

一線級アスリートの足部形状と足底圧分布から歩行動作の特異性を探る

柏木 悠

目 次

要約	1
緒言	2
方法	3
結果	5
考察	9
謝辞	10
参考文献	10

一線級アスリートの足部形状と足底圧分布から歩行動作の特異性を探る

研究代表者 柏木悠 (日本体育大学大学院)
共同研究者 秋武寛 (日本体育大学大学院)
共同研究者 袴田智子(国立スポーツ科学センター)
共同研究者 船渡和男(日本体育大学)

要約

【目的】陸上短距離種目のトップスプリンターを含む、一線級アスリートの、足部形状(構造)と歩行中の足底圧分布(機能)を同年代の一般成人と比較することで、アスリートの歩行動作の特異性を検討すること。

【方法】被験者は、アスリート群として体育大学陸上競技部に所属する短距離選手 20 名と、比較対象群として同年度の一般男子学生 15 名とした。被験者は、足部に解剖学的ランドマークを貼付した後、3次元足部スキャナーInfoot(アイウェアラボラトリー社製)を使用し、足部形状計測を行った。足関節における力の伝達に関する定義には、ギア比を求めるために、3次元座標データから、外果最高突点と内果最高突点の中間点(足関節中心:CAJ)と、第1中足骨骨頭点、第5中足骨骨頭点の中間点(中足骨関節:MP)を算出し、CAJ から MP までの距離(CAJ-MP)と CAJ から踵までの水平距離(CAJ-HL)を算出した。歩行動作中の足底圧分布は、13mの歩行路の中心に足底圧計 FootScan(RSScan 社製)を設置し、各被験者の至適速度で5試技歩行動作を行うことにより求めた。足底圧分布データに基づき、歩行支持期中の踵接地から離地までを5つのタイミングと4つのフェイズに区分し、それぞれについての COPxy位置、COPxy速度、時間分析を行った。

【結果および考察】陸上短距離スプリンターの足部形状は、CAJ-MP(足関節中心-MP 関節)間の長さが相対的に大きく、足関節で有効的な力発揮を行えるギア比を有していることが示された。またスプリンターでは、歩行中の足底圧分布 COP 軌跡長は足軸にそって直線的に移動し、Forefoot Contact Phase では、母指部で離地する移動パターンを示した。さらに足部接地直後に COP の前後方向の速度を高めることにより、歩行動作中にスプリント競技にとって合目的な重心移動を行っていることが示唆された。

I. 緒言

ヒトの主な移動手段である2足歩行動作は、日常生活において基本的な動作の一つであり、成長に伴う長い年月の中で生活習慣・様式などの外的な環境要因に影響されながら運動パターンが獲得される。この様に無意識に自動化された歩行パターンは、日常生活以外の運動習慣や、トレーニングの内容によってそのパターンを変化させる可能性は十分に考えられる。そのような観点から、歩行動作の歩容やその様式に関する定性的な観察に基づき、例えば、リハビリテーション領域では、患者の歩容の観察から身体アライメントの矯正やシューズのインソールの改良などが行われている。一方スポーツ現場では、コーチや監督は、トップスプリンターの歩きや歩容をみるだけで、その選手の競技力を推測できるとされている。この様に歩行動作がスプリント能力と関係していることは感覚的に捉えているようである。

正しい歩き方を定義することは困難であるようにヒトの歩行動作は様々である。谷川ら(2008)による、トップスプリンターの走動作と歩行動作の共通性と一般人との違いを示した研究では、スプリンターは特に速歩において身体合成重心(COM)と足部の接地位置を近くし、左右脚の切り替え動作の素早さが、走動作と共通してみられたことを報告している。このことから彼らは、走行と歩行動作は相互にそれらの変容に影響し、日常生活から歩行動作を意識的に改善することで疾走動作の改善につながる可能性を示唆している。対象とする動作の改善には、神経骨格筋の調節能力と身体のフィットネスレベルの向上などが必要とされ、アスリートでは、競技力向上のために日々専門的なトレーニングの繰り返しが行われている。専門的トレーニングの特異性と適応によってアスリートはその競技特有の筋形態を有していることや(Abe et al., 2000, 2001), トレーニングによって筋形態に変化させることが報告されている(Kearns et al., 2001)。これはヒトに限らず、特に生物の移動運動の観点において生存目的の達成のために進化過程において特有の機能構造を有しており、その中でも特に足部は、構造上に違いが顕著とされている(Biewener, 1989)。ヒトにおいては、1/100秒を競う陸上競技短距離選手の筋形態への競技パフォーマンスの関係性が示されるようにその影響は最たるところであろう(Kumagai et al., 2000)。Sabrina et al (2009)は、スプリンターの内的なモーメントアーム長と、足部構造の違いを一般成人と比較し、さらに足部構造の違いから下腿筋群で発揮される力をシミュレーションした結果、スプリンターは長い足指を有することで接地時間を長くし、前方方向への多くの力積量を獲得に有効的なギア比を有していると報告している。足部は、唯一直接的に地面に力の伝達をおこなっている身体部位でもあることから他の身体部位より構造の変化や障害が多い部位でもある。他方近年問題視されているリュウマチや糖尿病を患った病理的な患者の足部位の奇形的な変化は、歩行パターンの変化に大きく影響していることが報告(Giacomozzi et al., 2002, 2009)されている様に足部構造の変化は、ヒトの歩行パターンに影響を与えることが多くの研究によって報告されている。

このように歩行動作においては、直接的に地面反力を伝達する足部の機能構造が歩行パターンに影響を与えることが推測され、足部、足底部の情報を機能(動き)、構造(形状・形態)両側面からそれらの関連性を捉える得ることが重要であると考えられる。先行研究ではヒトの歩行パターンを足底圧分布によって特徴づけ、特にその圧力の中心となる足圧中心(COP)の軌跡の違いによって、加齢、性差、病理など様々な被験者を対象に測定・診断などが行われてきた(Min et al., 2013a, 2013b, Hessert et al., 2005)。しかし、歩行中のCOPパターンや足底圧分布は、特にアーチの形成による足底面の接地する面積などに影響を受け(Stebbins et al., 2005, Ledoux and Hillstrom, 2002)、一律した結果が得られていない現状である。とりわけのアスリートの足底圧分布に関する情報は乏しく(Gurney et al., 2009, Huang et al., 2011)、その特徴は明からではない。アスリートの歩行動作の特異性を明らかにすることは、障害予防、スポーツギア、シューズ開発あるいは、谷川(2008)の報告にあるように日常生活の中で疾走動作の改善につながるようなトレーニングの応用に関する知見が得られることが期待される。

本研究は、陸上短距離種目のトップスプリンターを含む、一線級アスリートの足部形状(構造)と歩行中の足底分布(機能)を同年代の一般成人と比較することでアスリートの歩行動作の特異性を検討することを目的とした。

II.方法

1. 被験者

被験者は、アスリート群として体育大学陸上競技部に所属する短距離選手(以下:SP)20名と比較対象群として同年度の一般男子学生(以下:CG)15名を対象とした。Table1には、被験者の身体的特徴およびSPに関しては、専門種目と競技記録を示した。被験者にはあらかじめ本研究の主旨、内容および安全性に関する説明を行い、書面により実験の参加の同意を得た。なお、本研究は、日本体育大学倫理審査委員会(承認番号 第013-H51号)の承諾を受けて実施した。

Table1 被験者の身体的特徴

	年齢(歳)	身長(cm)	体重(kg)	シーズンベスト 記録(秒)	被験者のベスト 記録(秒)
全体 (n=20)	19.9±0.9	174.0±5.3	67.8±5.8		
陸上 (SP) 100m (n=6)	19.6±1.2	172.9±3.9	69.6±4.2	11.1±0.33	10.55
200m (n=5)	19.7±0.7	174.9±6.2	68.3±5.1	22.9±0.44	22.18
400m (n=9)	20.3±0.6	174.3±6.0	66.4±7.1	49.6±1.53	48.0
一般成人(CG) (n=15)	20.5±2.3	172.6±5.8	64.1±9.9		

2. 足部形状計測

足部形状計測には、3次元足部スキャナーInfoot(アイウエアラボラトリー社製)を使用した。被験者は、10~15cmのスタンス幅で両足均等荷重の自然な静止立位姿勢で計測を行った(Fig.1)。また被験者の足部には、解剖学的計測点にランドマーク片足9点貼付し足部形状スキャンをおこなった。足部解剖学的計測点は、第1中足骨骨頭、第5中足骨骨頭、第5中足骨粗面、舟状骨、仮移行点、外果端点、内果端点、外果最高突点、内果最高突点とした(Fig.2)。Fig.3にはスキャニングデータのデータサンプルを示す。

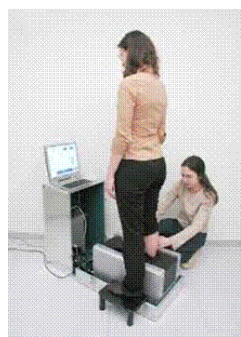
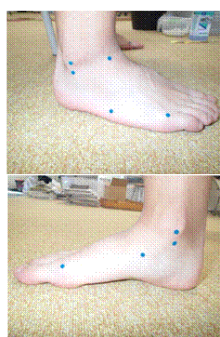


Fig. 1 計測風景



- ①第1中足骨頭
- ②第5中足骨頭
- ③第5中足骨粗面
- ④舟状骨
- ⑤仮移行点
- ⑥内果端点
- ⑦外果端点
- ⑧外果最高突点
- ⑨内果最高突点

Fig. 2 足部解剖学的ランドマーク位置

スプリンター (100m タイム10:55)

一般成人男性

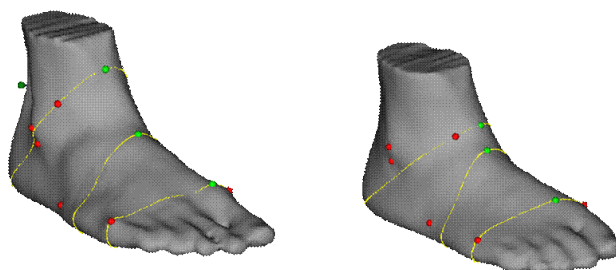


Fig.3 トップスプリンターと一般成人男性の足部形状データサンプル

2-1. 足部形態計測データ分析

足部形態計測点は、先行研究の Kouchi(1998)の方法をもとに、足部解剖学的ランドマーク座標より算出した。計測項目は、足部の長さに関して5項目、周径囲4項目、角度2項目、足高5項目とした(Fig.4)。本研究は先行研究とは別に足部を機能面から外・内的モーメントアームの評価として、外果最高突点、内果最高突点、第1中足骨骨頭点、第5中足骨骨頭点の3次元座標データから、外果最高突点と内果最高突点の中間点(足関節中心:CAJ)と、第1中足骨骨頭点、第5中足骨骨頭点の中間点(中足骨関節:MP)を算出し、CAJからMPまでの距離(CAJ-MP)とCAJから踵までの水平距離(CAJ-HL)を算出した。算出したCAJ-MPとCAJ-HLから、内的なモーメントアーム長と外的なモーメントアーム長として、両者の比をギア比とした(ギア比=CAJ-MP/CAJ-HL)。また、第1足指長と外果最高突点-第1足指最突点の水平距離を算出した。足部形態計測値の長さに関する変数は、すべて足長で除すことによって正規化した。

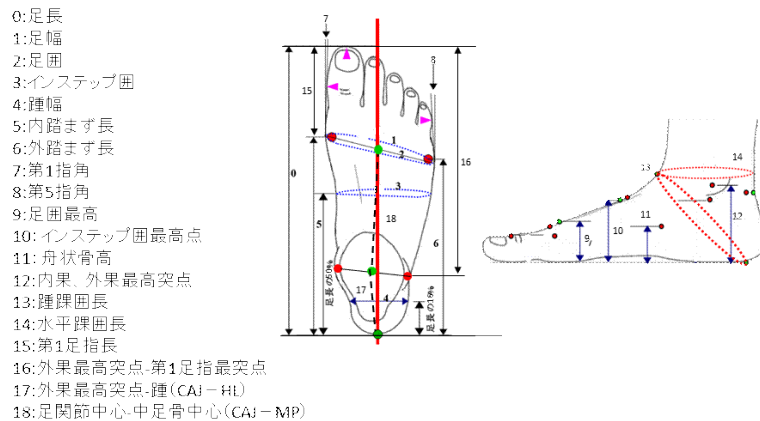


Fig. 4 足部形態計測点一覧

3. 歩行測定

被験者は、13mの歩行路の中心に設置した足底圧計上を、各被験者の至適速度で5試技の歩行動作を行った。歩行中の足底圧分計測には、FootScan(RSScan社製)を用いて計測周波数500Hzで歩行中の足底圧分布の計測を行った。被験者の歩行速度計測には、歩行路の中心5m区間の光電管(マルチパス:DKH社製)を用いて時間計測し、5m区間の平均速度を算出した。光電管の高さは、被験者の腕振り動作の影響を考慮し、肩の高さ位置で設定した。また歩行路側方からハイスピードカメラ(GOPRO)撮影速度240fpsで5m区間の歩行1サイクルの時間計測を行った。Fig.5には本研究の実験配置図を示す。

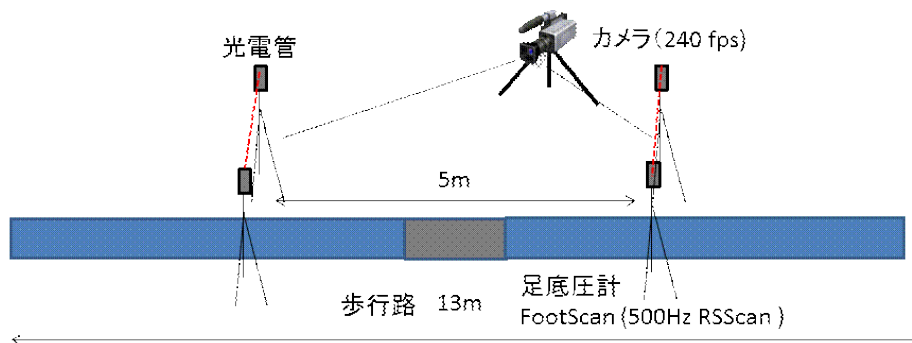


Fig. 5 実験配置図

3-1. 歩行データ分析

データ分析は、足底圧計の中心付近に接地した右足を対象とし、5試技の歩行速度の最大値、最小値を除いた3試技のデータを分析に採用した。被験者の歩行中の時空間パラメーターは、5m区間の平均速度を歩行1サイクルから算出したステップ頻度(steps/s)で除すことにより、ストライド長算出し、最終的に一步のステップ長(m)を算出した。ステップ長は身長で除し。ステップ頻度は、 $\sqrt{BH/g}$ を乗じることにより正規化した(Alexander and Goldspink, 1977)。

歩行中の足底圧分布データは、footscan7 gait generation2 ソフトウェア(RSScan社製)を用いておこなっ

た. 足底座標は、踵と第 2 指を直線に結んだ軸を長軸(前後軸:y軸), y 軸に直行した軸を左右軸(x軸)と定義し、踵位置を原点とした(Fig.6a). 歩行中の足底の角度は、進行方向とy軸とがなす角度(Foot axis angle)を算出し、足部外転方向をプラス(+), 内転方向をマイナス(-)と定義した。

足底圧計から得られた足底圧中心(COP)データは、残差分析(Winter 2009)によって最適遮断周波数を決定した後、4 次のバターズローパスデジタルフィルタ(x 成分 11Hz,y成分 17Hz)で平滑化をおこなった. COP データは、3 次のスプライン関数を用いて右足接地時間を 2%ごとに正規化した. また、COP の x, y 座標データは、足長で除し正規化した. COP の x, y,座標データを時間微分し COPV_x, COPV_y の速度を算出した. 足底圧分布データは、踵接地から離地までを 5 つのタイミングを基に 4 つのフェイズに区分し、時間分析を行った(Fig.6). 5 つのタイミングは、Initial Foot Contact(IFC), Initial Metatarsal Contact(IMC), Initial Forefoot Flat Contact(IFFC), Heel off(HO), Last Foot Contact(LFC)と 4 つのフェイズは、Initial Contact Phase(ICP), Forefoot contact phase(FCP), Foot flat phase(FFP), Forefoot push off phase(FPOP)とした(Fig.6b).

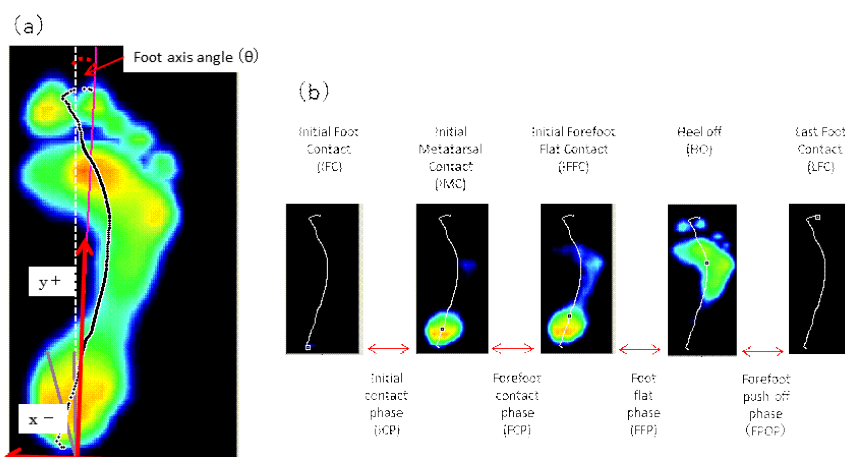


Fig. 6 足底圧分布データの定義
 (a) 足底圧分布座標とFoot axis angle
 (b) 歩行支持期中のタイミングとフェイズの定義

統計分析

すべての測定変数は、平均値±標準偏差で示した. SPとCGの足部形態計測と歩行計測変数の検定は、t-検定(対応なし)を用いた. 統計処理は、すべて統計処理ソフト JMP ver 8.0 (SAS 社製)を用いて行い、危険率 5%未満をもって有意とした.

III. 結果

1. 足部形態計測

Table2 には、SPとCGの足部形態計測の結果を示した. 足部の長育、足高に関してSPとCGには、大きな差はみられず、絶対値、相対値ともに統計上有意な差はみられなかった. 足指角度においては、SPがCGに比べて大きい角度を示したが、統計上有意な差はみられなかった. 足部周径囲に関しては、水平踝囲において、SPがCGに対して6.2mm大きな値を示し、統計上有意な差がみられたが(p<0.01), 相対値では両群に差はみられなかった. 内・外的なモーメントアームに関係する変数においては、CAJ-MP, 外果最高突点-第1足指最突点の距離において、SPがCGより大きな値を示し(CAJ-MP: 133.4±6.3mm vs 127.4±6.3mm p<0.01, CAJ-第1指端: 136.8±4.8mm vs 131.1±6.7mm p<0.01), 統計上有意な差がみられた(Table3). また、相対値においても両群には統計上有意な差がみられた(CAJ-MP :p<0.01, 外果最高突点-第1足指最突点:p<0.05). 一方で、第1足指長とCAJ-HLには絶対値,相対値共に両群には有意な差がみられなかった. ギア比に関しては、SPはCGに比べて小さな値を示し(0.377±0.035 vs 0.402±0.028), 統計上有意な差がみられた(p<0.05).

Table 2 SPとCGにおける足部形態計測値

	Unit	SP		CG		Difference	
		Mean	SD	Mean	SD		
足長	mm	257.6	9.5	253.7	11.5	3.9	
足幅	mm	102.8	5.1	101.4	6.1	1.4	
	%	39.9	1.6	40.0	1.8	-0.1	
踵幅	mm	65.0	3.8	64.1	3.7	-1.2	
	%	24.5	1.3	25.3	1.5	-0.9	
内踏まず長	mm	191.0	7.2	185.6	10.7	5.4	
	%	74.2	1.1	73.1	2.4	1.0	
外踏まず長	mm	169.3	6.3	168.4	7.7	2.9	
	%	65.7	1.8	65.6	1.4	0.1	
舟状骨高	mm	44.2	6.5	45.1	6.5	-0.9	
	%	17.2	2.9	17.8	2.7	-0.6	
足田最高点高	mm	37.2	2.1	38.0	3.7	-0.8	
	%	14.5	1.0	15.0	1.6	-0.6	
インステップ田最高点	mm	64.5	4.0	64.3	4.3	-0.4	
	%	25.1	2.0	25.6	2.1	-0.5	
外果差最突点高	mm	63.5	4.2	68.1	4.2	1.5	
	%	27.0	2.1	26.9	1.7	0.2	
内果差最突点高	mm	81.0	4.4	80.8	6.0	0.2	
	%	31.5	1.9	31.9	2.2	-0.4	
足田	mm	246.2	10.5	243.3	13.1	2.9	
	%	95.6	3.5	95.0	4.2	-0.3	
インステップ田	mm	250.6	10.3	245.2	13.0	4.3	
	%	97.3	3.7	97.1	4.4	0.2	
踵顆田長	mm	320.8	10.3	319.8	16.1	1.1	
	%	124.6	3.2	126.1	4.7	-1.5	
水平顆田長	mm	260.8	11.8	249.5	14.5	11.3	**
	%	101.3	3.4	98.3	3.0	2.9	
第1指側角度	deg	4.5	5.8	2.8	5.3	1.8	
第5指側角度	deg	6.9	6.7	5.4	3.3	1.5	

** : p < 0.05

Table 3 SPとCGのギア比に関する足部変数

	unit	SP	CG	Difference(mm)	
第1足指長	mm	70.8 ± 4.4	70.2 ± 5.1	0.60	
	%	27.5 ± 1.1	27.5 ± 1.5	0.00	
外果最高突点-第1足指最突点	mm	136.8 ± 4.8	131.1 ± 6.7	5.7	**
	%	53.3 ± 2.9	51.4 ± 1.8	1.9	*
CAJ-MP	mm	133.4 ± 6.3	127.4 ± 6.3	6.0	**
	%	51.9 ± 2.3	50.0 ± 1.5	2.0	**
CAJ-HL	mm	50.2 ± 4.2	51.2 ± 3.3	-1.0	
	%	19.5 ± 1.2	20.1 ± 1.0	-0.6	
ギア比		0.377 ± 0.035	0.402 ± 0.028	-0.025	*

* : p < 0.05, ** : p < 0.01

2. 歩行測定

2-1 歩行時空間パラメーターとFoot axis angle

SPとCGの至適歩行速度においては両群には統計上有意な差はみられなかった。また、歩行速度を構成しているステップ長、ステップ頻度においても絶対値、相対値ともに両群には統計上有意な差はみられなかった。Foot axis angleは、SPはCGより小さい傾向を示したが、両群には統計上有意な差はみられなかった(Table4)。

Table 4 SPとCGの歩行中の時空間パラメーターとFoot axis angleの比較

	Unit	SP		CG	
		Mean	SD	Mean	SD
歩行速度	m/s	1.35	0.12	1.33	0.14
ステップ長	m	0.67	0.06	0.68	0.05
ステップ頻度	step/s	2.01	0.12	1.94	0.12
ストライド長	m/BH	0.39	0.03	0.40	0.03
ステップ頻度	step/s · √BH/g	0.85	0.06	0.81	0.05
Foot Axis Angle	deg	11.9	4.8	14.9	5.6

2-2 足底圧分布

Fig.7は、トップスプリンターと一般成人の典型的な足底圧分布とCOPxy軌跡データを示した。トップスプリンターは、踵接地からほぼ足の軸に沿ってCOP軌跡が移行し、最終的に母指に移行するパターンがみられたが、一般人のCOPは、踵接地後、中足部位に差し掛かるとトップスプリンターより、足部外側へ移行し、最終的に母指に移行するパターンがみられた。

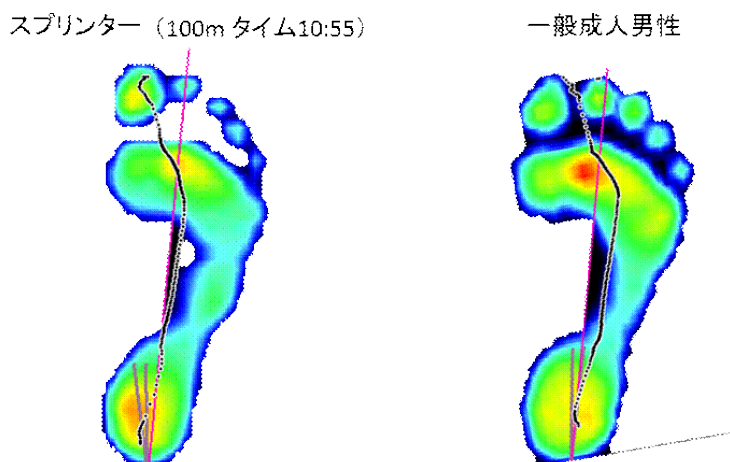


Fig.7 トップスプリンターと一般成人の足底圧分布とCOP軌跡の比較

2-2 歩行支持期時間分析とCOP軌跡

Fig8は、SPとCGの歩行支持期時間分析とCOPxy軌跡を示した。まず、SPとCGの歩行支持期中の時間分析の結果において、SPはCGと比較してHeel-offのタイミングが相対的に速く、統計上有意な差がみられた($p < 0.05$)。また、フェイズにおいては、SPはCGと比較しFoot Flat Phaseの相対時間が短く、一方で、Forefoot Push Off Phaseの相対時間では、SPがCGに比べて長く、統計上有意な差が示された($p < 0.05$)。

SPは足軸に沿ってCOPの軌跡が移行し、最終的に母指にCOPが移行するが、一方で、CGは、SPよりCOPの軌跡が外側を通過し、第2指へ最終的に移行するパターンがみられた。また時間変化でみるとSPのCOPx位置はCGと比較してすべての時間において統計上有意な差がみられた。COPyに関しては、特に、正規化時間の20%から56%区間では、SPはCGよりCOPyが前方に位置していた。

2-4 COP速度

Fig.9 は、歩行支持期中の COPV_x, COPV_y 変化を示した。COPV_x は、踵接地直後、正規化時間の 6~10%において SP は CG に比べて外方向へ大きな速度を示し、Heel-off 以降は、反対に内側へ SP の COPV_x は増加した。COPV_y は、Foot Flat Phase の正規時間の 12~36%において SP が CG より大きな値を示し、それ以降の Heel-off 付近までは、SP より CG が大きな値を示した。Last Foot Contact 直前においては、統計上有意な差がみられたが、ほぼ同値であった。

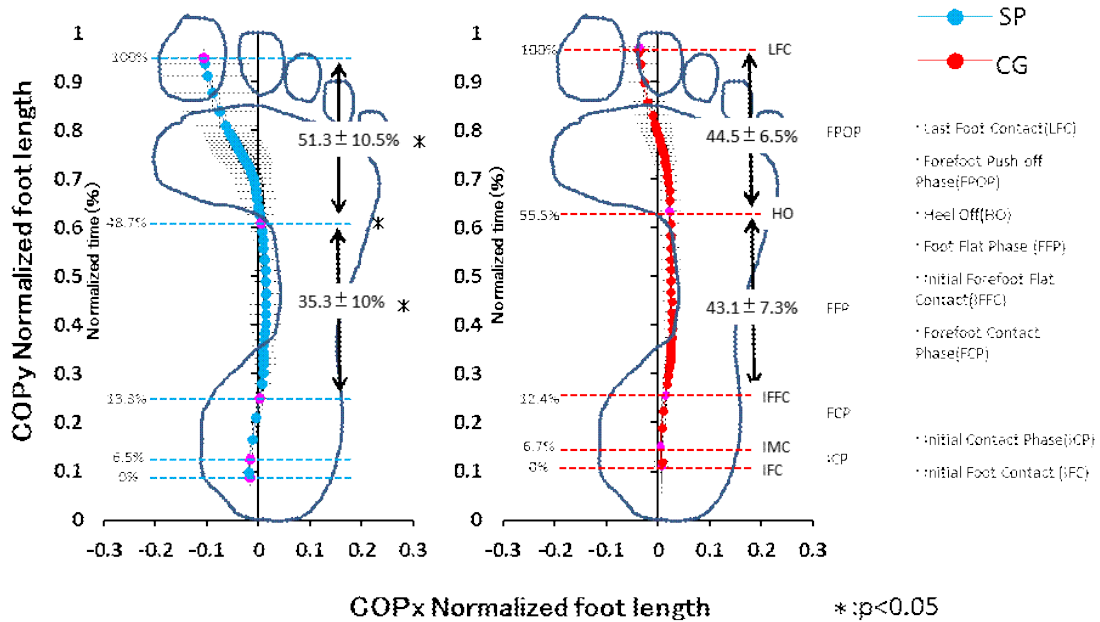


Fig.8 SPとCGにおける歩行支持期中のタイミング、フェイズとCOP位置の比較

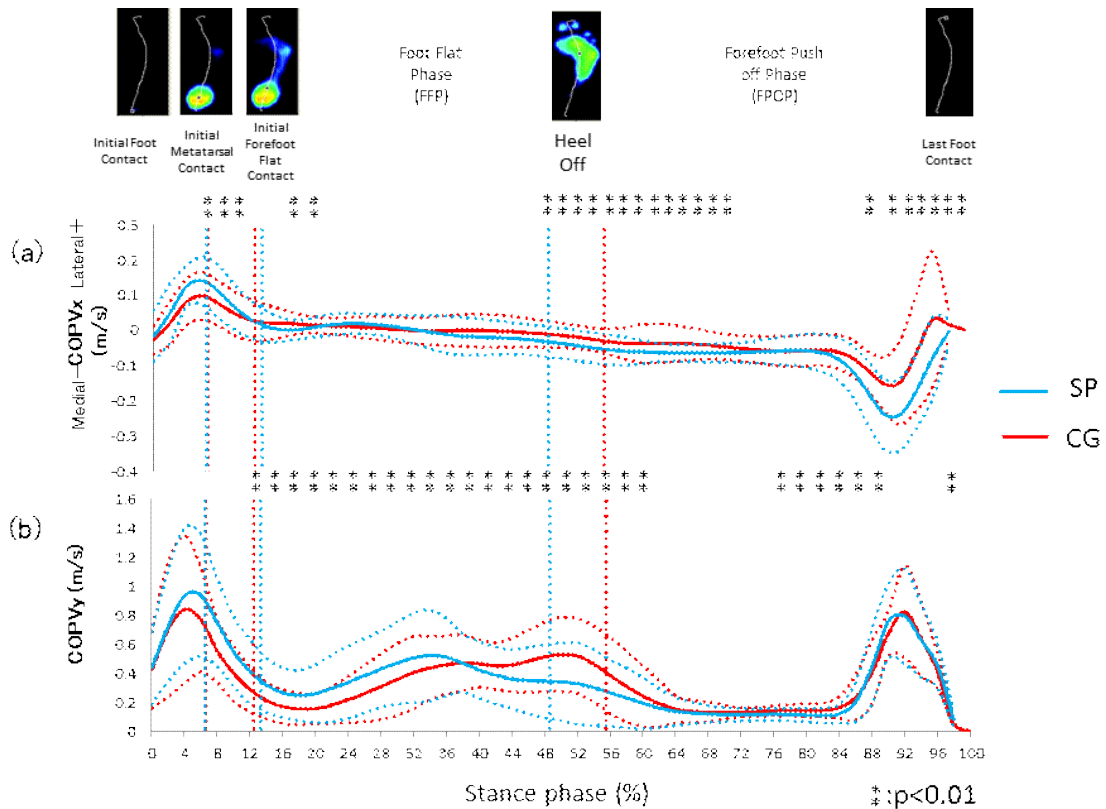


Fig.9 SPとCGにおける歩行支持期中のCOPV_x, COPV_yの変化

IV. 考察

1 足部形態計測

本研究は、スプリンター(SP)と一般成人(CG)の足部形態計測を比較した結果、足長、足幅、足囲舟状骨高(アーチ高)さらに足を評価する代表的な変数などには統計上有意な差がみられず、一方で、ギア比に関する足部変数として、外果最高突点-第1足指最突点の水平距離と、CAJ-MP間の距離が、絶対値および相対値ともに、CGに比べてSPにおいて統計上有意に長いことが示された。

一般的に足部形状は、人種、性別や生活習慣など環境要因によって大きく影響することは多くの研究によって報告されている(Kouchi 1998)。また Morimoto and Okada(1985,1987)は、陸上長距離ランナーは、投擲、跳躍、短距離選手と比較するとアーチ高が低い傾向にある。その理由として瞬間的に加わる機械的なストレスが小さいことに推測した。Kouchi and Mochimaru(2003)によると、長距離選手と一般成人の足部形状を比較した結果、長距離選手の特徴は、足幅が狭く、低いアーチであり更に踵から内・外果までの距離が短いことが報告されている。本研究においては、先行研究で報告されるような足幅、踵幅、またアーチ高などにSPとCGの顕著な差はみられなかった。また、ギア比に関する足部変数において、踵から内・外果までの距離はSPがOCに比べて短い傾向は示したが有意な差ではなかった。外果から踵までの距離が短いことは、足関節で発揮されるトルクに影響し、ランニングやスプリントパフォーマンスにおいて有利であることが報告されている(Sabrina et al., 2009) 一方で本研究のSPは外果から第1足指最突点の水平距離、特にCAJ-MP間の長さの比率がCGに比べて大きいことが示された。外果からつま先までの距離は、外的なモーメントアームの要素となる。ランニング支持期中のモーメントアーム長の変化は、内的なモーメントアームより、COPが前方に移動することによって変化する外的なモーメントの変化が大きい(Carrier et al., 1994)。したがってこれは足関節で発揮されるトルクを効率的に発揮できる要因となり、短距離選手の足形状の一つの特徴として示された。Sabrin et al(2009)は、トップスプリンターにおいて、外果-外果最高突点-第1足指最突点の水平距離と第1足指長が長いことを示し、更にトップスプリンターはアキレス腱までの短いモーメントアーム長を有していることから、下腿三頭筋で効率的な力発揮をすることができるギア比を有していることを報告している。本研究においては、SPは、CAJ-MP間の距離が長く、一方で足指長にはCGとは有意な差がみられず、先行研究と異なる結果であった。Kouchi(1998)が報告するに、日本人の足指は短い傾向にあり、先行研究との異なる原因としては、被験者の人種差が影響していると考えられる。本研究の結果からスプリンターの足部は外果からつま先までの距離が長い特徴が示された。しかし、骨格筋のようにトレーニング効果によって足部の形状が競技に特化した形状になるのか不明であり、今後更なる継続的な調査は必要である。

2 歩行計測

本研究においては、スプリンター(SP)と一般成人(CG)の歩行中の歩行速度や時空間パラメーターには有意な差はみられなかった。しかし、SPとCGの歩行支持期中のCOP位置に違いがみられた。特に左右方向のCOPxにおいてSPは歩行支持期中に足軸に沿って移動し、Heel-OffのタイミングからCOPxは内側へ移動し、Last Foot Contactでは母指を通過する軌跡パターンを示した。これに対してCGでは、足軸より外側をCOPxが移動し、Heel-Offから内側に移動するタイミングが遅く、そして第2指を通過する軌跡パターンを示した。先行研究においてランニング支持期中のCOP位置は、アーチ高が低いほどCOPの位置は外側に位置することが示されている(Cock et al., 2008)。本研究ではアーチ高は舟状骨高の高さで評価しているが、SPの 44.2 ± 6.5 mmに対してCG 45.1 ± 17.8 mmではほぼ同値であり両群に差はみられなかった。一方で歩行中のCOP位置に影響する要因として足の接地位置の問題も挙げられている(Lugade and Kaufmann, 2014)。本研究のSPとCGのFoot axis angleにおいて両群には、統計上有意な差がみられなかったが、SPはCGより小さい傾向を示し、足の接地角度が両群のCOPx位置に差が影響を与えたことも一因として考えられる。

歩行支持期中のSPとCGのタイミングとフェイズにおいてSPは、Heel-Offのタイミングが速く、また、Foot Flat PhaseとForefoot Push Off Phaseに有意な差がみられた。つまり、SPは、CGに比べて前足部で荷重をかけている相対時間が長いことが示された。COPの前後の移動速度(COPVy)において、SPとCGで違いがみられた。SPはCGに比べてHeel-OffまでのCOPVyが高く、正規化時間のFoot Flat Phaseの36%で徐々に減少し、Forefoot Push Off Phaseの64%以降は、CGとほぼ同値であった。SPとCGの歩行速度や時空間パラメーターにおいて両群には有意な差はみられなかったことから足部の接地から離地までの身

体合成重心の加減速に差に起因していることが推察される。Initial Foot Contact から正規化時間の 20% 付近までフェイズは、歩行動作特有の両足支持期中であるため、COPVy は、後ろの蹴り足との力配分によって影響することが考えられる。また Foot Flat Phase の 20% 以降の片足支持期では、SP は CG よりも COPVx の立ち上がりが早く、そして Foot Flat Phase での COPVy ピークの出現も早いことから、スムーズな重心移動が行えていることが推察される。陸上短距離競技では、いかに接地直後のブレーキフェイズから加速期に進行方向へ速度ベクトルを大きくするかが競技記録を左右するため、COM のスプリント競技にとって合目的な動きを獲得することは重要である。谷川ら(2008)によると、短距離選手の歩行動作では、接地する足部と COM との水平距離を短くし、片足支持期直後に COM を前方に移動させ、COM の真下で両脚の切り替え動作を行うことが特徴として示している。このことから、本研究の SP においても接地直後から高い COPVy と Foot Flat Phase の COPVy ピークが早いタイミングで出現することは、SP は日常生活から常にスプリント競技にとって合目的な COM の移動を可能にしていると考えられる。

本研究によって、陸上短距離スプリンターの足部形状は、CAJ-MP(足関節中心-MP 関節)間の相対的な長さが大きく、スプリント動作において足関節で有効的な力発揮を行えるギア比を有していることが示された。また、スプリンターでは歩行中の足底圧分布 COP 軌跡長は足軸にそって直線的に移動し、離地時に母指に移動するパターンを示した。この COP 軌跡長のパターンによって足部接地直後に COP の前後方向の速度を高め、歩行動作中にスプリント競技にとって合目的な重心移動を行っていることが示唆された。今後更なる研究は、スプリンターの足部形状がどれくらいの年代あるいは競技レベルにおいて形成され、そしてこの構造が実際の競技パフォーマンスにどれくらい寄与するかを検討がすることである。

V.謝辞

稿を終えるに当たり、本研究にご支援を賜りました第 11 回上月スポーツ研究助成事業へ心から感謝の意を表します。

VI.参考文献

- ・谷川 聡, 島田 一志, 岩井 浩一, 尾縣 貢 (2008) 競技者と一般人の走および歩動作の特徴. 体育学研究 53 : 75-85.
- ・Abe, T., Fukashiro, S., Harada, Y and Kuwamoto, K. (2000) Relationship between sprint performance and muscle fascicle length in female sprinters. *J. Physiol. Anthropol. Appl. Human Sci.* 20 :141-147.
- ・Abe, T., Kumagai, K and Brechue, W. F. (2001) Fascicle length of leg muscles is greater in sprinters than distance runners. *Med. Sci. Sports Exerc.* 32 :1125-1129.
- ・Alexander, R. M., and Goldspink, G. (1977) Mechanics and energetics of animal locomotion. *Terrestrial locomotion* :168-203.
- ・Biewener, A. A. (1989) Scaling Body Support in Mamals: Limb posture and Muscle Mechanics. *Science* 245 :45-48.
- ・Carrier, D. R., Heglund, N. C., and Earls, K. D. (1994) Variable gearing during locomotion in the human musculoskeletal system. *Science* 265 :651-653.
- ・Cock, A. D., Vanrenterghem, J., Willems, T., Witvrouw, E., and Clercq, D. D. (2008) The trajectory of the centre of pressure during barefoot running as a potential measure for foot function. *Gait & Posture* 27 :669-675.
- ・Giacomozzi, C., Caselli, A., Macellari, V., Giurato, L., Lardieri, L and Uccioli, L. (2002) Walking strategy in diabetic patients with peripheral neuropathy. *Diabetes Care* 25 :1451-1457.
- ・Giacomozzi, C., Martelli, F., Nagel, A., Schmiegel, A and Rosenbaum, D. (2009) Cluster analysis to classify gait alterations in rheumatoid arthritis using peak pressure curves. *Gait & Posture* 29(2) 220-224.
- ・Gurney, K. J., Kersting, U. G and Rosenbaum, D. (2009) Dynamic foot function and morphology in elite rugby league athletes of different ethnicity. *Appl. Ergon.* 40 :554-559.
- ・Hessert, M. J., Vyas, M., Leach, J., Hu, K., Lipsitz, L. A., Novak, V. (2005) Foot pressure distribution during walking in young and old adults. *BMC Geriatrics* 19(5) :1-8.
- ・Huang, P.-Y., Lin, C.-F., Kuo, L.-C and Liao, J.-C. (2011) Foot pressure and center of pressure in

- athletes with ankle instability during lateral shuffling and running gait. *Scand. J. Med. Sci. Sports* 21 :461-467.
- Kearns, C. F., Isokawa, M and Abe, T. (2001) Architectural characteristics of dominant leg muscles in junior soccer players. *Eur. J. Appl. Physiol.* 85 :240-243.
 - Kouchi M., and Mochimaru M. (2003) The feet of runners: Do they differ from the non-runner's feet? The 6th Symposium on Footwear Biomechanics.
 - Kouchi, M. (1998) Foot dimension and foot shape: Differences due to growth, generation and ethnic origin. *Anthropological Science* 106 :161-188.
 - Kumagai, K., Abe, T., Brechue, W. F., Ryushi, T., Takano, S and Mizuno, M. (2000) Sprint performance is related to muscle fascicle length in male 100-m sprinters. *J. Appl. Physiol.* 88 :811-816.
 - Ledoux, W. R., and Hillstrom, H. (2002) The distributed plantar vertical force of neutrally aligned and pes planus feet. *Gait & Posture* 15 :1-9.
 - Lugade, V., and Kaufman, K. (2014) Center of pressure trajectory during gait: A comparison of four foot position. *Gait & Posture* (In press)
 - Min-Chi, C., Hsin-Chieh W and Li-Yu, C., (2013a) Gait speed and gender effects on center of pressure progression during normal walking. *Gait & Posture* 37 :43-48.
 - Min-Chi, C., Hsin-Chieh W., Li-Yu, C and Min-Huan, W. (2013b) Center of pressure progression characteristics under the plantar region for elderly adults. *Gait & Posture* 37 :408-412.
 - Morimoto, M., and Okada, M. (1985) Somatometrical features of the foot in male athletes. *Jpn. J. Hum. Posture* 5(2) :101-105.
 - Morimoto, M., and Okada, M. (1987) X ray-metrical feature of the foot in male athletes. *Jpn. J. Hum. Posture* 7(1) :57-60.
 - Sabrina, S., M., L and Stephen, J. Piazza. (2009) Built for speed: musculoskeletal structure and sprinting ability. *J. Exp. Biol.* 212 :3700-3707.
 - Stebbins, J.A., Harrington, M.E., Giacomozzi, C., Thompson, N., Zavatsky, A and Theologis, T.N., (2005) Assessment of sub-division of plantar pressure measurement in children. *Gait & Posture* 22 : 372-376.
 - Winter, D. A. (2009). Biomechanics and motor control of human movement. New York: Wiley and Sons.