

## 接触面の 3 分力計測に基づいた測定システムの開発

### Development of Measurement System of Three Force Components on Contact Surface

笹川和彦, ○藤崎和弘, 小山拓馬, 佐久間貴也

Kazuhiko Sasagawa, ○Kazuhiro Fujisaki, Takuma Oyama, Takaya Sakuma

弘前大学

Hirosaki University

キーワード：接触界面 (Contact interface), せん断応力 (Shear stress),  
接触圧力 (Contact pressure), 薄型センサ (Thin sensor), 柔軟性 (Flexibility)

連絡先：〒036-8561 青森県弘前市文京町 3 弘前大学理工学部 笹川和彦

Tel/Fax: (0172)39-3675, E-mail sasagawa@cc.hirosaki-u.ac.jp

#### 1. はじめに

手の把持力や歩行時に足底に生じる接触圧力・せん断応力を測定することはスポーツ工学や医学, 福祉の分野において重要な課題である。歩行解析の一環として, 足底の接触圧力・せん断応力測定が行われている[1]。しかしながら, これまでに用いられたセンサは形状が厚く, 硬いことから, 足裏と靴の間に挿入することができず, 接触面への設置が難しいといった問題がある。

我々はこれまでに, 導電性高分子材料であるポリピロール薄膜を感圧素子に用いた薄くてしなやかなセンサを開発し, 固体接触に伴って生じる圧力およびせん断応力の

同時測定に成功している[2]。しかしながら, 従来のセンサは測定部のサイズが  $500\text{mm}^2$  程度と大きく, 接触面の圧力・せん断応力分布を計測するのは難しい。

そこで本研究では, 固体接触に伴う圧力およびせん断応力の分布を測定するため, センサの集積化を目指し, 小型化したユニットタイプの圧力およびせん断応力の同時測定センサを開発し, その有効性を検討する。検証実験として, 足底に設置可能な薄くしなやかなセンサを製作し, 歩行解析のための足底接触圧力・せん断応力分布計測システムを開発し, その有効性を検討した。

## 2. センサの原理

接触圧力とせん断応力の感圧素子としてポリチオフェン薄膜を用いた。ポリチオフェンは導電性の高分子材料であり、力が加わった際、作用圧力に応じて厚さ方向の電気抵抗が変化する特性を有している。この性質を利用し、接触面の垂直負荷による電気抵抗の低下を測定することで接触圧力を検出する。図1にせん断センサの測定原理を示す。せん断応力検出部では、上下の電極がせん断力により移動することで、電極間距離が変わり電気抵抗が変化する。このせん断応力検出素子には圧縮による影響も含むため、圧力検出素子部とブリッジ回路を組むことで圧力分の抵抗変化の影響を取り除くことができる[3]。本研究では接触圧力検出素子と2軸のせん断応力検出素子の抵抗変化を電圧変換回路を介して個別に測定し、データ処理用ソフトウェアにより補正した。

図2に垂直圧力と水平面(x, y)のせん断応力測定の一例を示す。垂直圧力をz軸方向にプロットすることで接触面に作用する力の3次元ベクトルを描くことができる。

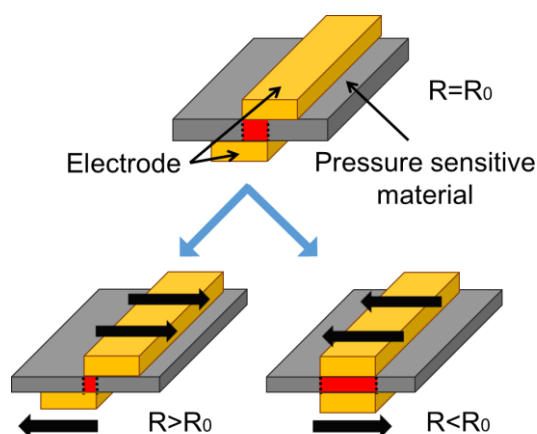


図1 せん断応力センサの構造と計測原理

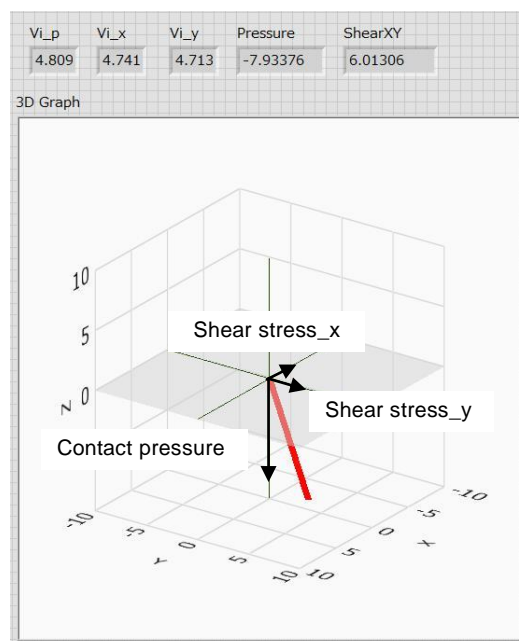


図2 接触部負荷の3次元表現  
(LabVIEW2012 上での表示例)

## 3. センサユニットの製作

センサユニットの小型化を目指し、図3に示す電極パターンを設計・製作した。下部電極材としてポリイミドフィルムに積層した銅薄膜を用いた。ウェットエッチング処理により形成した銅薄膜電極パターン上にポリチオフェン膜を積層した。上部電極は銅ペーストをスクリーン印刷することにより形成し、センサ表面の絶縁のため上部をポリイミドで被膜した。今回作製したセンサは1ユニットが5×5 mmの大きさであり、厚さが200μmである。

## 4. 実験方法

作製したセンサによる接触圧力およびせん断応力測定の有効性を検証するため、3軸ステージを利用したせん断力負荷実験を行った。実験装置は接触圧力負荷用のアクチュエータ1つとせん断応力負荷用のアク

チュエータ2つにより X-Y ステージ上に設置したセンサユニットに接触圧力およびせん断応力を作用させることができる。また、アクチュエータの先端にロードセルを設置しており、応力値を計測することができる。この装置を用いて一定の接触圧力を作用させた状態において $-20\sim 20\text{kPa}$ のせん断応力を負荷し、出力電圧と応力の関係を求めた。

次に、実際に歩行中の足底での接触圧力とせん断応力の分布を測定するため、3個のセンサを図4に示すようにサンダルの表面に配置し、歩行時の踵接地時から足指(爪先)離地時までの接触面負荷計測を行った。

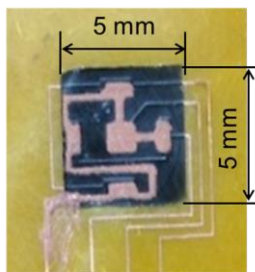
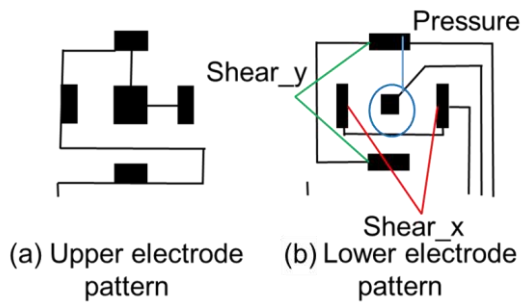


図3 センサの電極パターンと外観

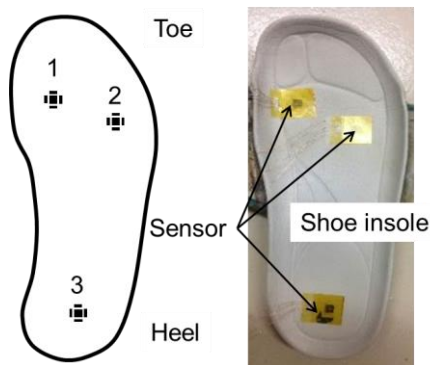


図4 センサユニットの設置位置

## 5. 結果と考察

図5に接触圧力を $20\text{kPa}$ 作用させた下でのせん断応力と出力電圧計測結果の一例を示す。無負荷時に不感領域が生じるものの、各方向での電圧の増分に注目すると、加えたせん断力に対してほぼ線形的に電圧が上昇していることがわかる。一方、接触圧力を変化させても、せん断応力に対する出力電圧の関係は変化しなかった。これにより、接触圧力の影響を受けずにせん断応力の測定が可能であることがわかった。

図6に歩行中における足底の(a)接触圧力・(b)せん断応力分布計測の一例を示す。踵接地時において踵部に圧力が測定され、足指離地時に拇指球へ接触圧力が移動しているのがわかる。また、せん断応力についてみると、踵接地時に踵部にサンダルに対して前方のせん断応力が作用し、足指離地時には拇指球にサンダルに対して後方のせん断応力が作用していることがわかる。

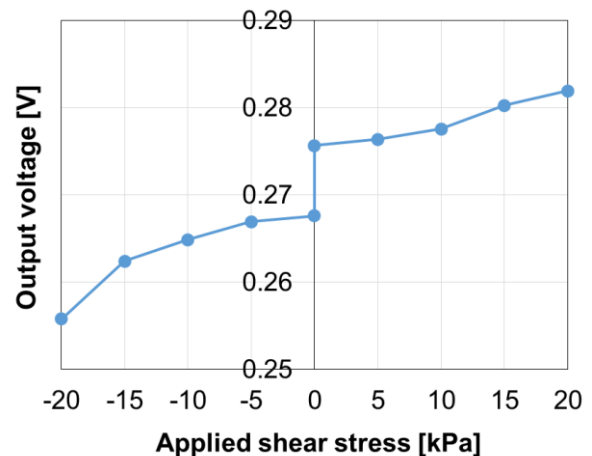


図5 センサのせん断応力負荷に対する電圧特性

(Contact pressure:  $20\text{kPa}$  負荷時)

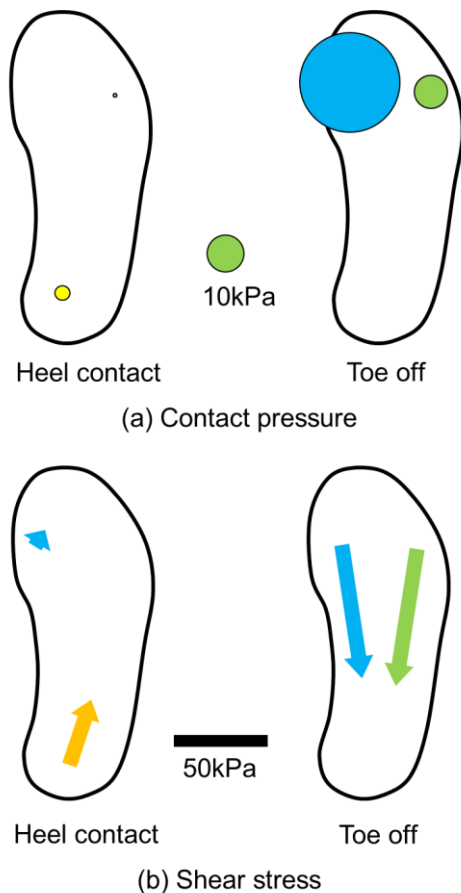


図6 歩行時の接触圧力・せん断応力計測結果の一例（Heel contact：踵接地時，Toe off：足指離地時）

## 6. おわりに

物体接触面に設置可能な薄くしなやかなセンサを製作し，歩行解析のための足底接触圧力・せん断応力分布計測システムを開発した．本システムの有効性を検討するた

め，歩行中における足底の接触圧力とせん断応力の分布測定を試みた．その結果，妥当な接触圧力およびせん断応力分布を測定することができた．これらの結果より作製したシステムの有効性を確認できた．

## 参考文献

- [1] Satu, K., Jukka, L., Hannu, K. and Jouko, H., Development of a Piezoelectric Polymer Film Sensor for Plantar Normal and Shear Stress Measurement, *Sensors and Actuators A: Physical*, Vol.154, Issue 1-2, (2009), pp.57-64.
- [2] Sasagawa, K. and Tokiyoshi, K., Development of Sensor System for Measurement of Distributions of Contact Pressure and Shear Stress on Contacting Skin Surface, *The 5th International Symposium on Advance and Technology in Experimental Mechanics*, (2010), Paper ID: 127.
- [3] Sasagawa, K., Oyama, T., Tokiyoshi, K., and Yokoyama, K., Development of Contact-Pressure and Shear-Stress Sensing System for Application to a Haptic Display, *Journal of JSEM*, Vol.13, Special Issue, (2013), pp. s228-s232.