伸縮梁構造を用いた MEMS 加速度センサの特性安定化

風間 敦^{*1}, 青野 宇紀^{*2}, 岡田 亮二^{*3}

Stabilization of MEMS accelerometer properties using stretchable beam structure

Atsushi KAZAMA^{*1}, Takanori AONO^{*2} and Ryoji OKADA^{*3}^{*1, *2}Research and Development Group, Hitachi, Ltd.

832-2 Horiguchi, Hitachinaka-shi, Ibaraki 312-0034, Japan

^{*3}Research and Development Group, Hitachi, Ltd.

5-3-1 Akasaka, Minato-ku, Tokyo 107-6323, Japan

Received 18 April 2016

Abstract

A high-reliability design method for a MEMS accelerometer using a stretchable beam structure was proposed to prevent sensor property variations due to stresses from device fabrication and packaging. To achieve a compact piezoresistive three-axis accelerometer using a low-cost resin-mold packaging, beam buckling due to compression forces originating from residual stresses of thin films and shrinkage of mold resin must be overcome. The proposed stretchable beam structure, which gives axial flexibility by adding a ring-shape part at the center of the beam, has advantages in which it is effective against not only packaging stress but also inner stress such as thin film stress, and it does not sacrifice compactness. Formulations with a simple accelerometer model revealed that large and nonlinear variations in sensitivity occur due to beam compression. Such large variations have to be avoided to stabilize sensor performances. Besides, it is expected to enhance sensitivity up to about 1.5 times while maintaining linearity by arranging an appropriate compression force using the stretchable beam. The effects of the stretchable beam were verified using simulations and experiments on test samples. The designed stretchable beam, which has two rings connected serially, has five times the axial flexibility compared with a conventional straight beam without significant change in bending stiffness. A preferable increase of about 1.4 times and small deviations in measured sensitivity were achieved with the developed stretchable beam, compared with the straight beam with an unstable increase of about seven times and extremely large deviations. These large deviations seem to come from shape variation due to non-uniformity of dry etching technologies commonly used for MEMS devices. Thus, the effects of the proposed stretchable beam to the MEMS accelerometer design were confirmed to prevent large variations and deviations in sensor properties and to enhance sensitivity.

Key words : Micro electro mechanical systems, Sensor, Buckling, Residual stress, Structural analysis

1. 緒 言

近年、半導体微細加工技術を応用した MEMS (Micro Electro Mechanical Systems) 技術の進展により、様々なセンサが大量に生産されるようになってきた(Vigna, 2009). 半導体技術をベースとした微細加工技術である MEMS 技術を活用することで、小型高密度化が進む民生用モバイル機器にも、サイズと価格の面で採用が可能となった。加速度センサやジャイロセンサ (角速度センサ) などの慣性センサはその代表的な存在である。

MEMS 慣性センサでは、錘を細い梁で支持した構造の可動部をシリコン基板上に製作し、慣性力による錘の変位から加速度や角速度を検出する。主な検出原理としては、錘の変位に伴って変化する電極間の静電容量変化を検出する静電容量型 (Matsumoto and Esashi, 1993, Kuehnel and Sherman, 1994, Boser and Howe, 1996) と、梁上に形成したピエゾ抵抗の抵抗変化を検出するピエゾ抵抗型 (Roylance and Angell, 1979, Allen et al., 1989, Yamada et al.,

No.16-00177 [DOI:10.1299/transjsme.16-00177], J-STAGE Advance Publication date : 20 July, 2016

^{*1} 正員, 日立製作所 研究開発グループ (〒312-0034 茨城県ひたちなか市堀口 832-2)

^{*2} 日立製作所 研究開発グループ

^{*3} 正員, フェロー, 日立製作所 研究開発グループ (〒107-6323 東京都港区赤坂 5-3-1)

E-mail of corresponding author: atsushi.kazama.hk@hitachi.com

1990, Okada, 1992) がある。

このように、MEMS 慣性センサは可動部を有するため、一般の半導体チップのように汎用的な樹脂モールドパッケージを用いることができず、中空のセラミックパッケージ内に固定してキャップ封止するといった構造が必要になり、パッケージングコストが高いことが課題であった。しかし近年、ウエハの段階でキャップをして可動部を保護したチップを作成するウエハレベルパッケージ (WLP) 技術 (Schmidt, 1998, Cheng et al., 2002, Felton et al., 2003, Yun et al., 2007) を用い、安価な樹脂モールドパッケージを採用する動きが出てきている。しかし、こうした構成では、モールド樹脂の収縮力によりセンサの特性が変動する課題があった (Zhang et al., 2007)。図 1 (a)に、上下を WLP 技術でキャップした WLP センサチップを、樹脂モールドしたパッケージの断面構造の例を示す。モールド樹脂はシリコン製の WLP センサチップよりも熱膨張係数が大きいので、モールド樹脂の加熱硬化温度 (例えば 175°C) から常温への冷却過程で収縮し、WLP センサチップを圧縮する。WLP センサチップは主に側面から圧縮を受けるので、センサ素子の枠を介して梁が軸方向圧縮を受け、センサ特性に影響を与える。

また、MEMS センサチップの製造プロセスで発生する内部応力もセンサ特性に影響する。図 1 (b)にピエゾ抵抗型加速度センサチップの断面構造の一例を示す。センサ素子は、厚さ 6 μm のデバイス層と厚さ 400 μm のハンドル層の 2 層のシリコン層を、シリコン酸化膜層 (Box 層) を介して接合した Silicon on Insulator (SOI) 基板を用いて製作される。センサ素子表面には、ピエゾ抵抗ゲージの保護および絶縁のためにシリコン酸化膜による絶縁層が形成されるが、絶縁層の成膜工程では高温 (例えば 950°C) のアニールを行うので、そこからの冷却過程でシリコンとシリコン酸化膜の熱収縮差による残留応力が発生する。このとき、錘および枠は厚いハンドル層があるためにはほぼシリコンの線膨張係数で収縮するが、薄いデバイス層のみで構成される梁では、絶縁層の厚さの比率が相対的に大きくなるため、錘および枠と比べて収縮量が小さくなる。その結果、梁は錘と枠の間で圧縮される。以上のように、絶縁膜の残留応力に代表されるセンサ素子の内部応力と、モールド樹脂収縮に代表される外部からの力により、梁が軸方向に圧縮されると考えられる。

こうした課題は、錘を梁で支持した構造を有する慣性センサに共通した課題である。また、センサの小型化や高感度化を目指すほど、梁を薄く細くして剛性を下げる必要があるため、上記の課題が顕著になる。

上記課題を解決するため、本論文では、ピエゾ抵抗型 3 軸加速度センサを対象として、梁に軸方向圧縮力が加わる際のセンサ特性への影響度を、理論式と構造シミュレーション、および試作評価を通じて詳細に検討する。さらに、圧縮力の影響を抑制する方法として、軸方向に伸縮性のある形状の伸縮部を梁の中央に形成した伸縮梁構造を提案し、その効果を検証する。また、伸縮梁構造を適用することで、センサ特性の不安定化を抑制するとともに、センサ感度の向上も実現する設計手法について論じる。

Fig. 1 Stress problems causing degradations of sensor properties. (a) A compression stress coming from outside of a sensor chip. A wafer-level-packaged sensor chip suffers compression force due to thermal shrinkage of a mold resin. (b) A stress is generated inside of a sensor chip. Beams are compressed due to residual thermal stress of thin films.
(α : Coefficient of thermal expansion [$10^{-6}/^\circ\text{C}$])

2. 梁圧縮がMEMS 加速度センサの特性に与える影響の検討

2・1 ピエゾ抵抗型 3 軸加速度センサの構成

本研究で対象とするピエゾ抵抗型加速度センサの代表的な構造と検出原理を図 2 に示す (Okada, 1992). 錘を 4 本の薄い梁により枠に接続し支持した構造であり, 梁の付根付近に半導体ピエゾ抵抗ゲージが形成されている. 加速度による力で錘が変位することで梁が変形し, 梁上のゲージの抵抗が変化することを利用して加速度に応じた電圧出力を得る. 図 2 (b) にブリッジ回路を用いた 3 軸独立検出の仕組みを示す. 同じ梁上に形成したゲージでも, 加速度方向に対する梁の変形モードの違いを利用してブリッジ回路の接続を変えることで, 水平 (X, Y) 方向と垂直 (Z) 方向の加速度を分離検出できる. このように, ピエゾ抵抗型の加速度センサは, 単純な構造で 3 軸の加速度を独立検出できる特徴がある.

Fig. 2 Structure and sensing principle for a 3-axis piezoresistive accelerometer. (a) An accelerometer device consists of a mass suspended in a frame by four beams. (b) Four piezoresistive gauges located on the beams constitute a bridge circuit for each sensing axis. X-axis and z-axis accelerations are independently detected making use of the difference in beam deformation.

2・2 梁圧縮の影響と対策指針

上記のピエゾ抵抗型 3 軸加速度センサを対象として, 梁が軸方向圧縮を受けたときのセンサ特性への影響メカニズムを分析する. そのため, まず加速度センサの単純化モデルを用いて, 梁が圧縮を受けるときの Z 軸感度への影響を理論的に導くこととする. 検討に用いた単純化モデルを図 3 (a) に示す. 質量 m の錘を 4 本の梁で支持した構造とし, 図 3 (a) はその XZ 断面を示している. 梁の寸法は長さ l , 幅 b , 厚さ t とし, 錘の重心に質量 m と Z 方向加速度 g に比例した力が加わるとする. 加速度センサの感度は, 図 2 (b) に示したように 4 つのゲージ抵抗 $R_1 \sim R_4$ の変化から計算されるが, 本モデルでは単純化のため, ゲージの応力を梁の上面端部の点で代表した. 各ゲージの抵抗 R_i ($i=1 \sim 4$) は, 初期抵抗 R_0 , 梁の軸方向 (X 方向) の応力成分 σ_i , および縦ピエゾ抵抗係数 π_l から以下のように計算される.

$$R_i = R_0 (1 + \pi_l \sigma_i) \quad (1)$$

各ゲージの初期抵抗および縦ピエゾ抵抗係数は均一であり, また梁に垂直な応力成分は無視できると仮定した. Z 軸加速度に対する挙動は左右対称であるので, 梁の錘側端部の応力を σ_A , 枠側端部を σ_B とすると, 図 2 (b) に示

した Z 軸用のブリッジ回路における，入力電圧に対する出力電圧の比，すなわち Z 軸感度 V_{out}/V_{in} は，

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{R_1}{R_1 + R_3} - \frac{R_2}{R_2 + R_4} = \frac{\pi_l}{2} (\sigma_B - \sigma_A) = \frac{3\pi_l}{bt^2} (M_A - M_B) \quad (2)$$

と求められる． M_A および M_B は，梁の錘側および枠側端部に加わるモーメントであり，これらを求めることで Z 軸感度が求められる．

Fig. 3 Beam modeling for analyzing z-axis sensitivity. (a) Simplified sensor device model. Stresses of gauges are evaluated at the ends of the beam. (b) Gauge stresses can be evaluated with a single beam model because of symmetry. Axial compression displacement by packaging and thin-film stress was assumed. Compression force becomes smaller with a stretchable beam than with a straight beam against same compression displacement.

そこで，図 3 (b) に示す 1 本の梁のモデルを用い，端部のモーメントを求めることで Z 軸感度を評価することとする．梁の端部の境界条件は，錘側端部（A 点）ではたわみ角がゼロで Z 方向には可動，枠側端部（B 点）ではたわみ角がゼロで Z 方向には固定とし，A 点に加速度による荷重 $F_A (=mg/4)$ が加わるとする．さらに，樹脂モールド収縮と絶縁層残留応力の影響で梁の軸方向に強制圧縮変位が加わる場合を想定し，それによる圧縮荷重 P が X 軸に沿って梁の両端に加わると仮定した．

圧縮荷重 P によるモーメントは，任意点 x におけるたわみ v を含む式となり，モーメントの式は以下となる．

$$M = M_A - F_A x - P(v_A - v) \quad (3)$$

たわみ v が，端末条件を満足する以下の三角関数

$$v = \frac{v_A}{2} \left(1 - \cos \frac{\pi}{l} x \right) \quad (4)$$

で表現できると仮定し，A 点のたわみ角 i_A およびたわみ v_A に関してカスチリアーノの定理を適用して計算すると，A 点および B 点のモーメントは，

$$M_A = -M_B = \frac{l}{2} F_A H_s \quad (5)$$

$$H_s = \left\{ 1 - \left(1 - \frac{\pi^2}{12} \right) \frac{P}{P_{cr}} \right\} / \left(1 - \frac{P}{P_{cr}} \right) \quad (6)$$

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{l^2} \quad (7)$$

と求められる。上記 H_s は梁圧縮の影響による感度の増大率を示しており、感度増大率と定義する。 P_{cr} は本検討の梁モデルの端末条件におけるオイラーの座屈荷重である。ただし、 E は梁のヤング率、 I は梁の断面二次モーメントで $I = bt^3/12$ で表される。

圧縮荷重 P の座屈荷重 P_{cr} に対する比率 P/P_{cr} を横軸に取り、感度増大率 H_s の変化を示したグラフを図4に示す。 $P=0$ では $H_s=1$ となり式 (5) は圧縮がない場合に一致する。 P/P_{cr} が増加していくと、感度増大率 H_s は非線形に増加していき、 $P/P_{cr}=1$ で H_s は無限大に発散し、座屈することを意味する。一般にセンサの感度が増加するのは望ましいが、 $P/P_{cr}=0.4$ 程度より大きくなると変化が非線形で急峻になっている。モールド樹脂収縮や絶縁膜残留応力による梁圧縮力は温度により変化するため、図4の横軸の変化は温度の変化とも捉えることができる。よって、センサが初期状態で上記のような変化が急峻な領域の圧縮を受けていると、温度特性が大きくかつ非線形になり、温度補正が困難になると懸念される。また、加工誤差などに起因する特性のばらつきが大きくなる懸念がある。逆に $P/P_{cr}=0.4$ 程度以下では変化が小さく線形性も保たれており、補正が十分可能である。この範囲に圧縮の影響を制御できれば、安定な特性を保ちつつ、センサ感度を1.5倍程度まで高められると期待される。

Fig. 4 Sensitivity increase versus compression force. Sensitivity increase rate H_s shown in equations (5)–(7) is plotted against compression force P , which is described as a rate to the buckling force P_{cr} . The graph indicates that the sensitivity increases non-linearly as the compression stress approaches the buckling force. Roughly below 0.4 in P/P_{cr} , the increase rate is almost linear, and a sensitivity increase up to 1.5 times is expected.

3. 伸縮梁構造による圧縮影響抑制設計

3・1 伸縮梁構造の提案

前章の指針に基づき、梁圧縮の影響を制御する設計手法について検討する。樹脂パッケージの適用などを目的として、外力に対して MEMS センサの特性が変動しにくくするための研究はこれまでも様々なされている (Zhang et al., 2007, Li and Tseng, 2001, Plaza et al., 2000, Hsieh et al., 2011, Muro et al., 1991, Takao et al., 1996)。例えばセンサチップ内にセンサ素子部分を取り囲むように溝を形成し、一箇所のみで枠部と接続する構造にした例がある (Hsieh et al., 2011)。本構造は、外部からの力を遮断する効果は高いが、溝の形成によりセンサチップの面積が増加するため、小型化においては課題がある。また、上述した絶縁層残留応力のような、センサ素子の内部で発生する応力に対しては効果が低い。他の研究例として、中央の固定されたポストに対して、周囲を囲む形状の錘を梁で支持した構造も提案されている (Takao et al., 1996)。本構造では錘が枠から完全に分離されるため外力の遮断効果が高いが、別基板に接続するポストのみでセンサ素子が固定されるため、センサ素子構造の加工の前に別基板に接合するなど製造方法が複雑になる課題があり、また上記内部応力への効果は低い。

そこで本研究では、梁の中央に伸縮部を形成し、梁自体に軸方向の伸縮性を持たせることで、軸方向の力の影響を緩和する構造を提案する。上記の従来例と比較して、本提案構造では梁の形状を変えるだけであり、センサ

チップのサイズが増加することではなく、製造プロセスが複雑化することもないので、小型化、低コスト化に適している。また、梁自体に応力緩和効果を有することから、絶縁層残留応力のようなセンサ素子内部の応力も緩和できる利点がある。一方で、センサ特性変動の抑制効果の大きさや、感度や固有振動数などの本来のセンサ特性への悪影響、耐衝撃強度の低下などが懸念される。以下、伸縮梁構造の効果について、理論式を用いて検証する。

3・2 伸縮梁構造による圧縮影響抑制機構

伸縮梁の定義方法を図5に示す。長さ l 、幅 b 、厚さ t のストレート梁に対し、ストレート梁の中央に軸方向に柔軟な構造の伸縮部を形成した梁を伸縮梁と呼び、ストレート梁と比較することとする。伸縮部の長さは梁の全長の r 倍（すなわち長さ rl ）と定義し、伸縮部の剛性が、ストレート部と比較して縮みやすさ C 倍、曲がりやすさ D 倍というように、ストレート部との比較で定義した。A点に曲げ荷重 F_A を与えた場合の面外変形モデルを図5(b)に示す。ストレート梁は梁全体の曲げやすさが $1/EI$ であるのに対して、伸縮梁では伸縮部のみ D/EI になるとする。次に、B点に圧縮変位 Δl を与えた場合の面内変形モデルを図5(c)に示す。梁の断面積を $A(=bt)$ 、ストレート梁は梁全体で縮みやすさ $1/AE$ であるのに対し、伸縮梁では伸縮部のみ C/AE となる。伸縮梁の方が縮みやすいため、一定圧縮変位に対してかかる伸縮梁の圧縮荷重 P' はストレート梁の圧縮荷重 P と比べて小さくなる。

Fig. 5 Definition of stretchable beam. (a) Properties of a stretchable part are defined by scale factors to a straight part. (b) Modeling for bending of beam. D is defined as a scale factor for bending compliance. (c) Modeling for axial compression of beam. C is defined as a scale factor for compressive compliance.

前章と同様に、端部のモーメントを求めて梁圧縮のZ軸感度への影響を導く。まず圧縮がない場合について考えると、モーメントの式は、式(3)で圧縮荷重 P の項がないものとなる。カスチリアーノの定理の計算において、伸縮部とストレート部で積分区間を分けて計算し、たわみ角 i_A は以下のように求められる。

$$i_A = \frac{1}{EI} l \left(M_A - \frac{l}{2} F_A \right) (1 - r + Dr) \quad (8)$$

端末条件 $i_A=0$ より、

$$M_A = \frac{l}{2} F_A \quad (9)$$

となり、感度は圧縮のないストレート梁の場合と変わらない。この結果は、圧縮のない条件では、伸縮部の導入により梁の中央部の剛性が変わっても、Z軸感度には影響がないことを示している。

次にA点のたわみ v_A は、同様に積分区間を分けて計算し、式(9)を代入して整理すると、以下になる。

$$v_A = \frac{l^3}{12EI} F_A H_d \quad (10)$$

$$H_d = 1 - r^2 + r^2 D \quad (11)$$

H_d はストレート梁に対するたわみ量の増大率を示しており、曲げ増大率と定義する。つまり、伸縮梁では、梁全体の曲がりやすさがストレート梁の H_d 倍になったと解釈される。

次に、一定圧縮変位に対する伸縮梁とストレート梁での圧縮力 P と P' の関係を、図 5 (c) の定義から導く。伸縮梁においては、一定圧縮変位 Δl は伸縮部とそれ以外の部分の変位の和で表され、

$$\Delta l = \frac{(1-r)l}{AE} P + \frac{rC}{AE} P' = \frac{l}{AE} P' (1-r+rC) = \frac{l}{AE} P \quad (12)$$

となるので、 P と P' の関係は以下となる。

$$P' = P \frac{1}{H_c} \quad (13)$$

$$H_c = 1 - r + rC \quad (14)$$

上記 H_c は、圧縮荷重が一定の場合を考えたときには、伸縮梁による縮み量の増大率に対応しており、縮み増大率と定義する。

以上の結果を用いて、軸方向圧縮を受ける伸縮梁の感度増大率を求める。前章で導いたストレート梁のときの感度増大率の式 (6) , (7) において、梁全体の曲がりやすさがストレート梁の $1/EI$ に対して伸縮梁では H_d/EI になり、また圧縮力が $1/H_c$ 倍になることから、感度増大率は以下となる。

$$H_s = \left\{ 1 - \left(1 - \frac{\pi^2}{12} \right) \frac{P}{P_{cr}} \frac{H_d}{H_c} \right\} / \left(1 - \frac{P}{P_{cr}} \frac{H_d}{H_c} \right) \quad (15)$$

本式は、ストレート梁の場合の式 (6) に対して H_d/H_c が追加された形であり、伸縮部の特性が Z 軸感度に与える影響が読み取れる。すなわち、伸縮部を H_d/H_c が 1 より小さくなるようにするほど、感度増大率 H_s を低減して座屈から遠ざけることができる。このように、伸縮部により梁圧縮の影響を制御することで、安定な特性を保ちつつ、感度を増加する設計が可能となる。また、ストレート梁は、上式で伸縮部がストレート部と同じ特性 ($H_c=1$, $H_d=1$) とした場合に相当し、ストレート梁も含めて式 (15) で表すことができる。

次章では、具体的に伸縮梁構造を検討し、上記のような設計が可能であることを検証する。

4. 解析および試作評価

4・1 解析を用いた検証

伸縮梁の効果を検証するために設計した 3 軸加速度センサの平面構造を図 6 に示す。面積効率を考慮して錘はクローバー型に形成され、錘の切り欠き部分に収まるように梁が形成されている。Z 方向の寸法は、図 1 (b) の断面図に記載した通りである。梁形状は、図 7 に示すように、2 種類の伸縮梁形状とストレート梁を比較した。基準となるストレート梁は、長さ 310 μm 、厚さ 6 μm とし、梁の端部から 10 μm 離れた長さ 15 μm の領域にゲージを配置した。梁の幅は、ゲージを配置する端部付近は 28 μm で、中央部は 18 μm とした。これに対し、中央にリング形状の伸縮部を 1 つ形成した 1 リング梁と、2 つ直列に配置した 2 リング梁を検討した。伸縮部の形状とし

ではS字形状なども考えられるが、梁の中心軸に対して対称でないと、圧縮による各ゲージの応力変化のバランスが崩れる懸念があるので、対称性の良いリング形状を選択した。リング形状は、梁幅方向に $80\ \mu\text{m}$ 、長さ方向に $30\ \mu\text{m}$ の領域に幅 $11\ \mu\text{m}$ で形成し、角部はRを付けて、屈曲部への応力集中を緩和する形状とした。

図7(d)には、各梁形状に対して縮み増大率 H_c および曲げ増大率 H_d を求めた結果も示す。各梁形状に対して曲げおよび圧縮を与える有限要素法 (FEM) 解析を行い、縮み量および曲げ量がストレート梁に対して増加した比率から求めた。結果を見ると、本検討の伸縮梁では、曲げやすさは2%以下の変化に抑え、縮みやすさを約3倍、5倍と増加できている。2リング梁では H_d/H_c が約0.2となるので、座屈に至る圧縮変位量をストレート梁の約5倍にでき、特性変化を抑制する効果が期待される。

Fig. 6 Proposed stretchable beam structure. Ring-shaped part is added at the center of a beam to give axial flexibility for relaxing compression stress.

Fig. 7 Designed stretchable beam shapes and their calculated increase rates. (a) Conventional straight beam. (b) Designed single-ring beam. (c) Designed double-ring beam. (d) Calculated increase rates for the designed stretchable beams. Bending increase rate H_d defined with equation 11 and compression increase rate H_c defined with equation 14 are shown as comparisons to the straight beam. Designed stretchable beams have larger values in H_c without decreasing in H_d .

伸縮梁の効果を検証するため、FEM 解析を用いてセンサ感度を評価した。加速度センサの FEM モデル (Y 軸対称の 1/2 モデル) に対して X 軸および Z 軸方向の単位加速度を与える解析を行い、ゲージ部の応力変化を抽出して感度を計算した。計算には 3 軸方向の応力成分を用い、縦ピエゾ係数および横ピエゾ係数には、本センサで

用いる P 型シリコン[110]方向で、不純物濃度を考慮して概算した 5.03 および $4.64 [\times 10^{-4}/\text{MPa}]$ を用いた (Kanda, 1982).

本検討では、絶縁層残留応力とモールド樹脂収縮の影響を評価するため、表 1 に手順を示す Case 1~3 の解析を、上記 3 つの梁形状に対して実施した. Case 2 は絶縁層残留応力の影響を想定している. 表面に絶縁層 (厚さ $0.6 \mu\text{m}$) を形成したセンサチップ単体のモデルで、 $860 \rightarrow 25^\circ\text{C}$ の温度変化を与えて熱応力により梁が圧縮された状態を計算した後、そこから加速度を与えてゲージ部の応力変化を求めた. Case 3 はさらにモールド樹脂収縮の影響を想定し、図 8 に示すように、 860°C からの降温過程において、 280°C で WLP の上下キャップを、 140°C で樹脂パッケージのモデルを追加し、 25°C までの熱応力を与えた. 280°C は WLP のキャップ接合温度であり、 140°C はモールド樹脂のガラス転移点温度である. ガラス転移点以上の温度では弾性率が急激に低下するので、簡易的にガラス転移点以下の温度変化分が収縮力に寄与すると仮定して計算した. また、初期温度の 860°C は、絶縁層の残留応力を別途実測し、その応力が解析で与えた物性値に対して再現するように設定した. Case 1 は、梁圧縮がない場合であり、熱応力計算をせずに加速度のみ与えた.

解析のソルバーには、座屈のような幾何学的非線形の挙動を扱うため、大変形解析が可能な市販の解析ソルバーである ABAQUS を用いた. 解析に用いた物性値を表 2 および 3 に示す. モールド樹脂の線膨張係数は温度に対する変化が大きく、解析結果に与える影響も大きいので、 85°C を境に 2 つの温度域で平均値を設定して温度依存性を与え、解析精度の向上を図った. その他の材質は温度によらず一定の物性値を用いた. シリコンの弾性率は直交異方性を考慮した物性値を用いた.

Table 1 FEM Analysis procedures

	Case 1	Case 2	Case 3
Model	Chip	Chip	See Fig. 8
<Step 1> Thermal stress	None	860 →25 °C	
<Step 2> Gravity	9.8 m/s ² (x and z axes)		

Fig. 8 Thermal stress analysis procedure for Case 3 in Table 1. Thermal stress analysis was conducted with temperature change from 860°C to 25°C for considering thin-film residual stress. The analysis starts with a chip model. To consider influences of packaging, models of caps and resin-mold package are added at 280°C and 140°C , respectively.

Table 2 Material properties

	Elasticity [GPa]	Poisson's ratio	CTE [$10^{-6}/^\circ\text{C}$]
Silicon	See Table 3		2.6
Insulator	70	0.3	0.5
Mold resin	24	0.2	7 ($25\text{--}85^\circ\text{C}$) 12 ($85\text{--}140^\circ\text{C}$)
Attach film	4.2	0.4	120
Lead frame	67	0.25	12

CTE: Coefficient of thermal expansion

Table 3 Orthogonal anisotropy material properties for silicon [110]

Elasticity [GPa]	E1	169	Shear elasticity [GPa]	G12	50.9
	E2	169		G13	79.4
	E3	130		G23	79.4
Poisson's ratio	ν_{12}	0.064			
	ν_{13}	0.361			
	ν_{23}	0.361			

解析結果からゲージ部の応力変化を抽出し、感度を求めた結果を表 4 に示す. 感度は加速度 1 m/s^2 あたりの電圧変化率 (電源電圧 1 V あたりの出力変化 $[\mu\text{V}]$) で表しており、単位は $\mu\text{V/V}/(\text{m/s}^2)$ である. 表 4 には、各梁形状に対する各 Case の解析結果と、Case 1 から 3 に感度が増大した比率も示した. 熱応力による圧縮のない Case 1 では、梁形状によらず感度がほぼ同じとなっており、前章の理論式から導いた結果と一致した. 一方で、絶縁層残留応力の影響 (Case 1 $\rightarrow$ 2) と、モールド樹脂収縮の影響 (Case 2 $\rightarrow$ 3) が加わることで、それぞれ感度が増大し

ており、梁の圧縮による感度の増大現象を再現できた。また、感度の増大はX軸よりもZ軸で顕著であるので、梁圧縮の影響については、前章までの理論に基づきZ軸の特性を対象として検討すればよいことが分かる。Z軸感度でCase1→3の感度増大率を見ると、ストレート梁の6.52に対して、1リング、2リングでは1.41、1.22に抑制できた。図5のグラフから、ストレート梁の感度増大率6.52は座屈に近い非線形な領域と考えられるが、伸縮梁では安定な領域に維持することができた。

次に固有振動数の解析結果を表5に示す。Case1と2について固有値解析により振動モードと固有振動数を求めた。すなわち、Case2では熱応力を計算して梁に圧縮が加わった状態で固有値解析を行なった。X軸およびZ軸の加速度検出と同じ挙動であるMode1および2を見ると、梁圧縮のないCase1では梁形状によらず固有振動数がほぼ同じであるが、梁圧縮のあるCase2ではストレート梁では低下するのに対して、伸縮梁では低下が抑えられている。伸縮梁の適用に際して、直感的には、梁の剛性が低下することで固有振動数の低下を招くことが懸念されるが、図7(d)に示したように伸縮梁の曲げ剛性はほとんど低下しておらず、圧縮の影響を考慮するとむしろ固有振動数は高くできる。一方で、梁の伸縮を伴う挙動であるMode4では、伸縮梁の共振周波数はストレート梁と比べて大きく低下するが、加速度検出のMode1および2と比較して十分に高い周波数なので問題にはならない。以上より、伸縮梁による固有振動数への悪影響はなく、むしろ圧縮の影響を抑制することで高くできることが示された。

Table 4 FEM analysis results for sensitivities

	X axis				Z axis			
	Sensitivity [$\mu\text{V/V}/(\text{m/s}^2)$]			Increase rate	Sensitivity [$\mu\text{V/V}/(\text{m/s}^2)$]			Increase rate
	Case 1	Case 2	Case 3		Case 1	Case 2	Case 3	
(a) Straight	35.89	45.6	84.7	2.36	28.28	41.6	184.3	6.52
(b) Single ring	36.07	39.3	44.9	1.24	28.29	32.2	39.9	1.41
(c) Double ring	36.13	38.2	41.2	1.14	28.29	30.7	34.6	1.22

Table 5 FEM analysis results for natural frequencies [kHz]

	Mode 1		Mode 2		Mode 3		Mode 4	
	Case 1	Case 2	Case 1	Case 2	Case 1	Case 2	Case 1	Case 2
(a) Straight	1.98	1.78	2.94	2.50	11.43	11.33	115.6	115.4
(b) Single ring	1.97	1.90	2.93	2.79	11.37	11.33	73.4	73.2
(c) Double ring	1.95	1.91	2.91	2.83	11.30	11.27	57.9	57.8

4・2 試作評価

図6に示したセンサ素子形状、および図7に示した3種類の梁形状で、加速度センササンプルを試作して特性を評価した。試作サンプルは、図9に示す2種類の方法でパッケージングした。Package1ではWLPを用いないセンサチップを中空のセラミックパッケージ内に実装した。チップの固定には柔軟な接着材を用いており、パッケージングに起因する外力はほとんど加わらないと考えられ、梁には絶縁膜応力の影響のみが与えられるので、前節の解析のCase2に対応する。Package2はWLPを用いてキャップ封止したセンサチップを樹脂モールドしたもので、樹脂収縮の影響が加わるので、解析のCase3に対応する。

ストレート梁の場合について、上記2種類のパッケージ構造に対する3軸感度の測定結果を図10に示す。感度はそれぞれ10サンプルの平均値で示した。Package1では3軸とも設計値の $33 \mu\text{V/V}/(\text{m/s}^2)$ 付近の感度であるが、Package2では樹脂モールドの影響でX,Y軸は2~3倍、Z軸は7倍程度に感度が増大した。さらに、Z軸感度について梁形状の比較をした結果を図11に示す。伸縮梁を用いることで、Package2においても感度の増加を抑制

でき、1 リング梁では 1.35 倍、2 リング梁では 1.26 倍の増加に抑えられた。これらの増加は樹脂収縮の影響分に相当する。前節の解析の Case1 に相当する絶縁膜応力がない場合の試作評価は困難であるため、絶縁膜応力のみによる増加分は評価できなかった。ただし、前節の 1 リング梁の解析結果では樹脂収縮の影響 (Case2→3) が 1.24 倍で、絶縁膜応力の影響も含めた増加率が 1.41 倍であったことから推察すると、試作評価の 2 リング梁の結果について、絶縁膜応力の影響分も含めた増加率は 1.4 倍程度と推測される。

なお、前節の解析結果を試作評価結果と比較すると、解析結果は傾向がよく一致したものの、感度の増大率が全体的に小さくなった。解析による評価では伸縮梁の効果検証を目的としたので、材料物性値の定義などを簡略化しており、また実際のサンプルとの形状の誤差などもあると考えられる。解析のみで定量的な評価を行うためには、解析精度の改善の余地がある。

Fig. 9 Packaging structure for test samples. (a) Assembled without packaging stress. A chip is mounted using a soft adhesive in a ceramic package and capped. (b) Assembled with packaging stress. A chip was capped using WLP technology and assembled using a common resin-mold packaging.

Fig. 10 Measured 3-axis sensitivities for straight beam. They were close to the designed value ($3.3 \text{ mV/V/(m/s}^2)$) for Package 1. But sensitivity increases of about 7 times in z axis and 2–3 times in x and y axis were measured for Package 2 due to packaging stress.

Fig. 11 Measured z-axis sensitivities for three beam types. Sensitivity increases from Package 1 to 2 were suppressed by using the stretchable beams and measured as 1.35 times for the single ring and 1.26 for the double ring.

また、2 章において図 4 のグラフで考察したように、伸縮梁により温度特性の改善効果も得られると考えられる。そこで、Package 2 のサンプルで Z 軸感度の温度特性を測定した結果を図 12 に示す。グラフの縦軸は 25°C での出力を基準とした変化率で示した。低温になるほどモールド樹脂収縮による圧縮力が増加するため、ストレート梁では低温側ほど急激に感度が増加する非線形な特性となり、 -35°C での変化率は 370% にもなった。一方で 1 リングおよび 2 リングでは、20%、16% と変化が小さく、ほぼ線形な特性となった。本特性であれば、線形あるいは 2 次式を用いて温度補正が容易にできる。なお、 piezoelectric resistance body の温度特性が -35°C で 10% 程度と予測され (Kanda, 1982), それを超える部分が梁圧縮による影響と考えられる。

次に、上記 2 種類のパッケージに対する、Z 軸感度のばらつき測定結果を表 6 に示す。それぞれ 10 サンプルの測定結果の標準偏差で示した。樹脂モールドした Package 2 の Z 軸感度において、ストレート梁では標準偏差が $74.5 \text{ } \mu\text{V/V/(m/s}^2)$ と大きくばらついていたのに対して、2 リング梁では $1.4 \text{ } \mu\text{V/V/(m/s}^2)$ に抑制できた。

この特性ばらつきの要因としては、MEMS 加工の誤差が最も大きいと考える。センサ素子は SOI ウェハを加工して製作されるが、図 13 に示すように、厚いハンドル層のドライエッチング加工（図では下から加工）においては、ウェハ面内で加工レートがばらつきが生じ、加工終端でのオーバーエッチング量にもばらつきが生じる。加工終端を梁の端部に一致させるのは困難であるため、梁端部より外側に加工終端が来るように設計するが、その位置がばらつくことで、梁の付根付近の形状が変化する。すると、圧縮の影響によるゲージ部の応力変化にもばらつきが生じる。ストレート梁では座屈に近い状態になるため、こうした梁付根付近の形状ばらつきに対して挙動が敏感に変化し、大きな特性ばらつきが発生したと考えられる。このように、特有の加工誤差が発生する MEMS センサにおいて、伸縮梁を用いた梁圧縮影響の抑制が有効であることが検証できた。

Fig. 12 Measured temperature dependences in z-axis sensitivity for three beam types. Variation rates from the values at 25°C are shown. As expected, the sensitivity variations for the single-ring and double-ring beams were sufficiently small and linear compared with that for the straight beam, which was large and nonlinear.

Table 6 Measured standard deviations for sensitivity and zero-g offset

Beam type	Sensitivity deviation [$\mu\text{V}/\text{V}/(\text{m}/\text{s}^2)$]	
	Package 1	Package 2
Straight	1.02	74.5
Single-ring	0.68	1.76
Double-ring	0.68	1.39

Standard deviations were calculated from data of 10 samples.

Fig. 13 Assumed mechanism causing deviations in sensor properties. Shapes of beam edges vary due to non-uniformity of dry etching in the silicon handle layer. Stress variations at gauges responding to beam compression are influenced in accordance with the edge shape variation.

以上のように、センサ素子製造プロセスで発生する絶縁層の残留応力や、樹脂パッケージのモールド樹脂収縮により梁が圧縮される課題に対して、伸縮梁の特性を適切に設計することで梁圧縮の影響を制御し、センサ特性のばらつきを抑制しつつ、感度の増加を実現する設計手法を検証できた。

5. 結 言

錘を梁で支持した構造の MEMS 慣性センサにおいては、センサ素子製造プロセス中に発生する薄膜残留応力や、樹脂モールドパッケージングにおける樹脂収縮力などの影響によるセンサ特性の変動が、小型化や高感度化を阻む大きな課題となっている。本報では、圧電抵抗型 3 軸加速度センサを対象に、上記応力による梁の軸方向圧縮がセンサ特性に与える影響を詳細に分析するとともに、梁の中央部に伸縮部を形成した伸縮梁構造を提案し、その効果を検証した。また、伸縮部の特性により圧縮の影響を調整し、特性の安定性を維持しつつ感度の向上を図る設計手法について提案した。

加速度センサの単純化モデルに対する材料力学計算により、梁圧縮の影響について定式化を行い、以下の知見を得た。梁の圧縮が大きくなるほど、センサの感度は増大する。その感度増大率は、オイラーの座屈荷重との関係で表現され、圧縮力が座屈荷重に近づくほど感度が非線形に増大することが示される。座屈に近い領域では、非線形で大きな温度特性や、加工誤差に起因したセンサ特性ばらつきの増大が懸念される。一方で、座屈限界に対する圧縮荷重の比率を 0.4 程度までにできれば、安定な特性を維持しつつ、感度を 1.5 倍程度まで向上できると期待される。伸縮梁についても定式化を行い、ストレート梁に対する伸縮梁の曲げ増大率 H_d と縮み増大率 H_c を定義して、上記感度増大率を表現できることを示した。座屈に至る圧縮変位量を H_d/H_c 倍にできるので、 H_d/H_c が小さくなるように伸縮部を設計することで特性を安定化し、圧縮の影響を調整することが可能になる。

具体的な伸縮梁形状として、2つのリングを直列配置した形状の伸縮梁について、従来ストレート梁と比較検討した。上記伸縮梁では曲げ剛性をほぼ変えずに伸縮しやすさを約 5 倍にでき ($H_d/H_c=0.2$)、特性安定化が図れることをシミュレーションと試作評価から明らかにした。試作評価の結果、樹脂モールドの前後において、ストレート梁では Z 軸感度が平均で約 7 倍に増加したのに対し、伸縮梁では 1.26 倍の増加に抑えられた。また樹脂モールドしたサンプルの Z 軸感度のばらつきも、ストレート梁での標準偏差 $71.4 \mu\text{V/V}/(\text{m/s}^2)$ に対して、伸縮梁では $1.5 \mu\text{V/V}/(\text{m/s}^2)$ に低減でき、MEMS 加工技術に特有の加工誤差に起因する特性ばらつきに対しても抑制効果が確認できた。

以上のように、 H_d/H_c を小さくするほど温度特性やばらつきなどの特性の安定性が増す一方で、感度の向上効果は小さくなる。伸縮梁を適用することで、信号処理部の補正能力や要求感度を勘案して、圧縮の影響を望ましい領域に調整する設計が可能になることを検証できた。

本提案の伸縮梁構造は、樹脂収縮などの外力の影響を遮断する従来技術と比較して、サイズと製造容易性を犠牲にすることなく応力影響を抑制できる。また、薄膜残留応力のようなセンサ素子内部の応力の影響も抑制できる特徴がある。汎用樹脂パッケージを適用した小型で高感度な慣性センサの実現において、本研究の知見を生かせるものと考えられる。

なお、リング形状の伸縮梁には応力が集中しやすく、落下衝撃に対して梁が軸方向引張を受けた際には、ストレート梁と比較して強度が低下する。ただし、応力集中を緩和するリング形状設計と、衝撃を緩和するパッケージング構造により十分な耐衝撃強度の確保が可能であり、その強度検討内容については別途報告予定である。

謝 辞

本研究の遂行にあたり貴重な助言を頂いた東京大学大学院の割澤伸一教授に謝意を表します。

References

Allen, H. V., Terry, S. C. and De Bruin, D. W., Accelerometer systems with self-testable features, Sensors and Actuators A: Physical, Vol. 20, Issues 1-2 (1989), pp. 153-161.

- Boser, B. E. and Howe, R. T., Surface micromachined accelerometers, *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, Vol. 31 (1996), pp. 366-375.
- Cheng, Y.-T., Hsu, W.-T., Najafi, K., Nguyen, C. T.-C. and Lin, L., Vacuum packaging technology using localized aluminum/silicon-to-glass bonding, *Journal of Microelectromechanical Systems*, Vol. 11, No. 5 (2002), pp.556-565.
- Felton, L. E., Duffy, M., Hablutzel, N., Farrell, P. W. and Webster, W. A., Low-cost packaging of inertial MEMS devices, *Proceeding of International Symposium on Microelectronics (IMAPS)* (2003), pp. 402-406.
- Hsieh, H., Chang, H., Hu, C., Cheng, C. and Fang, W., A novel stress isolation guard ring design for the improvement of a three-axis piezoresistive accelerometer, *Journal of Micromechanics and Microengineering*, Vol. 21, No. 10 (2011), 105006.
- Kanda, Y., A graphical representation of the piezoresistance coefficients in silicon, *IEEE Transactions on Electron Devices*, Vol. 29, Issue 1 (1982), pp.64-70.
- Kuehnel, W. and Sherman, S., A surface micromachined silicon accelerometer with on-chip detection circuitry, *Sensors and Actuators A: Physical*, Vol. 45, Issue 1 (1994), pp. 7-16.
- Li, G. and Tseng, A. A., Low stress packaging of a micromachined accelerometer, *IEEE Transactions on Electronics Packaging Manufacturing*, Vol. 24, No. 1 (2001), pp. 18-25.
- Matsumoto, Y. and Esashi, M., Integrated silicon capacitive accelerometer with PLL servo technique, *Sensors and Actuators A: Physical*, Vol. 39, Issue 3 (1993), pp. 209-217.
- Muro, H., Kaneko, H., Kiyota, S. and French, P. J., Stress analysis of SiO₂/Si bi-metal effect in silicon piezoresistive accelerometers, *Proceeding of International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems (TRANSDUCERS)* (1991), pp. 768-771.
- Okada, K., Tri-axial piezoresistive accelerometer, *Technical Digest of the 11th Sensor Symposium* (1992), pp. 245-248.
- Plaza, J. A., Esteve, J. and Cané, C., Twin-mass accelerometer optimization to reduce the package stresses, *Sensors and Actuators A: Physical*, Vol. 80, Issue 3 (2000), pp. 199-207.
- Roylance, L. M. and Angell, J. B., A batch-fabricated silicon accelerometer, *IEEE Transaction on Electron Devices*, Vol. ED-26, No. 12 (1979), pp. 1911-1917.
- Schmidt, M. A., Wafer-to-wafer bonding for microstructure formation, *Proceeding of the IEEE*, Vol. 86, No. 8 (1998), pp. 1575-1584.
- Takao, H., Matsumoto, Y., Seo, H., Ishida, M. and Nakamura, T., Analysis and design considerations of three-dimensional vector accelerometer using SOI structure for wide temperature range, *Sensors and Actuators A: Physical*, Vol. 55, issues 2-3 (1996), pp. 91-97.
- Vigna, B., MEMS epiphany, *Proceeding of IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems* (2009), pp.1-6.
- Yamada, K., Higuchi, K. and Tanigawa, H., A novel silicon accelerometer with a surrounding mass structure, *Sensors and Actuators A: Physical*, Vol. 21, Issues 1-3 (1990), pp. 308-311.
- Yun, C. H., Martin, J. R., Chen, T. and Davis, D., MEMS wafer-level packaging with conductive vias and wafer bonding, *Proceeding of International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems (TRANSDUCERS)* (2007), pp. 2091-2094.
- Zhang, X., Park, S. and Judy, M. W., Accurate assessment of packaging stress effects on MEMS sensors by measurement and sensor-package interaction simulations, *Journal of Microelectromechanical Systems*, Vol. 16, No. 3 (2007), pp. 639-649.