

スパイクシューズのソール硬度の違いが加速疾走のパフォーマンスに与える影響

永原 隆
鹿屋体育大学

1 緒言

陸上競技の100m走では、記録が疾走中の最大速度と強く関係することから (Slawinski et al. 2017), 最大速度に至る過程である加速局面において速度を増加させる能力が高いパフォーマンス発揮に不可欠である。加速局面における疾走能力の優劣は、発揮された加速力(地面反力の加速成分)の大きさに依存している (Rabita et al. 2015, Morin et al. 2015)。つまり、加速疾走能力向上のためには、支持期において発揮される減速力を小さくするのではなく、加速力を大きくすることが重要となる。加速疾走において大きな加速力を発揮するためには、支持期において下肢の主要な関節である股関節、膝関節、足関節において、適切なタイミングで大きな力(モーメント)を発揮することが必要である (Johnson and Buckley 2001, Debaere et al. 2013)。一方、発揮されるモーメントの大きさは小さいものの (Bezodis et al. 2012, Smith et al. 2012, Stefanyshyn and Nigg 1997), 地面に近接した最も下位の関節(足部を構成する細かな骨間の関節は除く)である中足趾節関節において発揮されるモーメントも加速力の大きさに影響すると指摘されている (Bezodis et al. 2014, Goldmann et al. 2013)。また、足部全体はバネとして機能することが知られており (Ker et al. 1987), その硬さが力の伝達効率に影響を及ぼすと考えられる。さらに、足趾底屈筋力のトレーニングによって、疾走パフォーマンスが向上することが報告されている (Hashimoto and Sakuraba 2014)。これらのことから、中足趾節関節において大きな底屈力を発揮することは、疾走パフォーマンスの向上に寄与する蓋然性が高い。

陸上競技の短距離走において、スパイクシューズは唯一の用具である。スパイクシューズのソールは、支持期に変形し、離地に向けて足趾の底屈方向へ復元力が発生する。この力は、中足趾節関節底屈の促進や足部そのものの変形を抑制することで、疾走中の地面への効率的な加速力の伝達を助けると考えられている。身体の発揮した力の伝達を補助する観点では、硬いソールのスパイクシューズがパフォーマンス向上に有効であると考えられるが、競技レベルの低い筋力の弱い選手が硬いソールのスパイクシューズを着用することは、必ずしも疾走パフォーマンス向上に有効ではなく、怪我の原因ともなる。したがって、個人の特性に応じたソール硬度のスパイクシューズを着用することが、短距離走のパフォーマンス向上や怪我の予防に重要である。

スパイクシューズのソール硬度と疾走パフォーマンスの関係について検討した先行研究では、中敷きの下にカーボンシートを入れることで硬度を調節し、グループの平均では、42N/mmのカーボンシートを入れた条件がカーボンシートを入れない条件より有意にタイム(20m加速後の20mのタイム)が短かったことを報告し、疾走パフォーマンスが最も高まるソール硬度は個人ごとに異なることも明らかにしている (Stefanyshyn and Fusco 2004)。しかし、この先行研究では、疾走パフォーマンスが最も高まるソール硬度と個人の特性を表す変数(身長、体重、シューズのサイズ、疾走タイム)の間に有意な相関関係は見られず、最適なソール硬度に関係する被験者の特性は明らかにされていない。Stefanyshyn and Fusco (2004)は、ソールの硬度が疾走パフォーマンスに影響を及ぼすことを明らかにしているものの、1) タイムのみで疾走を評価、2) 20m加速後の20mの区間のみを評価、3) 疾走パフォーマンスが最も高まるソール硬度との関係につ

いて身長、体重、シューズのサイズ、疾走タイムのみで検討している。したがって、ソール硬度の違いによって、スタートから最高速度に達するまでのどの地点の疾走パフォーマンスが、それを構成するどの下位の要素（ステップ長あるいはステップ頻度、加速力の増加あるいは減速力の減少など）の変化によって達成されているのか、疾走パフォーマンスが最も高まるソール硬度が、個々の選手のどのような力-パワー発揮能力と関係するののかについては検討されていない。これらの先行研究の問題点が解決されれば、疾走パフォーマンス向上に有用なソール硬度の知識を提供できると考えられ、それらを用いることで個人の特性に応じたスパイクシューズの選択が可能になるであろう。

本研究の目的は、スパイクシューズのソール硬度の違いが加速疾走パフォーマンスに与える影響について検証し、競技レベルや筋力に応じた適切なスパイクシューズのソール硬度を明らかにすることであった。

2 方法

2.1 実験

実験では、陸上競技の短距離、跳躍、混成種目を専門とする 17 名の男子選手（年齢：20.24 ± 1.20 歳，身長：1.73 ± 0.04m，体重：66.65 ± 3.62kg，100m 走の自己最高記録：11.48 ± 0.42s）に 60m の全力走を 3 回行わせ、その際の 30m，60m 地点のタイム，スタートから 50m 地点までの 1 歩ごとの地面反力を計測した。3 回の全力走は、1) 通常のスパイクシューズを着用した条件（ノーマル）、2) スパイクシューズの中敷きの下に 0.75mm のカーボンシートを入れた条件（C75）、3) スパイクシューズの中敷きの下に 1.0mm のカーボンシートを入れた条件（C100）でランダムに行わせた。カーボンシートの中足指節関節付近を中心とした三点曲げ試験（支点間距離 105mm）によって計測したカーボンシートの硬度はそれぞれ 13.4N/mm（C75 条件）、37.1N/mm（C100 条件）であった。実施する条件の順序はランダムとした。疾走タイムの計測は、スタートシグナルと同期した光電管（Brower Timing systems）を用いて行い、地面反力の計測は地面に埋設された 54 枚のフォースプレート（テック技販）で行った。

60m 走の後、反動動作を伴った垂直跳（2 回計測）、リバウンドジャンプ（6 回連続）、アングルジャンプ（10 回連続）、足趾把持力（左右各 2 回計測）の計測を行った（Nagahara et al. 2014, Kurihara et al. 2014）。各ジャンプテストは、両手を腰に当てた状態で実施させた。ジャンプテストは、スマートフォン（iPhone 6，フレームレート：240Hz）を用いて、接地位置を画角の中心にして撮影した。足趾把持力の計測は、足趾筋力測定器（竹井機器工業）を用いて行った。

2.2 データ処理

地面反力のデータに関しては、バターワース型ローパスデジタルフィルタを用いて 50Hz で平滑化した (Nagahara et al. in press). その後、20N の鉛直力を閾値として接地、離地の瞬間を特定した。ブロッククリアランス局面については、閾値を 20N の加速力（前後方向の地面反力の正成分）とした。得られた接地、離地の時刻から、接地時間、滞空時間、ステップ時間（片方の足の接地から続く逆足の接地の瞬間までの時間）を求め、ステップ時間の逆数をステップ頻度とした。また、支持期の間における圧力中心位置を支持期の足部位置とし、片方の足の接地時位置から続く逆足の接地位置までの前後方向の距離をステップ長として算出した。さらに、ステップ長とステップ頻度の積を疾走速度とした。

地面反力については、支持期の加速力、減速力、鉛直力を積分することで、1 歩ごとの加速力積、減速力積、鉛直力積を求めた。また、加速力積と減速力積の差を前後正味の力積とした。さらに、力積の各変数をそれぞれの時間で除すことで平均加速力、平均減速力、前後正味の平均力、鉛直平均力を算出した。

疾走速度や時空間変数、地面反力の変数については、4 歩ごとにグループ化した。被験者のうち平均ステップ長が最も長かった者は、50m 地点に達するまでに要した歩数が 26 歩であった。そこで、本研究では 25 から 26 歩目までを 1 つのグループとし、ブロッククリアランス後の 1 歩目から 26 歩目までを合計 7 つのステップグループとして分析を行った。

ジャンプテストの記録として、撮影した映像からアプリ (My Jump) を用いて接地時間（垂直跳を除く）、滞空時間を求め (Balsalobre-Fernandez et al. 2015)、滞空時間から Bosco et al. (1983) の方法で跳躍高を算出した。また、リバウンドジャンプ、アングルジャンプについては、跳躍高を接地時間で除したインデックスも算出した。

2.3 統計処理

ノーマル、C75、C100 の条件間の疾走タイム、速度、速度変化量の差を検討するために、一元配置分散分析を行った（速度、速度変化量はステップグループごと）。被験者のスパイクシューズの最適なソール硬度の決定要因を調べるために、60m 走タイムが最も良かった試技のカーボンシートの硬度と被験者の身体特性、体力特性、疾走の特徴（時空間変数）との関係について、ピアソンの積率相関係数を算出した。また、被験者ごとに異なる 60m 走タイムが最も良かった条件の分類に最も強く影響する身体特性、体力特性、疾走の特徴（時空間変数）を明らかにするために決定木分析を用い、ソール硬度の 3 つの条件を目的変数とし、身体特性、体力特性、疾走の特徴（時空間変数）を説明変数として分析を行った。さらに、ソール硬度を変えた際に変化した疾走タイムと身体特性、体力特性の関係について検討するために、ステップワイズ法を用いた重回帰分析を行った。その際、多重共線性の影響を考慮し、リバウンドジャンプ、アングルジャンプのインデックスは投入する変数から排除した。さらに、ステップワイズ法で選択されたソール硬度変化にともなう疾走タイム変化に影響する独立変数を強制投入し、異なる条件において変化した疾走中の時空間変数や地面反力の変数（ステップグループごと）が、どのような身体特性、体力特性と関係しているのか検討した。有意水準は $P < 0.05$ 未満とし、統計処理は、JMP (SAS Institute Japan) を用いて行った。

3 結果

表 1 各条件における疾走タイムとノーマル条件との差, 分散分析の結果

条件	タイム [s]			カーボンシートなし条件との差 [s]		
	30m	60m	30-60m	30m	60m	30-60m
ノーマル	4.54 ± 0.15	7.81 ± 0.26	3.28 ± 0.12			
C75	4.55 ± 0.14	7.84 ± 0.25	3.29 ± 0.11	0.02 ± 0.06	0.03 ± 0.08	0.02 ± 0.04
C100	4.53 ± 0.15	7.81 ± 0.25	3.28 ± 0.10	>-0.01 ± 0.04	>-0.01 ± 0.07	<0.01 ± 0.03
F値(P値)	0.099 (0.906)	0.098 (0.907)	0.088 (0.916)			

表 1 は, ノーマル, C75, C100 の各条件における 30m, 60m 地点のタイム, 30m から 60m 地点まで (30-60m 区間) の通過タイムとそれらのタイムのノーマル条件との差を示したものである。疾

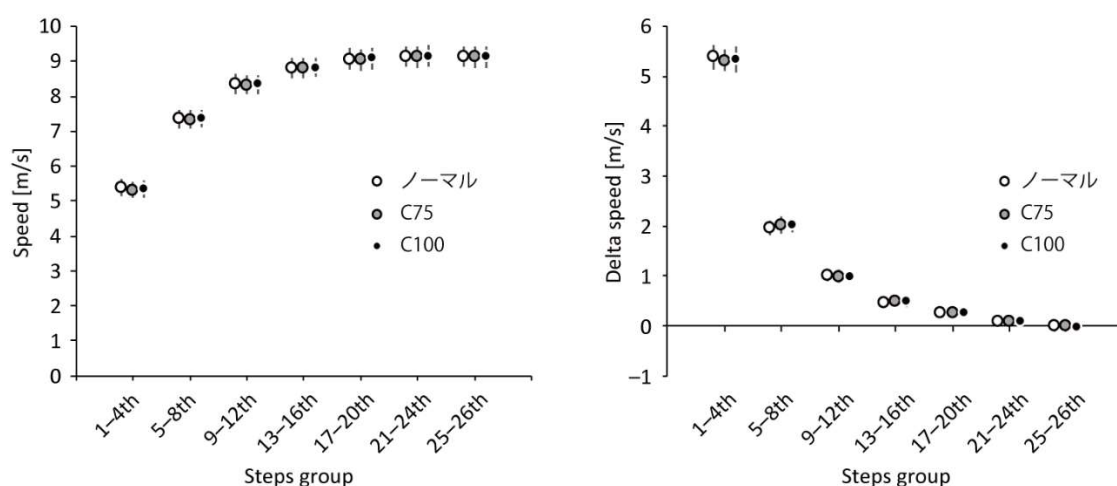


図 1 各条件の疾走速度, 速度変化量のステップグループごとの変化

走パフォーマンスは, ノーマル条件とカーボンシートを入れた各条件との間に差がなかった。図 1 は, 3 つの条件における疾走速度, 速度変化量の変化を示したものである。疾走速度は, 全てのステップグループにおいて 3 つの条件間に差がみられなかった ($F = 0.012-0.314$, $P = 0.732-0.988$)。また, 疾走速度の変化量についても, 全てのステップグループにおいて 3 つの条件間に差がみられなかった ($F = 0.014-0.764$, $P = 0.472-0.987$)。

表 2 身体特性, 体力特性, 疾走の特徴を表す各変数の値と 60m 走タイムが最も良かった試技におけるカーボンシートのソール硬度との関係

変数 [単位]	平均 ± 標準偏差	相関係数 (P値)	
身長 [m]	1.73 ± 0.04	0.149 (0.568)	
体重 [kg]	66.7 ± 3.6	0.230 (0.374)	
100m走の自己最高記録 [s]	11.48 ± 0.42	0.171 (0.512)	
足趾把持力	右 [kg]	27.8 ± 4.9	-0.022 (0.933)
	左 [kg]	27.4 ± 4.7	-0.177 (0.496)
垂直跳 [m]	0.433 ± 0.033	0.127 (0.627)	
リバウンドジャンプ	接地時間 [s]	0.182 ± 0.020	0.330 (0.196)
	跳躍高 [m]	0.366 ± 0.046	0.297 (0.247)
	インデックス [m/s]	2.042 ± 0.352	0.011 (0.965)
アングルジャンプ	接地時間 [s]	0.142 ± 0.015	-0.265 (0.304)
	跳躍高 [m]	0.093 ± 0.042	0.187 (0.473)
	インデックス [m/s]	0.672 ± 0.324	0.195 (0.454)
平均ステップ長 [m]	1.86 ± 0.10	-0.094 (0.720)	
平均ステップ頻度 [Hz]	4.36 ± 0.19	-0.103 (0.694)	
平均支持時間 [s]	0.120 ± 0.007	0.051 (0.845)	
平均滞空時間 [s]	0.111 ± 0.009	-0.016 (0.952)	
ベストパフォーマンスの条件 [N/mm]	17.0 ± 16.3		

表 2 は、被験者の身体特性、体力特性、疾走の特徴を表す各変数、60m 走タイムが最も良かった試技のカーボンシートの硬度（ノーマル条件は 0）、60m 走タイムが最も良かった試技のカーボンシートの硬度と被験者の特性との関係（相関係数）を示したものである。各被験者の 60m 走の最も良いタイムが記録された試技は、ノーマルが 6 名、C75 が 5 名、C100 が 6 名であった。被験者の 60m 走タイムが最も良かった試技のカーボンシートの硬度と身体特性、体力特性、疾走の特徴を表す変数の間には、有意な相関関係はなかった。図 2 は、60m 走タイムが最も良かった条件の分類に影響する変数を検討した決定木分析の結果を示したものである。ノーマルに対して、C75 と C100 を分類するのに最も強く影響する説明変数はリバウンドジャンプの接地時間であり、ノーマル条件で最も疾走パフォーマンスが高かった選手は、リバウンドジャンプの接地時間が短い傾向があった。また、C75 と C100 を分類するのに最も強く影響する説明変数もリバウンドジャンプの接地時間であり、C75 条件で最も疾走パフォーマンスが高かった被験者は、C100 条件で最も疾走パフォーマンスが高かった被験者と比べて、相対的にリバウンドジャンプの接地時間が短い者が多かった。

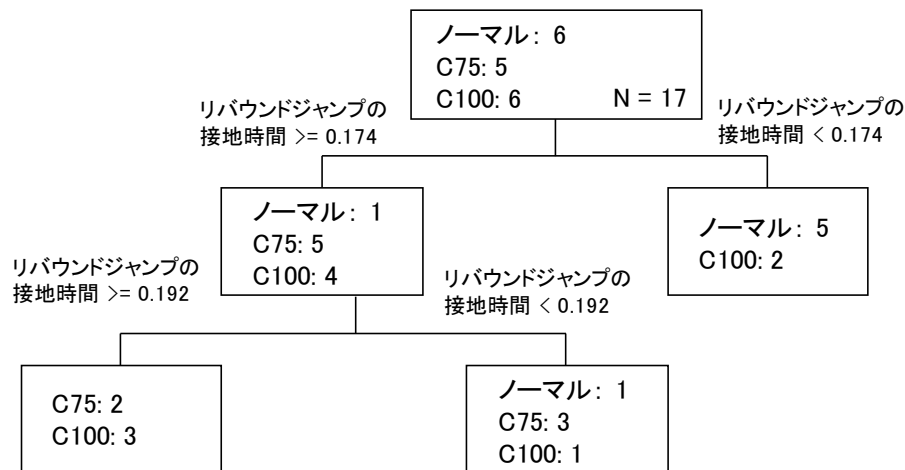


図 2 疾走タイムが最も良かった条件の分類に関与する身体特性、体力特性に関する決定木分析の結果

表 3 は、ノーマル条件に対して、C75、C100 条件において変化した各疾走タイムに対する、ステップワイズ法によって選択された被験者の身体、体力特性の関係を示したものである。ノーマル条件と C75 条件の間の 30m 走タイムの差に対しては、左足の足趾把持力、アングルジャンプの接地時間、アングルジャンプの跳躍高を独立変数とする重回帰式が得られた。ノーマル条件と C75 条件の間の 30-60m 区間タイムの差に対しては、変数が選択されなかった。ノーマル条件と C100 条件の間の 30m 走タイムの差に対しては、体重が独立変数として選択され、回帰式が得られた。ノーマル条件と C100 条件の間の 30-60m 走タイムの差に対しては、体重、左足の足趾把持力、リバウンドジャンプの接地時間、アングルジャンプの跳躍高を独立変数とする重回帰式が得られた。

ノーマル条件と C75 条件との間の 30m 走タイムの差の予測に有効な変数（左足の足趾把持力、アングルジャンプの接地時間、アングルジャンプの跳躍高）を用いた、C75 条件における時空間変数、地面反力変数の変化に対する有意な回帰式は、16 歩目（30m 地点までに達成される歩数）

までのステップグループでは得られなかった。ノーマル条件と C100 条件との間の 30m 走タイムの差の予測に有効な変数（体重）を用いた場合，速度（5-8 歩目， $R^2=0.241$ ， $P=0.045$ ），ステップ長（1-16 歩目， $R^2=0.250-0.352$ ， $P=0.011-0.041$ ），ステップ頻度（9-16 歩目， $R^2=0.237-0.340$ ， $P=0.014-0.048$ ），滞空時間（1-16 歩目， $R^2=0.249-0.288$ ， $P=0.026-0.041$ ），鉛直力積（1-4 歩目，9-12 歩目， $R^2=0.253-0.424$ ， $P=0.005-0.040$ ），減速力積（1-12 歩目， $R^2=0.271-0.281$ ， $P=0.029-0.032$ ），鉛直平均力（1-4 歩目，9-12 歩目， $R^2=0.233-0.262$ ， $P=0.036-0.049$ ），前後正味平均力（1-4 歩目， $R^2=0.367$ ， $P=0.010$ ）の変化に対して有意な回帰式が得られた。ノーマル条件と C100 条件との間の 30-60m 区間タイムの差の予測に有効な変数（体重，左足の足趾把持力，リバウンドジャンプの接地時間，アンクルジャンプの跳躍高）を用いた場合，鉛直力積（25-26 歩目， $R^2=0.544$ ， $P=0.038$ ）の変化に対してのみ有意な回帰式が得られた。

表 3 疾走パフォーマンスを従属変数とするステップワイズ法を用いた重回帰分析の結果

	自由度調整R2乗	P値	標準β
従属変数 C75とノーマルの30mタイム差	0.444	0.014	
左足趾把持力 (X_1)		0.094	0.363
独立変数 アンクルジャンプの接地時間 (X_2)		0.015	-0.663
アンクルジャンプの跳躍高 (X_3)		0.002	-0.939
重回帰式 $Y=0.005 \cdot X_1 - 2.385 \cdot X_2 - 1.238 \cdot X_3 + 0.345$			
従属変数 C75とノーマルの30-60mタイム差			変数選択されず
従属変数 C100とノーマルの30mタイム差	0.100	0.116	
独立変数 体重 (X_1)		0.116	-0.395
重回帰式 $Y=-0.005 \cdot X_1 + 0.315$			
従属変数 C100とノーマルの30-60mタイム差	0.418	0.030	
体重 (X_1)		0.111	-0.335
独立変数 左足趾把持力 (X_2)		0.003	0.796
リバウンドジャンプの接地時間 (X_3)		0.076	0.420
アンクルジャンプの跳躍高 (X_4)		0.055	-0.491
重回帰式 $Y=-0.003 \cdot X_1 + 0.006 \cdot X_2 + 0.693 \cdot X_3 - 0.377 \cdot X_4 - 0.048$			

4 考察

本研究の目的は，スパイクシューズのソール硬度の違いが加速疾走パフォーマンスに与える影響について検証し，競技レベルや筋力に応じた適切なスパイクシューズのソール硬度を明らかにすることであった。

4.1 ソール硬度の違いが加速疾走パフォーマンスに与える影響

本研究では，カーボンシートを使い3つの異なるソール硬度のスパイクシューズ条件で疾走パ

パフォーマンスの変化について検証したが、疾走タイム、4歩ごとの疾走速度、4歩ごとの速度変化量のいずれにも有意な差がなかった(表1, 図1)。このことは、スパイクシューズのソール硬度の違いはグループ平均では疾走パフォーマンスに影響しないことを示す。Stefanyshyn and Fusco (2004)は、硬度が42N/mmのカーボンシートを本研究と同様にインソールとして用いた際に、20m加速後の20-40m区間における疾走タイムがカーボンシートを用いない条件と比較して短かったことを報告している。本研究の結果は、先行研究とは異なるものであったが、先行研究と本研究では、被験者のパフォーマンスレベル、カーボンシートの硬度が異なり(先行研究ではカーボンシート硬度の計測法が異なるため正確な値の比較はできない)、これらのことが異なる結果が生じた要因と考えられる。しかし、Stefanyshyn and Fusco (2004)の研究では、実際のP値が0.07であり、被験者数も多かった(34名)。したがって、先行研究でスパイクシューズのソール硬度が疾走パフォーマンスに及ぼす効果が示されているものの、その影響は大きくない可能性がある。一方、最も疾走パフォーマンスが高かった試技は、6名がノーマル、5名がC75、6名がC100であり、11名はノーマルより硬いソールのスパイクで高いパフォーマンスを発揮していた。これらのことから、スパイクシューズのソール硬度は、平均的には疾走パフォーマンスに影響しないが、高いパフォーマンスを発揮できるスパイクシューズのソール硬度は個々の選手によって異なる蓋然性が高い。

4.2 個人の特性に応じた最適なソール硬度について

60m走タイムが最も良かった試技のカーボンシートの硬度と身体特性、体力特性、疾走の特徴との間には有意な相関関係がみられず、本研究で用いた身体特性や体力特性、疾走の特徴を表す変数では、個人の特性に応じた最適なソール硬度の決定要因を明らかにすることができなかった。しかし、決定木分析では、リバウンドジャンプの接地時間がノーマル条件に対してC75条件とC100条件、C75条件に対してC100条件をそれぞれ分類するのに最も強く影響する説明変数であり、リバウンドジャンプの接地時間が長い選手が硬いソールのスパイクシューズを使用することで高い疾走パフォーマンスが得られる蓋然性が相対的に高い。先行研究においても、最も疾走パフォーマンスが高かったスパイクシューズのソール硬度と身体特性の間には有意な相関がなかったことを報告しており(Stefanyshyn and Fusco 2004)、高い疾走パフォーマンスの発揮に最適なスパイクシューズのソール硬度決定に影響する要因は本研究で用いた評価指標以外のものがある可能性がある。

4.3 疾走パフォーマンス変化と身体・体力特性、それらの特性と疾走中の時空間・地面反力変数

ノーマル条件に対してC75、C100それぞれの条件で変化した疾走パフォーマンス(タイム)と身体特性、体力特性の関係について、ステップワイズ法を用いた重回帰分析を行った結果、各条件で異なる身体特性、体力特性が選択され、有意な重回帰式が得られた。この結果は、C75条件あるいはC100条件で疾走パフォーマンスが高まる選手には特徴があることを示している。

ノーマル条件とC75条件の間の30m走タイムの差に対しては、左足の足趾把持力、アングルジャンプの接地時間、アングルジャンプの跳躍高を独立変数とする重回帰式が得られた。したがって、これらの変数を計測することで、C75条件において個々の選手の30m走タイムがどの程度向上するのか、または低下するのか予測することができる。個々の変数の影響としては、左足の足趾把持力が弱い、アングルジャンプの接地時間が長い、アングルジャンプの跳躍高が高い選手の

方が C75 条件のソール硬度のスパイクシューズを使用した場合に、30m の疾走パフォーマンスを高められると考えられる。ノーマル条件と C75 条件の間の 30-60m 区間タイムの差に対しては、ステップワイズ方によって変数が選択されなかった。このことは、C75 条件のソール硬度で変化する 30-60m 区間の疾走パフォーマンスは、本研究で用いた被験者の身体特性、体力特性と関係しないことを示す。さらに、C75 条件で変化した 30m 走タイムに対して抽出された身体特性、体力特性の変数で予測可能な疾走中の時空間変数や地面反力変数はなく、選択された身体特性、体力特性の変数が単純には特定の時空間変数や地面反力変数と関係していないことがわかった。

硬いソールは、疾走の支持期後半において中足指節関節の底屈を補助する働きをする。また、足趾の把持力は、足趾の中足指節関節の底屈力を部分的に評価していると考えられる。したがって、これらの背景からソール硬度が高いスパイクシューズで疾走パフォーマンスが高まるのは、足趾把持力が弱い選手であったと考えられる。さらに、加速局面の前半では支持時間が比較的長い。このことがアンクルジャンプにおける接地時間の長さが、ソール硬度が高いスパイクシューズでの疾走パフォーマンス変化と関係した背景にある可能性がある。スパイクシューズのソールは、支持期中盤に中足指節関節付近を中心に背屈方向に変形し、その後底屈方向へ復元する。硬いソールを曲げるためにはより大きな力を加える必要があり、その力は足関節の底屈力に大きく依存している。アンクルジャンプは足底屈のみで遂行する鉛直ジャンプであり、その跳躍高は足底屈力を評価していると解釈できる。したがって、このことを背景として、アンクルジャンプの跳躍高が高い選手は、ソール硬度が高いスパイクシューズで疾走パフォーマンスを高められたと考えられる。

ノーマル条件と C100 条件の間の 30m 走タイムの差に対しては、体重が独立変数として選択され、回帰式が得られた。回帰係数の値は低いものの体重によって、C100 条件において変化する 30m 走タイムを予測することができる可能性が示され、体重が重いほど C100 条件のソール硬度のスパイクを使用した場合に、30m の疾走パフォーマンスが高まると考えられる。ノーマル条件と C100 条件の間の 30-60m 区間タイムの差に対しては、体重、左足の足趾把持力、リバウンドジャンプの接地時間、アンクルジャンプの跳躍高を独立変数とする重回帰式が得られた。したがって、これらの変数を計測することで、C100 条件において 30-60m 区間タイムがどの程度向上するのか、または低下するのか予測することができる。個々の変数の影響としては、体重が重い、左足の足趾把持力が弱い、リバウンドジャンプの接地時間が短い、アンクルジャンプの跳躍高が高い選手の方が C100 条件のソール硬度のスパイクシューズを使用した場合に、30-60m 区間の疾走パフォーマンスを高められると考えられる。C100 条件の際に変化した 30m タイムに対して選択された身体特性（体重）を用いた、疾走中の時空間変数や地面反力変数に対する回帰式は複数が有意なものであった。総合すると、C100 条件で 30m 走タイムが向上する体重の重い選手は、C100 条件では滞空時間が増加することで、ステップ長が増加し、ステップ頻度が低下する。また、同様に減速力積が減少し、前後正味の平均力が増加、鉛直平均力、鉛直力積が増加する。これらのことは、体重が重い選手が C100 条件において 30m 走パフォーマンスを高められる背景に、鉛直方向へ発揮される力の増加とそれに伴う滞空時間、ステップ長の増加、支持期全体における平均加速力の増加があることを示している。C100 条件の際に変化した 30-60m 区間タイムに対して選択された身体特性、体力特性（体重、左足の足趾把持力、リバウンドジャンプの接地時間、アンクルジャンプの跳躍高）を用いた、疾走中の時空間変数や地面反力変数に対する回帰式は、25-26 歩目の鉛直力積に対するもののみが有意であった。各変数の影響は、体重が重いほど、足趾把持力が弱

いほど、リバウンドジャンプの接地時間が長いほど、アングルジャンプの跳躍高が高いほど、C100条件において鉛直力積が大きくなると解釈できる。しかし、鉛直力積は、疾走パフォーマンスに直接影響する変数ではないことから、C100条件で変化した30-60m区間タイムに対して選択された身体特性、体力特性の変数が単純に特定の時空間変数や地面反力変数と関係していないと結論できる。

先に述べたように、スパイクシューズのソールは、支持期中盤に中足指節関節付近を中心に背屈するため、硬いソールを曲げるためにはより大きな力を加える必要がある。本研究では、カーボンシートの硬度を被験者間で統一したため、支持期においてカーボンシートを曲げるためには、体重の軽い選手は体重当たりに、より大きな力を発揮する必要があった。C100条件のカーボンシートを屈曲させるためには、大きな力が必要であるために体重の軽い選手がパフォーマンスを低下させることになり、疾走パフォーマンスの変化と体重の間に関係が生じたと考えられる。一方、C100条件での地面反力の変化と体重の間にも有意な関係がみられ、体重の重い選手ほど、C100条件で発揮された力（前後正味の平均力、鉛直力積、鉛直平均力）が大きくなった。これらのことは、体重の重い選手は、より硬いスパイクシューズを利用することで、より効果的な地面への力発揮が可能となり、疾走パフォーマンスを向上させることができる可能性を示す。足趾把持力やアングルジャンプの跳躍高については、C75条件における変数の関係と同様の背景が存在すると考えられる。一方、C100条件で疾走パフォーマンスは、リバウンドジャンプの接地時間が短いほうが向上することについては、関係が30-60m区間の限られることから、高速条件下においては支持時間が短いことを背景に関係が表出している可能性がある。

4.4 研究の限界と今後の課題

本研究では、ソール硬度の異なるスパイクシューズが疾走パフォーマンスに与える影響やソール硬度が異なる際に疾走パフォーマンスが向上する選手の身体、体力的特徴の関係、異なるソール硬度で走った際の時空間変数や地面反力の違いと選手の身体、体力的特徴の関係について明らかにしたが、それらの背景にある疾走動作や疾走中に関節で発揮された力については検討していない。疾走動作や疾走中に関節で発揮された力については、異なるソール硬度での疾走を理解するために有益であると考えられ、今後検討することが課題としてあげられる。また、本研究では決木分析において、リバウンドジャンプの接地時間が長い選手のほうが、硬いソールのシューズを着用した場合にタイムが良い選手が多いという結果であったが、ステップワイズ法を用いた重回帰分析の結果では、C100条件で疾走パフォーマンスが高まる選手は、リバウンドジャンプの接地時間が短いという関係であった。これらは矛盾する結果と捉えることもでき、選手に最適なスパイクシューズのソール硬度を提案することの難しさを示している。したがって、個々の選手に最適なスパイクシューズのソール硬度を提案できるように、今後より多くの被験者を対象とし、本研究で採用したものと異なる身体・体力特性を評価する指標についてデータを収集する必要がある。

5 まとめ

本研究では、スパイクシューズのソール硬度の違いが加速疾走パフォーマンスに与える影響について検証し、競技レベルや筋力に応じた適切なスパイクシューズのソール硬度を明らかにしようとした。その結果、スパイクシューズのソール硬度は、グループ平均では疾走パフォーマンス

に影響しないが、高いパフォーマンスを発揮できるスパイクシューズのソール硬度は個々の選手によって異なる可能性があることがわかった。競技レベルや筋力に応じた適切なスパイクシューズのソール硬度に関して、本研究で用いた身体特性や体力特性、疾走の特徴を表す変数では、個人の特性に応じた最適なソール硬度の決定要因を明らかにすることはできなかったが、リバウンドジャンプの接地時間が長い選手が硬いソールのスパイクシューズを使用することで高い疾走パフォーマンスが得られる蓋然性が相対的に高かった。一方、硬いソールのスパイクシューズを使用することによる疾走パフォーマンスの向上には、体重が重い、足趾把持力が弱い、アングルジャンプの跳躍高が高い、アングルジャンプの接地時間が長い、リバウンドジャンプの接地時間が短いことが複合的に影響していた。さらに、体重が重いことは、硬いソールのスパイクシューズを使用した際に、より効果的な地面への力発揮を生じさせる可能性が示された。

参考文献

- Balsalobre-Fernandez C, Glaister M, Lockey RA: The validity and reliability of an iPhone app for measuring vertical jump performance. *J Sports Sci* 33:1574-1579, 2015
- Bezodis NE, Salo A IT, Trewartha G: Modeling the stance leg in two-dimensional analyses of sprinting: inclusion of the MTP joint affects joint kinetics. *J Appl Biomech* 28:222-227, 2012
- Bezodis NE, Salo AI, Trewartha G: Lower limb joint kinetics during the first stance phase in athletics sprinting: three elite athlete case studies. *J Sports Sci*. 32:738-746, 2014
- Bosco C, Luhtanen P, Komi PV: A simple method for measurement of mechanical power in jumping. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol* 50:273-282, 1983
- Debaere S, Delecluse C, Aerenhouts D, Hagman F, Jonkers I: From block clearance to sprint running: Characteristics underlying an effective transition. *J Sports Sci* 31:137-149, 2013
- Goldmann JP, Sanno M, Willwacher S, Heinrich K, Bruggemann GP: The potential of toe flexor muscles to enhance performance. *J Sports Sci*. 31:424-433, 2012
- Hashimoto T, Sakuraba K: Strength training for the intrinsic flexor muscles of the foot: effects on muscle strength, the foot arch, and dynamic parameters before and after the training. *J Phys Ther Sci* 26:373-376, 2014
- Johnson MD, Buckley JG: Muscle power patterns in the mid-acceleration phase of sprinting. *J Sports Sci* 19:263-272, 2001
- Ker RF, Bennett MB, Bibby SR, Kester RC, Alexander RM: The spring in the arch of the human foot. *Nature* 325:147-149, 1987
- Kurihara T, Yamauchi J, Otsuka M, Tottori N, Hashimoto T, Isaka T: Maximum toe flexor muscle strength and quantitative analysis of human plantar intrinsic and extrinsic muscles by a magnetic resonance imaging technique. *J Foot Ankle Res* 7:26, 2014
- Nagahara R, Naito H, Miyashiro K, Morin JB, Zushi K: Traditional and ankle-specific vertical jumps as strength-power indicators for maximal sprint acceleration. *J Sports Med Phys Fitness* 54:691-699, 2014
- Nagahara R, Mizutani M, Matsuo A, Kanehisa H, Fukunaga T: Associations of step width with sprinting performance and ground reaction forces during acceleration phase. *Int J Sports Med*, in press
- Morin JB, Slawinski J, Dorel S, de VES, Couturier A, Samozino P, Brughelli M, Rabita G: Acceleration capability in elite sprinters and ground impulse: Push more, brake less? *J Biomech* 48:3149-3154, 2015
- Rabita G, Dorel S, Slawinski J, Saez-de-Villarreal E, Couturier A, Samozino P, Morin JB: Sprint mechanics in world-class athletes: a new insight into the limits of human locomotion. *Scand J Med Sci Sports* 25:583-594, 2015

- Slawinski J, Termoz N, Rabita G, Guilhem G, Dorel S, Morin JB, Samozino P: How 100-m event analyses improve our understanding of world-class men's and women's sprint performance. *Scand J Med Sci Sports* 27:45-54, 2017
- Smith G, Lake M, Lees A, Worsfold P: Measurement procedures affect the interpretation of metatarsophalangeal joint function during accelerated sprinting. *J Sports Sci* 30:1521-1527, 2012
- Stefanyshyn D, Fusco C: Increased shoe bending stiffness increases sprint performance. *Sports Biomech* 3:55-66, 2004
- Stefanyshyn DJ, Nigg BM: Mechanical energy contribution of the metatarsophalangeal joint to running and sprinting. *J Biomech* 30:1081-1085, 1997