

足と靴の バイオメカニクスの考察

井口 傑¹⁾

Key Words バイオメカニクス 足 靴 歩行

内容のポイント Q&A

Q1 人間はなぜ靴を履くようになったか？

人間が靴を履く理由として、足の保守、機能向上、装飾があげられる。靴は足を地面の硬さや凹凸、熱さ冷たさや、暑さ寒さから保守している。また、ランニング・シューズや登山靴のように、足の機能向上に役立っている。さらに、衣服と同様、美や権威の象徴としての役割をもつ。

しかし、「なぜ、靴を履くようになったか？」と尋ねられれば、人間が足を守ってでも歩いていかねばならない事情が、生じたからであろう。

Q2 足の構造と靴の関係は？

足は、数多くの小骨が連結した構造で、地面の凸凹、傾斜に足底を密着させる柔軟性と、片持ち梁として全体重を支えられるほどの剛性を併せもつ。

靴は足と地面の間に介在し、ヒールは衝撃を吸収する粘弾性をもち、靴底は足底圧を平均化させるために平らで硬く、踏み返し時に足に合わせて屈曲する構造をもつ。甲革は足を外気から守る。

「関係は？」と問われれば、互いの許容性にもたれ合う仲といえる。

Q3 歩行中の足は靴のなかでどうなっているのか？

足の形状、物性は、歩行によって大きく変化する。靴を履くと、足は周囲から圧迫される。また、床からの反力は、靴底を介して加わるので、靴底の形状、物性により、変わる。

荷重を受けた足は、伸びて広がるので、靴からの反力で押される。適切な捨て寸があれば趾や踵が痛みを感じることはない。幅はボールで最も広がり圧迫され、余裕がないと痛む。しかし、適度の捨て寸と余裕が必須だといっても、あり過ぎると、足が靴のなかで泳いでしまい、踵が浮いて歩きにくい。

Q4 適切な靴の選び方は？

夕方、靴屋に行き、足のサイズ(長さとうィズ)を測定してもらい、そのサイズの靴を履いて立ってみる。長さに指1本分の余裕があり、ボール部でウィズがピッタリし、踵のカウンターが密着していて、アキレス腱が食い込まず、爪が甲革に当たらず、趾が自由に動くことを確かめる。次に踏み返しをして、ボール部で表底が屈曲し、踏まずでへたらず、履き口が笑わない、喉が食い込まない、踵が浮かないことを確かめる。店のなかを歩き回って、前述のポイントを再チェックして、どこも痛くないことを確認する。

* Biomechanics of Foot and Shoe

¹⁾ Suguru Inokuchi MD PhD

至誠会第二病院足と靴の医療センター



人間はなぜ靴を履くようになったか

約 300 万年前に人間は常時直立 2 足歩行を開始し、その後ずっと裸足で歩いてきた。だから、人間の足は、生きていくのに必要な強度、能力をもっているはずであり、靴に守ってもらう必要は、本来、なかったはずである。では、なぜ、人間は靴を履くようになったのであろうか。

最も古い靴は、米国のアーノルドリサーチ洞窟にある約 8 千年前の遺跡で発見されている。皮や布でつくられた種々のスタイルの靴があり、その時代には、既に靴は一般に普及し、実用に供されていたと考えられる。アルメニアやオーストリアでも 5~6 千年前の靴が発見されているが、現在と同様、二枚に削いだり、なめしたりした革を使い、内張りも施した高度な靴である。

ところが、現在でも熱帯の発展途上国で、裸足の人々を見かけるのは珍しくない。日本でも、戦前まで、農村部での裸足は珍しくなかった。また、欧米でも、中世までは多くの庶民が裸足で生活していて、大半の人々が靴を履くようになったのは産業革命以降といわれている。

英国には、「靴も買えない貧乏人」という諺があるそうだ。産業革命までは、靴は高価で、一生に一度の買物であったという。そんな高価な靴を子供に買えたのは、王侯貴族や大商人等、極限られた富裕層だけで、一般の子どもは裸足で育った。だから、大人になっても、裸足で歩くことに不自由はなく、特別な場合以外は、靴を履かなかった。

アルメニアの遺跡からは、靴と同時に、数十キロ離れた場所で採れる黒曜石が発見されている。古代の人々は、筆者らが考える以上に過酷な土地を長距離歩いて、欲しい物を手に入れていたらしい。歴史上、何度も繰り返された民族の大移動は、戦いに負けた人々を、砂漠や荒れた岩だらけの地に追いやった。商業や貿易が発達すると、商人は富を得るために、気が遠くなるほどの距離を走破した。すべての道はローマに通ずと、軍用道路を整備したローマ人でも、石畳の上を重装備で長距

離行軍するのに、サンダルが不可欠であった。

近世になり、産業が盛んになり、農村から都市へ人口が集中すると、生活環境は悪化した。また、都市化により道路も舗装が進み、足に過酷な状況となって靴が必要となった。同時に、産業革命が起こり、大量生産が可能になって靴の価格が低下した。一方で、一般庶民の現金収入も増え、売れるから安くなり、安いから売れるという好循環から、靴の普及は急速に進んだ。

靴は履くと足が楽なので、一度、靴が普及すると、通常は裸足、必要なときだけ靴を履くという生活パターンが崩れ、朝から晩まで常時、靴を履いて生活するように変化した。裸足で育った足でも、常に靴で守られていると、痛みに対する耐久力がなくなるので、靴なしには痛くて歩けなくなる。靴を履くから足が弱くなり、弱くなるから痛くなり、痛いから靴を履くという悪循環で、耐久力が低下し、靴が脱げなくなった。靴がさらに普及し安価になると、子供にも靴を買え与えられるようになり、子供は靴を履いて成長するようになった。その結果、靴を履かずに歩いて生活する能力を獲得する機会を失った。

最終的に、靴を履くのが当たり前となり、都会では誰でも靴を履くようになると、靴を履くことが習慣や儀礼として根付き、裸足は野蛮な振る舞いとして廃れていった。

したがって、都市化による靴の必要性の増大と、産業革命による靴価格の低下、足の耐久力の低下、そして靴を履くことの習慣化が、人間が靴を履くようになった理由といえる。



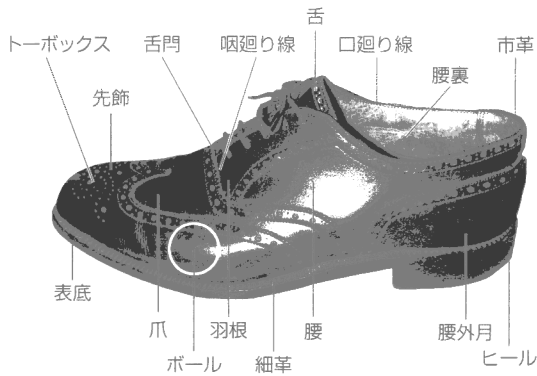
足の構造と靴の関係 (図 1, 2)

(1) 足の構造と運動

足は、歩行に際し、地面と接触する唯一の器官であり、体重を支え、衝撃を緩和し、推力を伝えている。足は歩行に特化した器官で、多くの骨が関節と靭帯で結合し、筋や腱で補強された立体的構造をもつ。

足の構造を簡単にたとえると、前に開いた長い 2 本の棒と後の短い 1 本の棒を縄で束ねた 3 脚の

■ 図 1 靴の名称



椅子である。このままでは潰れてしまうので、3本の脚は縄でつないである。踵に内足列、外足列、間が内側、外側の縦アーチと横アーチで、結んでいるのが足底腱膜と遠位中足骨間靭帯である。

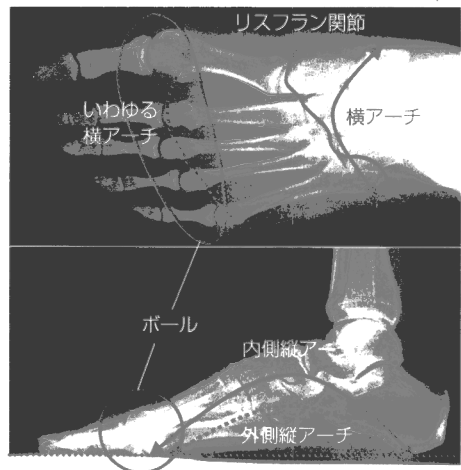
足を前方からみると、足幅は徐々に広がり、ボール部で最も広くなる。その後、少し狭くなるが、徐々に高さを増しながらリスフラン関節付近でまた広くなり、踵に向けて狭くなっていく。足の形状は立つ、座る、歩く、走る、跳ぶ等の動作で変化するばかりでなく、時間や体調によって変化する。靴は夕方買えといわれるが、夜は朝に比べて足は大きくなっている。

足の動きは、大半が距腿関節と距骨下関節、MTP関節で行われる。距腿関節での底背屈、距骨下関節での内返し、外返し、MTP関節での屈伸が主な運動である。それ以外の関節の可動域は小さいが、数が多いので、わずかではあるがすべての方向に可動性を持ち、複雑な運動と柔軟な構造を可能にしている。足全体でみると、バレリーナのポアントの肢位から蹲踞の姿勢までの屈伸、正座での内返しが限界である。

足が受ける圧力は、外力と接触面積によって決まる。最大圧力は、すべての部位で圧力が均等になるときに最低になる。

水枕を足で踏むと弾力性があるが、水を減らしていくと「こつん」と止まり、弾力性が急になくなる。水がある間は、パスカルの原理により荷重はゴムに均等に伝わり、ゴムの張力性が反力とし

■ 図 2 足の構造



て接触面に均等に伝わり、足を支えている。しかし、水がなくなると、足と床が直接ぶつかり、荷重は均等には伝わらず、「底突き」という現象を起こす。

足底の軟部組織は、液体と固体の性質を併せもつ。液体は自由に變形し移動し、力をすべての方向に均等に伝達し、粘性をもつ。固体は、變形に抵抗し、力の伝達は方向性を持ち、弾性をもつ。したがって、足底の軟部組織は粘弾性体であり、限定的であるが變形し移動することもできる。

地面に接する脂肪組織は他の脂肪組織と異なる特殊な構造をしている。踵や前足部の脂肪褥は、骨に固定された線維で仕切られた小部屋のなかに、油の詰まった小さな風船が、ぎっしり詰まったような構造で、これが皮膚に包まれている。力が加わると、液体として動こうとして粘性が働くと同時に、すべての方向に均等に力が伝わるので風船や小部屋の隔壁は變形し張力を生じる。

点字ブロックの上に立つと、突起の上では軟部組織が圧縮されて、圧力が上昇し、谷間では軟部組織が伸展し、圧力は低下するので不均一になり、最大圧力は上昇する。軟部組織は圧力を受けると周囲に圧排され、接地面と骨との間の軟部組織そのものが減ってしまう。水枕の水ほど完全に圧排されないが、点字ブロックの突起の上でも、軟部組織が周囲に圧排されて「底突き」を起こすことがあり、圧が急上昇する。

(2) 踵接地時にかかる力

踵が接地すると、張力(バネ)と弾性(ダッシュ・ボッド)より減速し、最終的には停止する。質量 m が、速度 v_1 で力を受け始め、 t 時間後に停止 ($v_2=0$ m/sec) したとすると、力積は $[Ft=v_1 m - v_2 m = (v_1 - v_2)m]$ となる。したがって、 $v_2=0$ だから、働く力の大きさは、 $F=v_1 m/t$ となり、停止に要した時間に反比例し、初速と質量に比例する。すなわち、踵が接地から停止するまでの接地速度が倍になるか、または体重が倍なるか、または停止までの時間が半分になると、加わる力の総和(時間に対する積分値)は倍になる。

等加速度運動では、 $v_1 - at = 0$ 、 $a = v_1/t$ で、質量と初速、停止に要した時間が計測できれば、力が計算できる。しかし、接地から停止までの加速度は変化するので、その時点の力や圧力はわからない。ただ、頭のなかで想像するに、粘弾性組織があれば、速度の速い接地直後には粘性が大きく働き、速度が遅い停止直前には弾性が働くので、軟着陸できるだろう。しかし、停止時に脂肪褥が残っていなければ、底突き現象を起こして、力は急上昇するかもしれない。

(3) 足と靴底の関係(図3)

点字ブロックの上に立つと、圧の不均一、接触面積の減少、底突きとさまざまな原因で、足に加わる圧が高まる。しかし、硬い平らな板をブロックの上に載せれば、平らな地面と同じになる。簡単にいえば、硬い平らな板が靴の底の根本的構造で、その意味では、下駄も靴も役割や構造は同一といえる。

踵接地に対しては、自動車のクラッシュブル・ゾーンと同様に、ヒールの変形が停止するまでの時間を長くする工夫をする。靴のヒールや踵部分の中敷きを厚くし、材質の粘弾性を下げれば、力は減り、圧力も下がる。しかし、厚くすれば歩きにくく脱げやすいし、粘弾性を下げ過ぎれば底突き現象を起こす。どこに妥協点をみつけるかが、腕のみせどころである。

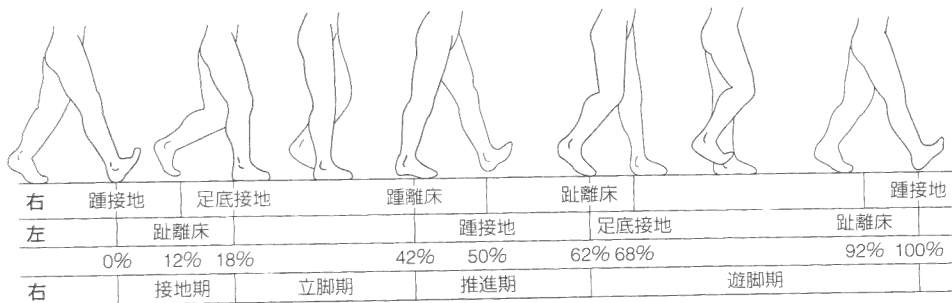
踵接地から前足部が接地するまで足関節は減速しながら底屈を続け、足底接地すると体の前方への慣性力により背屈させられる。趾屈筋腱は足関節後方を通過しているので、足関節が背屈すると腱が緊張して、趾を屈曲し足関節背屈を制動しアーチを挙上する。後脛骨筋、腓骨筋も同様に、足関節背屈を制動する。アキレス腱も反射や粘性によって足関節背屈を抑制する。足内外の屈筋は収縮しようとするが、それ以上に力で引っ張られて、伸展する。このように、足底接地時には足関節が背屈させられるが、筋の能動的、腱や靭帯の受動的拮抗力が抑制的に働いて、運動速度を制御する。

荷重はアーチを低下させるが、底側の靭帯や腱膜は引っ張られて受動的な張力を生じ、抵抗する。足内外の屈筋群は、アーチを上昇させる方向に働くが、趾屈筋群はまずは趾を屈曲、接地させた後に、アーチの挙上に働く。

足底接地時には、重心の前方移動によって、荷重が踵から小趾球、母趾球部に移動し、趾先にも体重がかかるようになる。

靴のヒールは、足底接地時の足関節運動域を全体として底屈方向にずらす。同じ歩容ならば、靴

■ 図3 歩行周期



を履いたほうが、より底屈位で足底接地し、より浅い背屈位で踵が離床する。ハイヒールのように高いヒールでは、足底接地時の底屈角度が大きいので、中間位まで背屈しないうちに踵が離床することになる。踵離床時、足関節背屈位が大きいほどアキレス腱が緊張し、腓腹筋が膝を屈曲させるので、膝が伸びにくくなる。したがって、ヒールはアキレス腱の緊張を軽減し、膝の伸展を容易にする。また、ヒール分、底屈位で足底接地するので、拮抗筋群の抵抗開始時の筋肉長、前緊張の状態が変わり、前足部への荷重が大きくなる。

(4) 足関節の運動と靴底の形状

仮に、足関節が中間位に関節固定されたとする。前足部が接地した瞬間に踵が離床を始めるので、足底接地は極短時間になる。重心の移動は、踵とMTP関節部を支点とした回転運動だけに頼ることになり、支点が変わると急に膝からの長さが増え回転モーメントも変わる。これを防ぐには、踵からMTP関節部までの靴底を、ポックリや揺り椅子の脚のようにカーブさせればよい。これがロッカー・ボトムである。

一般の靴にもトー・リフトといって、つま先が反って床面から持ち上がっている。これは、遊脚期に足を振り出すとき、つま先が地面に突っかからないようにするためだが、結果的に靴底をカーブさせることになり、足関節の運動域を減少させている。

現在の靴はヒールと表底が発砲ウレタンで一体形成された物が増えたが、革底でヒールと前方の表底が分離したフォーマルシューズでは、ヒールとソールの境目の強度が不足するので、シャンク(踏まず芯)とよばれる金属製の板を入れて補強してある。これは強度を増して、荷重時にヒールの前方で表底が曲がり、履き口が左右に開いて(笑)踵のホールドが悪くなるのを防ぐと同時に、スプリングとして足の縦アーチを助けている。

(5) 踏み返し時の足と靴

足全体が接地(足底接地)し、後足部と前足部で荷重するようになると、体重により縦アーチは低下する。踵が離床しMTP関節が背屈すると、足底腱膜が引き絞られてアーチが挙上する。これを

巻き上げ機構(windlass mechanism)とよび、踏み返し時にアーチの挙上として蓄えられた力が推進力として役立つとされている。うまい理論であり、趾を背屈してX線写真を撮ると舟状骨は挙上しているのでもっともらしく聞こえるが、人差し指一本で背屈できる趾の反発力がどこまで推進力として役立つかには疑問がある。

もし、踵が離床した後もMTP関節が背屈しないと、支点が趾先に移動し、アキレス腱付着部からの距離が延長するので、梃子の柄(モーメント・アーム)が長くなり、体重を支える力の効率が低下する。このほうが、踏み返しの役割としては重要だと考えている。だから、靴底は足底を守るため一定の硬さを要求されるが、踏み返し時にMTP関節で靴底も曲がらなければならない。したがって、踏まずを支えているシャンクもMTP関節より手前で終わりにする。



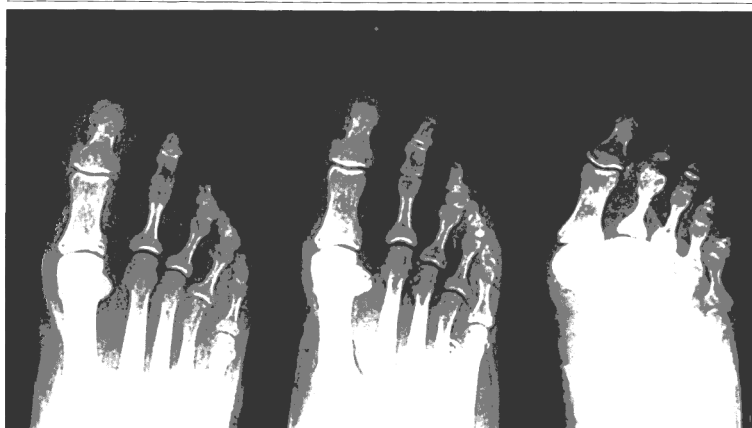
歩行中の足の様子

一足は靴を履くとどうなるか(図4)

まず、足を履き口から靴に入れるとき、インステップ(靴の甲; instep)の部分は足をしっかり保持するためにガース(周径; girth)を実寸より狭めにつくる(殺す)ので、通りにくい。靴紐を解かず、狭い履き口のまま無理に履こうとすると、足が靴先まで進まず、靴の踵を踏んでしまう。靴べらを使えば、体重が踵を前に押すので、趾がトーボックス(靴先の趾が入る空間; toe box)に進む。ボール(あゆみ板、踏み返して曲がる足の部分; ball)部は広くつくってあるので、ウィズ(幅; width)が適切ならば圧迫されることはない。靴先には捨て寸といって余裕がとってあるが、趾が自由に屈伸できる捨て寸とトーボックスの高さが必要である。

ボール部が狭すぎると、MTP関節部が押されて狭くなる。中足骨骨頭の横の配列を横アーチということがあるが、骨と骨が接していないので正確にはアーチではない。骨頭と骨頭の間には軟部組織があるので、圧迫すると骨頭の間が狭くなり、足幅が縮まる。さらに圧迫すると、中間趾列が背

■ 図4 靴のなかの足



同一人物が、左からコンフォート・シューズ、パンプス、ハイヒールを履いたX線写真。

側に転位し、纏足てんそくのように狭くなる。足は靴を押し、靴は足を押す(反力)ので、足は縮まり靴は広がり、釣り合う。しかし、歩行時に体重がかかると、縦アーチが低下してさらに長くなり、いわゆる横アーチも潰れて平らになりさらに広がる。また、踏み返すと、趾屈筋腱の牽引力で母趾外反、小趾内反が大きくなり幅が広がる。

ハイヒールでは、滑り台に乗ったように、ボールで止まるまで、足は前に滑る。前に滑った前足部は三角形の靴に無理矢理押し込まれるので、まずは横から圧迫され母趾が外反し小趾が内反し、さらに前方から押されて三角変形が増強する。そのうえ、立脚期で前に滑り、遊脚期で後に戻る動きを繰り返すので、毎回、新たな外力を受け、変形が進む。

適切な靴の選び方

当たり前のことだが、合った靴を選ぶことである。

きつすぎる靴の弊害が大きかったので、小さい靴はよくないといわれてきた。そのために、小さいのが悪ければ、大きいほうがよいだろうという誤解が生じている。足に優しい靴といえば聞こえはよいが、どこも圧迫されない靴は大き過ぎる。小さ過ぎない、合った靴が適切なのである。

足は、立ったとき、歩いたとき、走ったときで

形が変わる。靴も形を変えるが、足ほどの変化はない。したがって、足に合ったといっても、足と寸分違わない靴はきつ過ぎたり、緩すぎたりする。「捨て寸」とか「殺す」とか、物騒な隠語で代表される経験から得られた調節が必要である。

JIS規格で靴の長さは0.5 cm、周径は0.3 cm刻みである。縦、横、高さの三次元の足を、長さと同径で済ますJIS規格に無理がある。そのうえ、市販靴の周径は一種類が普通だから、合った靴を探すのは絶望的である。ところが、ほとんどの人が市販靴を履いて歩いている。これは足の許容性と、靴の冗長性によるところが大きい。大抵の人が長過ぎる、広過ぎる靴であれば相当の差を許容できてしまう。靴には捨て寸という靴先の余裕があり、1~5 cm、平均2.5 cm程度と極めて曖昧である。このデザインやメーカーによるばらつきのため、同じ規格でもいろいろな大きさの靴が作られてしまい、逆に合った靴が探せる理由になっている。

足の許容力と靴の曖昧さによって合った靴が存在するならば、その選択は妥協の産物といえる。規格外の足の持ち主なら、ウィズがあつて短か過ぎない靴がみつければ、色、デザイン、値段も日をつぶって妥協しなければならない。サイズも、短か過ぎない、狭過ぎない、広過ぎない、長過ぎない、の順で折り合う。簡単にいえば、きつくない、もっといえば痛くないのが最低限の妥協点で

ある。

妥協の産物であろうとなかろうと、とりあえず履ける靴がみつかったら、次の点をチェックする。

- ①長さに余裕があること。足を後ろにいっぱい寄せて、足先に2.5 cm、少なくとも1 cmは余裕(捨て寸)がある。靴先は触れにくいので、わからなければ足をいっぱい先端に寄せて、踵の後に1.5 cm(指一本)程度の余裕がある。
- ②靴を履いて、親趾と小趾の付け根(ボール)がピッタリか、少し余裕がある。立ったときに、少し押されるが、痛みを感じない。踏み返しをしてみて、靴底の曲がる部分とMTP関節部の位置が合っている。踏み返したとき、甲革にあまり深い皺が寄らず、食い込んで痛くない。
- ③トーボックスには高さにも余裕があり、趾に力を入れてもPIP関節が甲革に当たらない。趾を屈伸できる広さがある。適当な(5~8 mm)トー・スプリングがあること。
- ④紐靴は絞めてみて、インステップの部分に適度の圧迫感があり、立ったときに痛くない。
- ⑤踵が靴に合っていて、起立時に圧迫感があっても痛くない。歩行時に踵が上がらず、靴が踵に付いてくる。
- ⑥アキレス腱の部分に少し余裕があり、食い込まない。
- ⑦体重をかけたとき、踏み返しをしたとき、履き口が左右に開かないこと。適切なシャンクが入っていないと、靴を曲げると、ボールの部分ではなくヒールの直前で曲がってしまい、履き口が笑う。
- ⑧インステップ(靴の甲)に適度の圧迫感があるが、踏み返し時に甲が圧迫されたり、縫い目が食い込んで痛かったりしないこと。

靴選びに王道はない、と言いたいところだが、標準的な足の持ち主は王道を行くがごとく、どんな靴でも苦勞せず履いて歩いている。ところが、規格外の足の持ち主は、なかなか合った靴をみつけるのは難しい。このような人の靴選びのコツは、メーカー、デザイン、色は無視して、時間と根気で探すこと、探し当てたら同じ靴を買い続けることである。