ランニングシューズにおける トライボロジーを応用したグリップ性設計*

Grip Performance Design Applied Tribology for Running Shoes

佐藤 丞**
Sho SATO

Key words

adhesion, deformation, dewetting, viscoelastic properties, stiffness, running shoes, grip performance

1. はじめに

近年、人々の健康意識の高まりからスポーツに対する関心が高まっている。図1に示すように、ウォーキングや水泳、テニスなどのスポーツを週1回以上実施する人々の割合は2004年以降50%超で推移している。特に、手軽に取り組むことができるジョギングおよびランニングを週1回以上実施する人々の割合は2002年以降増加傾向を示しており、その関心の高まりがうかがえる¹⁾。

ランニングシューズは、着用者の障害予防と、パフォーマンスの最大化に対し、非常に重要な役割を担っている。図2に、ランニングシューズの構成要素と要求機能を示す。ランニングシューズは主にアッパーとソールから構成されている。これらのパーツは、ランニングシューズに求められるさまざまな機能を発現するために、材料および構造の設計がなされている²⁾。例えば、路面と接触するアウトソールは、グリップ性と耐久性（耐摩耗性）の両立が求められる。グリップ性については、すべりによる転倒防

止や、動作時におけるアウトソールから路面への推進力伝達の観点から、その設計がなされている。加えて、グリップ性の維持や製品寿命の長期化という観点から耐久性も同時に求められる。このように両機能の設計および向上は、ランニングシューズにとって不可欠であるといえる。

本稿では、はじめにランニングシューズにおけるグリップ性、すなわち摩擦力の発現機構を概説する。次いで、ランニングシューズの実用時において、特にすべりが生じやすい特徴的な路面でのグリップ性設計に対し、トライボロジーの知見を応用したソールの材料設計および構造設計の取り組みを紹介する。

2. ランニングシューズにおける摩擦力の発現機構

ランニングシューズにおけるグリップ性は、アウトソールと路面との間において生じる摩擦力の大小で議論できる。アウトソールと路面との間において発現する摩擦力 F は、凝着摩擦、ヒステリシス摩擦、掘り起こし摩擦によって生じる摩擦力をそれぞれ F_{adh} 、 F_{hys} 、 F_{pl} としたとき、次式で与えられる³⁾⁴⁾。

$$F = F_{adh} + F_{hys} + F_{pl} \quad (1)$$

式(1)における掘り起こし摩擦の解釈は、路面の種類やアウトソールと路面の剛性差によって異なる。例えば、路面よりも十分に高剛性な突起（スタッド）を有するアウトソールのシューズで走行する際には、突起により路面

図1 週1回以上のスポーツ実施者の割合¹⁾

図2 ランニングシューズの構成要素と要求機能

*原稿受付 令和2年5月20日

** (株)アシックススポーツ工学研究所 (兵庫県神戸市西区高塚台6-2-1)

図3 潤滑下において接触する3物体の三重界線の模式図

を掘り起こす際に生じる掘削抵抗により、摩擦力 F_{pl} が生じる。一方で、アスファルト路面上を、ゴム材料などのアウターソールを有するシューズで走行する際には、アウターソールは路面よりも軟質であることから、 F_{pl} は硬質な固体突起（粗さ突起）の上を軟質材がすべる際に生じる抵抗を指す。このとき、前述のような接触する2物体のいずれかに塑性変形を伴うとは限らない。つまり、ランニングシューズにおいて、 F_{hys} と F_{pl} はいずれも、アウターソールと路面の接触前端部と接触後端部における、変形抵抗の非対称性から生じる摩擦力と考えられる。このとき、 F_{hys} と F_{pl} の和は、変形によって生じる摩擦力 F_{def} としても表現されうる⁴⁾。この場合の摩擦力は以下の式で表すことができる。

$$F = F_{adh} + F_{def} \quad (2)$$

以上のことから、ランニングシューズと路面の間において発現する摩擦力は、 F_{adh} と F_{def} に起因するものと考えられ、これらに着目したグリップ性設計が行われている。

3. ランニングシューズにおけるグリップ性設計指針

3.1 濡れた平滑面を想定した材料設計指針

雨水などの液体が路面上に存在する場合、その液体はアウターソールと路面との接触時、潤滑剤として作用しうる。路面が、濡れた大理石に代表されるような濡れた平滑面の場合、潤滑剤が排除されにくいことから、アウターソールと路面とが接触する際に、すべりが生じやすい環境となる。さらに、平滑面は粗面と比べ、アウターソールの変形量が少ないことから、式(2)で示した変形による摩擦力 F_{def} は小さくなり、摩擦力は F_{adh} が支配的になる。 F_{adh} は、一般に真実接触面積 A_r と、真実接触部における界面せん断強度 τ の積で表される⁵⁾。よって、グリップ性の確保のためには、界面における潤滑剤を排除し、真実接触面積の確保および界面せん断強度の低下抑制が必須となる。そのためには、アウターソールと路面における接触界面での撥水挙動の理解と制御が必要であろう。

図3に、潤滑下におけるアウターソール材料と潤滑剤および路面により構成される三重界線の模式図を示す。アウターソール材料と濡れた路面の接触界面では、アウターソール材料 (Sole)、路面 (Road) および潤滑剤

図4 撥水速度と動摩擦係数の関係⁸⁾

(Lubricant) が接触する三重界線が存在する。このとき、三重界線上において、潤滑剤のアウターソール材料-路面界面への浸入しやすさは次式に示す拡張係数 S で表される。

$$S = \gamma_{SR} - (\gamma_{SL} + \gamma_{RL}) \quad (3)$$

ここで、 γ_{SR} 、 γ_{SL} 、 γ_{RL} は、三重界線を構成する各界面間の界面自由エネルギー γ_{SR} (Sole/Road 界面)、 γ_{SL} (Sole/Lubricant 界面)、 γ_{RL} (Road/Lubricant 界面) である。拡張係数 S が、正ならば濡れは促進され、負ならば抑制される。

図3に示すような、アウターソール材料と濡れた平滑面との接触において、すべりが無い場合、 S が增大することで濡れが促進し、 A_r は減少することが報告されている⁶⁾。加えて、これにすべりが生じた場合、接触界面における潤滑剤の撥水挙動はアウターソール材料の圧縮弾性率 E_s や潤滑剤の粘度 η 、潤滑剤膜厚 h の影響により変化することが知られており、撥水速度 V_d は次式のように表される⁷⁾。

$$V_d = \frac{|S|^2}{E_s \eta h} \quad (4)$$

ここで、 V_d が增大することは、潤滑剤の排除が促進されることを意味し、これにより接触面積が増大すると考えられる。図4は、半球状ゴム材料（直径 25 mm）と平滑な大理石とのすべり摩擦試験により得られた、動摩擦係数 μ_d に及ぼす撥水速度 V_d の影響を示している⁸⁾。なお、荷重は 1.96 N、すべり速度は 1, 5, 10, 100 mm/s とし、定常すべり域における摩擦係数を動摩擦係数 μ_d と定義した。同図によれば、すべり速度によらず V_d の増加にともない、 μ_d が増加することが分かる。このことは、濡れた平滑な路面に対するグリップ性について、凝着摩擦に着目した材料設計が可能であること、具体的には拡張係数 S とアウターソール材料の圧縮弾性率 E_s により V_d を制御することでグリップ性設計が可能であることが示唆された。

3.2 濡れた粗面を想定した材料設計指針

濡れた岩場やアスファルト路面に代表されるような、濡れた粗面も、すべりが生じやすいランニングシューズの使

図5 撥水性と動摩擦係数の関係⁹⁾

用環境に挙げられよう。先述の大理石のような平滑面は最大高さ粗さ R_z が数 μm オーダーであるのに対し、目視でも凹凸が確認できるようなアスファルト路面の最大高さ粗さ R_z は数百 μm 程度まで大きくなる。アウトソール材料は粘弾性材料であり、路面の表面粗さが変化するとき、摩擦力の発現機構もまた変化する³⁾ことから、 F_{def} を考慮した材料設計が必要となる。そこで、粗さの異なる路面に対し、水濡れ条件下でアウトソール材料のすべり摩擦試験を行い、路面の表面粗さがアウトソール材料の摩擦特性に与える影響を調査した⁹⁾。

試験に用いたアウトソール材料は、ランニングシューズに汎用される、原料種や弾性率の異なる6種類である。また、相手材は、表面粗さを変化させた2種類の路面 ($R_z=11,800 \mu\text{m}$) とし、アウトソール材料よりも十分に高剛性なアクリル樹脂を用いて3Dプリンターにより作製した。すべり摩擦試験は、垂直荷重 99.5 N、すべり速度 30 mm/s とし、水濡れ条件下にて行った。このとき、定常すべり域における摩擦係数を、動摩擦係数 μ_d として評価に用いた。

まず、前節にならない、撥水速度 V_d が摩擦係数に及ぼす影響を調査した。図5は、撥水速度 V_d に比例する、拡張係数 S の絶対値の2乗をアウトソール材料弾性率 E_s で除した値（以下、撥水性）と動摩擦係数 μ_d の関係である。同図 (a) に示すように R_z が小さい平滑面の場合、撥水性と動摩擦係数との間に高い正の相関が認められた。一方で、同図 (b) より、 R_z が大きい粗面の場合には、撥水性と動摩擦係数との間に相関は認められなかった。これは、粗面において、凝着による摩擦力 F_{adh} よりも、変形により生じる摩擦力 F_{def} が支配的であるためと考えられた。

高剛性な路面上を軟質な材料がすべる場合、 F_{def} は、材料の損失正接 $\tan \delta$ に比例するといわれている¹⁰⁾。そこで、損失正接 $\tan \delta$ による動摩擦係数の整理を試みた。

図6に、アウトソール材料の $\tan \delta$ と動摩擦係数 μ_d の関係を示す。同図 (a) は、微小ひずみ（静ひずみ 0%、動ひずみ $\pm 0.025\%$ ）を与えたときの $\tan \delta$ と μ_d の関係であり、同パラメータ間に相関は認められなかった。同図 (b) には、すべりが生じている際に試験片に生じるひず

図6 アウトソール材料の損失正接と動摩擦係数の関係⁹⁾ 図7 樹脂フォーム材料とアウトソール材料の積層試験片¹¹⁾

みを測定し、それと同じひずみ（静ひずみ 10%、動ひずみ $\pm 8\%$ ）を与えたときの $\tan \delta$ と μ_d との関係を示す。同図より、両パラメータ間には強い正の相関が認められた。このことは、実使用下においてアウトソール材料に生じるひずみを把握し、材料に粘弾性設計を施すことで、濡れた粗面に対するランニングシューズのグリップ性向上が可能であることを示唆している。本調査により得られた知見を活用することで、山岳地帯を走行するためのトレイルランニングシューズのアウトソール材料が開発され、製品に適用されている。

3.3 ソール意匠の剛性を考慮した構造設計指針

ランニングシューズのアウトソールには、グリップ性や外観を考慮し、凹凸の意匠が施されることがある。本節では、意匠形状が摩擦特性に及ぼす影響を検討した例を紹介する。

アウトソールの意匠は、図7に示すように、樹脂フォーム材料とアウトソール材料の積層材としてモデル化することができる。長さ l 、幅 w 、フォーム材料積層厚比率 t_f/t を変化させた試験片を用いてすべり摩擦試験を行い、ソール意匠構造が摩擦特性に及ぼす影響を調査した¹¹⁾。

表1に、摩擦試験に用いた $t_f/t=0.5$ における試験片形状を示す。試験片総厚み t は 10 mm で統一し、それぞれの試験片形状に対し、樹脂フォーム材料積層厚比率 t_f/t を 0.2, 0.5, 0.8 と変化させた。摩擦試験には Dead-Weight 式直動すべり摩擦試験装置を用いた。垂直荷重は 79.9 N、すべり速度は 10 mm/s とし、大気中無潤滑下ですべり摩擦試験を行った。すべり出し時および定常すべり時における摩擦係数を、それぞれ静摩擦係数 μ_s 、および動摩擦係数 μ_d として評価に用いた。

図8 (a) および (b) に、試験片の長さとの比 l/w と

表 1 積層材モデル試験片形状 ($t_i/t=0.5$)¹¹⁾

	S_6	S_7	S_8	S_9	S_{10}
Outline
Bottom view
Length l (mm)	25.0	20.0	15.0	11.25	9.0
Width w (mm)	9.0	11.25	15.0	20.0	25.0
Thickness t (mm)	10.0

図 8 試験片の長さ/幅比と静・動摩擦係数の関係¹¹⁾ 図 10 水平剛性と静・動摩擦係数の関係¹¹⁾

図 9 接線力によるたわみの変形モード

静・動摩擦係数の関係をそれぞれ示す。フォーム材料積層厚比率によらず l/w の増加にともない、静・動摩擦係数が増加することが分かる。これは、形状の変化により剛性が変化する、すべり摩擦時の接触面積が変化したためと考えられる。例えば図 9 に示すように、試験片には接線力 F_t が作用することで、曲げモーメントやせん断力に起因するたわみが生じると考えられる。そこで、ティモシェンコ梁理論¹²⁾を基に、試験片のたわみにくさに相当する水平剛性 K_h を定義し、せん断力に起因するたわみ δ_s を曲げモーメントに起因するたわみ δ_b で除した無次元パラメータ R_s を用い、試験片の変形状態が摩擦特性に及ぼす影響を検討した。なお、 K_h 、 δ_s 、 δ_b および R_s は、以下の式で表される。

$$K_h = \frac{F_t}{\delta} = \frac{F_t}{\delta_s + \delta_b} \quad (5)$$

$$\delta_s = \frac{F_t t}{G_T k A} \quad (6)$$

$$\delta_b = \frac{F_t}{I} \left(\frac{t^3 + t_r^3}{E_t} + \frac{t_r^3}{E_r} \right) \quad (7)$$

$$R_s = \frac{\delta_s}{\delta_b} \quad (8)$$

$$\frac{1}{G_T} = \frac{V_f}{G_f} + \frac{V_r}{G_r} \quad (9)$$

ここで、 I は試験片の x - y 平面における x 軸方向に対する断面二次モーメント、 G_T は樹脂フォーム材料とアウターソール材料の積層試験片におけるせん断剛性率であり、樹脂フォーム材料とアウターソール材料のせん断剛性率 G_f 、 G_r および体積含有率 V_f 、 V_r を用い、複合則を基に式 (9) より算出した¹³⁾。式 (6) における k はせん断補正係数であり、試験片断面がすべて矩形であることから $k=2/3$ とした。また、 A は試験片の底面積であり、本試験においては $A=225 \text{ mm}^2$ で一定である。

図 10 (a) および (b) に、水平剛性 K_h と静・動摩擦係数の関係をそれぞれ示す。同図より、 K_h の増加にともない、静・動摩擦係数はいずれも増加することが分かる。さらに図 11 (a) および (b) に、無次元パラメータ R_s と静・動摩擦係数の関係をそれぞれ示す。同図より、 R_s の増加にともない、静・動摩擦係数は増加することが分かる。すなわち、試験片のせん断変形が支配的である、 R_s が大きい領域においては、接触面積が増加することにより摩擦係数が増加したと考えられる。これらの結果から、アウターソール意匠の水平剛性を増加させることがグリップ性の向上のために重要であることが分かった。特に、接線力により生じる凹凸意匠におけるバルクの変形モードを考

図 11 無次元パラメータと静・動摩擦係数の関係¹¹⁾

図 12 リオデジャネイロオリンピックの選手用マラソンシューズ

慮し、無次元パラメータ R_s を増加させること、すなわちアウトソール意匠のせん断変形を促すことが、グリップ性向上に有効であることが明らかになった。

本調査により得られた知見は、図 12 に示すような 2016 年のリオデジャネイロオリンピックの選手用マラソンシューズをはじめ、各種マラソンシューズ・ランニングシューズのアウトソール意匠の設計に応用されている。ランニングシューズのほかにも、テニスシューズにおいては、移動にともなうすべり動作や打球動作などのさまざまな動作を解析することで、各種動作に対応したグリップ性向上のためのアウトソール意匠が施されている。

4. お わ り に

本稿では、ランニングシューズにおけるトライボロジーの研究・応用事例として、ソールにおけるグリップ性設計の取り組みを紹介した。ランニングシューズは多種多様な使用環境で使用され、その環境もまた刻々と変化する。したがって、着用者の障害予防やパフォーマンス向上を目指したグリップ性設計のために解明すべきことはまだまだ多く、今後も使用環境を想定し、かつ適切に再現した研究が必要であろう。

ランニングシューズをはじめとするスポーツギアは、そ

れに関わる科学技術の発展とともに日々進化している。トップアスリートのパフォーマンス向上のための機能について話題になることが多いが、これはわれわれの研究目的の一部でしかない。これからスポーツを始めようと考えている方々や自己ベストの更新のために日々研鑽されている方々、自らの健康のために運動される方々がおられ、スポーツはさまざまな目的の下に取り組まれている。また、本稿で紹介した技術はスニーカーや安全靴などの生活に身近な製品にも適用されている。トップアスリートのみならず、多くの方々の生活の一助となる製品・サービスを届けることが、われわれスポーツメーカーの、そしてスポーツメーカーに在籍する研究者としての使命であると考えている。われわれの研究が、より多くの方々の健康で快適な生活に貢献できることを切に願う。

参 考 文 献

- 1) 笹川スポーツ財団：スポーツライフデータ、(2018)。
- 2) 西脇剛史：記録を作るランニングシューズ、日本機械学会誌、**113**, 1095 (2010) 101。
- 3) D.F. Moore: The Friction and Lubrication of Elastomers, Pergamon Press, (1972)。
- 4) 桃園聡：エラストマーの凝着を伴う摩擦の発生機構、日本ゴム協会誌、**88**, 2 (2015) 48。
- 5) F.P. Bowden and D. Tabor: The Friction and Lubrication of Solids II, Phys. Today, **17**, 72 (1964)。
- 6) T. Nishi: Influence of lubricant properties and contacting velocity on real contact formation between rubber and glass in a contact process, Trib. Int., **127** (2018) 240。
- 7) A. Martin, J. Clain, A. Buguin and F. Brochard-Wyart: Wetting Transitions at Soft, Sliding Interfaces, Phys. Rev. E—Stat. Nonlinear Soft Matter Phys., **65** (2002) 031605。
- 8) T. Nishi: Influence of Dewettability on Rubber Friction Properties with Different Surface Roughness under Water/Ethanol/Glycerol Lubricated Conditions, Trib. Online, **11**, 5 (2016) 601。
- 9) 坂本将規, 森安健太, 原野健一, 西脇剛史：シューズソール材の摩擦特性に及ぼす床材表面粗さの影響、日本トライボロジー学会トライボロジー会議予稿集、**F34** (2016)。
- 10) 内山吉隆：ゴムの摩耗と摩擦、日本ゴム協会誌、**61**, 5 (1988) 315。
- 11) K. Moriyasu, T. Nishiwaki, K. Shibata, T. Yamaguchi and K. Hokkirigawa: Friction control of a resin foam/rubber laminated block material, Trib. Int., **136** (2019) 548。
- 12) S.P. Timoshenko: Strength of Materials, Part I, Elementary Theory and Problems, third edition, Krieger Pub. Co., (1958)。
- 13) 堂山昌男, 山本隆一：材料テクノロジー 17 複合材料, 東京大学出版会, (1992)。

佐藤 丞

1993 年生まれ。2018 年東北大学大学院工学研究科ファインメカニクス専攻修了。工学修士。同年(株)アシックス入社。現在に至る。入社後は、トライボロジー研究を含むシューズ材料の開発に従事。