

架橋発泡樹脂を用いたユニソール構造による超軽量耐滑シューズの開発

Development of shoes with ultra lightweight and high slip resistance
ensured by an unisole structure of cross-linked resin foam

東北大（正）*西 駿明（正）山口 健 安衛研（正）柴田 圭 アシックス（正）原野 健一

東北大（正）堀切川 一男

Toshiaki Nishi*, Takeshi Yamaguchi*, Kei Shibata**, Kenichi Harano***, Kazuo Hokkirigawa*

*Tohoku University, **National Institute of Occupational Safety and Health, Japan, ***Asics Corporation

1. 緒言

シューズのソールは多くの場合、アウトソールとミッドソールの 2 層構造を有するが、シューズの軽量化や生産での接着工程簡略化を目的に、アウトソールとミッドソール両方の機能を担う単層構造（ユニソール）の採用が近年増えてきている¹⁾。ユニソールの場合、緩衝性確保のため架橋発泡樹脂で構成されるが、加硫ゴム相当の耐滑性と耐摩耗性を確保することが技術的に困難とされ、シューズ靴底材料開発の課題の一つとして挙げられる¹⁾。本技術は、架橋発泡樹脂における気孔率分布の制御により、ユニソールとしての耐滑性と耐摩耗性を達成する技術であり、東京 2020 オリンピック・パラリンピック競技大会に参加するフィールドキャスト（大会スタッフ）やシティキャスト（都市ボランティア）のユニフォームシューズとして実用化されている²⁾。本稿では、架橋発泡樹脂の摩擦摩耗特性に及ぼす気孔率分布の影響に関する研究成果ならびにユニフォームシューズの設計内容を概説する。

2. 架橋発泡樹脂の摩擦と摩耗に及ぼす気孔率の影響

架橋発泡樹脂製ソールは、Fig. 1 に示すように、架橋剤と発泡剤を添加した樹脂を充填した金型を数十分間 160–170℃にて加熱し、金型を開放した際に発泡することで成型される¹⁾。本成型手法による架橋発泡樹脂の構造的特徴として、Fig. 2(a)に示すように、表面近傍に気孔構造を有さないスキン層が形成され、Fig. 2(b)に示すように、気孔率 α は表面からの鉛直距離 z の増大に伴い、0 から架橋発泡樹脂内部の気孔率 α_{bulk} まで増大する¹⁾。最も一般的なミッドソール材料である架橋発泡エチレン・酢酸ビニル共重合体(EVA)では、 α_{bulk} の増大に伴い、弾性率に加えて、引張強度や引裂強度は減少する¹⁾。無潤滑下において、スキン層を除去した架橋発泡 EVA の摩擦係数 μ は、 α_{bulk} の増大に伴い、増大傾向を示す^{3,4)}。一方、スキン層を有する架橋発泡 EVA の場合、徐々にスキン層が摩耗することで、摩耗深さ d は増大する¹⁾。さらに、 d の増大に伴い、摩耗面の気孔率 $\alpha_{\text{worn_surface}}$ は増大し、 μ は摩耗初期では減少し、その後増大傾向を示す¹⁾。凝着項が真実接触面積 A_r に比例することを考慮すると、摩耗初期における μ の減少傾向は、スキン層最表面では気孔構造を有さないことで A_r が大きいため、摩耗により気孔構造が摩耗面に露出することで、 A_r が減少したことが要因と推察される¹⁾。また、Fig. 3 に示すように、摩耗面に気孔構造露出後は、 α_{bulk} および垂直荷重 F_n に関わらず、 μ と比摩耗量 w_s は $\alpha_{\text{worn_surface}}$ と正の相関を示す¹⁾。さらに、 F_n の影響に着目すると、同一の $\alpha_{\text{worn_surface}}$ では、 μ と w_s は F_n に対してそれぞれ負、正の相関を示す¹⁾。特に w_s は、 μ と比較すると、 $\alpha_{\text{worn_surface}}$ および F_n の影響が非常に大きい。換言すると、架橋発泡 EVA の耐摩耗性を増大させるためには、 α_{bulk} および F_n の最小化が効

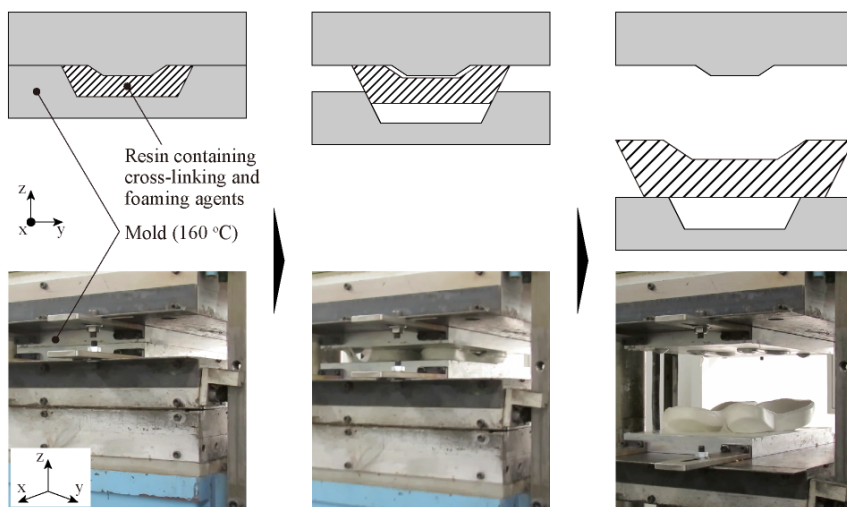


Fig. 1 Typical process of making cross-linked EVA foam soles¹⁾

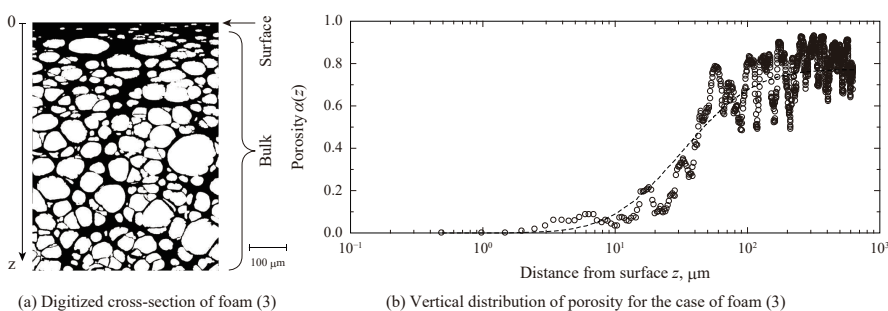


Fig. 2 Digitized vertical cross-section view and vertical distribution of α plotted against the distance from the surface z ¹⁾

果的であるといえる。アウターソール全体に負荷される F_n は材料設計により直接制御することはできないが、 F_n の最小化は、接触圧力の最小化と同等であるため、弾性率 E の最小化により達成可能であり、同時に高摩擦化に寄与できる。 α_{bulk} の減少に伴いスキン層厚さが増大する傾向¹⁾も考慮すると、低弾性樹脂で構成された低 α_{bulk} の架橋発泡樹脂は、耐摩耗性に優れることが示唆される。

3. 架橋発泡樹脂を用いたユニソール構造を有するシューズの開発

Figure 4 にユニフォームシューズおよびユニソール単体の外観を示す。東京 2020 オリンピック・パラリンピック競技大会では、夏季開催が故に酷暑が想定されたため、通気性の向上に特化した構造が採用されている。具体的には、通気性の高いアップ材の採用に加え、Fig. 4(c)に示すようにユニソール上面に通気溝を、さらに中敷きおよび中底に通気口を鉛直方向に配置することで、ユニソール側面からアップ内部までの通気経路を確保した構造となっている⁵⁾。ユニソール設計の視点から本構造を見ると、耐摩耗性に加えて、溝を支える壁部に F_n が集中することによる耐へたり性の減少が懸念される。本アイテムのユニソール開発では、前章で紹介した架橋発泡 EVA の摩擦摩耗特性に及ぼす α_{bulk} と F_n の影響に着目し、低 α_{bulk} かつ低 E となる架橋発泡樹脂を開発することで、耐滑性と耐摩耗性に優れたユニソールの完成に至った。一般的に、架橋発泡樹脂の耐へたり性は、 α_{bulk} と負の相関を示すため、低 α_{bulk} とすることで、懸念されていた通気溝壁部の耐久性を確保した。また、通気溝の容積分、ユニソールの体積が減少するため、低 α_{bulk} によるシューズ重量の増大は、最小限度に留められている。加えて、東京 2020 大会で掲げられている環境配慮の推進を目的に、セルロースナノファイバや天然ゴムなどのバイオマス由来原料を可能な限り添加した材料となっている（バイオマス率：23.4%）。なお、摩擦摩耗特性への寄与は小さいものの、低 E と高バイオマス率を活かすべく、本アイテムの中敷きにも同一材料が採用されている。

4. 結言

架橋発泡 EVA の耐摩耗性を増大させるためには、材料内部の気孔率 α_{bulk} および垂直荷重 F_n の最小化が効果的であるとする実験結果に基づき、低 α_{bulk} かつ低 E となる架橋発泡樹脂を開発することで、耐滑性と耐摩耗性に優れたユニソールを搭載した超軽量耐滑シューズの完成に至った。

文献

- 1) T. Nishi, T. Yamaguchi, K. Shibata & K. Hokkirigawa: Effect of the Porosity Distribution on Dry Sliding Friction and Wear of Cross-Linked Ethylene Vinyl Acetate Foams With a Skin Layer, *Biotribology*, 22 (2020) 100128.
- 2) 西：トライボロジーに基づく東京 2020 大会フィールドキャスト(大会スタッフ)ユニフォームシューズの開発, *トライボロジスト*, 65, 7 (2020) 398.
- 3) T. Yamaguchi, T. Sugawara, M. Takahashi, K. Shibata, K. Moriyasu, T. NISHIWAKI & K. HOKKIRIGAWA : Dry Sliding Friction of Ethylene Vinyl Acetate Blocks: Effect of the Porosity, *Tribol. Int.*, 116 (2017) 264.
- 4) T. Yamaguchi, T. Sugawara, M. Takahashi, K. Shibata, K. Moriyasu, T. Nishiwaki & K. Hokkirigawa: Effect of Porosity and Normal Load on Dry Sliding Friction of Polymer Foam Blocks, *Tribol. Lett.*, 66 (2018) 33.
- 5) 株式会社アシックス：靴底、及び該靴底を備える靴, 特登 6609089 (2019).

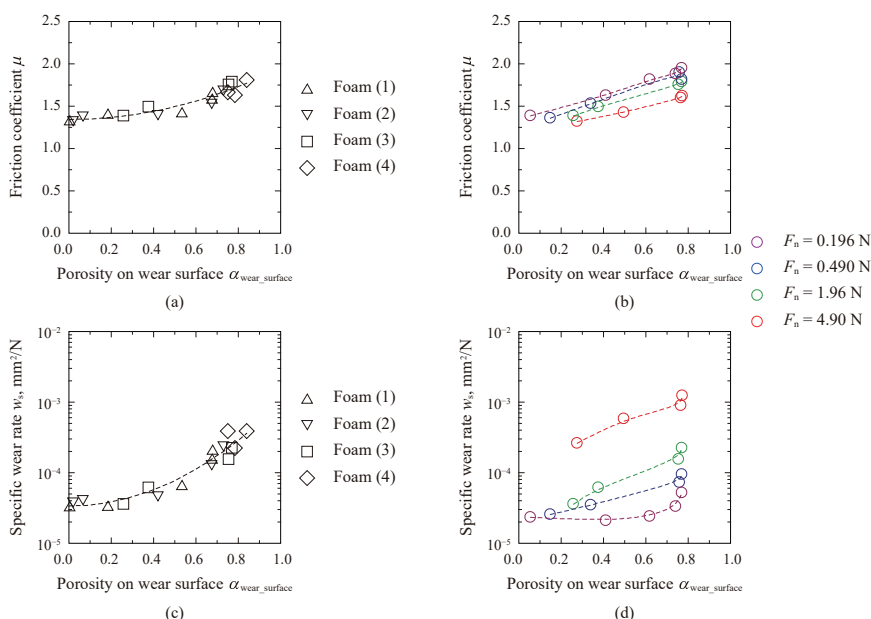


Fig. 3 Influence of $\alpha_{\text{worn_surface}}$ and F_n on μ and w_s ¹⁾



Fig. 4 Overview of volunteer shoes and unisole part for Tokyo 2020²⁾