

インドアシューズソールにおけるジャンプ着地時の衝撃緩衝性評価

岩佐 雄大郎^{*1}, 磯部 真志^{*1}, 仲谷 政剛^{*2}, 田川 武弘^{*1}, 西脇 剛史^{*2}

Evaluation of shock attenuation for indoor shoe sole during landing from a drop jump

Yutaro IWASA^{*1}, Masashi ISOBE^{*1}, Seigo NAKAYA^{*2}, Takehiro TAGAWA^{*1}

and Tsuyoshi NISHIWAKI^{*2}

^{*1} ASICS Corporation
6-2-1, Takatsukadai, Nishi-ku, Kobe

Shock attenuation property of shoe is especially important in indoor-sports because indoor-shoe users perform a jump and suffer a large landing impact force repeatedly. Moreover foot landing pattern is essentially different between jumping and running in that the forefoot lands first with the rearfoot next in jumping and vice-versa in running. This study firstly developed an evaluation method of shock attenuation in drop jump with accelerometer after the relationship between the acceleration data on the shank and sensory test values of shock attenuation was found. Furthermore, the stress-strain curves of shoe-sole materials under compressive load and also plantar pressure distribution during drop jumps were measured to calculate the stored energy in the forefoot and rearfoot areas of shoe-sole respectively. It was found that the main area attenuating the landing force by its compressive deformation in drop jump was the rearfoot of shoe-sole however the shock attenuation property could be affected by the hardness of the forefoot area if the mechanical conditions of the rearfoot area were the same.

Key Words : Shock attenuation, Shoe-sole, Strain energy, Drop jump, Acceleration, Ground reaction force

1. 結 言

使用者の障害を予防することは、スポーツシューズの重要な役割の1つと言える。そのため、身体への負荷を低減する衝撃緩衝性（以下、緩衝性と称する）は不可欠な機能である。これまで著者らは、動作に適合した緩衝性評価手法の確立を進め、ランニング着地における緩衝性の定量化手法を提案し、これが官能試験値との高い相関を有することを明らかにした⁽¹⁾。

着地衝撃の評価にはフォースプレートが用いられることが多い。しかし、一般的なフォースプレートは据え置き型であるため、実験環境が制限されるという問題点がある。さらに、測定対象の足部のみでフォースプレートを踏むという動作的な制約を被験者に課すことになる。一方、加速度計による測定は場所を選ばず、動作の制約を受けにくいという意味で、より簡便な方法である。地面反力と加速度の関係について、両者を同時に計測することにより、それらの相関関係を調査した研究が多数報告されている。例えば、走行や跳躍動作の着地において、脛部に装着した加速度計のピーク値が地面反力垂直成分（Fz）の1stピーク値と高い相関を示すことや⁽²⁾⁽³⁾、跳躍時の踏切・着地動作において、非利き足外踝部に装着した加速度計のピーク値とFzのピーク値との間に強い相関が認められることが報告されている⁽⁴⁾。

インドア競技におけるジャンプ着地動作では、ランニング着地動作と大きく異なる特徴が存在する。例えば、ジャンプ着地時にはランニング着地時と比較して人体により大きい反力が作用する⁽⁴⁾。そのため、シューズによりこれを低減することは特に重要である。著者らはインドア競技のジャンプ着地動作において下肢に生じる加速

^{*1} 客員, 株式会社アシックス スポーツ工学研究所 (〒651-2271 神戸市西区高塚台 6-2-1)

^{*2} 正員, 株式会社アシックス スポーツ工学研究所

E-mail: iwasa-yu@asics.co.jp

度の周波数解析を行い、ジャンプ着地とランニング着地の比較や、シューズソールの影響について報告してきた^{5) 6)}。また、ランニング着地では一般に後足部から前足部の順に接地するのに対し、ジャンプ着地では前足部から後足部の順に接地するため、身体への負荷の伝達様式が大きく異なると考えられる。したがって、シューズソールの前足部および後足部それぞれの力学特性と緩衝性との関係を明らかにすることにより、インドアシューズの緩衝性設計に有益な知見が期待される。

本研究では、ジャンプ着地時の地面反力および下肢に貼付した加速度計により得られた加速度と、官能試験値との比較から、簡便な評価が可能な緩衝性評価手法について検討した。さらに、シューズソールに貯蔵されるひずみエネルギーを算出し、ソール前足部および後足部の力学特性が緩衝性に及ぼす影響について考察を加えた。

2. ジャンプ着地時の緩衝性評価

2.1 実験

本実験では、健常な成人男性 5 名 (174 ± 8 cm, 67.5 ± 10.5 kg) を被験者とした。被験者には実験の趣旨について説明を行い、協力への同意を得た上で実験を行った。被験者の踵骨側面および脛骨稜上近位端より 100 mm 下方の位置に、静止立位時の重力方向を向くように一軸加速度計 (Type4393, Brüel & Kjær 社製) を貼付した (図 1)。なお、加速度計の貼付位置は軟部組織が比較的少ない位置とし、踵骨は身体への外力の作用点として、脛骨はシューズ着用時に貼付可能な範囲において、外力の作用点に近い部位として、それぞれ選択した。

使用サンプルは、シューズソール形状に厚さ 20 mm で抜き出した、3 種類のエチレン-酢酸ビニル共重合体 (Ethylene Vinyl Acetate) のフォーム材 (以下、EVA フォームと称す) とした。なお、各 EVA フォームについて、ゴム硬度計 (アスカーゴム硬度計 C 型, 高分子計器社製) により測定した硬度は 45, 57, 62 度である (以下、それぞれ HC45, HC57, HC62 と称す)。万能試験機 (AG-50kNISMS, 島津製作所社製) を用い、ひずみ速度 0.01 s⁻¹ で測定した圧縮荷重下における各 EVA フォームの応力-ひずみ曲線を図 2 に示す。

3 種類の EVA フォームを両面テープにて被験者の足底部に貼付し、台上から前方への両脚着地動作を対象動作とした。被験者には、埋設されたフォースプレート (9287C, Kistler 社製) を右足のみで踏むこと、足首の背屈および膝・腰の屈曲による衝撃緩和を抑えるため、全試技を通してこれらの角度を小さく且つ一定にすることを指示した。本実験では被験者の負担を考慮し、再現性良く反復できる高さとして、落下高さを被験者の外踝から大転子までの長さの 50% (42.3 ± 3.3 cm) とした。また、着地時における足部の様子を、側方から高速度ビデオカメラ (MEMRECAM GX-1, ナックイメージテクノロジー社製) を用い、サンプリング周波数 500 Hz で撮影した。なお、上記の計測に加え、一対比較法による緩衝性の官能試験も行った。



Fig.1 Positions of accelerometers.

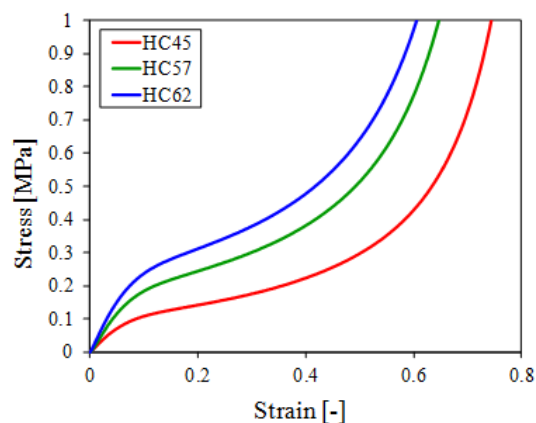


Fig.2 Stress – strain curves of EVA foams.

Table1 Sensory test values and peak values of acceleration and ground reaction force with coefficient of determination between sensory test value and each peak value.

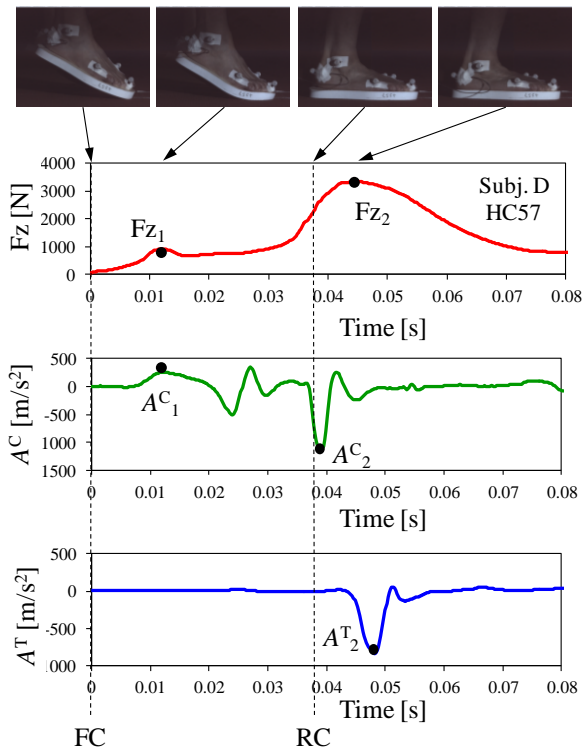


Fig.3 Typical patterns of vertical ground reaction force (F_z) and accelerations at calcaneus (A^C) and tibia (A^T). Upper pictures illustrate foot postures in each time.

		Subj. A	Subj. B	Subj. C	Subj. D	Subj. E
Sensory test value [-]	HC45	0.6034	0.4373	0.5894	0.5817	0.5789
	HC57	0.2349	0.3024	0.2728	0.2476	0.2705
	HC62	0.1615	0.2601	0.1376	0.1705	0.1504
A^{C_1} [m/s^2]	HC45	527.8	243.3	1258	290.8	812.7
	HC57	431.2	229.1	1177	398.4	984.3
	HC62	721.0	244.1	1369	423.9	1073
	R^2	0.1147	0.0596	0.1444	1.0000	0.9955
A^{C_2} [m/s^2]	HC45	-667.5	-708.4	-838.2	-695.1	-
	HC57	-1106	-909.4	-1025	-1165	-
	HC62	-849.1	-995.0	-1165	-1083	-
	R^2	0.5070	0.9958	0.9790	0.8886	-
A^{T_2} [m/s^2]	HC45	-252.1	-618.6	-791.6	-642.9	-210.9
	HC57	-324.8	-879.9	-980.9	-746.7	-227.4
	HC62	-365.5	-1069	-1079	-822.9	-243.5
	R^2	0.9579	0.9598	0.9978	0.9349	0.9434
F_{z1} [N]	HC45	851.3	647.4	679.9	853.7	823.2
	HC57	949.3	663.2	775.5	869.5	1015
	HC62	995.8	693.2	880.0	964.3	1034
	R^2	0.9731	0.7938	0.9371	0.5485	0.9629
F_{z2} [N]	HC45	2782	2322	2743	3818	1770
	HC57	3149	2458	2797	3679	1857
	HC62	3266	2676	2992	3650	2094
	R^2	0.9938	0.8293	0.7326	0.9998	0.7568

2・2 結果および考察

図3に F_z 、踵骨加速度 (A^C)、脛骨加速度 (A^T) の時間履歴と、各特徴点における接地状態の典型例を示す。これによれば、接地はつま先より開始され (Forefoot contact, FC)、約 0.01 sec 後に F_z の第 1 ピーク (F_{z1}) が出現する。これとほぼ同時点において、 A^C に正のピーク (A^{C_1}) が出現する。この時点での接地領域は前足部のみである。その後、接地領域が後足部へ拡大し、踵が接地 (Rearfoot contact, RC) すると、第 2 ピーク (F_{z2}) が出現する。5 名全ての被験者において F_{z2} は F_{z1} の約 2-4 倍の値を示したことから、FC 後よりも RC 後の方が、人体により大きな地面反力が作用していることが確認できる。RC 以降には A^C の負のピーク (A^{C_2}) と A^T の負のピーク (A^{T_2}) も出現し、その後抜重していく様子が確認された。

表 1 に、各被験者における、各サンプルの官能試験値、地面反力と加速度に関する各ピーク値と共に、官能試験値と各ピーク値の相関関係を示す決定係数 (R^2) を併記する。表 1 において R^2 が 0.9 を超える場合、該当する物理量の R^2 値を太線で囲った。まず、 A^{C_2} について、被験者 E は明確なピークが確認できなかった。また、 A^{C_2} 、 F_{z1} および F_{z2} は官能試験値との高い相関が確認できない被験者が見られた。これらに対し、 A^{T_2} は 5 名の被験者全員において明確なピークが出現し、官能試験値との高い相関が得られた。以上より、ジャンプ着地時の緩衝性を簡便に評価する指標として、脛骨加速度のピーク値 A^{T_2} は妥当であると判断した。

3. 硬度分布が緩衝性に及ぼす影響

前章において、FC 後より RC 後の方が、人体により大きな地面反力が作用していることを示した。このことから、ソール前足部に比べ、後足部の力学特性が緩衝性に及ぼす影響は大きいと考えられる。しかしながら、着地動作において、踵部からだけではなく、前足部からも身体へ地面反力が作用することを考慮すれば、ソール前足部の力学特性が緩衝性に与える影響は無視できない。そこで本章では、ソール前足部および後足部材料の硬度が異なるサンプルを用い、各サンプルのジャンプ着地動作における緩衝性について検討するとともに、ソール内部に貯蔵されるひずみエネルギーの観点から考察を行った。

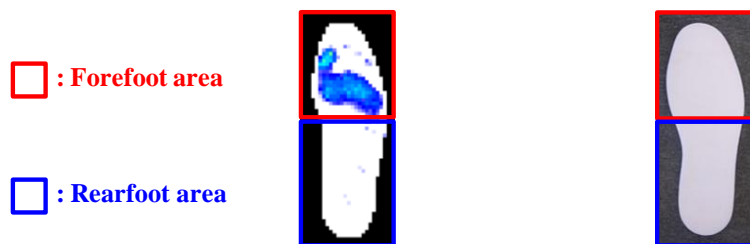
3・1 実験

サンプルは、前章と同様に加工した3種類のEVAフォームを前後に切断し、接着剤で接合したものである。切断位置は図4に示すように、 Fz_1 が出現する時点での接触領域と非接触領域に基づき決定した。ソール前足部および後足部に対して、各3種の材料を組み合わせた計9種のサンプルを作成し、前足部材料の硬度の後に後足部のそれが続くようにサンプル名を決定した(例:前足部45度,後足部57度のサンプル名はHC45-57)。なお、ジャンプ着地動作においては圧縮方向の変形が支配的であるため、接合による影響は小さいと判断した。本実験では前章と同一条件に加え、足圧分布測定システム(F-Scan System, Tekscan社製)を用い、ソールと足部の間に生じる垂直圧力分布(以下、足圧分布と称す)を測定した。なお、測定に使用したセンサーシートにおける圧力の最小測定単位(以下、センシングユニット, SUと称す)の寸法は一辺5.08 mmである。被験者は前章で対象とした内の1名(身長176 cm, 体重66 kg)であり、フォースプレートの位置、加速度計の貼付部位に関しては2・1と同様である。

以下、ひずみエネルギーの算出方法について説明する。まず、MacWilliamsらの方法⁷⁾を用い、各SUの圧力値比を基に、フォースプレートから得られた Fz を各SUに分配した。さらに、各SUにおける Fz を、SUの面積(25.64 mm²)で除することによって、各SUに作用する圧力を算出した。次に、図2に示した応力-ひずみ曲線を基に、時刻 t における圧力から各SUに対応したサンプル各部位のひずみを推定した。さらに、時刻 t における i 番目のSU対応部位のひずみエネルギー $u_i(t)$ を次式として計算した。

$$u_i(t) = v_0 \int_0^{\varepsilon(t)} \sigma(\varepsilon) d\varepsilon \quad (1)$$

ここで、 v_0 は各SU対応部位の初期体積、 $\sigma(\varepsilon)$ はひずみ ε における応力、 $\varepsilon(t)$ は時刻 t におけるひずみである。さらに、ソール前足部および後足部、それぞれに貯蔵されたひずみエネルギーを検討するため、接合部を境界として前足部と後足部に対応した各SUにおけるひずみエネルギーの合計値をそれぞれ $U_f(t)$ 、 $U_r(t)$ として算出した。



(a) Plantar pressure distribution in HC45-45. (b) Shoe-sole sample.

Fig.4 Forefoot and rearfoot areas defined based on contact area at the time of Fz_1 .

3・2 結果および考察

3・2・1 ソール前足部の影響

単一硬度のサンプルを用いた前章の実験結果では、全ての被験者において硬度の低いHC45が最も緩衝性が良いことを示した。そこで、本節では、後足部材料の硬度を45度に統一し、前足部材料の硬度を変更した各サンプルを比較し、前足部の力学特性が緩衝性に及ぼす影響について検討を行った。

各サンプルの A^T_2 と官能試験値との関係を図5に示す。いずれの値も、HC45-45, HC57-45, HC62-45の順に並んでおり、後足部材料同一の条件下において、緩衝性は前足部材料の硬度に依存することが確認できた。

次に、ひずみエネルギーおよびFzの時間履歴と、各特徴点における足圧分布の典型例を図6に示す。Fzと $U_f(t) + U_r(t)$ のピーク時刻は対応しており、ソールに作用する地面反力が大きいほど、貯蔵されるひずみエネルギーも大きいことが確認できる。 $U_f(t)$ の急激な立ち上がりを確認できる時点をもFCとし、FCからRCまでをPhase1、RCからFzが被験者の体重に対応する値(647 N)を下回る時点までをPhase2とした。

$U_f(t)$, $U_r(t)$ をそれぞれ時間積分することにより、ソールの前足部および後足部に蓄積されたひずみエネルギーの積算量を算出し、それぞれ S_f , S_r とした。図7にPhase1およびPhase2における S_f , S_r の値を示す。まず、Phase1に着目すると、接地領域は前足部のみであるため、ひずみエネルギーの多くはソール前足部に貯蔵されていることがわかる。また、前足部材料の硬度上昇に伴い、 S_f は減少し S_r は増大することが確認できる。次にPhase2に着目すると、Phase1と比較して S_f および S_r の値が共に大きいことから、ひずみエネルギーは主としてPhase2で貯蔵されていることがわかる。さらに、Phase2においていずれのサンプルでも S_f は S_r を上回ることから、シューズソールにおいて、圧縮変形によるジャンプ着地衝撃の緩衝は、主として後足部が担っていることが示された。しかしながら、Phase2においても、Phase1と同様、ソール前足部材料の硬度上昇に伴う、 S_f の減少および S_r の増大が確認できる。したがって、ソール後足部材料の硬度が低い場合には、前足部材料の硬度と緩衝性との間には相関があることが確認された。次項にて、後足部材料の硬度が高い場合について考察する。

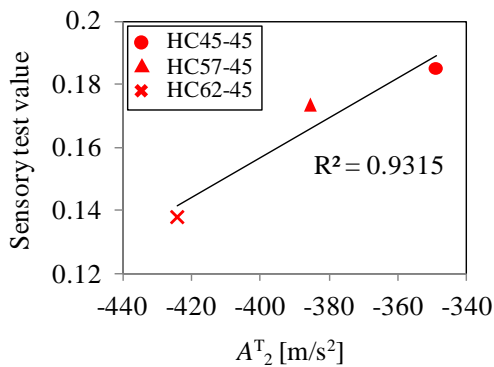


Fig.5 Correlation between A^T_2 and sensory test value in HC45-45, HC57-45, and HC62-45.

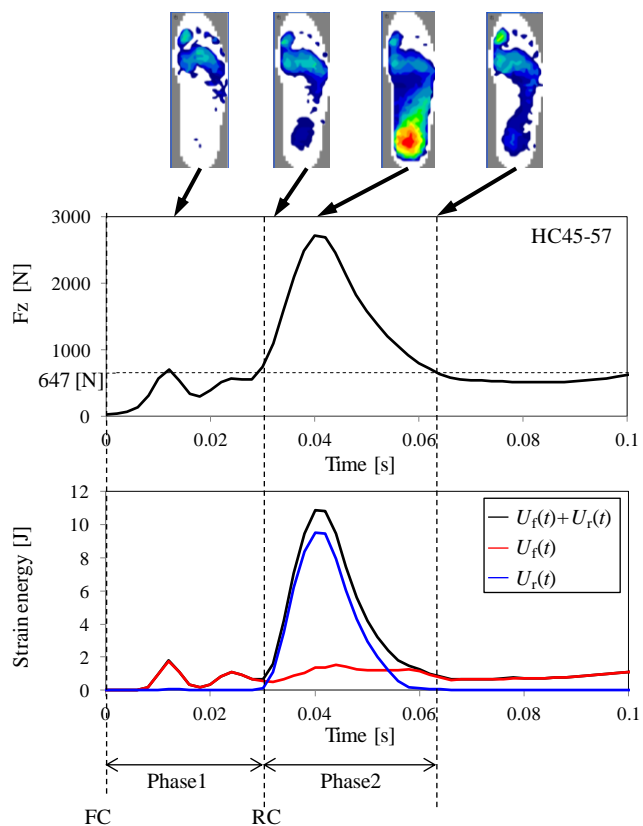


Fig.6 Typical patterns of strain energy stored in shoe-sole and Fz during landing motion. Upper figures illustrate plantar pressure distribution in each time.

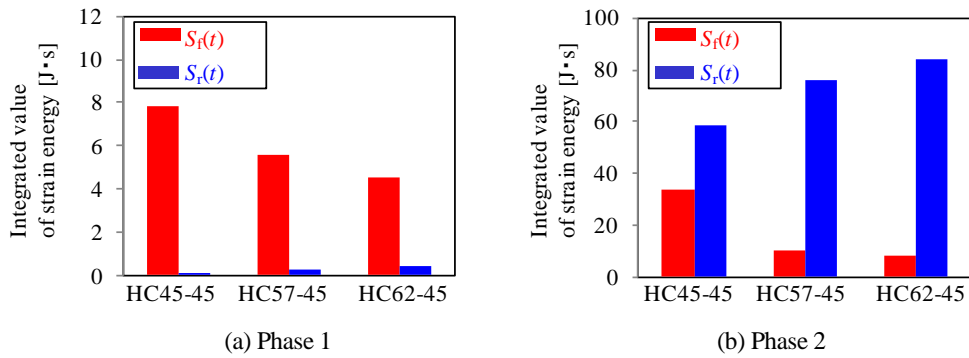


Fig.7 Integrated values of strain energy stored in HC45-45, HC57-45, and HC62-45 during landing motion.

3・2・2 ソール前足部および後足部の関係

後足部に硬度 57 度および 62 度の EVA フォームを用いた各サンプルについて、 A^T_2 と官能試験値との関係を検討した。その結果、図 5 に示した後足部に硬度 62 度の EVA フォームを用いた各サンプルの結果と同様、前足部材料の硬度が低いサンプルほど優れた緩衝性を有することが確認された (HC57: $R^2 = 0.999$, HC62: $R^2 = 0.9844$)。また、図 8 に、より大きいひずみエネルギーの貯蔵される Phase2 における、各サンプルの S_f および S_r を示す。同図より、全てのサンプルにおいて S_f が S_r を上回ること、さらに、前足部材料の硬度上昇に伴う S_f の減少および S_r の増大が確認できる。以上の結果から、ジャンプ着地時において、圧縮変形によるひずみエネルギーは主としてソール後足部に貯蔵されるが、前足部材料の硬度が低いほど、前足部に貯蔵されるひずみエネルギーが増え、後足部に貯蔵されるひずみエネルギーは減少することを示している。

ここで、HC45-45, HC57-45, HC62-45 の各サンプルについて、 Fz_2 出現時における足圧分布を図 9 に示す。全てのサンプルにおいて、踵部付近に圧力が集中していること、また、前足部材料の硬度が低いほど、踵部に作用する圧力が足底部全体に分散していることが確認できる。実際に、HC45-45, HC57-45, HC62-45 の踵部における最大圧力値は、それぞれ 0.346, 0.615, 0.755 MPa であった。図 2 に示した HC45 の応カーひずみ曲線を用い、各サンプルの最大圧力値に対応する応カーひずみ曲線の傾き、すなわち圧縮剛性を比較すると、HC45-45, HC57-45, HC62-45 の順に高い。この圧縮剛性の違いが、後足部同一条件下において、緩衝性が前足部材料の硬度に依存する原因として考えられる。以上のことから、着地動作が頻繁に行われるインドアスポーツ用シューズにおいては、後足部のみならず、前足部についても緩衝性を考慮したミッドソールの材料選択および構造設計が重要であると考えられる。

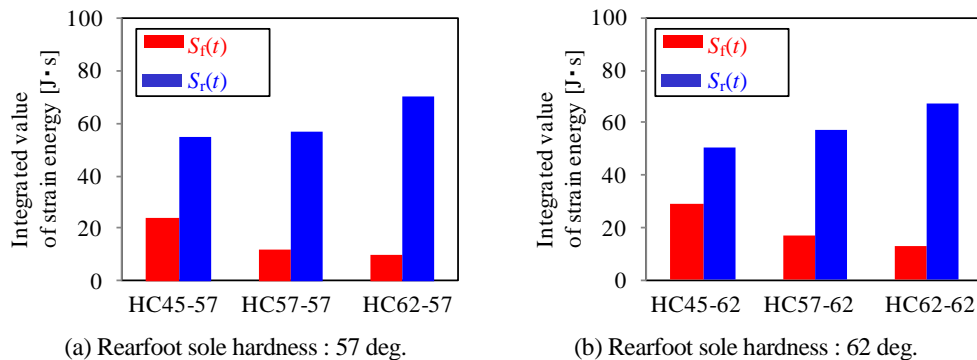


Fig.8 Integrated values of strain energy stored in samples which hardness in rearfoot are 57 and 62 deg. during landing motion.

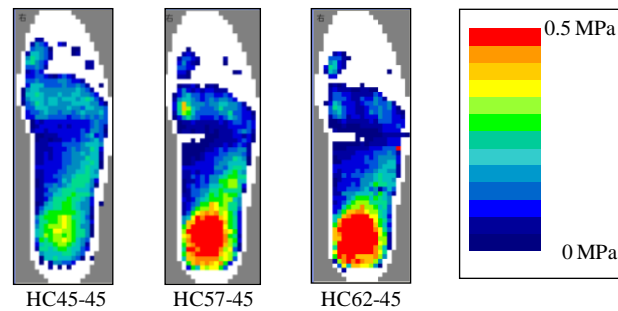


Fig.9 Plantar pressure distributions at the time of Fz_2 .

4. 結 言

本研究では、ジャンプ着地時の緩衝性を簡便に評価可能な指標について検討を行うとともに、シューズソールに貯蔵されるひずみエネルギーから、ソール前足部および後足部の力学特性が緩衝性に及ぼす影響について検討を行った。本研究により得られた結果を以下に示す。

- (1) 脛骨に生じる加速度のピーク値は、着地動作時の緩衝性を評価するための簡便な測定指標になる。
- (2) ひずみエネルギーの多くはソール後足部に貯蔵されており、圧縮変形による衝撃緩衝は主として後足部が担っている。
- (3) 後足部材料同一の条件下において、前足部材料の硬度が低いほど、緩衝性は向上する。この理由として、前足部にひずみエネルギーが貯蔵されることで、踵部に作用する圧力を分散させることができ、踵部の圧縮剛性が低くなるためと考えられる。
- (4) インドアシューズのジャンプ着地時における緩衝性を設計する上では、ソール後足部のみならず、前足部の材料選択および構造設計が重要である。

文 献

- (1) 西脇剛史, “FEM を用いたシューズの機能性評価法”, バイオメカニクス学会誌, Vol. 24, No. 2 (2000), pp. 82-86.
- (2) Ewald M. Hennig, et al., “Use of Ground Reaction Force Parameters in Predicting Peak Tibial Accelerations in Running”, *Journal of Applied Biomechanics* 9 (1993), pp306-314.
- (3) Niell G. Elvin, et al. “Correlation Between Ground Reaction Force and Tibial Acceleration in Vertical Jumping”, *Journal of Applied Biomechanics* 23 (2007), pp. 180-189.
- (4) 長谷川善通, 丸山剛生, “球技スポーツの動作における足部衝撃加速度と着地衝撃の関係”, スポーツ・アンド・ヒューマン・ダイナミクス 2012 講演論文集, pp. 460-463.
- (5) 坂本賢志, 西脇剛史, “ジャンプ着地衝撃を考慮したインドアシューズ設計”, スポーツ・アンド・ヒューマン・ダイナミクス 2011 講演論文集, pp. 289-292.
- (6) 坂本賢志, 中田麻衣, 西脇剛史, “ジャンプ着地衝撃における人体への影響”, スポーツ・アンド・ヒューマン・ダイナミクス 2012 講演論文集, pp. 261-264.
- (7) Mac Williams, B.A., Cowley, M. and Nicholson, D.E., “Foot Kinematics and Kinetics during Adolescent Gait”, *Gait and posture* 17 (2003), pp. 214-224.