

## 論文

## 新しい熱型マイクロ3軸加速度センサの提案

豊島 克久\*<sup>1)</sup>

## Proposal of a new thermal micro 3-axis acceleration sensor

Katsuhisa Toshima\*<sup>1)</sup>

A new thermal 3-axis acceleration sensor manufactured by combined silicon micromachining technique and bonding technique is proposed. This sensor is useful for tilt sensing due to its 3-axis differential temperature sensors which have the same sensibility. To realize a simple, low cost sensor, one SOI (silicon on insulator) substrate having four micro bridges, two SOI substrates having one micro bridge, respectively, and one silicon substrate as a spacer are sandwiched together, using a silicon anisotropic etching technique. Each of the micro bridges is combined with the micro heater and the PN-junction temperature sensor. On the other hand, the macro model of the thermal acceleration sensor is fabricated using 6 sets of chip resistor and chip diode, and its tilt characteristics are demonstrated.

キーワード: マイクロヒータ, 加速度センサ, 傾斜センサ, 温度センサ, MEMS

Keywords: Microheater, Acceleration sensor, Tilt sensor, Temperature sensor, MEMS

## 1. はじめに

熱型加速度センサは、機械的な可動部を持たず耐衝撃性・耐振動性に優れていることから、自動車車体安定性制御などに適用されている。これまでの研究としては、マイクロヒータを中心に4つの温度センサを周辺の平面空間上に配置させることで、X軸及びY軸の加速度を温度センサからの差動信号成分により検出できる2軸加速度センサがある<sup>(1)(2)</sup>。このセンサは、MEMS (Micro Electro Mechanical Systems)技術を用いてマイクロヒータと温度センサを同一のシリコン基板上に形成するとともに小型化を図ることにより、熱応答速度を向上させている。

一方、マイクロヒータと温度センサを同一平面上に配置することで、X軸及びY軸だけではなくZ軸の加速度も検出できるセンサも提案されている<sup>(3)</sup>。しかし、このセンサにおいてZ軸の加速度は、平面上に配置した温度センサからの同相信号成分より検出するためX軸及びY軸に比べて検出感度が小さくなってしまいう問題があった。

3軸全ての感度が等しい差動型のセンサを実現するには、マイクロヒータと温度センサを同一平面上ではなく3次元的に配置する必要があるため、センサの配置や製造方法などが課題となっている。

本論文では、単結晶シリコンの異方性エッチングと基板張り合わせにより形成させた正8面体の空洞及び6つのマイクロブリッジを持つ、新しい熱型加速度センサ<sup>(4)</sup>を提案する。

## 2. デザイン・コンセプト

2.1 本センサの基本原則 図1は本研究の熱型3軸加速度センサの基本構造である。内部が空洞となる閉じられた測定空間において、ヒータ及び温度センサを一体としたセンサエレメントを正8面体の頂点に位置するように6対配置させた構成となっており(図中の $R_{-x}$ ,  $R_{+x}$ ,  $R_{-y}$ ,  $R_{+y}$ ,  $R_{-z}$ ,  $R_{+z}$ に相当), それぞれ測定空間の壁面の近くに沿って配置する。

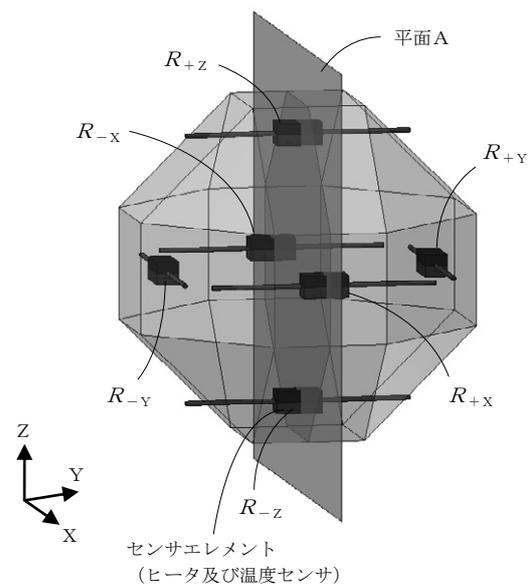


図1. 本センサの基本構造

図2は、本センサの動作原理について示したものである。ヒータの駆動方法としては、ヒータの電流が一定となるように制御する定電流制御方式(図2(a))のほか、センサの温度が一定となるようにヒータの印加電圧を制御する定温度制御方式(図2(b))がある。図2は、それぞれの方式において、Z軸方向に加速度を印加した際の測定空間の温度分布(図1の平面Aの断面部分)を示したものであり、色が濃いほど高温である。

ヒータを加熱した状態で加速度を印加すると、ヒータで暖められた空気は、周辺の冷たく重い空気に押しつけられるため、加速度方向へ移動する。このとき、暖められた空気が衝突する壁面 $W_z$ とヒータ $R_{+z}$ との間での空間では対流が発生するため、加速度と反対方向の壁面 $W_{-z}$ 側に比べて温度が高くなり易くなる。

そのため、図2(a)の定電流制御方式では、 $R_{+z}$ の温度が $R_{-z}$ に比べて高くなる。また、図2(b)の定温度制御方式では、 $R_{+z}$ に印加するヒータ電圧が $R_{-z}$ に比べて小さく済む。これにより、 $R_{+z}$ と $R_{-z}$ の差分を求めることで加速度を割り出すことができる。さらにX軸、Y軸においても同様に求めることで3軸検出が可能となる。

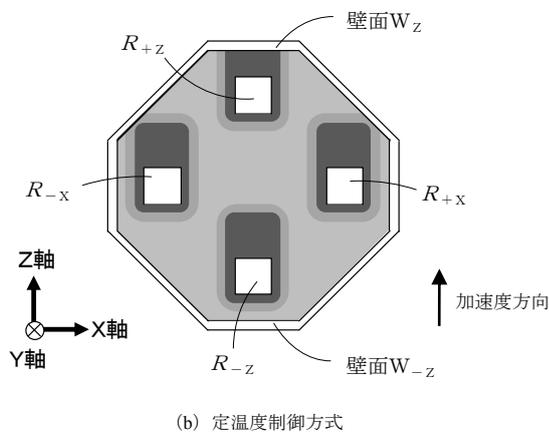
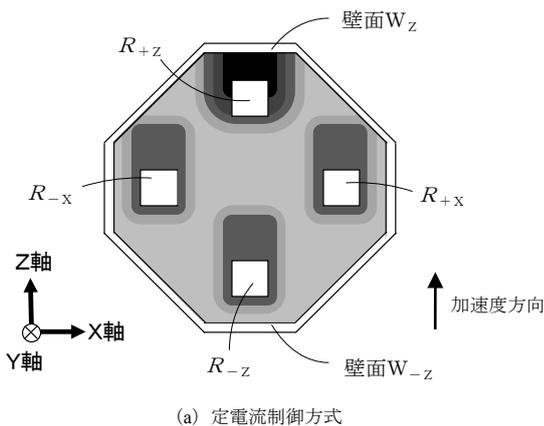


図2. 本センサの動作原理

また、二つの駆動方式を比較すると、定温度制御方式のほうは、ヒータの抵抗値 $R$ の値における温度依存性の影響を受けずに検出できるメリットがある。3章で提案するセンサに用いる半導体拡散抵抗は、温度に対して非線形な抵抗値をもつため<sup>(6)</sup>、ヒータとして駆動させるには、定温度制御方式が望ましい。

2.2 マクロモデルによる原理確認

図1のセンサについてマクロモデルの試作・特性評価による原理確認を行った。マクロモデルとしては、幅30mm程度の26面体の外箱の中にヒータと温度センサを張り合わせたものを6対配置させた。ヒータとしてはチップ抵抗(6432サイズ)、温度センサとしてはチップダイオード(4.5mm×2.6mm×2.0mm)を用いており、両者を張り合わせてセンサエレメントとした。

図3は、試作したマクロモデルの傾斜センサとしての角度依存性を評価するための方法を示しており、図4は、その測定結果で、各軸成分の出力を示した。図3に示すように、センサのX軸及びY軸が水平方向、Z軸が垂直方向となるように置いた位置を基準として、Y軸に対して左方向に30°ずつ回転させ、それぞれの位置において静止状態で測定を行った。測定条件については、560Ωのチップ抵抗に18Vを印加したときの温度変化をチップダイオードにより検出した。温度変化については、チップダイオードに電流1mAを流したときの電圧変化により捉えた。

図4の結果において、Y軸成分がほぼフラットであるのに対して、X軸成分及びZ軸成分は、それぞれSinカーブ及びCosカーブをほぼ描いている。この結果は、重力の影響による温度の差異を捉えたものである。本センサの基本原則を用いたマクロモデルは、傾斜センサとして機能していることが、測定結果より明らかとなった。

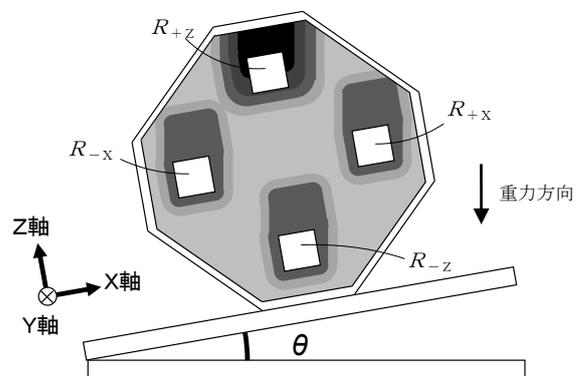


図3. マクロモデルの評価方法

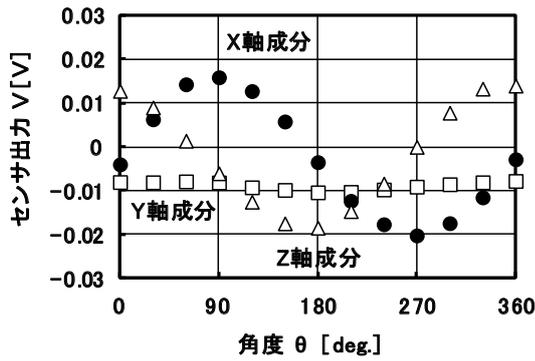


図4. マクロモデルの測定結果

### 3. 新しい熱型マイクロ3軸加速度センサの提案

**3.1 センサの構造** 図5は提案したセンサの構造図である。面方位が(100)のシリコン基板及びSOI (Silicon on Insulator) 基板を用いて結晶異方性エッチングを行うことで、空洞部及びマイクロブリッジを形成した基板4枚を張り合わせた構造とした。

単結晶シリコンの(100)面においてKOHなどのアルカリエッチャントを用いてエッチングを行うと、(111)面のエッチング速度は(100)面に比べて極めて遅く、(111)面が露出する。この結果、基板に対して $54.7^\circ$ の角度となるテーパ構造を形成することができる。エッチングによって形成された溝に合わせて4枚の基板を張り合わせることで、正8面体の空洞部を形成すると同時に、正8面体の6つの頂点の方向にマイクロブリッジを配置できる。

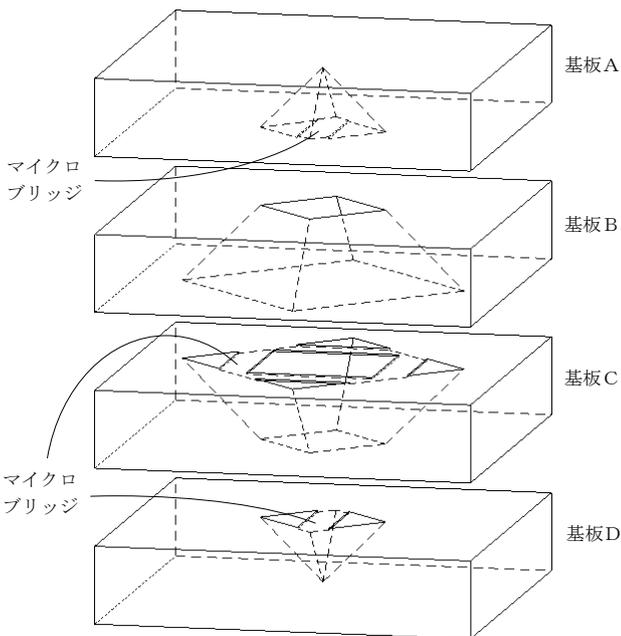


図5. 新しい熱型マイクロ3軸加速度センサの構造図

**3.2 マイクロブリッジの構造** 図6は、マイクロブリッジ上に半導体拡散抵抗ヒータ及びPN接合ダイオードを搭載したセンサエレメントの構造図であり、図5の基板A及び基板Dに相当するものである。温度センサとなるPN接合部をブリッジの中心に設け、その周辺において取り囲むように半導体拡散抵抗ヒータを配置している。これによりマイクロヒータの温度をこのダイオード温度センサにより検出できる。500 $\mu$ m厚の基板に対してマイクロブリッジの厚みを6 $\mu$ m程度とした場合には、基板から熱分離された局所加熱が可能となるため、熱時定数が20 msec.程度を有する高速応答のヒータが実現できる。また、温度センサとして用いるPN接合ダイオードについては、一定バイアス電圧を印加した状態で電流検出を行うことで、わずかな温度変化を高感度に検出することができる<sup>(6)</sup>。

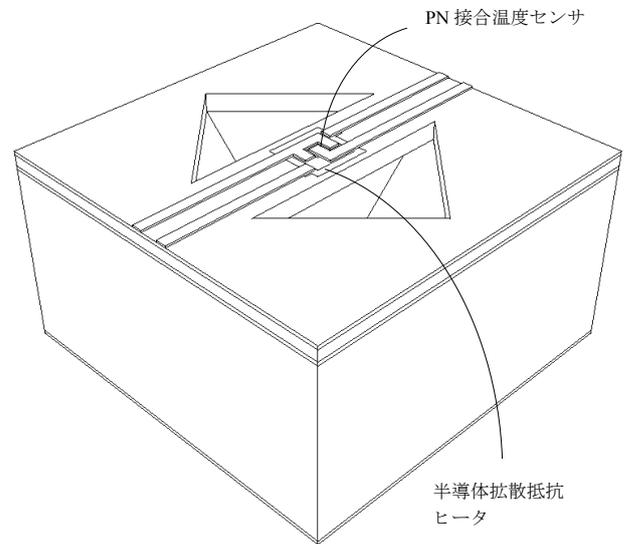


図6. 半導体拡散抵抗ヒータ及びPN接合ダイオードを搭載したマイクロブリッジの構造図

**3.3 センサの検出回路** 図7は加速度を検出するための回路で、X軸成分の検出部分を示したものである。ヒータの駆動方法としては、定温度制御方式を用いている。ダイオード $D_{+x}$ 及びダイオード $D_{-x}$ に一定バイアス電圧 $V_B$ を印加した状態での温度出力に相当するダイオードの電流をオペアンプ $OP1$ 及びオペアンプ $OP1'$ によりそれぞれ電圧変換する。さらに一定温度に相当する電圧値 $V_S$ を用いてオペアンプ $OP2$ 及びオペアンプ $OP2'$ においてヒータ $R_{+x}$ 及びヒータ $R_{-x}$ の温度制御をそれぞれ行う。 $+X$ 軸方向へ加速度を印加した場合、 $+X$ 軸方向のヒータ $R_{+x}$ は温まり易いため $V_x$ は小さくなり、 $-X$ 軸方向のヒータ $R_{-x}$ は温まりにくいいため $V_{-x}$ は大きくなる。したがって、 $X$ 軸方向の加速度出力 $\alpha_x = V_{-x} - V_x$ は、減算回路 $OP3$ により検出可能となる。Y軸及びZ軸においてもX軸と同様に求めることができるので、これにより3軸加速度の検出が可能となる。

また、バイアス電圧  $V_B$  は、順方向及び逆方向バイアスのいずれにおいても動作可能である。順方向バイアスでは、バイアス電圧を変化させることで感度可変な温度検出ができる。一方、逆方向バイアスでは、ヒータ温度  $150^\circ\text{C}$  付近以上から、逆方向リーク電流をオペアンプにより電圧変換することで容易に検出可能である<sup>(6)</sup>。

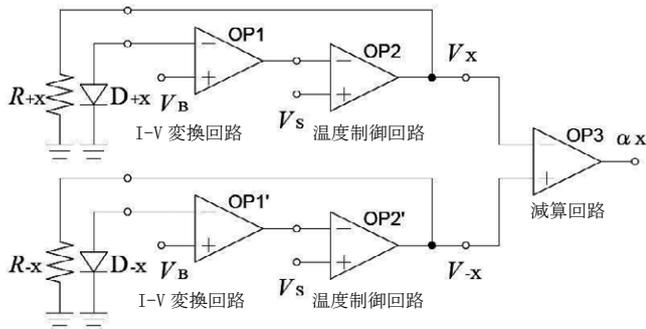


図7. 加速度検出のブロック図

(半導体拡散抵抗の温度が一定となるように制御)

#### 4. まとめ

3軸感度が等しい熱型加速度センサの実現へ向けて3枚のSOI基板及び1枚のシリコン基板を張り合わせた新型センサの提案を行った。マクロモデルを用いたセンサの原理確認において、3軸傾斜センサとしての性能を得ることができた。また、半導体拡散抵抗をヒータとした場合、ヒータの抵抗値の非線形な温度依存性の影響を取り除くためには、定電流制御方式よりも定温度制御方式でヒータを駆動させたほうが望ましいことがわかった。

本センサは、車載のほか、携帯電子機器、ゲームの入力デバイス、ロボティクスセンサなど様々な分野において応用が期待できる。今後は、センサの普及へ向けた試作・検討を行う予定である。

(平成24年5月25日受付, 平成24年7月5日再受付)

#### 文 献

- (1) V. T. Dau, D. V. Dao, M. Hayashida, T. X. Dinh and S. Sugiyama: "A Dual Axis Accelerometer Utilizing Low Doped Silicon Thermistor", IEEJ Trans. SM, Vol. 126, pp.190-194 (2006).
- (2) US-6182509: Accelerometer without Proof Mass
- (3) 特開 2005-351892: Z軸熱加速度計
- (4) 特願 2011-227936: 熱型加速度センサ
- (5) M. Kimura and K. Toshima: "Thermistor-like pn junction temperature sensor with variable sensitivity and its combination with a micro-air-bridge heater", Sensors and Actuators A, vol. 108, pp. 239-243 (2003).