

ランニング中の着地衝撃の粘弾性モデルによるシミュレーション

宮地 力・小林 一敏・牛山 幸彦*

A Simulation of landing Shock during Running by Viscoelastic Elements Model

Chikara MIYAJI Kazutoshi KOBAYASHI Yukihiro USHIYAMA*

Abstract

The purpose of this study is to simulate landing shock during running. Two types of landing were chosen; barefoot landing and landing with shoe. Viscoelastic models were constructed for each landing, and these models were simulated by the numerical solution of the equations of motion.

The results are summarized as follows;

1) For barefoot landing, the model was constructed by the body and leg segment masses connected by viscoelastic elements, and viscoelastic elements with a non-linear elastic element below the leg segment.

2) In the model of barefoot landing, ground reaction force and acceleration curves were estimated. These curves were very similar to the experimental data from force-platform and accelerometer attached to the subject.

3) For the model of landing with shoe, besides the barefoot model, the shoe model was added.

4) In the model of landing with shoe, initial peak value of estimated ground reaction force was 25% lower than that of the measured force. Increasing the mass of leg segment while other parameters were unchanged, the estimated peak value came close to the measured value.

5) The difference of leg segment mass might be explained in that the movement of landing with shoe is slightly different from the movement of barefoot landing.

Key words: Simulation, model, landing shock, shoes and barefoot

1. 緒 言

着地衝撃の身体に与える影響は、近年スポーツ障害の面から、関心が持たれている。特に、ジョギングの普及に伴い、ランナーズ障害と呼ばれるものが増加したので、ランニング中の着地衝撃に関する研究が多くなった^{1,5,21,22)}。

着地時の身体の動作分析として、足首の回内、回外に關しての研究がある⁸⁾。シューズとランニングの關係⁶⁾、シューズの物性に関する研究が

ある^{7,9)}。また、着地衝撃の床反力からの研究は多く、着力点に關しての研究^{1,3,5)}、床反力の圧力分布に關しての研究がある⁴⁾。また、ランニング時の身体の受ける負荷を、受動的負荷と能動的負荷に區別した研究がある²³⁾。加速度については、主として加速度計を用いた研究がある。また、ランニング以外のスポーツでの着地衝撃では、筆者らによってテニスでの着地衝撃が加速度計を用いて調べられている¹⁹⁾。

しかし、上述の研究の多くは、実験データの解析にとどまり、モデル化を行なっている例は少な

* 筑波大学大学院修士課程体育研究科コーチ学専攻

く、また、モデル化を發展させたシミュレーション手法もあまり使われていない。

しかし、シミュレーション手法を抜きには、シューズのデザイン等の研究は難しい。例えば、シューズ・フロア間の力は、床反力としてフォースプレートにより測定可能であっても、人間・シューズ間の力は測定することが不可能である。このような場面で、シミュレーションが役立つ。また、人間では現実的に困難であるような運動の結果を推測することにも役立つ。

そこで、本研究では、裸足での身体モデル化、着地衝撃のシミュレーションと、シューズをはいた身体・シューズ系での着地衝撃のシミュレーションを行うことを目的とした。

2. 本研究でのシミュレーション手法

バイオメカニクスの分野において、身体運動のモデル化、用具等のモデル化は多くの研究にある。また、モデルのシミュレーションがコンピューターを使うことにより行なわれている。Vaughan, C.L.は、スポーツにおけるコンピューターシミュレーションに関し100編以上の論文を紹介している²⁷⁾。また、Millerによるコンピューターシミュレーションの紹介もある¹⁸⁾。

身体運動のモデル化では、剛体系リンクモデルが多く用いられている。剛体系リンクモデルは、

ランニング、飛び込みでの空中期等色々な動作に応用されている。しかし、速度を持った物体の衝突現象である着地衝撃では、相互に働く力が剛体系モデルでは衝突時に無限大となる。そこで、衝突現象には、剛体系ではなく、ばね、粘性要素等によるモデル化が必要となる²⁵⁾。

着地衝撃のモデルでは、剛体系にばね要素を一つ付加したモデルがある¹⁰⁾。また、垂直跳びを粘弾性並列要素とアクチュエーターによりモデル化したものなどがある¹⁷⁾。しかし、粘弾性要素の複合したモデルにより着地衝撃をモデル化したものは少ない。また、モデル化とシミュレーションを区別すれば、着地動作のシミュレーションによる研究はほとんどなされていない。

その理由として、着地衝撃の粘弾性要素によるモデル化において、シューズ系、足部組織、かかと、膝、腰等多くの要素の系の複合したものであり、その各系のモデルが明らかでないことがある。たとえば、シューズの粘弾性のモデル化や係数の決定は、湯川・小林²⁶⁾、中田²⁷⁾らによって行なわれているにすぎない。

シミュレーションには、初期値問題として解の求まるものと、時系列にしたがったトルク値や角度値を入力していく方法等¹²⁾、その複合したものがある。着地衝撃において、特に障害との関連から問題となる初期ピークは、受動的負荷として

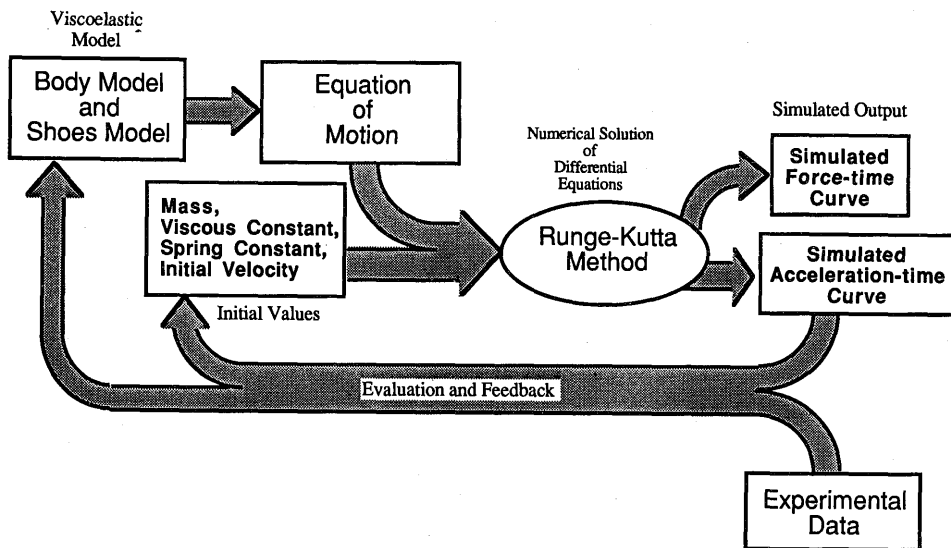


Fig. 1 Schematic representation of simulation and evaluation.

とらえられる。そこで、質量要素と、アクチュエーターを含まない受動的要素の組み合わせにより、モデルを構成することが適当であると考えられる。また、シューズなどは本質的に受動的要素で構成しなければならない。

本研究でのシミュレーションは次のようにして行なった。まず身体を質量、ばね、粘性要素の組み合わせによりモデル化し、運動方程式を求めた。また、実験により定めることができるモデルの各係数を求めた。次にルンゲ・クッタ法¹¹⁾により初期値問題の解として時間一力波形、時間一加速度波形を求めた。その曲線と実験で得た力一時間波形の一致度から、モデルの係数を従来の研究から可能性のある値で変化させて、再検討した。手法の図式的説明を Fig. 1 に示した。

モデル化と係数の決定において、身体要素とシューズの要素とは、分離して考える必要がある。そこでまず、シューズの要素を取り去り、裸足での身体要素のモデル化とシミュレーションを行なった。次に、湯川・小林のシューズの粘弾性係数を用いて、上記の裸足の身体モデルとシューズのモデルを直列化することで身体一シューズモデルを作成し、その時のシミュレーションを試みた。

3. 実験および結果

実験試技は、 3.5 ± 0.5 m/s の速度のジョギングを、裸足、シューズの2条件で行なった。

被験者は、25歳、青年男子、身長171.0cm、体重65.0kg、右足首外側に重量2.0gのピエゾ型加速度計 (TEAC 製#501) を身体の鉛直軸方向に装着した。キスラー社製フォースプレート (#9281B) により、着地時の床反力を求めた。

加速度計の装着には、皮膚の影響を受けやすいことが報告されている。本研究に用いた加速度計は極めて軽量であり、皮膚振動の影響は少ないと考えられる。また、牛山らの実験によれば、本実験と同じ位置に同様の方法で取り付けられた加速度計の着地時の2階積分値は、同位置に取り付けられた変位計と良く一致することが報告されている¹⁶⁾。このことから、加速度計の信頼性は高いと考えられる。

裸足でのジョギングの8試技の着地時の床反力を平均したものを、Fig. 2 に示した。被験者は、裸足によるかかと接地のため、初期ピークが1650Nと大きい。シューズによるジョギングの8試技の

着地時の床反力を平均したものを Fig. 3 に示した。

4. 裸足での着地のモデル化

裸足での着地衝撃では、初期ピークが大きいことが特徴である¹³⁾。着地の初期、全身が屈膝により沈み込む直前に、足首の部分が、床と衝突し、その後、全身の沈み込みが起きている。初期ピークは、その足首部分等の部分衝突により、生みだされたものである。そこで、裸足での着地の身体モデルも、少なくとも、初期の衝突を起こす部分と全身部分の2つの質量を持つ必要がある。

本研究では、裸足のモデルに、2つの集中質量要素 m_1 , m_2 を設定した。 m_1 と m_2 の和は身体全質量と等しいとした。 m_1 は足首等を除く全身の質量、 m_2 は足首等の初期衝突に係わる部分の質量である。全身を表す m_1 は、膝の屈伸の動作に支えられている。この膝の屈伸動作を単一のばねとしてモデル化している例もある。小林は、ハイジャンプを一つの質量一ばね系としてモデル化し、そのばね定数を求めている¹⁴⁾。また、Cavagna らは、膝をばねモデルとし、弾性エネルギーの視点からランニングのエネルギー消費量を求めている²⁾。単一ばねの場合、力一時間曲線は、力の最大値を中心として、左右対称になる。しかし、現実の波形では、通常、対称ではなく最大値が着地初期に観察される。また、本実験の結果も同様の波形となっている。

これは、膝の屈伸動作はばね的ではあるが、筋の粘性等により筋内部での消費されるエネルギーを考慮し、弾性と共に粘性要素を加える必要があることを示している。そこで、 m_1 と m_2 の間は、粘弾性の並列要素 k_1 , c_1 としてモデル化した。 m_2 の下部は、足首の屈伸に関する粘弾性要素を持つ。これを、 k_2 , c_2 とした。

足底部の変形は、ヒステリシスを持ち、その変位一力曲線は、直線でないことが報告されている。足底部の衝突では、極く初期には、軟らかい組織の変形により床反力は小さく、変形が進むにつれ、組織が圧縮され、変形の限界に近くなると大きな床反力となる。そこで足底部のモデルを非線形ばねとして、以下の式によりあらわした。

$$F = -kx^5$$

そこで、 m_2 下部は、 k_2 , c_2 の粘弾性並列要素に直列に非線形ばね k_3 がつながっているものとし

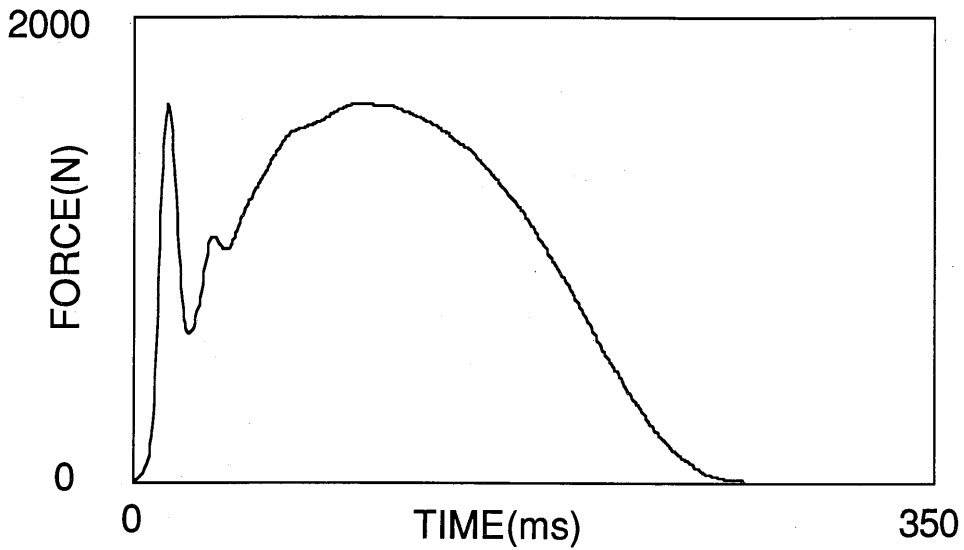


Fig. 2 Mean ground reaction force of 8 trials performed by the subject (25 years, 171.0cm height, 65.0kg weight) in barefoot running at speed of 3.5m/s.

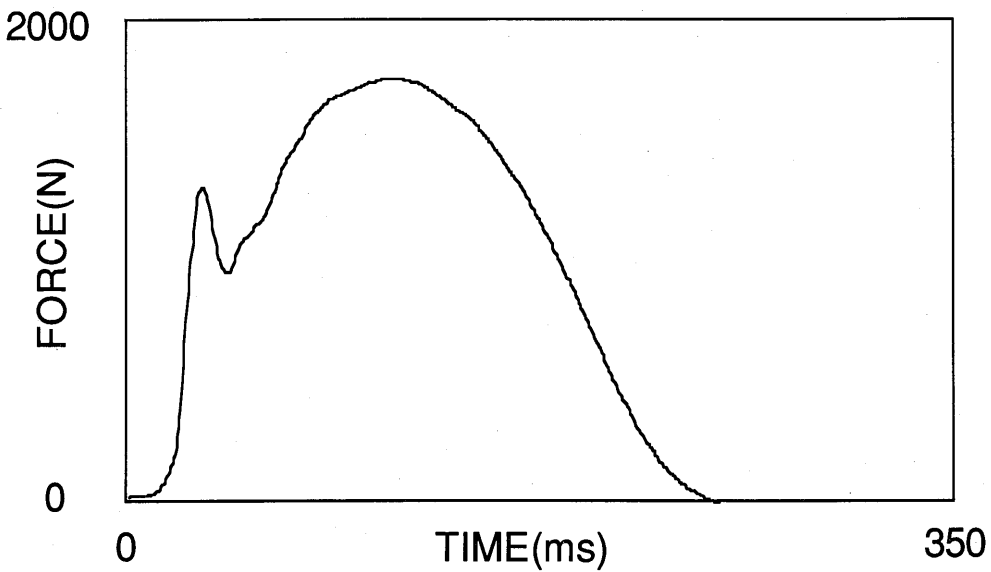


Fig. 3 Mean ground reaction force of 8 trials performed by the subject (25 years, 171.0cm height, 65.0kg weight) in running with shoes at speed of 3.5m/s.

てモデル化できる。また、裸足着地の床反力波形の初めの立ち上がりは、緩やかに立ち上がっていることは、非線形ばねの要素を考えて初めて理解できる。

そこで、裸足着地を Fig. 4-a のようにモデル化し、そのモデルの運動方程式を Fig. 4-b に示した。各質量の変位 x_1 , x_2 と k_2 , k_3 の直列部の変位を x_3 とし、その $x_1 \sim x_3$ に働く力から運動方程式を立て

た。

ここで、この運動方程式の初期値問題の解を求めるために必要な初期値は、変位 x_1, x_2, x_3 , 速度 v_1, v_2, v_3 , 質量 m_1, m_2 , 粘弾性係数 k_1, k_2, k_3, c_1, c_2 の13個である。 x_1, x_2, x_3 はすべて0とした。また、 v_1, v_2, v_3 は、重心の着地時の落下速度に近い値として、 -1.05m/s とした。 $m_2, k_2 \sim c_2$ は、現在までの研究による推定値をもとにして、結果として得られる力波形の一致度により変化させていった。

方程式は、Runge-kutta 法により数値解を求めた。その時の時間間隔は 0.5ms , プログラムはc言語を用いて作成し、計算機は、Unix4.2BSDオペレーティングシステムで働くSun3/110を用いた。シミュレーション結果は、すべてchart²⁰⁾を用いてグラフ化した。

5. 裸足着地のシミュレーション結果と考察

シミュレーションによる裸足での着地衝撃の床反力波形と、実験により得られた波形を重ねたものを Fig. 5に示す。

シミュレーションによる波形は、現実の波形と良く一致している。特に、初期ピークまでの立ち上がり、2つめの小さい山と全体の大きな山の関係が良く一致している。各係数の値は m_1 は 59.5

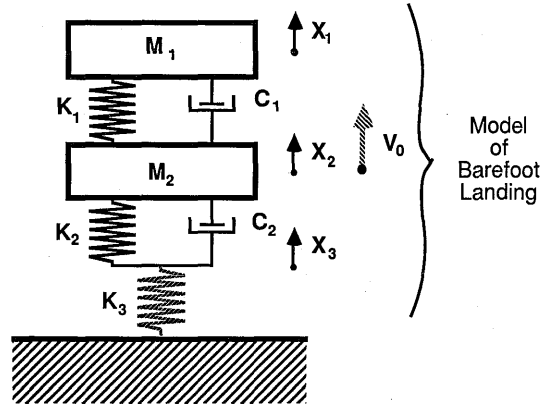


Fig. 4-a Viscoelastic model of barefoot landing. M_1 is the mass of upper body and upper legs, K_1 and C_1 are the model of knee action, M_2 is the lower leg mass, K_2 and C_2 are the model of ankle and K_3 is the non-linear elastic element of heel tissue.

kg, m_2 は 5.5kg である。人間の足首の部分質量は、 2.5kg 程度であるから、足首と下腿の一部の質量と見ることができる。

また、 k_1 は 2.1N/m , これは小林のハイジャンプのモデル¹⁴⁾のばね定数値の $0.78 \sim 1.17\text{N/m}$ に比

$$F_{m_1} = F_{k_1} + F_{c_1} - m_1 g = m_1 \frac{d^2 x_1}{dt^2} = -k_1(x_1 - x_2) - c_1 \left(\frac{dx_1}{dt} - \frac{dx_2}{dt} \right) - m_1 g$$

$$F_{m_2} = F_{k_2} + F_{c_2} - F_{m_1} - m_2 g = m_2 \frac{d^2 x_2}{dt^2} = -k_2(x_2 - x_3) - c_2 \left(\frac{dx_2}{dt} - \frac{dx_3}{dt} \right) - F_{m_1} - m_2 g$$

$$F_{k_3} = F_{k_2} + F_{c_2} = -k_3(x_3 - x_4)^5 = -k_2(x_2 - x_3) - c_2 \left(\frac{dx_2}{dt} - \frac{dx_3}{dt} \right)$$

$F_{m_1}, F_{m_2}, F_{k_1}, F_{k_2}, F_{k_3}, F_{c_1}, F_{c_2} \dots$ Forces acting on each element.

$m_1, m_2 \dots$ Masses of each element. $m_1 + m_2$ are equal to the body mass.

$k_1, k_2 \dots$ Constants of elastic element.

$k_3 \dots$ Constant of non-linear elastic element.

$c_1, c_2 \dots$ Constants of viscous element.

$x_1, x_2, x_3 \dots$ Displacement of each element.

Fig. 4-b Equations of motion of barefoot landing.

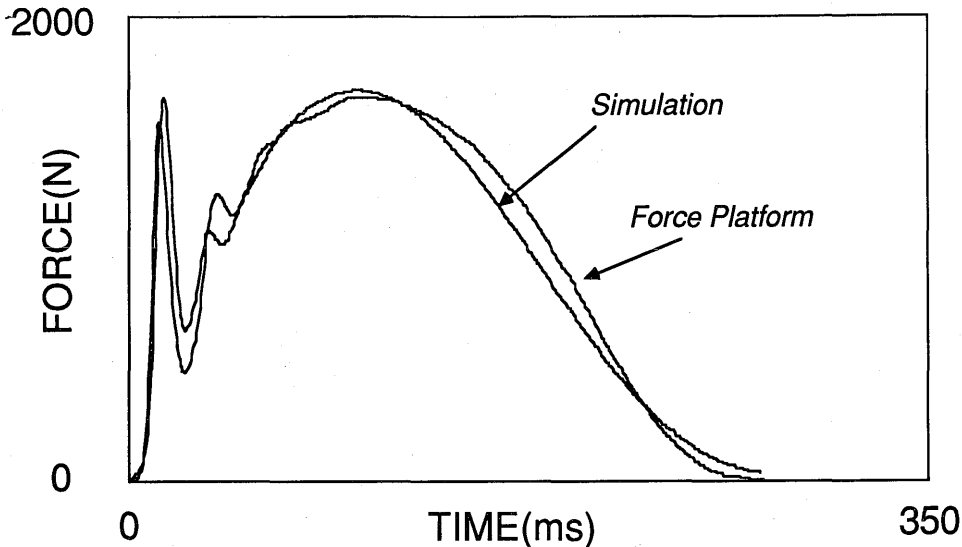


Fig. 5 Simulated ground reaction force of barefoot landing and ground reaction force of force platform. Coefficients of the model are;
 $m_1=59.5$, $m_2=5.5$ [kg], Initial velocity = -1.05 [m/s],
 $k_1=2.1e4$, $k_2=4.0e5$ [N/m],
 $k_3=1.0e13$ [N/m³], and
 $c_1=3.5e2$, $c_2=4.0e3$ [Ns/m]

べ, 80%以上大きい値である。ハイジャンプはジョギング時と比べ屈膝が大きく, 手の振りなどの影響がある。そのため, 大きい力が長い距離にわたって働くことから, 低いばね定数になったと考えられる。またハイジャンプでは, 粘性成分もばね定数に含めていることから, ばね定数が低く見積られている。ジョギングでは, 特に受動筋力として力が発揮されていることも, ばね定数を大きくしていると考えられる。

k_3 の係数は, 波形の立ち上がり時に最も大きな影響を与えている。Fig. 5に示した実験値とシミュレーションの値は, 立ち上がりが非常に良く一致している。このことは, 非線形要素の妥当性を示すと考えられる。シミュレーション波形の2つめの小さい山は, 実験値にも現われている。これは, m_2 質量部の初期ピークの振動減衰の一部であることがモデルからわかる。また, その山の後も大変小さい波が大きいピークに重なっていることが観察される。

実験では, 足部外側に加速度計を装着し, 着地時の加速度を測定している。そこで裸足の着地衝

撃のシミュレーションを行なったときの m_2 の質量の加速度も求めた。その加速度と実験による加速度を Fig. 6に示す。これら2つの加速度波形は, 大きさ, 波形の位相ともにとっても良く近似しているという興味深い結果を示した。床反力波形と足部の加速度という2つの異なる現実の波形が, 1つのモデルからシミュレートできるということは, 2の質量モデルの妥当性を別の面から示していると考えられる。また, 足部にとりつけた加速度計の波形が, 皮膚などの振動によるものではないという証拠でもある。

6. 身体・シューズでの着地のモデル化

シューズの物性的性質を, 粘弾性係数として求めている研究は少ない。ここでは, 湯川・小林らによる非線形粘弾性モデルによるシューズモデルを用いた。係数が, 落下速度等の影響を受けにくいモデルであること, 実験と同じシューズの係数が得られていることから, 身体, シューズの着地衝撃のシミュレーションに適している。

湯川・小林の係数は, シューズを平置きした場

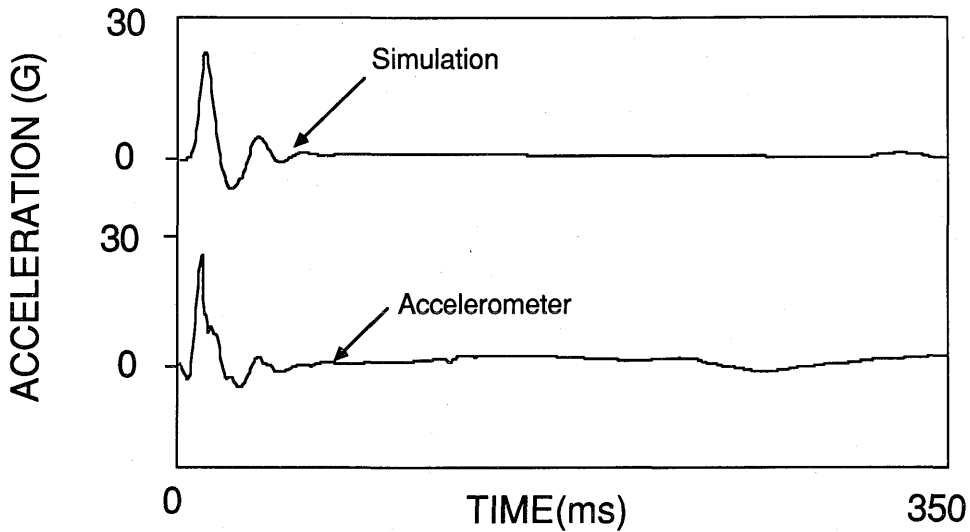


Fig. 6 Acceleration of lower leg mass from simulation and accelerometer.

合の係数である。しかし、着地動作は、Fig. 7の様に、シューズの後端の一部が接地してから全体が接地している。そこで、裸足と同様に、はじめ柔らかく接地し、徐々に硬くなる非線形ばねの介在するモデルが必要になってくる。このことは、シューズの着地衝撃においても、立ち上がりは低く、だんだんと立ち上がっていく波形からも裏付けられる。そこで、湯川・小林のモデルに非線形ばねを直列に加えたシューズのモデルを作成した。

シューズ身体モデルを Fig. 8-a, 運動方程式を Fig. 8-b に示す。 $x_1 \sim x_5$ の各位置で働く力から運動方程式をたてた。身体各部分の粘弾性係数は、裸足のデータをそのまま用いた。

湯川・小林は、面積6.0cmの圧縮面積を持つ衝撃試験器により k_4, c_3 を求めている。実際の接地時の足底部の実効低面積はおおよそその2倍程度であると考えられることから、 k_4, c_3 の係数を2倍したものをを用いた。

m_3 は、シューズ系で、質量的に作用する要素として400gに設定した。また、運動方程式中の q は、湯川・小林の係数が1.083で1に近いため計算の煩雑化を避けるため1.0とおいた。シミュレーションは、裸足と同様の時間間隔、0.5msで行なった。

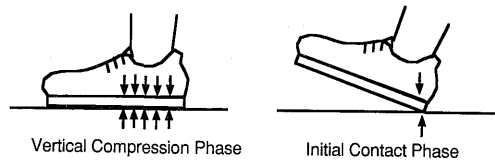


Fig. 7 Schematic representation of contact phase. Because of the small contact area in initial phase, the sole of the shoes has more elasticity than during the vertical compression phase.

7. 身体・シューズモデルでのシミュレーション結果と考察

身体、シューズモデルによる床反力のシミュレーション波形と実験から得られた波形を重ね合わせたものを Fig. 9 に示す。初期ピークは、立ち上がりのカーブはよく近似しているがシミュレーションした波形のピークが25%小さい。全体の大きい力の曲線は、実験値、シミュレート値とも位相、最大値ともによく一致していた。

このことから、裸足のモデルにシューズを履かせたモデルでは、現実の値より初期衝撃が小さくなるのがわかる。その原因として、シューズを履いたときのランニングは、裸足とは異なっていることが予想される。

そこで、実際のシューズでの床反力に近くなるようにシューズ身体モデルの身体の係数を変化さ

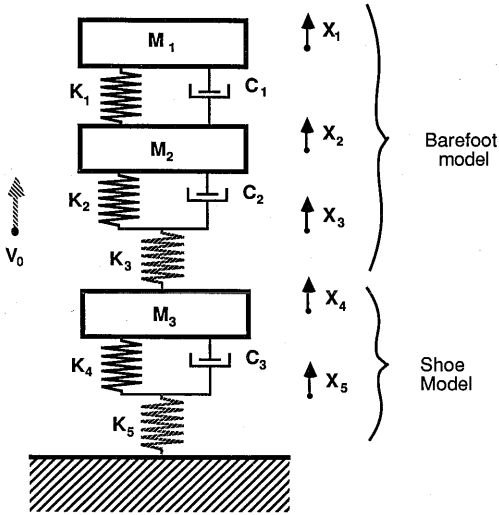


Fig. 8-a Viscoelastic model of landing with shoes. The upper part of the figure is the barefoot model (same as in 4-a.) M_3 is the effective mass of shoe, K_4 and C_3 are the viscoelastic elements of the shoe. K_5 is the non-linear elastic element of the shoe.

せ、その結果得られたシミュレーション波形を Fig. 10に示した。裸足のシミュレーションとの係数の違いは、 m_2 が54%増加し8.5kg、その他は全く同じであった。

初期ピークの値は、実際の値の95%になった。また、波形全体に、小さい波が乗っていることが観察された。これは、質量 m_2 が増加したために m_2 の振動の減衰が少なくなったためと考えられる。しかし、全体の大きい曲線の高さなどの一致度はよいと考えられる。

そこで、シューズを履いたときの身体モデルと裸足の時のモデルの相違点を明らかにするために、裸足の実際の波形と、シューズを履いたときの身体の係数を用いた裸足のシミュレーション波形を重ね合わせたものを Fig. 11に示す。

両方の比較において特徴的なことは、シューズを履いたときの身体のモデルの初期ピークは、2000Nで実際の波形に比べ10%以上大きいことである。これは、シューズを履いたときの身体の動きは、裸足のときよりも大きい初期ピークを受ける動きであることをあらわしている。換言すれば、裸足の時はシューズを履いた時よりも、衝撃が少なくなるように動きが変わっていると考えられる。

$$F_{m_1} = F_{k_1} + F_{c_1} - m_1 g = m_1 \frac{d^2 x_1}{dt^2} = -k_1(x_1 - x_2) - c_1\left(\frac{dx_1}{dt} - \frac{dx_2}{dt}\right) - m_1 g$$

$$F_{m_2} = F_{k_2} + F_{c_2} - F_{m_1} - m_2 g = m_2 \frac{d^2 x_2}{dt^2} = -k_2(x_2 - x_3) - c_2\left(\frac{dx_2}{dt} - \frac{dx_3}{dt}\right) - F_{m_1} - m_2 g$$

$$F_{k_3} = F_{k_2} + F_{c_2} = -k_3(x_3 - x_4)^5 = -k_2(x_2 - x_3) - c_2\left(\frac{dx_2}{dt} - \frac{dx_3}{dt}\right)$$

$$F_{m_3} = F_{k_4} + F_{c_3} - F_{k_3} - m_3 g = m_3 \frac{d^2 x_4}{dt^2} = -k_4(x_4 - x_5)^p - c_3\left(\frac{dx_4}{dt} - \frac{dx_5}{dt}\right) - F_{k_3} - m_3 g$$

$$F_{k_5} = F_{k_4} + F_{c_3} = -k_5 x_5^5 = -k_4(x_4 - x_5)^p - c_3\left(\frac{dx_4}{dt} - \frac{dx_5}{dt}\right)$$

- $F_{m_1}, F_{m_2}, F_{m_3}, F_{k_1}, F_{k_2}, F_{k_3}, F_{k_4}, F_{k_5}, F_{c_1}, F_{c_2}, F_{c_3} \dots$ Forces acting on each element.
- $m_1, m_2, m_3 \dots$ Masses of each element. $m_1 + m_2$ are equal to the body mass.
- $k_1, k_2 \dots$ Constants of elastic element.
- $k_3, k_4, k_5 \dots$ Constant of non-linear elastic element.
- $c_1, c_2, c_3 \dots$ Constants of viscous element.
- $x_1, x_2, x_3, x_4, x_5 \dots$ Displacement of each element.

Fig. 8-b Equations of motion of landing with shoe.

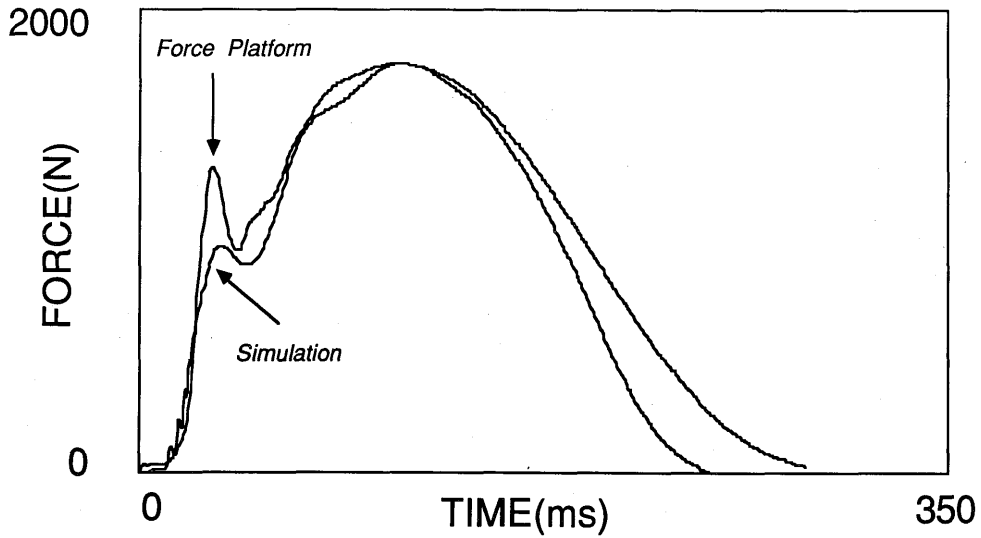


Fig. 9 Simulated ground reaction force of landing with shoe and ground reaction force of force platform. Coefficients of the barefoot model are the same as the model of barefoot landing. Shoe coefficients are;
 $k_4=9.6e5$ [N/m], $k_5=8.0e11$ [N/m²],
 $p=1.23$, $c_3=177.2$ [Ns/m]

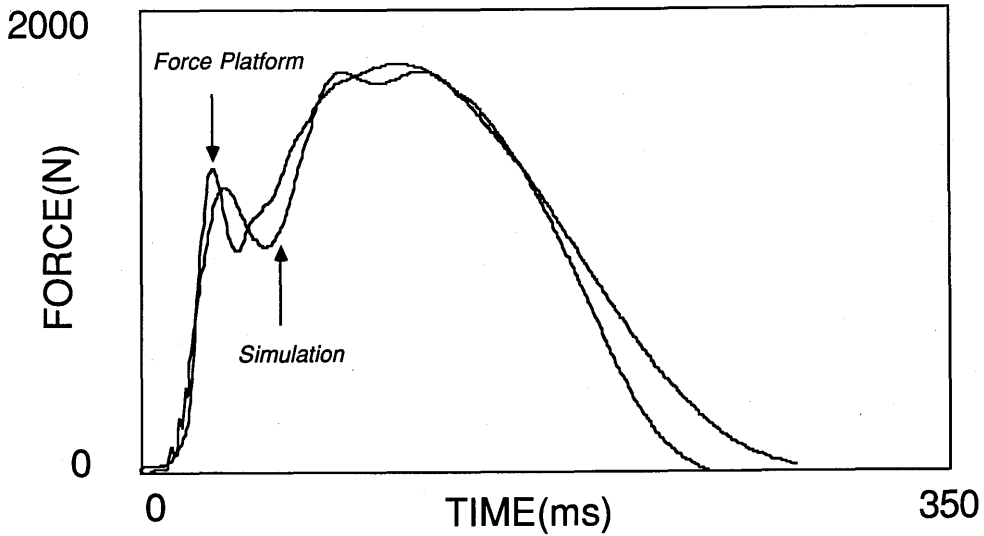


Fig. 10 Simulated ground reaction force of landing with shoe and ground reaction force of force platform. m_3 value was greater than the barefoot model.

この動作の違いはモデルから見れば m_2 の増加に現われている。下部の衝撃の際の、質量要素は、足首や膝の筋を枯坑的に緊張することで増加し、膝を柔らかく可動するようになれば減少する。つまり、裸足での着地では足首、膝を柔軟に動かすように下肢は動いており、これが初期ピークを減らす効果を生んでいると言えよう。

8. まとめ

本研究では、ランニングでの着地衝撃を、裸足での身体モデルと、身体・シューズのモデルのシミュレーションから考察した。そして、粘弾性モデルの妥当性と、シミュレーションの有効性が確かめられた。

結果は以下のようにまとめられる：

1) 裸足の着地は、2つの集中質量要素を設定し、その間は粘弾性の並列要素とし、質量要素の下部は、粘弾性並列要素に直列に非線形ばねを入れたモデルとしてあらわせた。

2) 裸足での床反力のシミュレーションによる波形は、現実の波形と良く一致しており、特に初期ピークまでの立ち上がり、2つめの小さい山と全体の大きな山の関係が良く一致していた。シ

ミュレーションによる加速度と実験による加速度波形は、大きさ、波形の位相ともに良く近似していた。

3) 裸足のモデルに湯川・小林のシューズモデルと非線形ばねを直列に加えたシューズのモデルをくわえて身体・シューズモデルをえた。

4) 身体・シューズモデルで得られた床反力は、全体の大きい力の曲線は、位相、最大値ともによく実験値と一致していたが、シミュレートした波形の初期ピークが25%小さかった。実際の床反力に近くなるように身体モデルの係数を変化させたところ、裸足のシミュレーションとの係数の違いは、 m_2 が54%の増加し8.5kgとなり、他は全く同じであった。

5) 裸足の実際の床反力波形とシューズを履いたときの身体係数による裸足のシミュレーション波形を比べたところ、シミュレーションでの初期ピークは、2000N で実際の波形に比べ10%以上大きかった。これは、裸足の時はシューズを履いた時よりも、衝撃が少なくなるように微妙に身体の動きが変わっていたことをあらわすと考えられた。

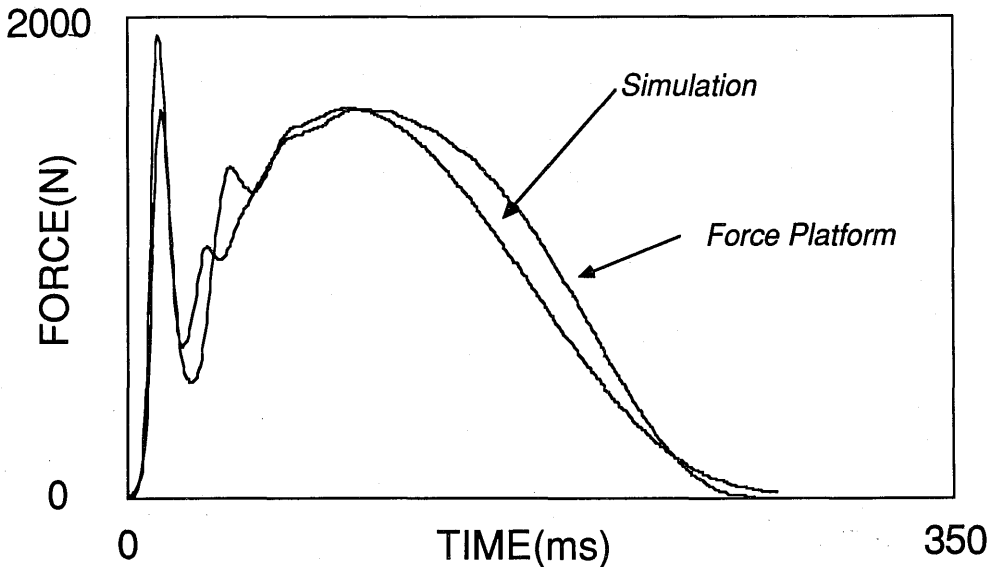


Fig. 11 Simulated ground reaction force of barefoot landing using the coefficient of lower leg segment 8.5kg and ground reaction force of force platform.

Reference

- 1 Bates, B.T., James, S.L., Oslerning, L.R., and Sawhill, J.A. "Effects of running on Ground Reaction force", *Biomechanics VII-B*, pp. 226-233, 1979.
- 2 Cavagna, G. "Elastic bounce of the body", *J. of appl. physiol.*, 29, pp. 279-282.
- 3 Cavanagh, P.R. and Lafortune, M.A. "Ground reaction forces in distance running", *J. of Biomechanics* 13: pp. 397-406, 1980.
- 4 Cavanagh, P.R. and Henning, E.M. "Pressure distribution measurement a review and some news observation for the effect of shoe from materials during running", *Biomechanical measurement of Sports shoes and Playing surfaces*, The univ. of Calgary, pp. 187-189, 1983.
- 5 Cavanagh, P.R., Williams, K.R. and Clarke, T. E. "A Comparison of Ground Reaction forces during walking barefoot and in running shoes", *Biomechanics VII-B*: pp. 151-156, 1979.
- 6 Clarke, T.E. and Frederick, E.C. "Dynamic load displacement characteristics of athletic shoe midsole materials (abstract)", *J. of Biomechanics* 15, 4: p. 340, 1982.
- 7 Clarke, T.E., Frederick, E.C. and Cooper, L.B. "Biomechanical measurement of running shoe cushioning properties", *Biomechanical aspects of Sport shoes and Playing surfaces*: pp. 25-33, The univ. Calgary, Canada, 1983.
- 8 Clarke, T.E., Frederick, E.C. and Hamill, C., "The Study of rear foot movement in Running", *Sport shoes and playing surfaces*: pp. 166-189, 1984.
- 9 Denoth, J., "A method to Measure mechanical properties of soles and playing surfaces", *Biomechanical aspects of sport shoes and playing surfaces*: pp. 43-50, The univ. Calgary, Canada, 1983.
- 10 Denoth, J., "Load on the locomotor system and modeling", *Biomechanics of running Shoes*: pp. 63-115, *Human kinetics Pub.*, 1986.
- 11 Forsythe, G.E., Malcolm, M.A. and Moler, C.B. 森正武訳"計算機のための数値計算法", *日本コンピューター協会*: pp. 137-138, 1978.
- 12 Gbosh, T.K. and Boykin, W.H., "Dynamics of the human kip-up maneuver", *Trans. of ASME.J. of Dynamic Systems*: pp. 196-201, June 1975.
- 13 飯本雄二, 小林一敏, 中田了, "足の着き方と着地衝撃の関連性についての力学的研究", *東京体育学研究*10: pp. 31-34, 1983.
- 14 小林一敏, "走高跳の踏切りについての力学的研究" *体育学研究*21-1: pp. 79-86, 1979.
- 15 小林一敏 "スポーツにおける身体の衝撃" *日本機械学会誌*98,828: pp. 111-116, 1987.
- 16 小林一敏"衝撃加速度からの変位の算出", *J.J. of Sports Science* 6-3: pp. 185-190, 1987.
- 17 Komor, A., Morawski, J. and Druski, L., "Control systems Analysis of the take-off phase of the vertical jump", *Biomechanics VII-B*, pp. 257-263, 1979.
- 18 Miller, D.I., "Computer simulation of Human motion", *Techniques for the Analysis of Human movement*: pp. 69-105, Princeton Book co. Princeton, New Jersey, 1976.
- 19 宮地力, 小林一敏, "オールウェザーコートとクレーコートでのテニスプレー中にかかる身体衝撃の比較", 第8回日本バイオメカニクス学会大会予稿集 pp. 165-168.
- 20 宮地力, "バイオメカニクスの分析に適した汎用グラフィックプログラム Chart の作成", *筑波大学体育科学系紀要*10: pp. 269-196, 1987.
- 21 Nigg, B.M., Denoth, J., Kerr, B., Luethi S., Smith, D. and Stacoff, A., "Load Sports Shoes and Playing Surfaces", *Sport Shoes and Playing Surfaces*: pp. 1-23, *Human kinetics Publishers Inc.*, Champaign, IL, 1984.
- 22 Nigg, B.M., Denoth, J., Leuthi, S. and stacoff, A., "Methodological aspects of Sports Shoe and Sport floor analysis", *Biomechanics VIII*.
- 23 Nigg, B.M., Denoth, J. and Neukomn, P.A., "Load on the human Body", *Biomechanics VII*: pp. 88-105, 1982.
- 24 中田了, "スポーツシューズの衝撃に関する力学的研究", *東京体育学研究*9: pp. 43-48, 1982.
- 25 中川鶴太郎, *レオロジー*第2版: pp. 157-170, 岩波全書, 1978.
- 26 湯川治敏, 小林一敏, "シューズの動的粘弾性係数の測定", 第38回体育学会大会号: p. 681, 1987.
- 27 Vaughan, C.L., "Computer Simulation of Human Motion in Sports Biomechanics", *Exercise and Sports Sciences Reviews* 12, pp. 373-416, 1984.