

シリコンレゾナント高感度ひずみセンサ

High-sensitivity Silicon Resonant Strain Sensor

鮫島 健* ¹	鈴木 良孝* ¹	濱松 伸到* ¹
Takeru Samejima	Yoshitaka Suzuki	Nobuyuki Hamamatsu
横内 裕* ¹	吉田 隆司* ¹	
Hiroshi Yokouchi	Takashi Yoshida	

差圧伝送器 DPharp に採用しているシリコンレゾナント圧力センサは、圧力によって変形したダイアフラムのひずみを、内蔵のシリコンレゾナントひずみゲージにより測定し、このひずみから圧力を求めている。シリコンレゾナントひずみゲージは金属箔ひずみゲージやピエゾ抵抗式ひずみゲージよりも高感度であるが、被測定物との熱膨張係数の違いにより温度誤差が生じるという課題があった。今回新しく、温度補償構造体上にシリコンレゾナントセンサを配置することにより温度誤差を改善し、さらにひずみゲージを静電駆動式とすることにより、高感度で低消費電力なシリコンレゾナントひずみセンサを作製できる見込みを得たので報告する。本センサは、無線計測や IIoT (Industrial Internet of Things) との親和性に優れるという特長を持つ。

Silicon resonant sensors, which are used in the DPharp series differential pressure transmitter, calculate pressure by measuring the strain of a diaphragm caused by the pressure with a built-in silicon resonant strain gauge. Although this gauge features higher sensitivity than metal foil strain gauges or piezo-resistance type strain gauges, measurement error is caused by temperature when its thermal expansion coefficient is different from that of objects to be measured. To solve this, we have developed a new sensor by mounting a silicon resonant sensor on a thermal stress compensation structure and by driving the gauge electrostatically, achieving high sensitivity and less power consumption. This sensor delivers excellent affinity with wireless measurement and the Industrial Internet of Things (IIoT).

1. はじめに

当社製差圧伝送器 DPharp に採用しているシリコンレゾナント圧力センサは、高い精度、再現性、及び長期安定性に優れており、工業計測分野で幅広く利用されている⁽¹⁾⁽²⁾。

図 1 にシリコンレゾナント圧力センサを示す。ガラス上に接合したシリコンレゾナントセンサチップ内に、MEMS (Micro Electro Mechanical System) 技術を用いてシリコン振動子を作製し、このシリコン振動子がひずみゲージとして機能する。これをシリコンレゾナントひずみゲージと呼ぶ。

このセンサチップは裏面がダイアフラム構造となっており、ダイアフラムが受けた圧力によりシリコン振動子がひずみ、その共振周波数が変動する。共振周波数からひずみの絶対値が求められ、その値を圧力に換算する。

差圧伝送器 DPharp に採用しているシリコンレゾナントセンサチップ内に作り込んだシリコンレゾナントひずみゲージは、電磁駆動であるため消費電力が大きかったが、新たに開発したシリコンレゾナントひずみゲージは、静電駆動を採用し低電力化した。このひずみゲージの高精度性・高信頼性・低電力性を生かし、ひずみセンサへの展開を検討した。

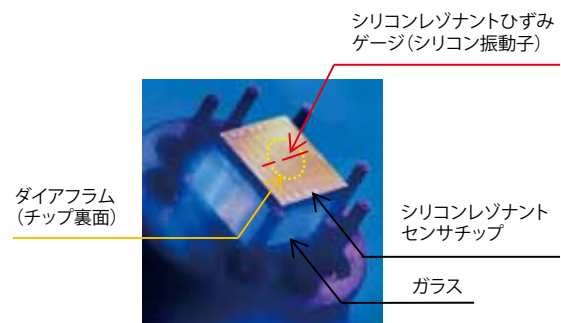


図 1 シリコンレゾナント圧力センサ

*1 IA プロダクト&サービス事業本部 半導体応用開発センター

ひずみゲージの感度はゲージファクタ（ゲージ率）と呼ばれる係数で比較することができる。ゲージファクタ G_f は、ゲージに加えられたひずみ ε に対するゲージの出力の変化率の比で定義され、ゲージファクタが大きいほどひずみ感度はよい。表1にシリコンレゾナントひずみゲージと一般的なひずみゲージの特性を示す。金属箔ひずみゲージやピエゾ抵抗式ひずみゲージは、ゲージの伸縮に対し抵抗 R が変化する。この変化は微小なため、一般にホイートストンブリッジ回路を用いて検出し、ひずみに変換する。これらのひずみゲージは、測定対象に応じていくつかの熱膨張係数を持つものが用意されており、適切なひずみゲージを選ぶことで熱応力の発生を抑えることができる。さらに、ホイートストンブリッジの特性を利用して温度補償を行うことで、温度変化に対する安定性を高めている。

表1に示す通り、シリコンレゾナントひずみゲージは他のひずみゲージと比べゲージファクタが非常に高い。そのため、鋼材のようにシリコンと熱膨張係数が異なる測定対象に直接センサチップを取り付けると、熱膨張係数の差により発生する熱応力による温度誤差ひずみも大きくなる。そのため、安定した測定ができないという問題が生じる。

表1 ひずみゲージの種類と特徴

ひずみゲージ種類	ゲージファクタ		応用先例
	定義式	代表値	
金属箔	$G_f \equiv \frac{\Delta R/R_0}{\varepsilon}$	~ 2	ロードセル 圧力センサ
ピエゾ抵抗式		~ 100	圧力センサ
シリコンレゾナント	$G_f \equiv \frac{\Delta f/f_0}{\varepsilon}$	~ 1000	圧力センサ

以上の理由から、シリコンレゾナントひずみゲージは、ゲージファクタが高いものの、その応用分野は限定されていた。

そこで、熱応力を抑える温度補償構造体を考案し、シリコンレゾナントひずみゲージを搭載したシリコンレゾナントひずみセンサチップと組み合わせることで、微小なひずみを安定して測定可能となったシリコンレゾナントひずみセンサの原理確認を行ったので報告する。

2. センサ構造及び動作原理

2.1 温度補償機能を有するシリコンレゾナントひずみセンサの基本構造

図2に、温度補償機能を有するシリコンレゾナントひずみセンサの基本構造を示す。温度補償構造体上に、シリコンレゾナントひずみセンサチップを搭載する。温度補償構造体は、測定対象のひずみをシリコンレゾナントひずみゲージに伝え、環境温度変動による熱応力を吸収するように機能する。

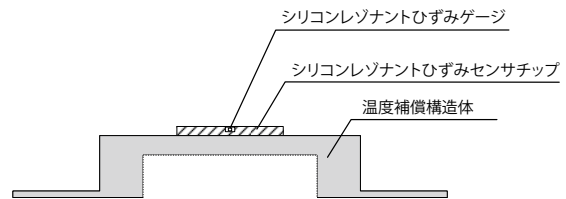


図2 シリコンレゾナントひずみセンサの断面構造

2.2 温度補償構造のメカニズム

2.2.1 環境温度の変化に対するひずみセンサ動作

初めに、鋼材に直接シリコンレゾナントひずみセンサチップ（以下、シリコンチップと略す）を取り付けた場合における、環境温度の変化に対するシリコンチップの動作を図3に示す。環境温度が上昇すると、測定対象の鋼材とシリコンチップは共に膨張する。シリコンの熱膨張係数（約 $3 \mu\text{e}/\text{K}$ ）に対し、鋼材の熱膨張係数（約 $12 \mu\text{e}/\text{K}$ ）が大きいいため、温度が上昇すると薄いシリコンチップは鋼材に引っ張られ、シリコンチップに等方的な引張応力が生じる。この引張応力により、振動子の共振

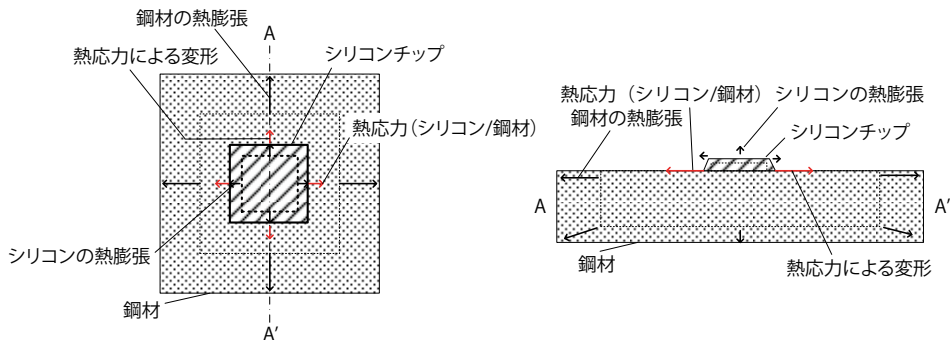


図3 シリコンチップを直接鋼材に取り付け、環境温度が上昇した時のシリコンチップの変形

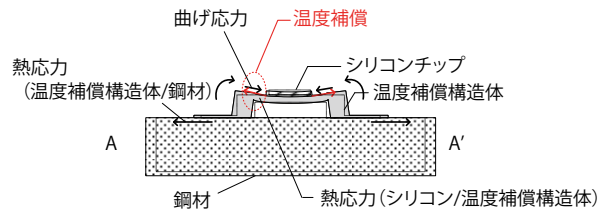
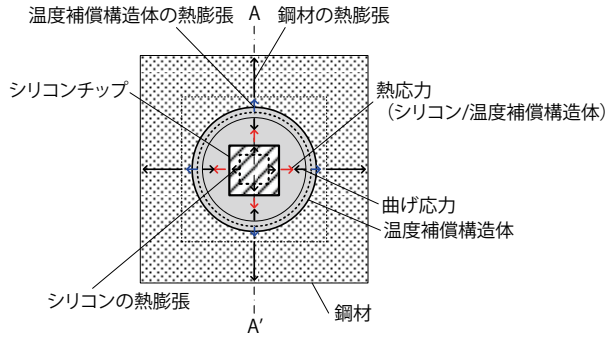


図4 温度補償構造を介してシリコンチップを鋼材に取り付けた時のシリコンチップの変形

周波数が変わり、温度誤差ひずみが生じる。

次に温度補償構造を有するひずみセンサを鋼材に取り付けた場合における、環境温度の変化に対するシリコンチップ動作を図4に示す。

環境温度が上昇すると鋼材と温度補償構造体、シリコンチップがそれぞれ熱膨張する。温度補償構造体に鋼材より熱膨張係数が小さい低熱膨張材料を用いると、温度補償構造体側壁の下部が鋼材に引っ張られて広がる。その結果、温度補償構造体の上面がたわみ、圧縮応力が生じる。一方、環境温度の上昇により、シリコンチップと温度補償構造体には熱膨張係数差による熱応力が発生する。この圧縮応力と熱応力を相殺させることで、温度誤差ひずみを抑圧することができる。

2.2.2 引張応力が印加された時のひずみセンサ動作

次に、引張応力が印加された時の動作を説明する。まず、温度補償構造体を用いず直接鋼材にシリコンチップを取り付けた場合の動作を図5に示す。鋼材が引っ張られると、薄いシリコンチップは鋼材の変形に合わせて変形し、シリコンチップが引張応力によりひずむことで測定できる。

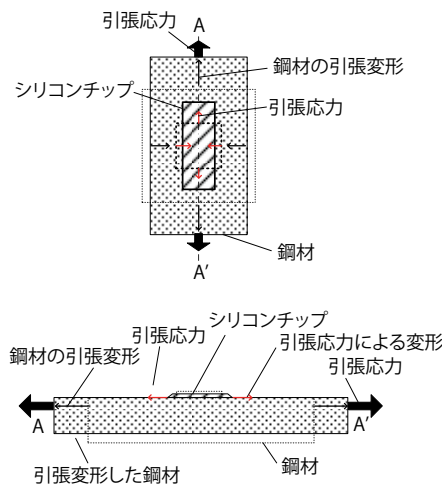


図5 シリコンチップを直接鋼材に取り付け、鋼材に引張応力を印加した時のシリコンチップの変形

次に、温度補償構造を有するひずみセンサに引張応力が印加された時の動作を図6に示す。鋼材が引っ張られると、温度補償構造の側壁が鋼材の変形に合わせて変形し、温度補償構造の上面がたわみ、鋼材に発生した応力が緩和されてシリコンチップに伝わり、ひずみを測定できる。

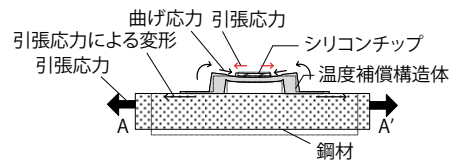
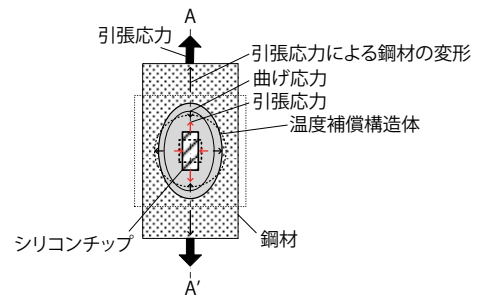


図6 温度補償構造を介してシリコンチップを鋼材に取り付けた時のシリコンチップの変形

このように、温度補償構造体を用いることにより温度補償効果を有するひずみゲージを実現できる。

3. 作製

FEM (Finite Element Method) により、温度補償構造体の設計を行った。図7は、温度補償構造体の形状を変えた時の温度誤差と、ひずみ緩和係数の特性を示したものである。温度補償効果により、温度誤差がゼロでひずみ感度がある温度補償構造体を得られた。図7中の赤点で示す設計値を用いて実際に試作したシリコンレゾナントひずみセンサを図8(左)に示す。中空構造を有する温度補償構造体の上に、シリコンレゾナントひずみセンサチップを搭載している。センサ信号の取り出しにはFPC (Flexible Printed Circuits) を用い、センサのシール

ドと物理的な保護のために、**図 8 (右)** のように、金属製のキャップをセンサ上面に設けた。

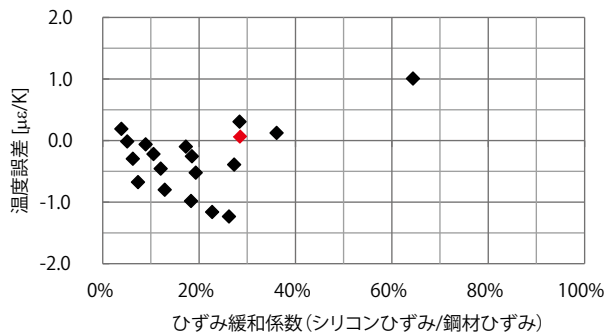


図 7 温度補償構造体の計算結果

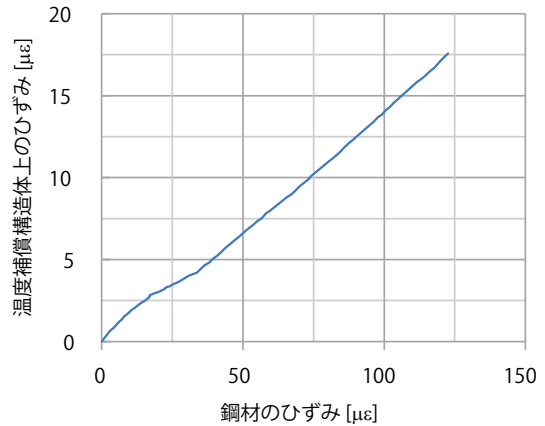


図 10 温度補償構造体の引張ひずみ緩和特性

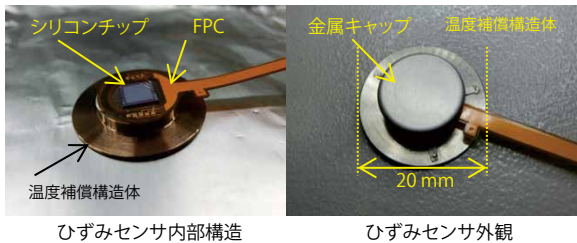


図 8 試作したひずみセンサの写真

4. 試作結果

温度補償構造体は鋼材の歪みを緩和してシリコンチップに伝えるため、引張試験機により緩和係数を測定した。**図 9** に示すように、鋼材表面にシリコンレゾナントひずみセンサを取り付け、裏面に市販ひずみゲージを取り付けた引張試験片を用意し、引張試験機を用いて鋼材に引張り応力を印加した。結果を**図 10** に示す。40 $\mu\epsilon$ 以下の領域で非直線性が存在するが、これは引張試験片の初期不整合の影響である。測定の結果、緩和係数は約 14% であり、ゲージファクタは約 107 となった。一般的なひずみゲージである金属箔ひずみゲージのゲージファクタは約 2 であることから、作製したシリコンレゾナントひずみセンサが高感度であることが示された。

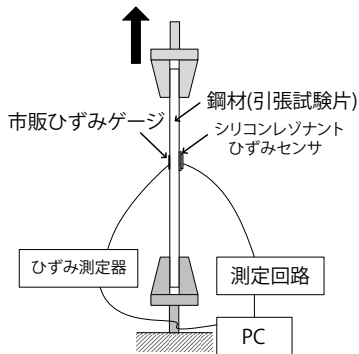


図 9 引張試験の評価系

次に、温度補償効果を確認した結果を**図 11** に示す。鋼材にシリコンレゾナントひずみセンサを取り付けた試験片を恒温槽内に設置し、温度を変化させた時のセンサ出力を取得した。温度補償構造体を介さずにシリコンレゾナントひずみセンサチップを接着剤で鋼材に直接取り付け付けた場合は、**図 3** に示したように、熱膨張係数差により発生した熱応力を受け、シリコンチップがひずむ。その場合の温度誤差ひずみが約 6 $\mu\epsilon/K$ であったのに対し、試作したシリコンレゾナントひずみセンサは熱応力がキャンセルされ、約 $\pm 1 \mu\epsilon/K$ の温度誤差ひずみとなったことから、温度補償構造の有効性を確認した。

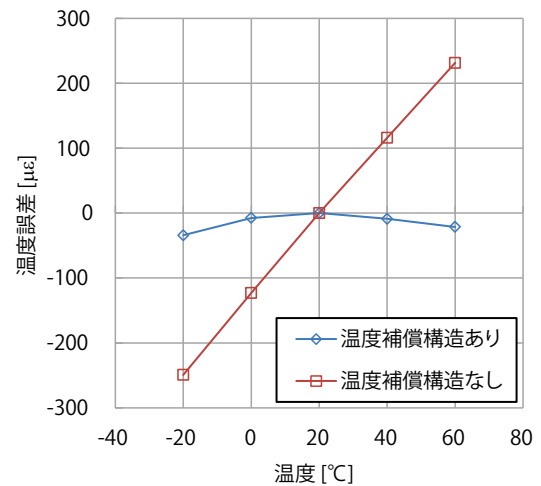


図 11 試作したひずみセンサの温度補償効果

最後に、カンチレバーを用いて微小なひずみを測定した。結果を**図 12** に示す。

カンチレバーの根元にシリコンレゾナントひずみセンサを取り付け、カンチレバーの先端に錘を 1 つずつ計 10 個乗せ、カンチレバーを徐々に曲げた。カンチレバーは錘 1 個当たり約 0.042 $\mu\epsilon$ ひずむ。荷重変化時にデータが飛

んでいるが、これは錘を乗せた時の衝撃である。サンプリング時間 100 msec の時、約 $10 \text{ n}\epsilon$ のばらつきとなり、温度補償構造によってひずみが緩和されてもなお、非常に高分解能なひずみの計測が可能であることが確認できた。

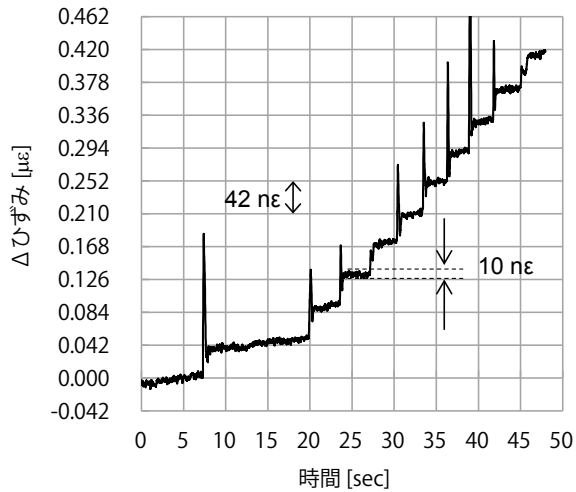


図 12 カンチレバーによる分解能試験

5. おわりに

新しいシリコンレゾナントセンサを応用した例として、開発中のシリコンレゾナント高感度ひずみセンサを紹介した。

本試作により、温度補償構造の原理を確認した。温度補償構造体の上にシリコンレゾナントひずみセンサチップを搭載することで、ゲージファクタが 100 以上あり温度誤差が少なく、サンプリング時間 100 msec において約 $10 \text{ n}\epsilon$ の高いひずみ分解能を有するひずみセンサが実現できることが示された。本センサは消費電力が少ないことから、今後、無線計測や IIoT (Industrial Internet of Things) への応用の可能性について検討していく。

なお、本研究は国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) の委託事業「インフラ維持・更新等の社会課題対応システム開発プロジェクト」の助成を受けて行った。

参考文献

- (1) K. Ikeda, H. Kuwayama, et al., "Silicon Pressure Sensor Integrates Resonant Strain Gauge on Diaphragm," Sensors and Actuators, No. A21-A23, 1990, pp. 146-150
- (2) 野田隆一郎, 岩井滋人, 他, "シリコンレゾナント圧力センサの高耐圧化", 第 32 回センサ・マイクロマシンと応用システムシンポジウム論文集, 電気学会センサ・マイクロマシン部門 (編) 32, 2015

* DPharp は、横河電機株式会社の登録商標です。

