

## 異なる歩行条件におけるシューズ内温熱環境形成

村田 雅明<sup>\*1</sup>, 島崎 康弘<sup>\*2</sup>, 野津 滋<sup>\*2</sup>

### Determination of Thermal Environment in Shoes in Various Walking Condition

Masaaki MURATA<sup>\*1</sup>, Yasuhiro SHIMAZAKI<sup>\*2</sup>, and Shigeru NOZU<sup>\*2</sup>

<sup>\*1</sup> Okayama Prefecture Univ. Dept. of Systems Engineering for Sports  
Kuboki 111, Soja, Okayama, 719-1197 Japan

Shoes are essential for decreasing the amount of impact force at the landing. The impact force generates heat, thus sometimes the temperature in shoes rises more than 40 °C in outdoor in summer. Therefore thermal environment in shoes is harsh. However, there are few researches addressing the formation of thermal environment in shoes. In the present study, the authors carried out the experiment with subjects for quantitative evaluation of temperature change during various walking condition, and established energy flow model. The authors measured temperature under various walking condition of walking speed. Through the experiment, the pressure value and contact area of feet, landing, swing time, and feet moving velocity during walking. The authors established energy flow model and carried out the numerical simulation for predicting thermal environment in shoes. In the model, the heat was gained by landing, human metabolic, and ground surface temperature. On the other hand, the heat was lose by feet movement with convection heat transfer. The heat was mainly transferred by conduction within human skin. Some parameters in the simulation were decided by using subject experiments. The result of the numerical simulation for predicting thermal environment in shoes qualitatively agreed with subject experiments by using two-dimensional heat conduction model. However, temperatures in numerical simulation was slightly higher than the experiments. The detailed considerations remain as future works.

**Key Words** : Foot, Shoes, Heat transfer, Landing, Numerical simulation

### 1. 結 言

近年、心身の健康意識の向上から多くの人がスポーツを楽しんでいる。その中でランニングは、シューズ以外に特別な用具を必要としないため、気軽なスポーツとして人気が高い。シューズは、ランニング時の地面との衝撃力を軽減させるためになくてはならない。しかし、衝撃力を軽減させることによって熱を発生させる。この発生した熱がシューズ内の温熱環境を悪化させる。真夏に屋外での激しい運動時には、シューズ内温度は48 °Cにも達して、激しい発汗を促す<sup>(1)</sup>。この汗が皮膚の炎症、その他のスポーツ障害、靴の腐食、亀裂、型崩れ、不適合の原因にもなるといわれており<sup>(2)</sup>、シューズ内温熱環境の悪化は、様々な障害に関係している。しかし、人の体温は運動による一時的な体温上昇であっても上限は40.5 °C程である<sup>(3)</sup>。そのため、48 °Cまで上昇するには外部からの熱授受が影響していると考えられる。しかし、外部熱授受がシューズ内温熱環境に与える影響に関する研究は、あまり行われていない。そこで本研究では、種々の歩行状態での被験者実験を行うことで、シューズ内温熱環境を定量的に評価し、歩行時のシューズ内のエネルギーの流れのモデルを確立し、快適なシューズ設計への応用を目指す。

<sup>\*1</sup> 学生員, 岡山県立大学大学院 情報系工学研究科 (〒719-1197 岡山県総社市窪木 111)

<sup>\*2</sup> 正員, 岡山県立大学 情報工学部  
E-mail: cd25049a@ss.oka-pu.ac.jp

## 2. 実 験

本実験で使用するのは、市販のランニングシューズである。シューズの内側靴長は 270 mm、重さ 0.18 kg、シューズ底はゴム製で厚さ 20 mm である。事前測定より、衝撃吸収率 0.55、温度伝導率  $1.87 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ 、熱伝導率  $0.25 \text{ W}/(\text{mK})$ であった。

### 2・1 歩行による接地動作挙動

歩行の基本動作を解析する目的で、健康な男子大学生 6 名 (Year  $21.5 \pm 1.4$ ) にトレッドミル上にて歩行速度 3.0, 6.0, 9.0, 12.0, 15.0 km/h で歩行した際の様子を測定した。測定項目は衝撃力、接地時間、遊脚時間、接地面積、足部速度である。なお、6 名の足長は 265 mm~275 mm であった。

実験ではシューズ内に足圧センサ (NITTA F スキャン) を配置し、衝撃力と接地面積の経時変化を測定し、接地時間と遊脚時間を算出した。データ記録にはパーソナルコンピュータを使用した。更に加速度センサ (ZMP IMU-Z2) をシューズ踵部に取り付け、足部の加速度を測定し、その結果から足部速度を算出した。

例えば、歩行速度 3.0 km/h において 6 名の被験者によって得た衝撃力、接地面積の平均値は図 1(a)となる。なお、ここでいう衝撃力は足裏全体での積算値である。図 1(a)において 0.3 sec 付近で衝撃力、接地面積が増加し始める。この時、踵が地面に接地し、そののち足底接地する。衝撃力、接地面積が 0 付近になる時、つま先が離地する。この動作が周期的に行われており、例えば、ある被験者の衝撃力分布は図 1(b)となる。本研究では、踵が接地してからつま先が離地するまでの時間を接地時間とし、つま先が離地してから踵が接地するまでの時間を遊脚時間とする。

各歩行速度における被験者全員の最大衝撃力、接地時間、遊脚時間、最大接地面積、足部速度の平均値を表 1 にまとめた。衝撃力、接地時間、足部速度は、歩行速度の増加に伴い増加した。接地時間は、歩行速度の増加により短くなり、遊脚時間は歩行速度によらず 0.5 sec でほぼ一定であった。接地面積に関しては、歩行速度が 3.0 ~ 6.0 km/h では  $0.09 \text{ m}^2$ 、9.0 km/h~15.0 km/h では  $0.13 \text{ m}^2$  でほぼ一定であった。

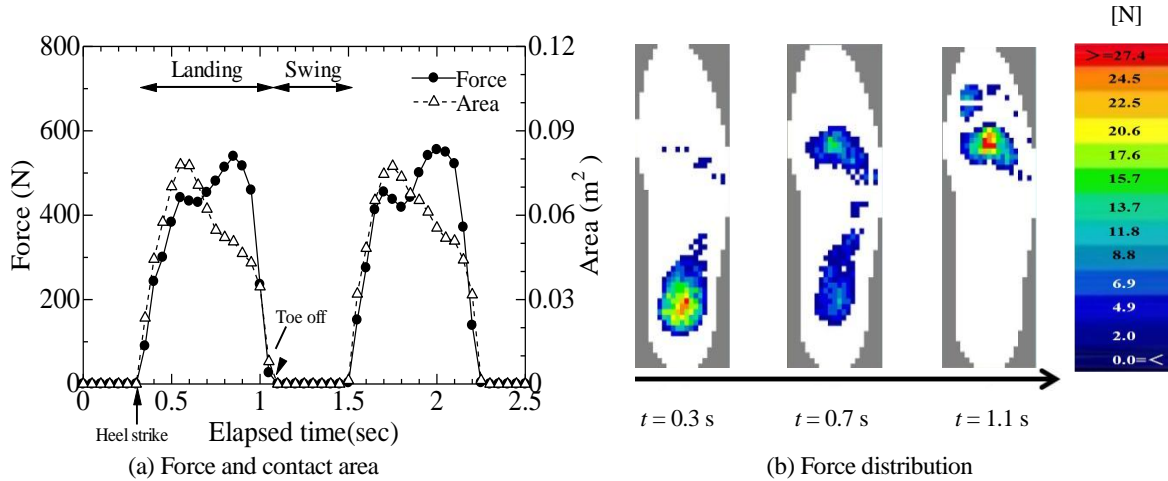


Fig.1 Result of landing experiments

Table 1 Result of landing experiment

	Force [N]	Landing time[s]	Swing time[s]	Area [m <sup>2</sup> ]	Landing speed [m/s]
3.0 km/h	575	0.8	0.5	0.09	1.0
6.0 km/h	732	0.5	0.5	0.09	1.8
9.0 km/h	1191	0.3	0.5	0.13	3.0
12.0 km/h	1323	0.25	0.5	0.13	3.5
15.0 km/h	1464	0.2	0.5	0.13	4.0

## 2・2 歩行時の温熱環境

様々な歩行条件による足部温度を計測するため、接地動作解析と同速度の3.0, 6.0, 9.0, 12.0, 15.0 km/hにてトレッドミル上で歩行実験を行った。環境条件として、床面から高さ1.5 m地点における気温および相対湿度をサーミスタ(T&D TR-73R), を用いて1分間隔で測定した。

足部皮膚温度は、つま先, 拇指裏, 土踏まず, 踵, 甲, 内果, 外果の7箇所を、体内温度としては舌下温をそれぞれJ熱電対にて1分間隔で測定した。データの記録にはデータロガー(HIOKI LR8402)を使用した。更に歩行時の発汗による放熱量を計測する目的から、実験前後には精密体組成計(TANITA TBF-110)にて全身の体重を測定した。生理発熱の影響を考慮するため、呼気代謝モニタシステム(S&ME VO2000)にて酸素摂取量および二酸化炭素排出量を測定し、代謝量を算出した。

歩行時間は各人50分間とし、実験開始から10分間立位安静状態、実験開始10分から30分間は前述のとおり速度(3.0, 6.0, 9.0, 12.0, 15.0 km/h)で歩行した。また、基準として30分間立位状態(0.0 km/h)も行った。歩行後10分間は再び立位安静状態を保つものとした。

歩行速度3.0 km/hでのある被験者(62.8 kg)の歩行30分間の皮膚温度の経時変化の一例を図2に示す。足部皮膚温度計測7箇所では歩行時に徐々に温度上昇が起こった。計測箇所では踵部は歩行時の衝撃を最初に受ける箇所であり、初期温度35.0 °Cから30分後に37.9 °Cまで2.9 °Cと計測箇所でもっとも温度上昇した。その他の歩行速度においても、同様の傾向が見られた。また、この被験者の歩行中の代謝量平均値は120 W/m<sup>2</sup>, 実験前後での体重変化は0.4 kgであった。これから足部での代謝量, 汗による放熱量を算出するとそれぞれ4.44 W/m<sup>2</sup>, 0.42 W/m<sup>2</sup>であった。

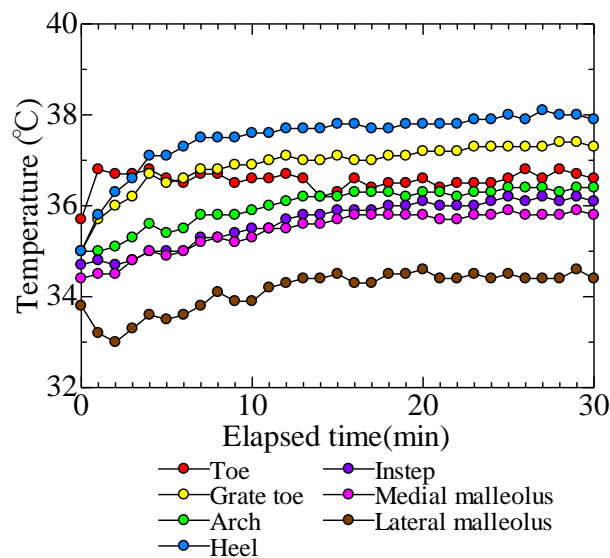


Fig.2 Temporal change of skin temperature

## 3. 伝熱数値解析

歩行時の接地動作挙動を基に、歩行動作によるシューズ内での温熱環境を考える。本実験では簡単のため足部の接地モデルをシューズ底(ゴム)と人体足部の二層のモデルで考える。筆者らはこれまでに同様の考えに基づいた一次元モデルでシューズ内温熱環境を考慮できることを示した<sup>(4)</sup>。本解析における足部は二次元的であり、形状モデルを図3に示す。このモデルを用いて30分間の温度分布を求める。モデルの発熱要素は、接地時の衝撃力と代謝である。放熱要素は、発汗による蒸発と対流熱伝達である。

歩行動作の接地により受けた衝撃力をシューズの衝撃吸収分だけ熱エネルギーとして瞬時にシューズ底( $y=0$ )で一様に接地時間中に受け取る。代謝量は全身で一様に発熱していると仮定し、足部体表面積分発熱する。足部体表面積に関しては、高比良らの式<sup>(5)</sup>と藤本らの体表面の部位別比率<sup>(6)</sup>を用いて算出し、 $0.063 \text{ m}^2$ とした。

遊脚時間に対流熱伝達率で足部全体が放熱される。風速を足部速度とし、対流熱伝達率はNishiらの式<sup>(7)</sup>を用いて算出した( $=6.5 v^{0.39} \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ ,  $v$ : 風速)。実験前と後の体重変化がすべて発汗によるものと仮定し、発汗蒸発熱による潜熱損失量も全身で一様と仮定し、足部体表面積分放熱する。

本解析の方程式系を以下に示す。式(1)より順に支配方程式，差分式，シューズ底の初期条件，人体足部の初期条件，シューズ底と地面境界条件，接地期のシューズ底と地面境界の熱流束，遊脚期の熱流束，足部と外気との境界条件，足部と外気の熱流束であり，差分法により求めた。なお，ここでは上述の 3.0 km/h での歩行時の温度挙動を求めることとする。

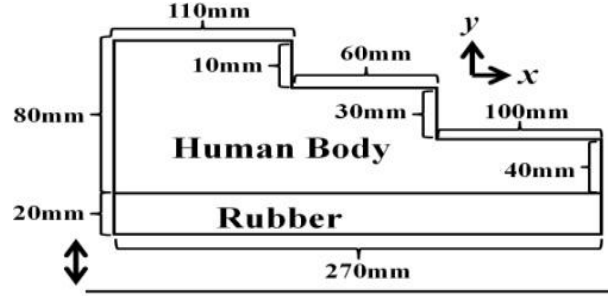


Fig.3 Feet shape for landing simulation model

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) \quad (1)$$

$$\frac{T_{i,j}^{n+1} - T_{i,j}^n}{\Delta t} = \alpha \left( \frac{T_{i-1,j}^n - 2T_{i,j}^n + T_{i+1,j}^n}{\Delta x^2} + \frac{T_{i,j-1}^n - 2T_{i,j}^n + T_{i,j+1}^n}{\Delta y^2} \right) \quad (2)$$

$$t = 0, 0 \leq x \leq 270, 0 \leq y \leq 20: T_{i,j}^0 = 32.9 \quad (3)$$

$$t = 0, (0 \leq x \leq 270, 20 \leq y \leq 40), (0 \leq x \leq 170, 60 \leq y \leq 90), (0 \leq x \leq 110, 90 \leq y \leq 100): T_{i,j}^0 = 34.8 \quad (4)$$

$$t > 0, 0 \leq x \leq 270, y = 0: T_{i,j=0}^n = T_{i,j=1}^n + \frac{\Delta y}{\lambda_1} q_1 \quad (5)$$

$$t = 0.5c + 0.3: q_1 = \frac{0.5mv^2}{0.8S} \eta \quad (6)$$

$$t = 0.8c + 0.5: q_1 = 6.5v^{0.39} (32.9 - 34.8) \quad (7)$$

$$t > 0, 0 \leq x \leq 110, y = 80: \frac{\partial T_{i,j}^n}{\partial x} = \frac{\partial T_{i,j}^n}{\partial y} = 0 \quad (8)$$

$$t > 0, (x = 0, 20 \leq y \leq 100), (x = 110, 90 \leq y \leq 100), (x = 170, 60 \leq y \leq 90), (x = 270, 20 \leq y \leq 60): T_{i=0,j}^n = T_{i=1,j}^n + \frac{\Delta x}{\lambda_2} q_2 \quad (9)$$

$$t > 0, (110 \leq x \leq 170, y = 90), (170 \leq x \leq 270, y = 60): T_{i,j=0}^n = T_{i,j=1}^n + \frac{\Delta y}{\lambda_2} q_2 \quad (10)$$

$$t > 0: q_2 = 6.5v^{0.39} (32.9 - 34.8) \quad (11)$$

$T$  は温度[°C]， $t$  は時刻[s]， $\alpha$  は温度伝導率[m<sup>2</sup>/s] (足部 =  $3.88 \times 10^{-7}$  m<sup>2</sup>/s<sup>(8)</sup>，シューズ底 =  $1.87 \times 10^{-3}$  m<sup>2</sup>/s)， $m$  は被験者体重[kg] (= 62.8 kg)， $v$  は足部速度[m/s] (= 1.0 m/s at 3.0 km/h walk)， $\eta$  は衝撃吸収率[N.D.] (= 0.55)， $S$  は接地面積[m<sup>2</sup>] (= 0.09 m<sup>2</sup> at 3.0 km/h walk)， $\lambda_1$  はシューズ底の熱伝導率[W/(mK)] (= 0.25 W/(mK)<sup>(9)</sup>， $\lambda_2$  は人体底部の熱伝導率[W/(mK)] (= 1.58 W/(mK)<sup>(10)</sup>， $q_1$  はシューズ底の熱流束[W/m<sup>2</sup>] (接地時 = 239.9 W/m<sup>2</sup>，遊脚時 = -0.8 W/m<sup>2</sup> at 3.0 km/h walk)， $q_2$  は人体足部の熱流束[W/m<sup>2</sup>] (= -0.04 W/m<sup>2</sup> at 3.0 km/h walk)，添字  $i$  は方向  $x$ ， $j$  は方向  $y$ ， $n$  は時刻  $t$  に関する差分， $c$  は接地のサイクル数を表す ( $c = 1, 2, \dots$ )。

#### 4. 結 果

図 4 に示すのは数値解析と歩行速度 3.0 km/h における被験者実験の歩行時 30 分間の皮膚温度変化である。数値解析の足部最下部 ( $0 \leq x \leq 270, y = 20$ ) の平均値と被験者実験の踵部，数値解析の足部全体の平均皮膚温と被験者実験の計測 7 箇所の平均皮膚温度を比較した。実験値の踵部 (Heel) の初期温度は 35.0 °C，30 分間で 2.9 °C 温度上昇した。解析値の足部最下部 ( $0 \leq x \leq 270, y = 20$ ) の初期温度は 34.8 °C，30 分間で 1.0 °C 温度上昇した。実験値の 7 箇所平均皮膚温の初期温度は 34.8 °C，30 分間で 1.6 °C 温度上昇した。解析値の足部全体の初期温度は 34.8 °C，30 分間で 0.1 °C 温度低下した。どちらの比較対象においても，被験者実験の方が温度が高い結果に

なった。この原因として考えられるのは、本モデルでは、シューズのアウトソールの熱抵抗の影響を考慮しておらず実際より足部からの放熱量が大きいことが考えられる。また、その他の歩行速度においても同様の傾向が見られた。今後はアウトソールの影響を考慮するため、使用しているシューズでの対流熱伝達率の測定などを行なう予定である。また、歩行時のシューズ底の変形によるゴム弾性の温度上昇や、歩行によって起きるシューズ内の換気などを考慮してゆき、数値解析精度の向上を図る。

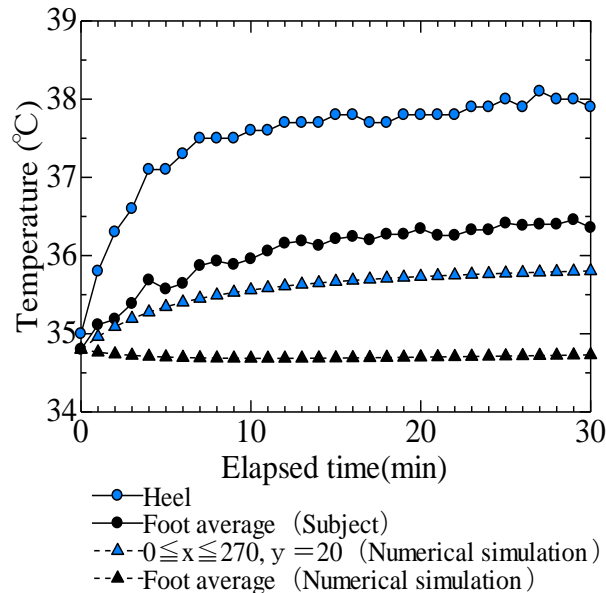


Fig.4 Temporal changes of skin temperatures for experiment and simulation

## 文 献

- (1) 石塚忠雄, “スポーツシューズの医学”, 金原出版株式会社, (1996), pp. 80-83.
- (2) 岩崎房子, “足の温熱生理機能と靴内微生物汚染の実態について”, かわとはきもの, No.138, (2006), pp. 2-7.
- (3) 北川薫, “運動とスポーツの生理学”, 市村出版, (2001), pp. 42-45.
- (4) 村田雅明, 島崎康弘, 野津滋, “接地時におけるランニングシューズの力学的考察”, 第43回中国四国学生員卒業研究発表講演会, (2013), CD-ROM, 講演番号 1116
- (5) 高比良英雄, “日本人体表面積の測定並びに之を表す式に就て, 日本人新陳代謝論(其の2)”, 栄養研究所報告, Vol. 1, (1925), pp. 61-95.
- (6) 藤本薫喜, 渡辺孟, 湯川幸一, 坂本淳, “日本人の体表面積に関する研究 第17篇 性・年齢・体型と部位別比率”, 日衛誌第23巻第5号, (1968), pp. 437-442.
- (7) Y.Nishi, and A.P.Gage, “Direct evaluation of convective heat transfer coefficient by naphthalene sublimation”, *Journal of Applied Physiology*, Vol. 29, No.6 (1970), pp. 830-838.
- (8) 横山真太郎, 角田直人, 富樫貴子, 濱田靖弘, 中村真人, 落藤澄, “部位別特性を考慮した人体の定常熱移動モデルの開発とその応用”, 衛生工学シンポジウム論文集, Vol. 5, (1997), pp. 68-71.
- (9) 社団法人日本ゴム協会ゴム技術フォーラム, “ライフラインを支えるゴム製品・技術”, 大成社, (1999), pp. 15-31.
- (10) 横山真太郎, 角田直人, 富樫貴子, 濱田靖弘, 中村真人, 落藤澄, “部位別特性を考慮した人体の定常熱移動モデルの開発とその応用”, 衛生工学シンポジウム論文集, Vol. 5, (1997), pp. 68-71.