

## 圧電フィルムを用いた靴中敷き型センサ

## Shoes Insole Sensor Using Piezoelectric Film

Taufiq.A.Setyanto・広島大学大学院工学研究科  
Taufiq.A.Setyanto, Hiroshima University星野 希・広島大学大学院工学研究科  
Nozomi Hoshino, Hiroshima University藤本 由紀夫・広島大学大学院工学研究科  
Yukio Fujimoto, Hiroshima University天野 孝三・広島大学教育学研究科  
Kouzo Amano, Hiroshima University渡部 和彦・広島大学教育学研究科  
Kazuhiko Watanabe, Hiroshima University

Key Words: Shoes Insole Sensor, PVDF, Piezoelectricity, Dynamic Load, Long Jump, Race Walk, Running

## 論文要旨

圧電フィルムからなる荷重検出素子を、シリコンゴムシートに複数埋め込んだセンサ本体を、スポンジゴムシートと帆布のカバー部材の間に挟み込んだ靴中敷き型センサを作製して、走り幅跳び、歩行、競歩、及びランニング中の足裏荷重の移動を測定した。圧電フィルムの電極に導電ゴムを用いたことで、ジャンプの衝撃に耐える頑強なセンサにした。体重移動の特徴を、踵、母指球およびつま先の3カ所で測定することにより、走り幅跳びの踏切と着地の足裏荷重の状態、歩行、競歩、ランニング中の体重移動や両足が浮く状態の様子を明らかにした。

## 1. 緒言

福祉工学やスポーツ工学の分野では、Force Plateや足裏荷重測定シートを用いた歩行解析が多く行われている。しかしながらこれらは、実験室内に設置して使用するもので、使用条件が制限されるという問題があった。

また、屋外でも使用可能な靴中敷き型の足裏荷重分布センサを用いた歩行解析も行われているが、ジャンプなどの激しい動作ではセンサが壊れやすいという問題や、ランニングのような高速な変動荷重の測定が困難という問題があった。

本研究は、スポーツ時の足裏荷重の測定や、階段からの飛び降りやつまずき動作のような、激しい足裏荷重の変動を比較的高い精度で測定できる強靱な靴中敷き型センサについて報告する。

## 2. 靴中敷き型センサ

靴中敷き型センサはセンサ本体とカバー部材からなる。図1は中敷き型センサ本体の写真、図2は全体写真を示す。

圧電フィルム(PVDF)の両面に、薄い導電ゴム電極を全面に接着し、導電ゴム電極に金属箔テープを介して電気配線を接続して荷重検出素子(図中の黒い部分)とした。踵部、母指球部およびつま先部での荷重測定のために、ほぼ同一面積の荷重検出素子を左右中敷きで各3個作製した。踵部と母指球部は円形形状にした。

次に、2枚のシリコンゴムを中敷き型に合わせて切り出して重ね、荷重検出素子をその間の所定位置に配置した後、両面を貼りあわせた。

靴中敷き型センサは上記本体の両面に、スポンジシートに帆布を接着したカバー部材を重ねて構成した。中敷き型センサの全体厚さは約5.5mmであるが、足を靴に入れて体重を加えるとスポンジシートは圧縮されて4mm程度の厚さになり、

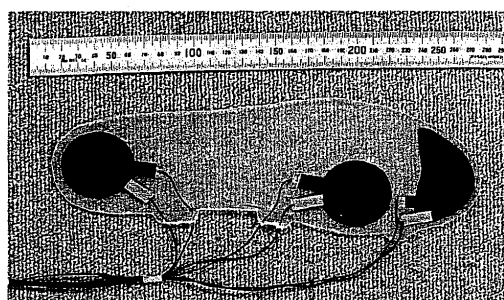


Fig.1 Main body of shoes insole sensor with three load sensing elements

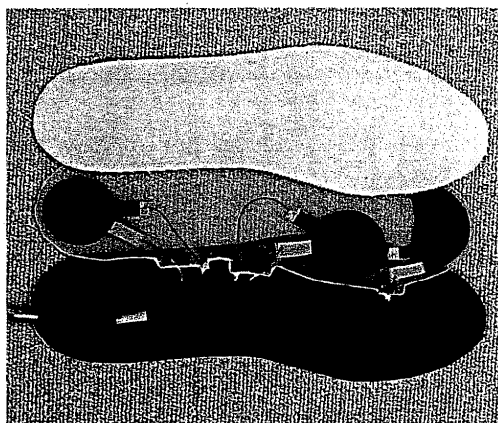


Fig.2 Shoes insole sensor with cover member

一般的な中敷きの場合と違和感のない履き心地になる。

### 3. 靴中敷き型センサの荷重検出原理

図3は中敷き型センサ本体の荷重検出原理を説明する図である。センサ本体の両面に圧縮力が作用すると、シリコンゴムは厚さが薄くなるとともに、ポアソン効果によって水平方向に伸びる変形をする。このときのゴムの水平方向の伸びによって圧電フィルムは引き延ばされ、表面の電極に電荷を生じる。このときの電荷変動を電気配線を介して取り出して荷重を測定するのが検出原理である。

ところが、センサ本体のみの場合、対象物とセンサ本体の接触摩擦によって、ゴム板の水平方向の変形が影響を受けるので精度の良い測定ができない。そこで、本中敷き型センサではシリコンゴムシートの上にスポンジゴムを配設して、接触摩擦影響を一定にするとともに、荷重分布の凹凸を滑らかにして本体に伝達するようにしている。

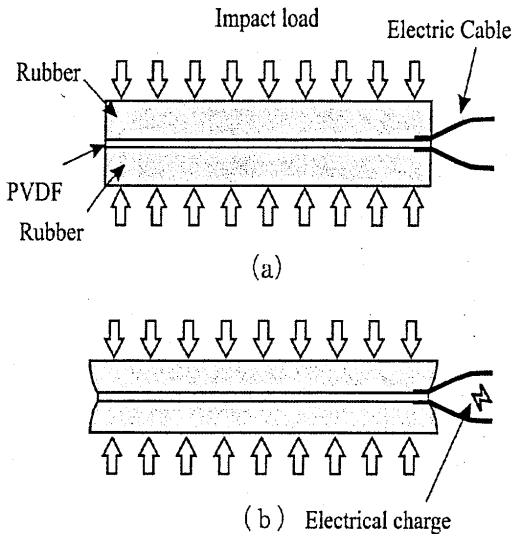


Fig.3 Load measurement principle of main body

### 4. 計測装置の構成

圧電フィルムは荷重速度に比例した出力を生じる。そこで、荷重に比例する信号を得るために通常はチャージアンプを使用する。しかし、本研究では、圧電フィルムの電流で駆動する受動型回路を用いた。受動回路は0.3Hz以上の荷重変動であれば、圧電フィルムの信号を積分して荷重に比例する信号を出力することができる。

### 5. 実験

#### 5.1 中敷き型センサの荷重検定

図4は中敷き型センサをロードセルの荷重受け台の上に置き、3カ所のセンサを足裏で繰り返し押す実験の様子を示す。各センサ形状に切り出したスポンジゴム板を中敷きの上に置き、それを足で踏んで荷重を負荷した。受動型回路はセンサから引き出したケーブルの途中に組み込み、ケーブルを直接電圧記録計に接続して測定した。

図5は荷重を負荷したときの、センサ出力電圧とロードセルの荷重波形を比較した一例である。センサの出力電圧はロードセルの荷重波形と良好な一致を示した。上記荷重検定を左右各3カ所のセンサ部について行い、センサの出力電圧と荷重との関係を求めた結果を図6に示す。本センサの回路を介しての出力電圧の勾配は約2mV/1kgであった。

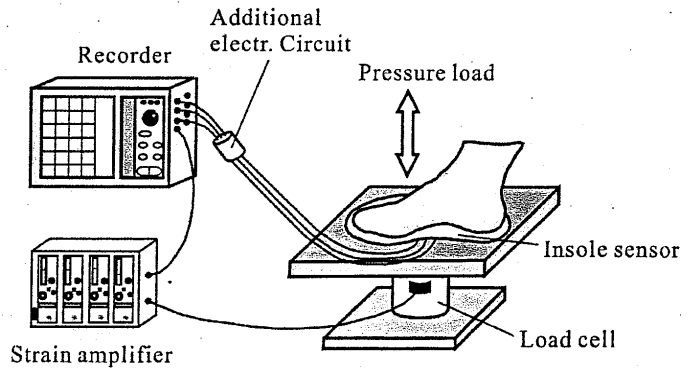


Fig.4 Measurement apparatus for sensor calibration

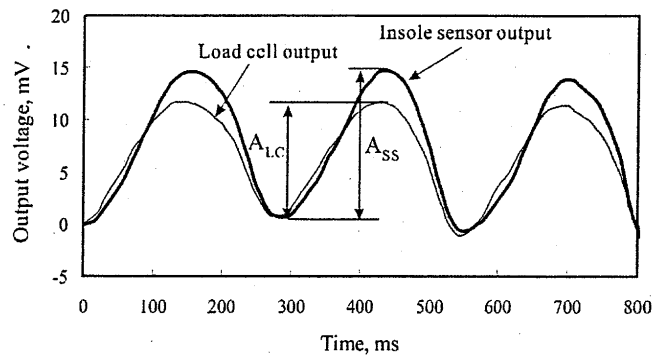


Fig.5 Comparison of insole sensor signal with load cell output

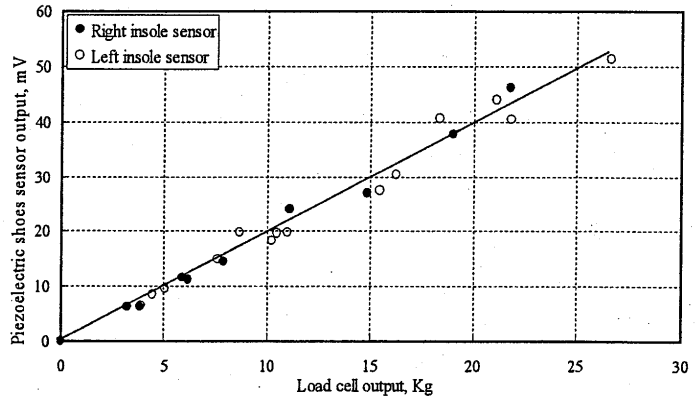


Fig.6 Relationship between sensor output and load

#### 5.2 走り幅跳び実験

走り幅跳びの実験は陸上競技場の施設で行い、広島大学学生に依頼して行った。つま先、母指球、及び踵の3箇所センサを設けた寸法26.5cmの男性用中敷きを使用した。中敷きの電気配線は踝内側から引き出し、脛脛、股部をそれぞれ弾性バンドで固定して腰まで持ち上げ、腰部のベルトに固定して、さらに腰から引き出した約15m長さのケーブルの端を助走路横に設置した電圧記録計(オムニエースRA-1200, NEC三栄)に接続した。データのサンプリング間隔は1msである。

図7は走り幅跳び実験での左右各3カ所のセンサで測定した荷重と時間の関係を示す。わかり易いように、左右の足の荷重は逆符号で表示している。男性ジャンパーは左足からステップを開始し、助走中は母指球に大きな荷重が作用している。また、つま先にも有る程度荷重が作用しているが、踵部

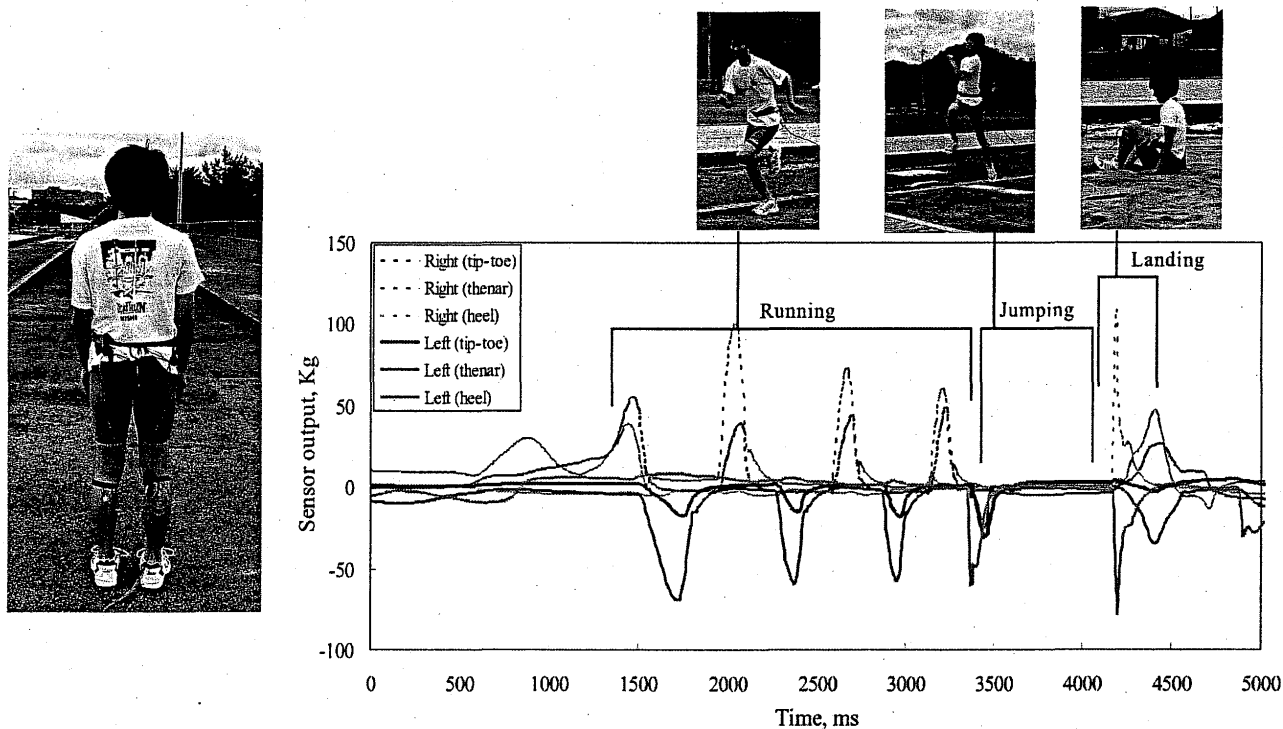


Fig.7 Experimental setup and output signal of shoes insole sensor during long jump experiment

にはほとんど作用していない。

踏切は右足で行っており、約 750ms 跳躍している。ジャンプ直前には左足踵部に大きな荷重が作用しており、母指球、つま先の順で荷重が移動している。着地時には左右両足の踵部にほぼ同時に衝撃的な最大荷重が作用している。

### 5.3 競歩, ランニング実験

競歩とランニング実験は走行速度を制御するため、トレッドミルの上で行った。実験は 23.5cm の女性用中敷きを作製して、陸上部の女性競歩選手に依頼して行った。トレッドミルの上に選手が立ち、腰から引き出したケーブルを、補助者が手で保持して、動作中のケーブルを引っ張らないようにして行った。

実験は、歩行(速度 4km/hr)、競歩(速度 8km/hr と 14km/hr)、ランニング(速度 14km/hr)の条件で行った。

図 8 は時速 4km/hr で歩行したときの各センサの荷重波形を示す。図より、踵から母指球、つま先順番で体重が移動していく様子がわかる。また、つま先にはわずかな荷重しか作用しないことがわかる。

図 9 は時速 8km/hr と 14km/hr の競歩の波形を比較して示す。図より体重は、踵から母指球、つま先へと移動している。体重の多くは、歩行やゆっくりした競歩の場合、踵部に主にかかっている。競歩の速度が速くなると、母指球に多くの荷重が作用するようになる。

また、時速 8km/hr の競歩では、いずれの時刻においても、左右の足裏の踵、母指球、つま先のいずれか

に加重が作用している。すなわち、少なくとも片方の足の一部が着地状態にある。一方、時速 14km/hr の競歩では、左右の足の踵、母指球、つま先のいずれもが荷重を受けていない状態、すなわち、両足が空中に浮いている時間帯が存在する。この飛行時間は約 50ms である。

撮影した競歩のビデオ撮影からは、時速 14km/hr の競歩においても一方の足が常に着地状態にあるように見えるが、実際には、競歩の速度が上がると、両足とも浮いている時間が生じることがあることがわかる。

ランニングの場合には、体重の多くは母指球にかかっている。

図 10 は速度 14km/hr のランニングの時のセンサの荷重は計の一例を示す。

この場合も、速度 14km/hr 競歩の場合と同様に、母指球部に大きな荷重が作用している。又、競歩の場合と比較して、両足が空中に浮いている時間が長くなっていることがわかる。

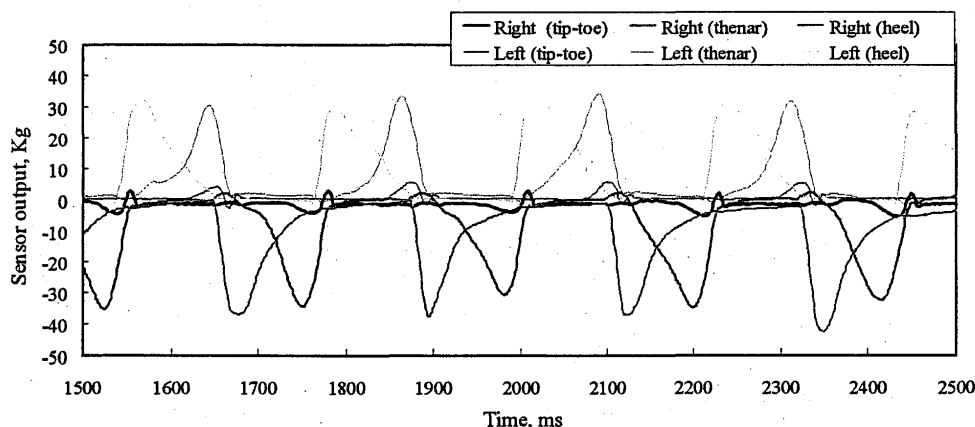


Fig.8 Output signal of shoes insole sensor during walking with speed 4km/hr

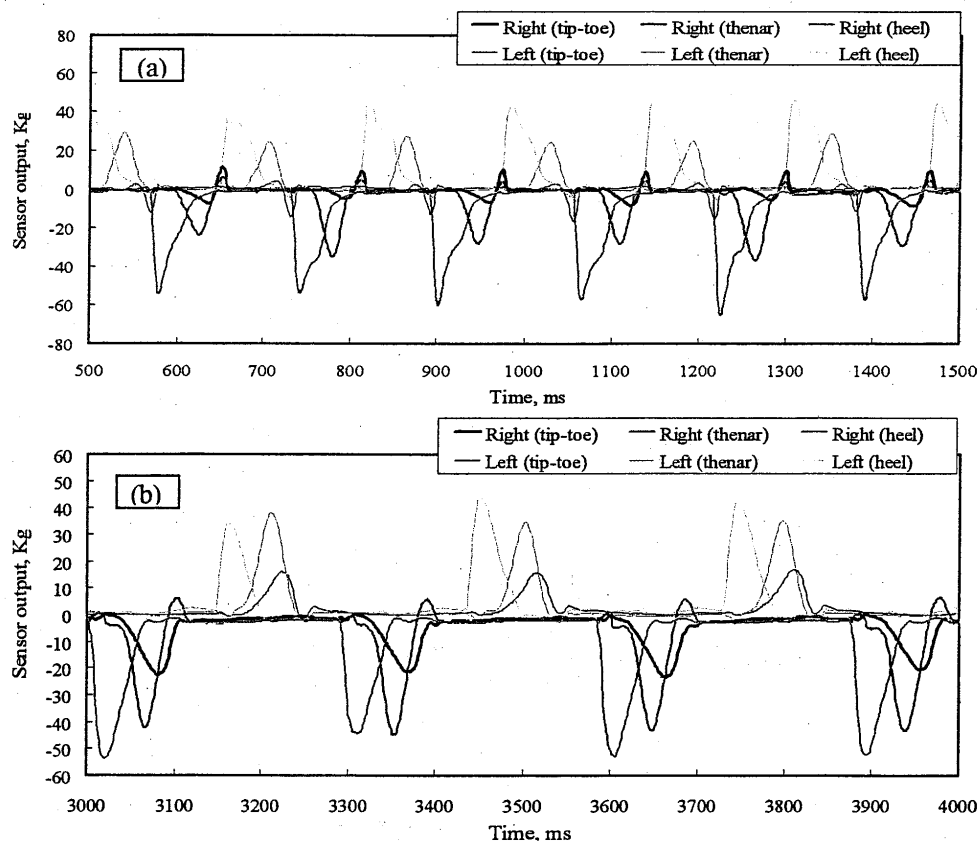


Fig.9 Race walking on tread mill and output signal of shoes insole sensor  
Race walking speed (a) 8 km/hr and (b) 14 km/hr

(2000), pp: 741-750.

なお、本靴中敷き型センサは、踵と母指球のセンサ寸法が約40mmの円形である。また、つま先部はこれとほぼ同一面積である。中敷き型センサで荷重の大きさを判断するには、靴の大きさの被験者の踵、母指球、つま先の位置がセンサの設置位置と良く一致することが大切である。

## 6. 結 言

本研究で開発した靴中敷き型センサは、圧電フィルムの電極に導電ゴムを用いたことで、長期間の激しい運動にも使用できることがわかった。また、走り幅跳びの着地時の衝撃や、ランニング中の踏み込みから離脱に至る高速な荷重波形と体重移動の様子を精度良く測定できることが明らかになった。

本研究のセンサ作製に当たり、(有)計測サポートの支援を受けたことを附記する。

## 文 献

1. Seyfarth, A., Blickan, R. and Van Leeuwen, J.L., Optimum take-off techniques and muscle design for long jump, The Journal of Experimental Biology 203

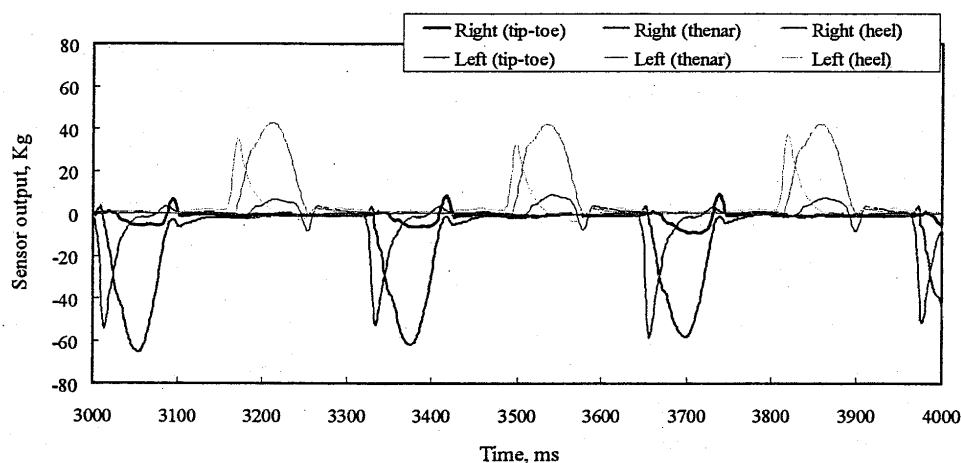


Fig.10 Output signal of shoes insole sensor during running experiment (speed 14km/hr)

2. Blake M. Ashby and Jean H. Heegaard, Role of arm motion in the standing long jump, Journal of Biomechanics 35 (2002), pp:1631-1637.
3. Setyanto, A.T., Fujimoto, Y. and Yue, J., Piezoelectric pad sensor for dynamic load measurement, Bulletin of the Graduate School of Engineering, Hiroshima University, Vol. 54, No. 1, 2005, pp: 35-42.