の違いが動作および接地様式に及ぼす影響を明らかにすることであった。

II. 方法

1. 被験者

被験者は男子大学生 25 名であった（年齢:21.0 ± 1.2 歳、身長:172.8 ± 6.4cm、体重:65.0 ± 8.0kg）。被験者は整形外科疾患や痛みを伴う障害がない者であった。すべての被験者に事前に本研究の目的や趣旨を十分に説明し、参加の同意を得た。本研究の実験プロトコルは滋賀大学研究審査委員会に承認されている（承認番号：A21041）。

2. 測定方法

被験者は普段から着用している室内用シューズを履いた条件（靴条件）と裸足の条件（裸足条件）の2条件でトレッドミル（WalkingPad X21、King Smith 社製）上を歩行および走行した。速度については、歩行は2km/h および 5km/h、走行は8km/h および 12km/h と設定した。動作撮影のために2試技（靴条件、裸足条件）、接地様式の撮影のために2試技（靴条件、裸足条件）を行う必要があったため、各被験者は計4試技を行った。すべての試技で2km/h、5km/h、8km/h、12km/hの順番で測定を行った。動作分析は各速度条件に到達した後の5秒後から10秒間を対象とした。

1) 三次元動作分析

被験者は専用反射マーカー計39点（頭部前方（左、右）、頭部後方（左、右）、胸骨上縁、剣状突起、肘関節外側（左、右）、前腕（左、右）、手関節橈側側（左、右）、手関節尺骨側（左、右）、上前腸骨棘（左、右）、大腿（左、右）、膝関節外側（左、右）、下腿（左、右）、足関節外果（左、右）、第2中足骨（左、右）、頭部後方（左、右）、第7頸椎、肩峰（左、右）、右肩甲骨、第10胸椎、上後腸骨棘（左、右）、第2中手骨（左、右）、踵（左、右））を貼付したスーツを着用し、歩行および走行を行った。8台の光学式モーションキャプチャカメラで構成される3次元動作解析システム（OptiTrack Flex3、アキュイティー株式会社製）を用いて、各試技における反射マーカーの3次元座標を計測した。実験座標系は右手系を用い、進行方向に対して進行方向をX軸、横方向をY軸、鉛直上方向をZ軸とした。カメラのフレームレートは100Hzであった。なお、キャリブレーション（較正）の結果は、5段階評価で最も高度なExceptionalであった。各試技の分析には専用動作分析ソフトウェアであるSKYCOM3.5（アキュイティー株式会社製）を用いた。動作分析の評価変数は表1の通りである。

2) 接地様式の判定

歩行および走行時の接地様式を判別するため、ハイスピードカメラ（Lumix dc-fz85、パナソニック社製）を用いて、歩行および走行中の足部を側方から撮影した。得られた映像を2名の検者がそれぞれ確認し、接地様式を判定した。Lieberman et al. (2010) の分類を参考に、踵が最初に接地する踵接地（RFS）、踵と母指球が同時に接地する中足部接地（MFS）、踵を降ろす前に母指球で接地する前足部接地（FFS）の3種類に分類した。検者間で異なる判定になった場合は合議によって決定した。初回判定時（合議前）の検者間信頼性を検討するために級内相関係数を算出した結果、ICC（2、1）は0.92であった。

3. 統計解析

すべての評価変数において基本統計量（平均値、標準偏差）を算出した。歩行および走行時の裸足と靴着用の違いおよび速度の違いが動作評価変数に及ぼす影響を検討するため、二要因ともに対応のある二要因分散分析を行った。有意差が認められた場合、多重比較検定を行った。歩行および走行時の裸足と靴着用の違いが接地様式に及ぼす影響を検討するために χ^2 検定を行った。有意差が認められた場合、残差分析を行った。統計的有意水準は5%とした。

表1 動作分析の評価変数

評価変数	説明
歩幅(m)	一方の足が着床してからもう一方の足が着床するまでの進行方向距離 (左右平均値)
歩隔 (cm)	左右の足の間の距離
歩行周期 (s)	一方の足が着床してからもう1度着床するまでの時間 (左右平均値)
遊脚期 (s)	足が離床してから着床するまでの時間 (左右平均値)
立脚期 (s)	足が着床してから離床するまでの時間 (左右平均値)
遊脚率 (%)	歩行周期における遊脚期の割合
平均足関節角度 (deg)	足関節の角度の平均値 (立位制御時を0とし、底屈をプラス、背屈をマイナス)
最大足関節背屈角度 (deg)	足関節が背屈された最大角度 (立位制御時を0とし、底屈をプラス、背屈をマイナス)
最大足関節底屈角度 (deg)	足関節が底屈された最大角度 (立位制御時を0とし、底屈をプラス、背屈をマイナス)
平均膝関節屈曲角度 (deg)	膝関節の角度の平均値 (立位制御時を0とし、屈曲をプラス、伸展をマイナス)
最大膝関節屈曲角度 (deg)	膝関節が屈曲された最大角度 (立位制御時を0とし、屈曲をプラス、伸展をマイナス)
平均股関節屈曲角度 (deg)	股関節の角度の平均値 (立位制御時を0とし、屈曲をプラス、伸展をマイナス)
最大股関節屈曲角度 (deg)	股関節が屈曲された最大角度 (立位制御時を0とし、屈曲をプラス、伸展をマイナス)
最大股関節伸展角度 (deg)	股関節が伸展された最大角度 (立位制御時を0とし、屈曲をプラス、伸展をマイナス)
身体重心上下動 (cm)	重心位置の上下変位 (最大値-最小値)

Ⅲ. 結果

表2には動作分析の評価変数の平均値、標準偏差、二要因分散分析の結果を示している。すべての評価変数において速度の要因で有意差が認められた。歩隔、遊脚期、立脚期、遊脚率、平均膝関節屈曲角度、最大膝関節屈曲角度、平均股関節屈曲角度、最大股関節屈曲角度、身体重心上下動には裸足・靴の要因で有意差が認められた。遊脚率、平均足関節角度、および最大膝関節屈曲角度には有意な交互作用が認められた。

表3は各速度条件における接地様式の人数、割合、および χ^2 検定の結果を示している。2km/hおよび12km/h条件で有意差が認められた。両条件において、MFSの割合は裸足条件が靴条件より、RFSの割合は靴条件が裸足条件より有意に多かった。

Ⅳ. 考察

歩行および走行の速度が上がるにつれて、すべての動作評価変数で有意差が認められた(表2)。歩隔、関節角度に関する変数(足関節、膝関節、股関節)および身体重心上下動は速度が上がることにより有意に大きくなったため、速度が上がることにより全体的に大きな動作に変容したと考えられる。

裸足条件と靴条件で差が認められたのが歩隔、遊脚期、立脚期、遊脚率、平均膝関節屈曲角度、最大膝関節屈曲角度、平均股関節屈曲角度、最大股関節屈曲角度、身体重心上下動であった。歩隔は靴条件が裸足条件より有意に大きかったが、この妥当な解釈は難しい。先行研究でも歩隔について検討した研究はほとんどない。推測となるが、靴を履くことによって足部の横幅が増すことになり、左右足の間隔が狭くなる。左右足の間隔が狭くなることにより歩行および走行中に足部同士が接触する可能性が増すため、靴着用時はそれを無意識に避けていた可能性も考えられる。

遊脚期は靴条件が裸足条件より、立脚期は裸足条件が靴条件より有意に高値を示した。Moreno-Hernandez et al.(2010)は6歳~13歳の120人の子どもの歩行を履物の有無の観点から分析している。靴着用時は立脚期の割合が裸足より有意に大きくなり、遊脚期の割合は裸足より小さくなったと報告

表 2 動作評価変数の二要因分散分析の結果 (n=25)

評価変数		裸足条件				靴条件				二要因分散分析			多重比較検定
		2km/h	5km/h	8km/h	12km/h	2km/h	5km/h	8km/h	12km/h	F	p		
歩幅(m)	M	0.39	0.67	0.79	1.09	0.41	0.65	0.79	1.11	裸足・靴	0.39	0.54	(2)<(5)<(8)<(12)
	SD	0.05	0.07	0.07	0.09	0.06	0.09	0.06	0.09	速度	1080.02	0.00*	
										交互作用	2.13	0.10	
歩隔 (cm)	M	15.60	14.12	13.35	13.02	16.25	14.63	13.99	13.69	裸足・靴	7.02	0.01*	裸足<靴
	SD	2.76	2.63	1.99	1.99	2.07	2.00	1.55	1.69	速度	42.15	0.00*	(8), (12)<(5)<(2)
										交互作用	0.14	0.93	
歩行周期 (s)	M	1.39	0.96	0.71	0.65	1.40	0.94	0.71	0.67	裸足・靴	0.00	1.00	(12)<(8)<(5)<(2)
	SD	0.17	0.11	0.06	0.05	0.21	0.13	0.05	0.06	速度	574.00	0.00*	
										交互作用	0.42	0.74	
遊脚期 (s)	M	0.71	0.56	0.51	0.51	0.79	0.59	0.53	0.52	裸足・靴	8.66	0.01*	裸足<靴
	SD	0.13	0.08	0.05	0.05	0.16	0.09	0.04	0.05	速度	86.20	0.00*	(12),(8)<(5)<(2)
										交互作用	2.07	0.11	
立脚期 (s)	M	0.67	0.40	0.20	0.15	0.61	0.35	0.18	0.15	裸足・靴	5.12	0.03*	靴<裸足
	SD	0.10	0.08	0.04	0.03	0.12	0.11	0.04	0.03	速度	718.32	0.00*	(12)<(8)<(5)<(2)
										交互作用	2.92	0.04*	
遊脚率 (%)	M	51.25	57.98	71.70	77.75	56.13	63.28	75.07	78.22	裸足・靴	9.19	0.01*	(2),(5),(8): 裸足<靴
	SD	5.93	6.71	4.79	4.22	7.05	8.96	5.00	3.69	速度	264.90	0.00*	裸足: (2)<(5)<(8)<(12)
										交互作用	3.05	0.03*	靴: (2)<(5)<(8)<(12)
平均足関節角度 (deg)	M	2.02	4.30	4.18	6.89	2.20	4.86	4.90	6.10	裸足・靴	0.14	0.71	裸足: (2)<(5),(8)<(12)
	SD	2.99	2.95	4.79	5.81	2.55	2.59	4.66	5.64	速度	16.04	0.00*	靴: (2)<(5),(8),(12)
										交互作用	3.51	0.02*	
最大足関節背屈角度 (deg)	M	11.08	9.94	16.50	17.44	10.89	10.49	16.35	17.03	裸足・靴	0.01	0.94	(2),(5)<(8),(12)
	SD	2.70	3.52	2.78	4.31	3.04	3.88	3.30	2.90	速度	68.30	0.00*	
										交互作用	0.73	0.54	
最大足関節底屈角度 (deg)	M	16.54	23.04	29.50	33.39	16.63	24.41	28.44	31.36	裸足・靴	0.17	0.68	(2),(5)<(8),(12)
	SD	5.67	5.59	10.25	9.76	5.12	5.12	9.28	10.90	速度	41.08	0.00*	
										交互作用	1.23	0.30	
平均膝関節屈曲角度 (deg)	M	13.86	19.89	30.92	37.00	16.68	21.73	33.28	39.69	裸足・靴	26.39	0.00*	裸足<靴
	SD	4.11	3.43	4.53	5.25	4.50	4.21	5.13	6.37	速度	371.63	0.00*	(2)<(5)<(8)<(12)
										交互作用	0.98	0.41	
最大膝関節屈曲角度 (deg)	M	52.90	61.07	74.75	92.67	57.46	64.20	80.02	99.77	裸足・靴	39.23	0.00*	(2),(5),(8),(12): 裸足<靴
	SD	5.67	4.60	7.75	12.15	6.42	5.44	9.90	12.83	速度	303.61	0.00*	裸足: (2)<(5)<(8)<(12)
										交互作用	3.59	0.02*	靴: (2)<(5)<(8)<(12)
平均股関節屈曲角度 (deg)	M	7.74	10.18	13.93	15.58	9.74	13.31	16.61	18.17	裸足・靴	4.16	0.00*	裸足<靴
	SD	3.58	4.02	3.91	4.30	3.68	5.10	5.61	5.34	速度	1.22	0.00*	(2)<(5)<(8)<(12)
										交互作用	0.76	0.81	
最大股関節屈曲角度 (deg)	M	24.67	28.43	38.21	44.60	27.38	32.34	40.72	50.32	裸足・靴	9.85	0.00*	裸足<靴
	SD	4.07	5.78	11.31	6.03	5.16	6.25	8.44	12.42	速度	75.15	0.00*	(2)<(5)<(8)<(12)
										交互作用	0.85	0.47	
最大股関節伸展角度 (deg)	M	10.35	14.12	15.20	20.86	8.08	11.71	13.97	18.22	裸足・靴	2.90	0.10	(2)<(5),(8),(12)
	SD	5.32	6.76	8.93	10.06	4.59	6.84	11.53	10.26	速度	16.92	0.00*	(5)<(12)
										交互作用	0.20	0.89	
身体重心上下動 (cm)	M	2.47	4.09	10.82	11.21	2.63	4.68	11.68	12.07	裸足・靴	16.85	0.00*	裸足<靴
	SD	0.58	1.00	1.67	2.23	0.57	1.12	2.13	2.40	速度	367.56	0.00*	(2)<(5)<(8),(12)
										交互作用	2.11	0.11	

注) *: p<0.05, 多重比較検定の () は速度を示す.

している。Zhang et al. (2013) は、10 人の成人男性を対象に、4 つの履物条件 (ランニングシューズ、ビーチサンダル、サンダル、裸足) の違いが歩行時の運動学的および運動力学的変数に及ぼす影響を検討している。その結果、立脚時間は裸足がランニングシューズも含めた他の 3 条件より有意に短かつ

表3 各条件の接地様式 (n=25)

速度	接地様式					χ^2 検定		残差分析
			FFS	MFS	RFS	χ^2	p	
2km/h	裸足	人数	5	15	5	15.83	0.00*	MFS:靴<裸足 RFS:裸足<靴
		%	20.0	60.0	20.0			
	靴	人数	1	5	19			
		%	4.0	20.0	76.0			
5km/h	裸足	人数	2	2	21	2.53	0.28	
		%	8.0	8.0	84.0			
	靴	人数	0	1	24			
		%	0.0	4.0	96.0			
8km/h	裸足	人数	8	9	8	2.93	0.23	
		%	32.0	36.0	32.0			
	靴	人数	5	6	14			
		%	20.0	24.0	56.0			
12km/h	裸足	人数	11	9	5	14.05	0.00*	MFS:靴<裸足 RFS:裸足<靴
		%	44.0	36.0	20.0			
	靴	人数	5	2	18			
		%	20.0	8.0	72.0			

注) *: p<0.05

たと報告している。すなわち、本結果は前述の先行研究と異なる傾向であった。実験方法、被験者の年齢、国籍等が本研究と異なるため、それらが影響しているのかもしれない。Zhang et al. (2013) の研究の実験条件は、17m の歩行路を一定のスピード (1.23 ~ 1.36m/s) で歩くというものであった。速度を条件間で統一しているのは本研究と同様であるが、本研究ではトレッドミル上での歩行および走行であるため、先行研究との実験条件の違いが結果に影響している可能性がある。トレッドミル上の歩行および走行では前方には進むことができないため、被験者は立脚時間あるいは遊脚時間をコントロールして、速度に合わせていた可能性がある。身体上下動は靴条件が裸足条件より有意に大きかった。靴着用時は遊脚期に身体を上方へ動かしながら歩行および走行を行った可能性もある。靴着用時の遊脚期の延長は靴のクッション機能を生かした結果なのかもしれない。あるいは、裸足時は着地時の大きな衝撃を避けるため、無意識下で遊脚時の上方への移動を避けているのかもしれない。実験条件の違い (トレッドミルあるいは通常歩行路) が立脚時間および遊脚時間にどれほど影響するかについては今後検討する必要がある。

平均膝関節屈曲角度、最大膝関節屈曲角度ともに裸足条件が靴条件よりも有意に低値であった。Zhang et al. (2013) は、裸足時はランニングシューズ、ビーチサンダル、サンダル着用時と比較して、膝関節可動域が有意に低値であったと報告している。本結果は Zhang et al. (2013) の結果と同様な傾向であった。Zhang et al. (2013) の研究では、接地時の膝関節角度を分析しており、接地時の膝関節屈曲角度は裸足がその他の条件より有意に大きかったと報告している。本研究では接地時の膝関節屈曲角度は分析できていない。局面ごとの動作分析については今後の課題である。

平均股関節屈曲角度および最大股関節屈曲角度は裸足条件が靴条件よりも有意に低値であった。Keenan et al. (2011) は、68 人の若年成人に対してトレッドミル上で約 1.3m/s の歩行を行わせ、裸足と 2 種類の靴で関節モーメントについて比較検討を行った。その結果、股関節伸筋モーメントおよび

股関節屈筋モーメントともに裸足時が靴着用時より有意に小さかったと報告している。本結果からも裸足時は股関節屈曲角度が小さいことが明らかになっており、裸足時と靴着用時では股関節の動きに違いが表れると推測される。本研究では、身体重心上下動が靴着用時が裸足時より大きくなっていった。靴着用時は遊脚期も長かったことから、靴着用時は裸足時より股関節屈曲を伴いながら上方へ動きながら歩行および走行を行っていた可能性もある。

身体重心上下動においては裸足条件が靴条件より有意に低値であった。走行時の重心は足部接地後に前下方に移動し最下点に達したのち、前上方に移動し足部離地後の遊脚期に最上点に達するように上下に移動する(肥田ら, 2016)。靴着用時は裸足時より平均膝関節屈曲角度、最大膝関節屈曲角度、平均股関節屈曲角度、および最大股関節屈曲角度が大きくなっていった。靴着用時は歩行および走行時の下肢の関節の屈曲が大きいことで、身体上下動が大きくなっていったと推察される。裸足時は遊脚期も短かったため、遊脚期の上方への移動も小さかったことが推測され、その結果、身体重心上下動が小さくなった可能性もある。

足関節角度については、平均足関節角度、最大足関節背屈角度、最大足関節底屈角度のいずれも裸足と靴の条件間差は認められなかった。Zhang et al. (2013) は、成人男性 10 名に対し、靴、ビーチサンダル、サンダル、裸足の 4 条件で 1.3m/s の歩行試験を行わせ、動作分析を行っている。その結果、裸足では他のすべての条件と比較して、接地時の足関節底屈角度が有意に大きかったと報告している。Oeffinger et al. (1999) が 7 歳から 10 歳までの 14 名を対象に、裸足と運動靴で歩行動作を比較した研究でも、裸足時は接地時の足関節底屈角度に有意な大きくなっていった。本研究では、各速度条件に達した 5 秒後から 10 秒間の動作を分析をしており、接地時の足関節底屈角度を分析できていないため、先行研究との比較は困難である。本研究では平均足関節角度に条件間差がなかったため、先行研究の知見も踏まえて考えると、接地期以外の局面においては裸足時は足関節底屈角度が靴着用時より小さくなっている可能性も考えられる。局面ごとの動作分析は今後の課題である。

歩幅については裸足条件と靴条件で有意差はみられなかった。Lythgo et al. (2009) は、小学生と若い成人を対象に裸足と靴で自由な速度における歩行について動作分析を行っている。その結果、歩幅は裸足時より靴着用時が有意に大きくなったと報告している。また、Moreno-Hernandez et al. (2010) は、120 人の子ども(6 歳から 13 歳)を対象に歩行における裸足と靴の違いについて検討している。その結果、歩幅は裸足時より靴着用時が有意に大きくなったと報告している。本研究は、これらの先行研究と異なる結果となった。本研究は速度に制限を加えたトレッドミル上での実験であったため、歩行速度に制限を加えていない前述の先行研究とは実験条件が異なる。前述の先行研究(Lythgo et al., 2009; Moreno-Hernandez et al., 2010) では裸足時よりも靴着用時が歩行速度が速くなったと報告されている。すなわち、先行研究の靴条件では歩行速度の増加に伴い、歩幅が大きくなったと考えられる。先行研究との実験条件の違いが本結果に表れていると推察される。

歩行周期については裸足条件と靴条件で有意差はみられなかった。遊脚期および遊脚率は靴条件が裸足条件より、立脚期は裸足条件が靴条件より大きくなっていった。よって、立脚期と遊脚期を足し合わせた指標である歩行周期には差がみられなかったと推測される。Wolf et al. (2008) は 18 人の子どもを対象に裸足時と靴着用時の違いによる歩行パラメータの変化を検討した。その結果、裸足時が靴着用時よりケイデンス(1 分間の歩数)が有意に大きかったと報告している。本研究は速度を規定したトレッドミル上での実験であったため、先行研究と異なり、歩行周期に有意差が認められなかった可能性がある。

接地様式については、2km/h、12km/h において裸足条件と靴条件に MFS と RFS に有意差が認められた。また、有意差はないものの、5km/h および 8km/h においても、裸足条件は FFS および MFS の割合が靴条件よりも多くなっていった(FFS および MFS の割合: 5km/h の時、裸足条件は 16.0%、靴条件は 4.0%、8km/h の時、裸足条件は 68.0%、靴条件は 44.0%)。水島ら(2016) は、児童 94 人に対して裸足と靴の違いが走行時の接地様式に及ぼす影響を検討している。その結果、靴着用時は多くの

児童が RFS であったのに対して、裸足では FFS および MFS の割合が増加したと報告している。本結果は先行研究 (水島ら, 2016) の結果と概ね同様の結果と考えられる。Lieberman et al. (2010) は、RFS は FFS より接地直後の衝撃ピークが大きいことを報告している。そして、Lieberman et al. (2015) は、裸足のランナーは衝撃のピークを避けるために硬い地面において RFS 着地を避けるのではないかと指摘している。本研究では硬い地面であるトレッドミル上での歩行および走行の実験を行った。裸足時において、被験者は接地直後の衝撃ピークを避けるために、接地を足裏の前方部分に移動させていたのかもしれない。一方、5km/h および 8km/h の際には裸足条件と靴条件では接地様式の傾向に違いはみられるものの、統計的な有意差はみられなかった。5km/h の歩行は少し速めの歩行であるため、速度についていくためストライドを確保する必要があり、裸足時であっても強制的に踵接地になっていた可能性が考えられる。そのことにより、裸足条件でも 84.0% が RFS となっており、速い歩行の場合は裸足の場合でも RFS が多くなると考えられる。8km/h の走行では、靴条件でも 44.0% の者が FFS および MFS であり、歩行時の割合とは大きく異なっていた (歩行時は 2km/h 時は 24.0%、5km/h は 4.0%)。12km/h でも FFS および MFS の割合が 28% であるため、走行になると靴条件でも接地が足裏の前方部に移行する者が増えると考えられる。

本研究には幾つかの研究の限界がある。本研究では各速度条件に達した 5 秒後から 10 秒間について動作分析を行った。接地時の足関節角度あるいは膝関節角度は裸足時と靴着用時では異なることと報告されているため (Zhang et al., 2013; Oeffinger et al., 1999)、接地時、立脚期、遊脚期などの局面別の分析が今後必要である。本研究の靴条件においては、被験者は普段から着用している室内用シューズを履いて実験に参加した。着用する靴の条件を一定にすることができていないため、被験者が着用する靴の影響が本結果に何らかの影響を及ぼしている可能性がある。今後は着用する靴の条件を統制する必要があるだろう。

V. まとめ

男子大学生 25 名を対象に、歩行および走行時の裸足と靴着用の違いが動作および接地様式に及ぼす影響を検討した。その結果、動作分析では、歩隔、遊脚期、立脚期、遊脚率、平均膝関節屈曲角度、最大膝関節屈曲角度、平均股関節屈曲角度、最大股関節屈曲角度、身体重心上下動において裸足条件と靴条件で有意差が認められた。接地様式については 2km/h、12km/h で裸足条件と靴条件に有意差がみられた。両速度とも中足部接地は裸足条件が靴条件より、後足部接地は靴条件が裸足条件より有意に多かった。結論として、トレッドミル上の歩行および走行時の裸足と靴着用の違いが動作変数および接地様式に影響を及ぼすことが示唆された。また、接地様式の条件間差は歩行および走行速度により異なることが明らかにされた。

文献

- De Wit, B., De Clercq, D., and Aerts, P. (2000) Biomechanical analysis of the stance phase during barefoot and shod running. *Journal of biomechanics*, 33 (3), 269-278.
- Franklin, S., Grey M. J., Heneghan, N., Bowen, L., and Li, F. X. (2015) Barefoot vs common footwear: a systematic review of the kinematic, kinetic and muscle activity differences during walking. *Gait Posture*, 42 (3), 230-239.
- 肥田直人, 石井慎一郎, 山本澄子 (2016) 足部接地パターンがランニングにおける推進特性に及ぼす影響, *理学療法科学*, 31 (6), 815-818.
- Keenan, G. S., Franz, J. R., Dicharry, J., Della Croce, U., and Kerrigan D. C. (2011) Lower limb joint kinetics in walking: the role of industry recommended footwear, *Gait Posture*, 33 (3), 350-355.
- Keller, T. S., Weisberger, A. M., Ray, J. L., Hasan, S. S., Shiavi, R. G., and Spengler, D. M. (1996) Relationship between vertical ground reaction force and speed during walking, slow jogging, and running. *Clinical biomechanics*, 11

(5), 253–259.

- Lieberman, D. E., Venkadesan, M., Werbel, W. A., Daoud, A. I., D'Andrea S, Davis, I. S., Mang'eni, R. O., and Pitsiladis, Y. (2010) Foot strike patterns and collision forces in habitually barefoot versus shod runners, *Nature*, 463, 531-535.
- Lieberman, D. E., Castillo, E. R., Otarola-Castillo, E., Sang, M. K., Sigei, T. K., Ojiambo, R., Okutoyi, P., and Pitsiladis, Y. (2015) Variation in Foot Strike Patterns among Habitually Barefoot and Shod Runners in Kenya, *PLoS One*, 10 (7), e0131354.
- Lythgo, N., Wilson, C., and Galea, M. (2009) Basic gait and symmetry measures for primary school-aged children and young adults whilst walking barefoot and with shoes, *Gait Posture*, 30 (4), 502-506.
- Moreno-Hernandez, A., Rodriguez-Reyes, G., Quinones-Uriostegui, I., Nunez-Carrera, L., and Perez-SanPablo, A. I. (2010) Temporal and spatial gait parameters analysis in non-pathological Mexican children, *Gait Posture*, 32 (1), 78-81.
- 水島淳, 小山宏之, 大山下圭悟 (2016) 「はだし」が児童の疾走動作に及ぼす影響：接地様式に着目して, 発育発達研究, 73, 13-19.
- Oeffinger, D., Brauch, B., Cranfill, S., Hisle, C., Wynn, C., Hicks, R., and Augsburg, S. (1999) Comparison of gait with and without shoes in children, *Gait Posture*, 9 (2), 95-100.
- Wirth, B., Hauser, F., and Mueller, R. (2011) Back and neck muscle activity in healthy adults during barefoot walking and walking in conventional and flexible shoes, *Footwear Science*, 3 (3), 159-167.
- Wolf, S., Simon, J., Patikas, D., Schuster, W., Armbrust, P., and Doederlein, L. (2008) Foot motion in children shoes – a comparison of barefoot walking with shod walking in conventional and flexible shoes, *Gait Posture*, 27 (1), 51-59.
- Zhang, X., Paquette, M. R., and Zhang S. (2013) A comparison of gait biomechanics of flip-flops, sandals, barefoot and shoes, *Journal of foot and ankle research*, 6 (1): 45.