

# インソールに配置した MEMS3 軸力センサによる足裏応力分布計測

Measurement of 3-axis Stress Distribution at Human Sole

by MEMS 3-axis Force Sensors Placed on Insole

○ 中井 亮仁 (東京大学) 永野 順法 (タッチエンス) 正 高橋 英俊 (東京大学)  
正 松本 潔 (東京大学) 正 下山 勲 (東京大学)

Akihito NAKAI, the University of Tokyo, nakai@leopard.t.u-tokyo.ac.jp

Akinori NAGANO, Touchence Inc.

Hidetoshi TAKAHASHI, the University of Tokyo

Kiyoshi MATSUMOTO, the University of Tokyo

Isao SHIMOYAMA, the University of Tokyo

We proposed and demonstrated a wireless measurement system of 3-axis stress distribution at a human sole. The system consists of three 3-axis force sensors fabricated by MEMS (Micro Electro Mechanical Systems) technologies which were placed on the heel, thenar and hypothenar, three amplifier circuit boards and a CPU board with a Bluetooth module. The 3-axis stresses composed of normal stress of vertical direction and shear stresses of lateral and front-back directions were measured and calibrated for crosstalk compensation in level walk. The peak stresses of vertical, lateral and front-back directions are about 100kPa at the heel and thenar, 15kPa at the thenar and 20kPa at the heel, respectively.

**Key Words:** walk measurement, wearable sensor, 3-axis force sensor, MEMS (Micro Electro Mechanical Systems)

## 1. 背景と目的

高齢化が進む我が国において、高齢者の健康寿命を延ばすことは重要な課題である。高齢者の歩き方の改善や転倒予防に有効なシステムを開発するにあたり、工学的に人の歩き方を解析する手法が研究されており、特に歩行者の足裏に働く力を計測する研究は国内外で数多く行われている。

床に固定されたフォースプレート上で歩行や運動を行い、三分力と三モーメントを計測する研究が報告されている[2]。この方法は高精度な計測が可能である一方で、計測範囲が室内に限られ、かつ力分布が計測できないという課題がある。靴底に三軸／六軸力センサを固定して、三分力と三モーメントを計測する方法も提案されている[3, 4]。場所を選ばず様々な環境での計測が可能であるが、センサの厚さや重さ、材質などの観点から、通常の歩行や運動を計測しているとは言い難かった。第三の方法は、圧電フィルムなどの薄型のセンサ素子を靴の中敷き部に配置するものである[5]。計測の場所を選ばず、歩行や運動に与える影響も最小限に抑えられ、さらに多点での分布情報が得られる優れた手法であるが、圧力しか検出できずせん断力を直接計測できない点が課題であった。

そこで本研究では、これら従来研究のデメリットを克服する方法として、小型・薄型の3軸力センサを靴のインソール部に複数埋め込み、計測データを無線で送信するシステムを提案する（図1参照）。歩行や運動に影響を与えることなく、かつ計測環境を選ばない、足裏部の3軸応力分布計測システムの実証が本研究の目的である。

## 2. 原理

本研究で使用する3軸力センサの写真を図2(a)に、内部に埋め込まれたセンサチップの写真を図2(b)に示す。センサチップ上には2本の両持ち梁のペアが3組配置されており、圧力検出用の両持ち梁は梁上面に、せん断力検出用の両持ち梁は梁側面に、それぞれピエゾ抵抗層が形成されている。各軸力検出用の両持ち梁のペアは、該当する力が加わった際に大きく変形するよう設計されており、また梁の変形に際して伸張・収縮が対称となる位置にピエゾ抵抗層が配置されている。その

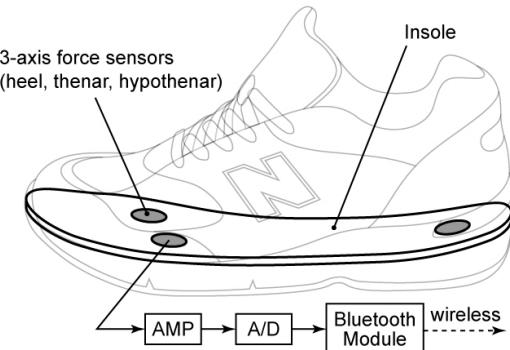


Fig. 1 Proposed wireless measurement system of 3-axis stress distribution at a human sole.

ため、これらの梁のペアを用いて2アクティブゲージ法でブリッジを形成しアンプ回路で増幅することで、梁の変形に起因する抵抗値変化を電圧変化として検出することができる。

3軸力センサに加重される圧力  $\sigma_z$  と2軸のせん断応力  $\tau_x$ ,  $\tau_y$  と、上記電圧変化  $V_x$ ,  $V_y$ ,  $V_z$  の間には、センサの特性行列を介して式(1)の関係が成り立つ。

$$\begin{pmatrix} V_x \\ V_y \\ V_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} k_{11} & k_{12} & k_{13} \\ k_{21} & k_{22} & k_{23} \\ k_{31} & k_{32} & k_{33} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \tau_x \\ \tau_y \\ \sigma_z \end{pmatrix} \quad (1)$$

実験的に係数  $k_{ij}$  (但し  $i, j=1, 2, 3$ ) を求めることで特性行列、並びにその逆行列が計算でき、これを用いてセンサに加重された力を算出することができる。

## 3. 製作

センサチップの製造プロセスは文献[6]に示されている。本研究では、試作したセンサチップをワイヤボンディングで電気的に接続した後、フレキシブル基板を厚さ0.3mmのSUS板に接着し、シリコーンゴム（信越化学工業製、KE-1606）を射出成型してセンサチップを埋め込んだ。シリコーンゴムの厚さは1.3mm、直径はセンサ表面で  $\phi 8\text{mm}$  となっている。

次に、運動靴のインソールの踵部、拇趾球部、小趾球部の3箇所に溝を形成し、試作した3軸力センサをそれぞれ固定した。フレキシブルケーブルは靴の側面に開けた穴を通してアンプ

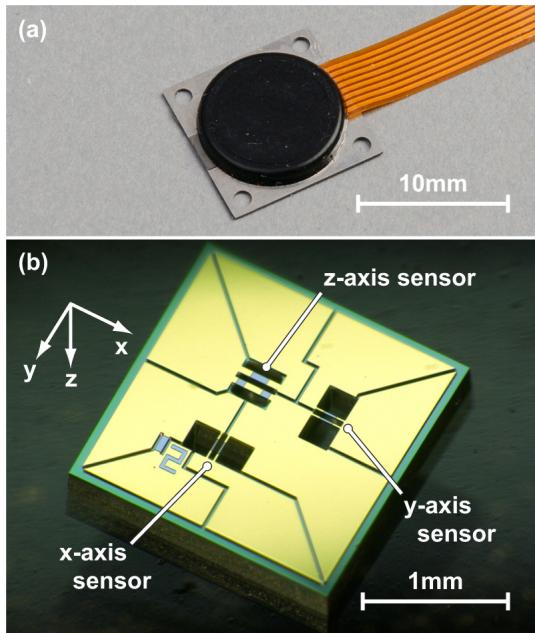


Fig. 2 Photographs of (a) the fabricated 3-axis force sensor; and (b) the sensor chip buried in the sensor.

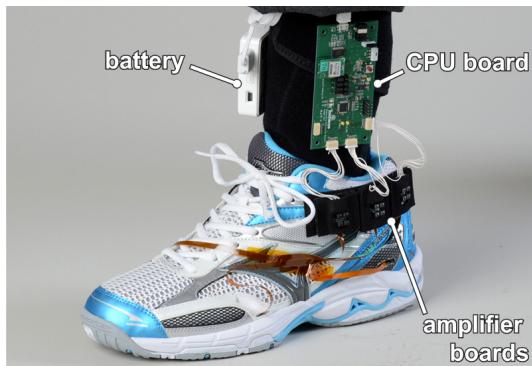


Fig. 3 Photograph of the composed measurement system.

基板に接続した。アンプの増幅率は全て100倍とした。アンプ基板は靴の外側側面に、マイコン基板と電源供給用のバッテリーは足首のサポーターにそれぞれ固定した。Bluetoothモジュールはマイコン基板に接続し、50Hzのシリアル通信でPCにデータを送信した。試作したシステムの全景を図3に示す。

#### 4. 実験と考察

試作した3軸力センサを較正するために、センサに圧力とせん断力を加重し、各軸力を6軸力覚センサで、センサ出力をオシロスコープでそれぞれ計測することで、式(1)の係数 $k_{ij}$ を求めた。実験結果から、加重時圧力400kPa、せん断応力80kPaまでの範囲で、線形な出力が得られることが確認できた。

試作した計測システムを左足に装着して、水平歩行時の3軸応力データの計測を行なった。踵、拇指球、小趾球の各点における垂直応力のデータを図6(a)に、前後方向のせん断応力のデータを(b)に、左右方向のせん断応力のデータを(c)に示す。垂直応力のピーク値は踵と拇指球で共に100kPa程度、前後方向のせん断応力のピーク値は踵で前向きは20kPa程度、左右方向は拇指球で15kPa程度となっている。

#### 5. 結論

本研究では、センサ部直径8mm、厚さ1.6mmの3軸力センサ

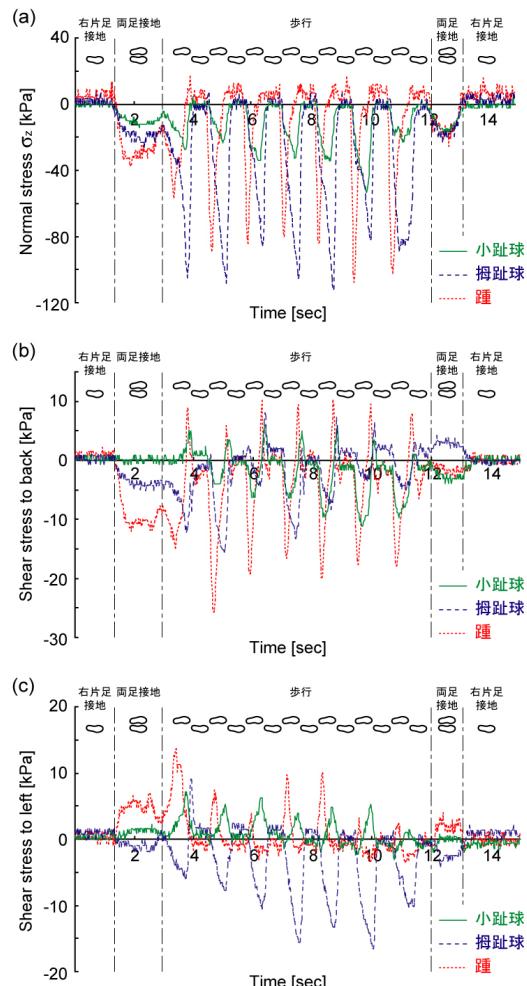


Fig. 4 Measured 3-axis stresses in level walk: (a) normal stress of vertical direction, (b) shear stress of front-back direction, and (c) shear stress of lateral direction.

を運動靴のインソールに埋め込み、計測データを無線で送信するシステムを提案・試作した。水平歩行時の足裏3軸応力分布の計測を行なった結果、垂直応力と前後・左右のせん断応力のピーク値は、それぞれ踵と拇指球で100kPa、踵で20kPa、拇指球で15kPaであった。以上の結果から、歩行時に影響を与えることなく、かつ計測環境を選ばない、足裏部の3軸応力分布計測システムの有効性が確認された。

#### 謝 辞

本研究は、JSPS科研費23700193の助成を受けたものです。運動靴はミズノ株式会社のご厚意により提供されたものです。

#### 文 献

- [1] 厚生労働省, “平成22年国民生活基礎調査の概況”.
- [2] D. E. Lieberman *et al.*, “Foot strike patterns and collision forces in habitually barefoot versus shod runners,” *Nature*, vol. 463, pp. 531-535, 2010.
- [3] C. Liedtke *et al.*, “Evaluation of instrumented shoes for ambulatory assessment of ground reaction forces,” *Gait Posture*, vol. 26, pp. 39-47, 2007.
- [4] 森健太, “スポーツシューズ設計のための新規測定技術,” *日本機械学会誌*, vol. 115, p. 103, 2012.
- [5] セテアントタフィック 他, “圧電フィルムを用いた靴中敷き型センサ,” *日本機械学会年次大会講演論文集*, vol. 5, pp. 113-114, 2006.
- [6] H. Takahashi *et al.*, “Shear Force Detector Using Piezo-Resistive Beams with Sidewall-Doping,” *Proc. MEMS2012*, pp. 599-602, 2012.