

# 多軸MEMS歪みセンサを利用した運動計測

下山 勲・中井 亮仁

## 1. はじめに

スポーツでは、床等の界面からの外力と、質量に働く外力としての重力と、筋肉が発生する内力によって、身体の位置や姿勢が変化している。界面に働く力を時間分解能よく検出し、力に基づいて運動を解析すれば、より速く、より高くなど、スポーツの記録の向上のためのヒントを得ることができるのではないかと考えている。界面を通して働く力を計測するために、半導体の性質を利用した微小な力センサを界面に埋めている。寸法が小さいので計測対象への影響が小さく、また、半導体の抵抗値として力が読めるので計測値の時間分解能が高いという特徴をもっている。

## 2. 半導体歪ゲージの原理と特長

力を計測するときによく使われるセンサが歪<sup>ひずみ</sup>ゲージである。力によって歪<sup>ひずみ</sup>が変化する場所に歪ゲージを置くと、その点での力を計算で求めることができる。抵抗率を $\rho$ 、長さを $L$ 、断面積を $A$ とすると抵抗 $R$ は(1)式で表される。

$$R = \rho L/A \quad (1)$$

円柱状の金属が軸方向に引き伸ばされると、抵抗率は変わらないものの、長さ $L$ が長くなることで抵抗が増し、断面積 $A$ が小さくなることで抵抗が増す。歪 $\epsilon$ に対して抵抗 $R$ が $\Delta R$ だけ増すとき、この関係はゲージ率 $K$ を使って、(2)式で表される。金属の場合に $K$ の値は2程度である。

$$\Delta R/R = K\epsilon \quad (2)$$

一方、シリコンにB, P, Asの不純物元素を入れた不純物半導体では、シリコンの結晶構造の歪みによって抵抗率 $\rho$ が大きく変化する。抵抗率変化が抵抗変化 $\Delta R$ に与える影響は、長さの増加や断面積の減少が与える影響よりも大きく、ゲージ率は100程度にもなる。これが半導体歪ゲージの歪感度が大きい理由である。さらに、半導体歪ゲージは半導体加工技術を使って作成できるので、微細化にも対応できる。一方で、温度や光に対しても抵抗が変化するので、温度や光の補償が必要となる場合がある。

## 3. センサの構造

図1のように、単結晶シリコンの細い梁<sup>はり</sup>を下方に曲げると、上面は伸び、下面は縮む。伸びる上面のみに薄く不純物を入れ不純物半導体とし、その抵抗を計ると、梁に加わる力によって引き起こされる上面の歪<sup>ひずみ</sup>に対応した抵抗変化が現れる。これを逆にたどると、抵抗変化から梁に加わる力を計算できる。また、側面に不純物半導体を形成すると、横方向の歪<sup>ひずみ</sup>・力を計測することもできる。

梁の厚みが300 nmの片持ち梁の場合<sup>1)</sup>、このセンサの圧

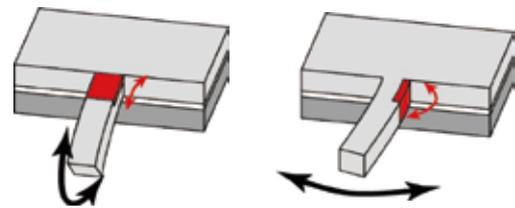


図1 不純物半導体(赤い部分)を形成したひずみ計測片持ち梁



Motion Measurement using MEMS Muti-Axial Strain Sensor  
Isao SHIMOYAMA  
1982年 東京大学大学院工学系研究科博士課程修了 工学博士  
現在 東京大学大学院情報理工学系研究科教授  
連絡先：〒113-8656 東京都文京区本郷7-3-1 工学部2号館8階81D4室  
E-mail isao@leopard.t.u-tokyo.ac.jp



Akihito NAKAI  
2005年 東京大学大学院情報理工学系研究科博士課程修了 博士(情報理工学)  
現在 東京大学 IRT 研究機構 特任助教, タッチエンス(株)取締役 CTO  
連絡先：〒113-8656 東京都文京区本郷7-3-1 工学部2号館8階81B室  
E-mail nakai@leopard.t.u-tokyo.ac.jp

2016年3月28日受理

力感度の代表的な値は  $(\Delta R/R)/P = 3 \times 10^{-4} [-/Pa]$  となり、高感度ではあるが、スポーツでの界面に働く力を検出するには感度が高すぎるとともに、大きく歪むのでセンサが破壊することになる。力に対して梁の歪を小さくし、計測すべき対象に合わせた力計測レンジにおさめるために図2のようにセンサを両持ち梁にし、直交する3軸xyz方向の力で歪む面に不純物半導体を形成した梁を、PDMS（ポリジメチルシロキサン）やエポキシ樹脂のような弾性体に埋めたものを使っている(図4)。

半導体歪ゲージの抵抗値はブリッジを通して電圧値として計測する。この原理は、抵抗値Rの4つの抵抗を図3のようにつなぎ、そのうちのひとつの抵抗が $\Delta R$ だけ増加したときに、電圧が(3)式により変化することを利用している。

$$\Delta V_{out}/V_{in} = -\Delta R/(4R + 2\Delta R) \quad (3)$$

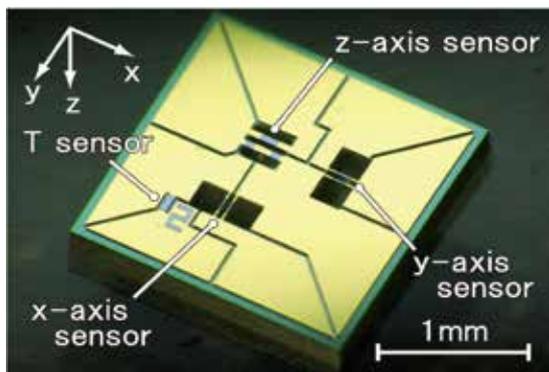


図2 シリコン基板面に形成された両持ち梁の歪センサ

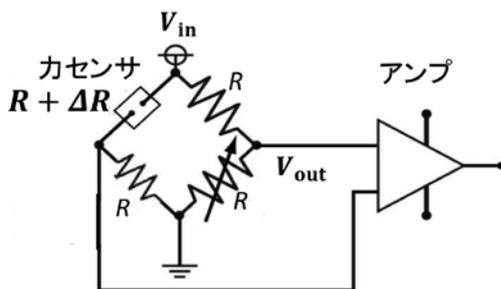


図3 抵抗変化を読むためのブリッジ回路

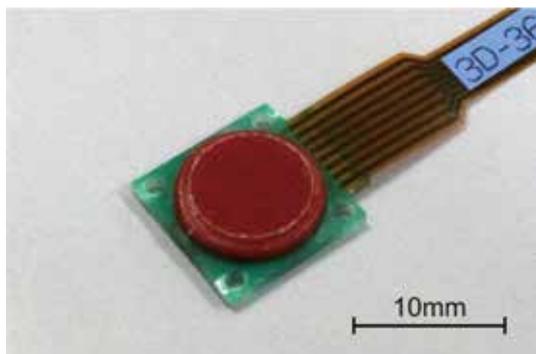


図4 MEMS3軸力センサ

また、このブリッジの電圧出力を200~1000倍のアンプで増幅している。したがって、歪  $\varepsilon = 10^{-6}$ 、ゲージファクタ  $K = 100$  に対して、(2)式により、 $\Delta R/R = 10^{-4}$ 、ブリッジに  $V_{in} = 1[V]$  をかけると、(3)式により、 $\Delta V_{out} = -1/4 \times 10^{-4} [V]$  となり、アンプを通すとこの200~1000倍の5から25 [mV] の出力が得られる。アンプの入力端をショートしたときのアンプの出力端でのノイズの例では<sup>2)</sup>、ノイズが標準偏差で0.5 [mV] であり、前記のような歪とそれに対応する力がノイズに埋もれず計測できることがわかる。

#### 4. MEMS3軸力センサを用いた歩行・運動計測

著者らは、独自に開発した小型・薄型のMEMS3軸力センサを運動靴のインソールの複数箇所に埋め込み、歩行・運動の計測と解析をおこなってきた。MEMS (Micro Electro Mechanical Systems) とは、シリコン半導体加工技術を利用してシリコン基板上に作ったセンサ等のことをいう。

図4に使用したセンサの外観を示す。図2に示した2 mm角のセンサチップを直径10 mm、厚さ1.3 mmのシリコンゴムの中に埋め込んだ構造となっており、センサ表面にかかる3軸力を抵抗値の変化として検出することができる。温度ドリフトと他軸干渉は較正行列を掛けて補償し、定格荷重は垂直力で40 N (応力換算で800 kPa相当)、せん断力で8 Nである。

運動靴のインソールには片足8個ずつセンサを配置した。センサの配置箇所を図5に示す。

実験はいくつかの段階を経て屋内からフィールドへと展開していった。まずは屋内に設置したフォースプレート上を歩き、各センサの出力とフォースプレートの出力の比較をおこなった。図6に実験の様子を示す。次に、トレッドミルを用いて歩行速度や路面傾斜角を変化させ、これらのパラメータが足裏各部の応力にどのような影響を与えるかを確認した<sup>3,4)</sup>。その後、階段昇降やジョギング、ダッシュといった様々な運動の計測をおこない、水平歩行との違いを明らかにした<sup>5)</sup>。現在は屋外フィールドで歩行実験をおこない、材質や濡れといった路面環境が歩行にどのような

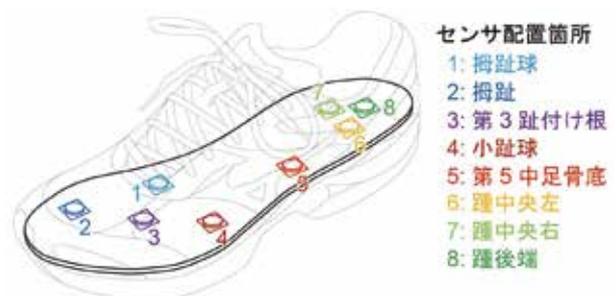


図5 インソール上のセンサの配置箇所

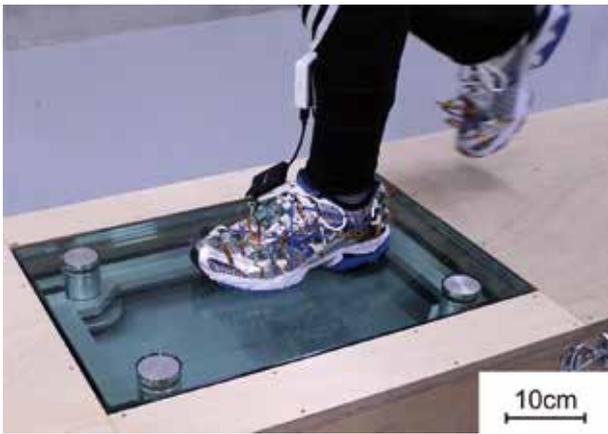


図6 フォースプレート上を歩行する実験の様子

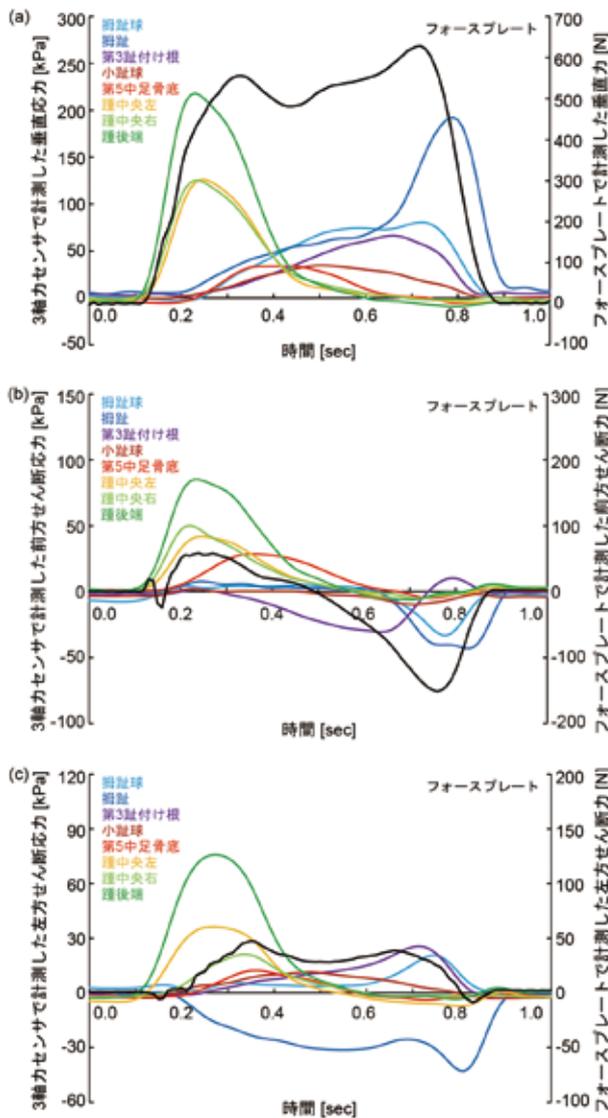


図7 フォースプレートとMEMS3軸力センサの出力比較

影響を及ぼすかについてデータを取得している段階である。

本稿では紙面に限りがあることから、フォースプレート上を左足で歩いた際の各センサ出力の比較データを紹介する。フォースプレートは地面反力、即ち靴裏全体にかかる

合力として3軸力を計測することができ、歩行や運動の計測・解析でよく用いられる計測器である。図7(a)~(c)に垂直方向, 前後方向, 左右方向の力と応力のグラフを示す。いずれのグラフも横軸が時間軸, 右縦軸がフォースプレートの出力, 左縦軸がMEMS3軸力センサの出力を応力換算したものとなっている。

水平歩行時の垂直力の波形は二峰性と呼ばれる特徴的なものとなっており、一つ目の峰が踵接地時のピーク、二つ目の峰が前足部で蹴り出す際のピークとなる。各センサの出力に着目すると、踵の3箇所が一つ目の峰の形成に大きく寄与していること、踵接地後は第5中足骨底、小趾球、第3趾付け根、拇趾球と順番にピークを迎えること、二つ目の峰は拇趾の影響が大きいことなどが見てとれる。

前後方向のせん断力については、踵接地時に前向き(かかと)のせん断力、即ちブレーキがかかり、前足部離地時に蹴り出しによる後ろ向きのせん断力が観察される。各センサに着目すると、踵の3箇所と第5中足骨底が前向き(かかと)のせん断力を、前足部の4箇所(小趾球、第3趾付け根、第5中足骨底、拇趾球)で後ろ向きのせん断力がそれぞれ出力されている。

左右方向のせん断力については、踵接地からつま先離地直前までのほぼ全ての時間帯で左向き(外側向き)のせん断力が観察される。各センサの出力を見ても、拇趾以外の全ての箇所(小趾球、第3趾付け根、第5中足骨底、拇趾球)で左向きのせん断力が出ていることがわかる。

このように、MEMS3軸力センサを用いることで、これまでは計測できなかった歩行・運動中の足裏各部の3軸力分布を計測することが可能である。

## 5. まとめ

不純物半導体を歪ゲージとしてもつシリコン梁の力センサを弾性体に埋め、界面を通して働く力を計測する方法を示した。また、このセンサを靴のインソールに埋め込んで歩行計測をおこない、その結果から足裏の力分布が計測できることがわかった。靴以外でも、ゴルフクラブのフェースや、卓球のラバーに埋め込むことで、インパクト時にボールに加わる力を計測し、その後のボールの運動を予測することもできると考えている。

### 参考文献

- 1) Takahashi, H., Nguyen Minh Dung, K. Matsumoto and I. Shimoyama : Differential pressure sensor using a piezoresistive cantilever, *Journal of Micromechanics and Microengineering*, **22**(5), article no. 055015 (2012)
- 2) 大宮知起: MEMS 3軸力センサを用いた細胞の接着力計測, 東京大学情報理工学系研究科修士論文(2016)
- 3) 中井亮仁, 森下康彦, 下山勲: MEMS3軸力センサを用いた傾斜路歩行時の足裏応力分布計測, *スポーツ・アンド・ヒューマン・ダイナミクス* 2014
- 4) 中井亮仁, 下山勲: MEMS3軸力センサを用いた歩行・走行時の足裏応力分布計測, *スポーツ工学・ヒューマンダイナミクス* 2015
- 5) 中井亮仁, 永野顕法, 高橋英後, 松本潔, 下山勲: MEMS3軸力センサを用いた階段昇降時の足裏応力分布計測, *スポーツ・アンド・ヒューマン・ダイナミクス* 2013