

エアバッグシステム用Z軸加速度センサ

平田善明* 平岡裕二**
 伊藤恭彦* 末次英治***
 紺野伸顕*

Z-axis Accelerometer for Airbag System

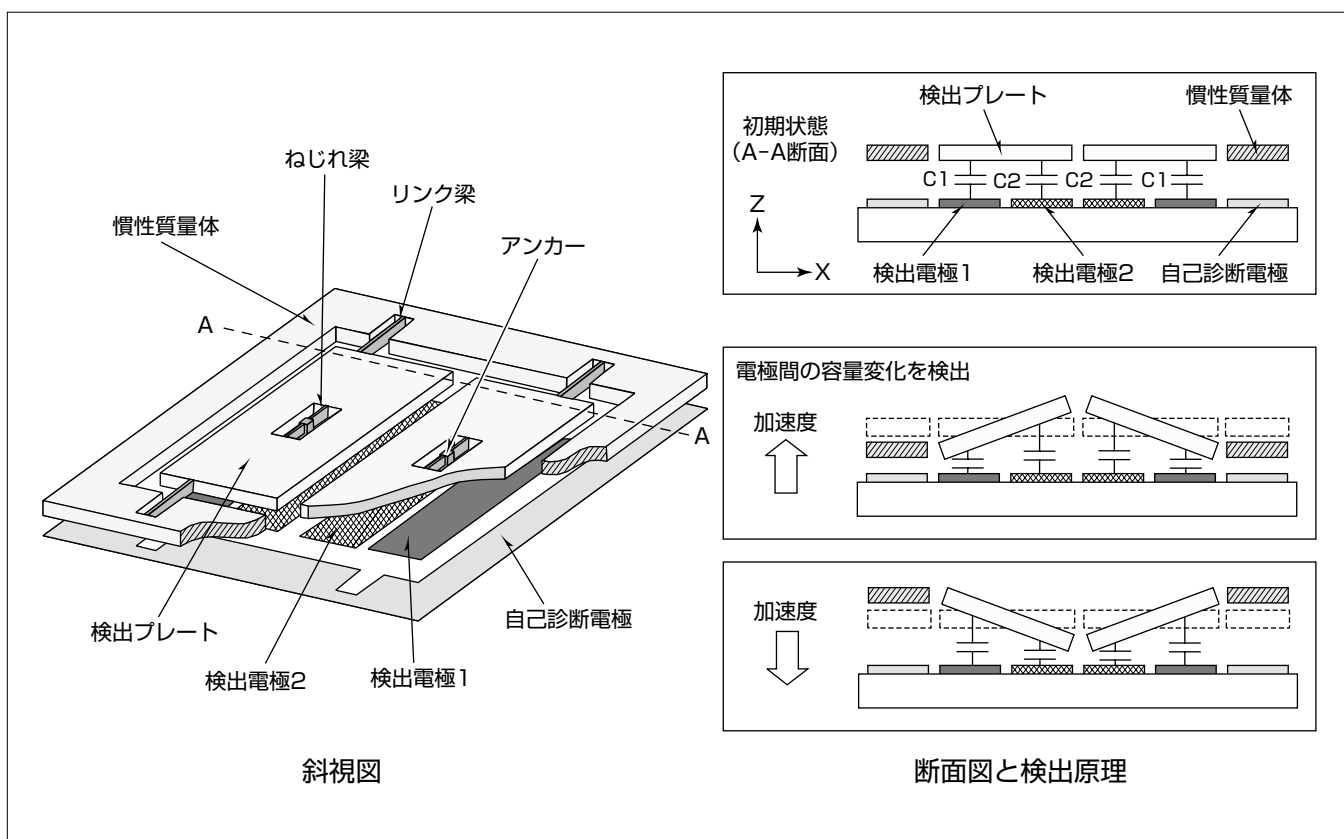
Yoshiaki Hirata, Takahiko Itoh, Nobuaki Konno, Yuji Hiraoka, Eiji Suetsugu

要旨

50G(G：重力加速度)以上の高い加速度を検知する半導体容量式加速度センサは、温度による特性変動が小さく、MEMS(Micro Electro Mechanical Systems)による小型・低価格化が可能のため車載エアバッグシステムに多数使用されている。一般的なエアバッグシステムでは、衝突検知用の加速度センサは運転席付近及びエンジンルーム付近に設置されるが、対応する衝突形態の多様化に伴い、車体の緩衝効果が小さいピラーなどへの搭載が増加している。車体の緩衝効果が小さい場合、衝突した際の入力加速度は、ボディ共振などによって検出加速度範囲をはるかに超える高周波振動となり、加速度センサの固定電極と可動電極が接触するクリップと呼ばれる現象が発生する可能性がある。

クリップが発生すると、加速度を積分してエアバッグ展開を決定する速度成分に誤差が発生し、誤動作を引き起こす要因となる。

今回開発した加速度センサは、面外方向の加速度を検出し、慣性質量体の面外変位を検出プレートの回転変位へメカニカルに変換する独自の検出機構を持ち、感度と共振周波数を独立に設計することが可能である。最適な共振周波数設定と、検出プレートと検出電極間のダンピング効果の利用によって、エアバッグ用途として理想的な感度周波数特性を実現し、クリップ現象を回避した正確な速度検出が可能となった。



Z軸加速度センサ構造と検出原理

加速度を検知する可動構造体は慣性質量体と可動電極からなる。可動構造体は2箇所のアンカーで基板と接続している。2枚の検出プレートはねじれ梁(はり)で支持されアンカーと接続する。リンク梁は慣性質量体と検出プレートを接続する。加速度による慣性質量体の面外変位を検出プレートの回転変位へメカニカルに変換し、検出プレートと基板上の電極間の差動容量変化で加速度を検出する。可動構造体と電極はポリシリコン薄膜で形成する。

1. ま え が き

車載用エアバッグシステムは、側突対応、オフセット衝突対応など、衝突形態が多様化し、車体の緩衝効果が小さい箇所への加速度センサ搭載が増加している。車体の緩衝効果がない場合、衝突した際の入力加速度は、検出範囲をはるかに超える高加速度・高周波振動となり、固定電極と可動電極が接触するクリップを誘発する。その結果、加速度を積分した速度誤差が大きくなり、エアバッグの展開判断ミスにつながる危険性がある⁽¹⁾。一方エアバッグ用加速度センサの市場でのコスト競争は激化しており、コストアップを伴うプロセスの適用は難しい。そこで、標準的な2層ポリシリコンプロセスで作製でき、独自の変位変換機構と大きいダンピング効果を持つZ軸加速度センサを開発してきた⁽¹⁾⁽²⁾⁽³⁾。

本稿では新規開発したZ軸加速度センサの検出原理、製造プロセス、特徴について述べる。

2. Z軸加速度センサの検出原理と製造プロセス

2.1 Z軸加速度センサの検出原理

図1はZ軸加速度センサの平面図であり、図2は検出原理を示す断面図である。センサの可動構造体は8μm厚のポリシリコンである。可動構造体は2か所のアンカーで基板と接続している。2枚の検出プレートはねじれ梁で支持されアンカーと接続し、リンク梁は慣性質量体と検出プレートを接続する。図2は図1のA-A断面図で、(a)は初期状態、(b)はZ軸に加速度が加わって変位した状態である。図2(a)に示す通り、検出プレートに対して検出電極1、2が検出ギャップgだけ離して配置している。検出初期容量は $C = \epsilon S / g$ となる。ここで ϵ は誘電率、Sは検出電極面積である。慣性質量体の下部には自己診断電極を配置し、静電引力によって慣性質量体及び検出プレートを強制変位させる自己診断機能を持つ。

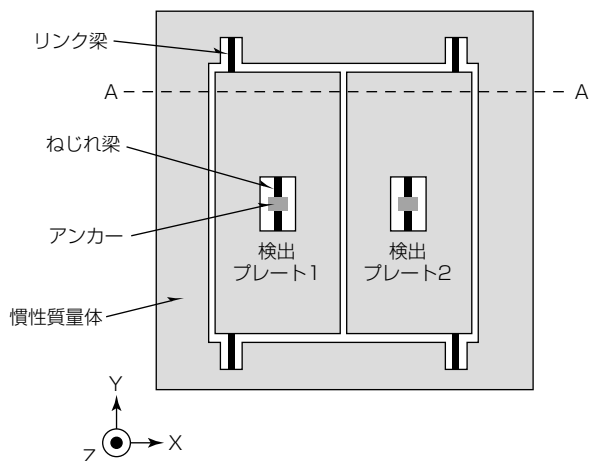


図1. Z軸加速度センサの平面図

図2(b)を用いてZ軸加速度センサの検出原理を述べる。基板の上方向に加速度Acが加わると、慣性力によって慣性質量体は下方向に変位する。検出プレートはリンク梁に引っ張られ、ねじれ梁を支点に回転変位する。検出容量C1, C2は片方の容量が増加すれば、他方が減少する差動容量を形成する。検出プレート先端の変位をuとすると、検出容量は式(1)、式(2)で表される。

$$C1 = \frac{\epsilon S}{u} \log\left(\frac{g}{g-u}\right) \dots\dots\dots(1)$$

$$C2 = \frac{\epsilon S}{u} \log\left(\frac{g+u}{g}\right) \dots\dots\dots(2)$$

センサ出力VoutはC-V変換回路を用いることで⁽⁴⁾、式(3)で表される。

$$Vout = \frac{C1}{C1+C2} Vs \dots\dots\dots(3)$$

ここで、Vsは供給電圧である。式(3)に式(1)、式(2)を代入し、uがgと比較して小さいと仮定すると、式(4)となる。

$$Vout \approx \left(1 + \frac{1}{2} \frac{u}{g}\right) \frac{Vs}{2} \dots\dots\dots(4)$$

検出プレートの先端変位uは加速度に比例するので、加速度に比例したセンサ出力が得られる。

図3に入力加速度とセンサ出力の相関を示す。uが大きくなると式(4)は成立せずセンサ出力の非線形性が大きくなるが、開発したZ軸加速度センサでは検出プレートの可動範囲を最適設計し、検出加速度範囲内での非線形性は1%以下である。2枚の検出プレートをY軸対称構造とすることで、X軸方向加速度及びY軸回り角加速度等、他の慣性力による出力誤差の低減を図っている。

2.2 Z軸加速度センサの製造プロセス

図4にZ軸加速度センサの製造プロセスを示す。Z軸加速度センサはポリシリコンを可動構造体とする表面マイクロマシンと呼ばれるプロセスで製造する。

(1) SiO₂付きSi基板上にポリシリコンで固定電極を形成する。固定電極の容量検出部以外をSi₃N₄膜で覆う。Si₃N₄

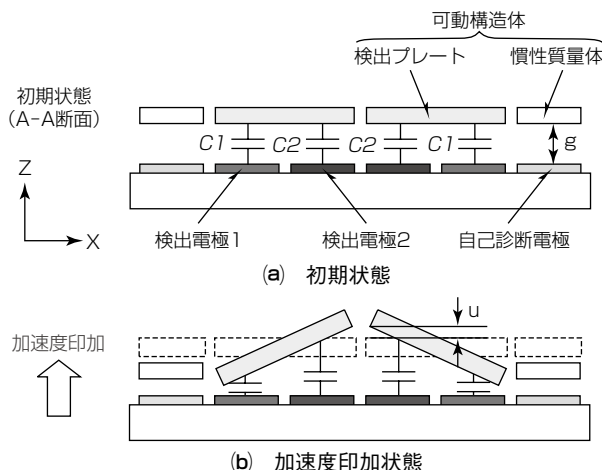


図2. Z軸加速度センサの断面図

は構造体リリース時に基板上のSiO₂エッチングを防ぐ保護膜である。

- (2) リン酸ガラス (PSG) を堆積し、パターニングする。PSG膜厚が検出ギャップとなる。
- (3) 8 μm厚のポリシリコンを堆積し、深掘りドライエッチング (DRIE) で可動構造体を形成する。ポリシリコンはドーパント量制御とアニール処理によって面外方向へ反らないように応力制御を行う。ワイヤボンディング用のアルミ電極を形成する。

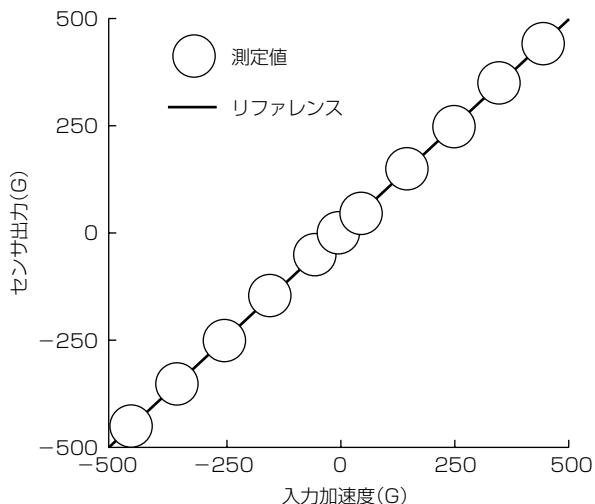


図 3. Z軸加速度センサの入力加速度とセンサ出力

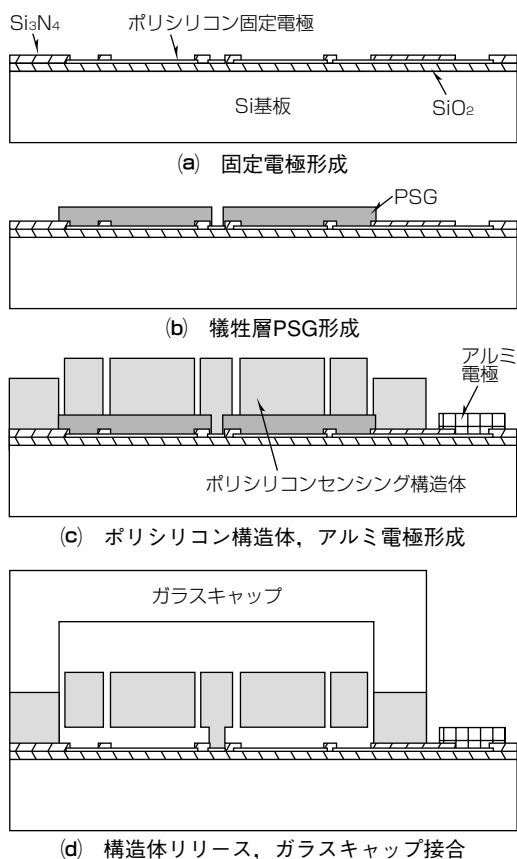


図 4. Z軸加速度センサの製造プロセス

- (4) PSGをフッ酸でエッチングして構造体をリリースする。固着防止のため、水洗後の乾燥には超臨界乾燥法を用いる。最後にガラスキャップを陽極接合法で接合し、ウェーハレベルで封止する。

従来の多くのZ軸加速度センサは、可動構造体のZ軸変位を検出するため、可動構造体の上下に配置した電極で差動容量を形成している。しかしこの構造では、プロセスが複雑で、かつ上下の検出ギャップの違いによって特性ばらつきが発生しやすい。このZ軸加速度センサは、慣性質量体のZ軸変位を検出プレートの回転変位へメカニカルに変換する独自のセンシング機構によって、可動構造体下面に配置した同一検出ギャップの電極で差動容量を形成でき、可動構造体上部の検出電極は不要である。また一層だけの膜厚で差動容量を形成しているため、検出ギャップばらつきに起因する素子間の特性ばらつきが少ない。

3. Z軸加速度センサの特徴

3.1 高ダンピング構造

図 2 に示す検出プレートと検出電極は、狭い検出ギャップでエアが挟まれた構造である。検出プレートの動きが低周波の場合、検出ギャップ間に挟まれたエアは検出プレート変位に追従して移動する。しかし検出プレートが高周波で変位すると、ギャップ間のエアは検出プレートに追従できず、検出プレート変位に対して抗力となって、いわゆるスクイズフィルムダンピングの効果を奏する。

図 5 の①は開発したZ軸加速度センサの感度周波数特性を示す。白抜きプロットは実測値で実線は解析値である。①の感度周波数特性は、強いダンピングによって8 kHzの共振周波数でピークが発生しない過減衰特性となる。

図 5 の①で、開発品の感度周波数特性は衝突検知に必要な周波数帯域であるDC~400Hzでほぼ平坦(へいたん)であるが、1 kHz付近からスクイズフィルムダンピング効果によって急速に減衰する。この感度周波数特性は、検知帯域を超える高周波・高加速度成分が入力されても可動電極は変位せず、クリップを生じないエアバッグ用として理想的な特性と言える。

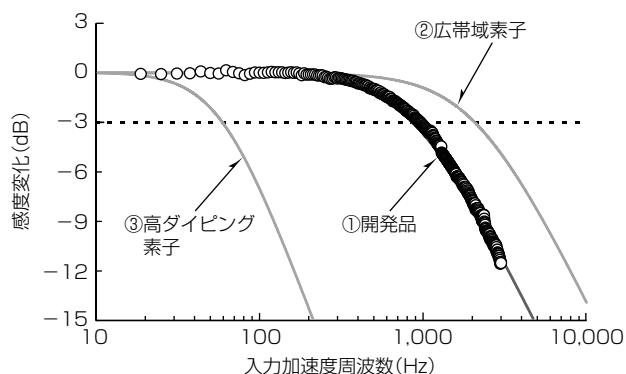


図 5. Z軸加速度センサの感度周波数特性

3.2 共振周波数可変構造

櫛歯(くしば)型などの通常の容量式加速度センサは、1つの慣性質量体を1自由度のばねで支持しているため、感度と共振周波数を個別に設計できない。したがって、感度が決まれば共振周波数は一意的に決まる。しかし、このZ軸加速度センサは、感度と共振周波数を決定するパラメータが慣性質量、ねじれ梁ばね定数、リンク梁ばね定数、ねじれ梁とリンク梁の距離と多数あるため、感度と共振周波数を個別に設計できる利点を持つ⁽¹⁾⁽²⁾。

図5の②と③は①の開発品と同一感度で、ねじれ梁長、リンク梁長、ねじれ梁とリンク梁のオフセット距離を変えたZ軸加速度センサの感度周波数特性の解析結果である。②は共振周波数を上げて帯域を広げた素子モデルであり、③は共振周波数を下げてダンピングを高めた素子モデルである。共振周波数に対応して検出周波数帯域が異なり、検出帯域の目安となる感度が-3dBとなる周波数は①が800Hzに対し、②が1.8kHz、③が60Hzとなる。

これらから、このZ軸加速度センサは、従来の1自由度系加速度センサでは不可能であった、同一構造、同一感度で共振周波数を変更することによって、検出帯域を調整できる。したがって、用途に応じた最適な周波数特性が設計可能である。

3.3 衝突模擬試験による速度誤差検証

衝突時の速度誤差を見積るため、加速度センサと圧電素子ピックアップを同一金属ブロックに貼り付け、ブロックを加速して壁に衝突させる衝突模擬試験を実施した。ブロックを加速する力、壁の材質を変えて、衝突速度と衝突加速度を調整する。衝突前のピックアップ加速度出力を積分した速度をリファレンスとし、衝突後の加速度センサ出力を積分した速度をプロットする。図6に試験結果を示す。図(a)は三菱電機で開発したZ軸加速度センサの結果であり、図(b)は他社のエアバッグ用加速度センサの結果である。

図6中のプロット○印の大きさは衝突直後のピックアップ最大加速度を表し、大きいほど加速度が高い。最大加速度は10,000Gを超える。図(a)に示すZ軸加速度センサの積分速度は、実線で示すリファレンスとほぼ一致する。また速度誤差は最大加速度に依存せず、衝突加速度が大きくなっても速度誤差が大きくなることはない。これに対し、図(b)に示す他社製の加速度センサは、センサ出力の積分速度がリファレンス速度より小さい傾向にある。また最大加速度が大きくなると、リファレンスからのズレが大きくなる。これは、衝突によって固定電極と可動電極が接触するクリップが発生して出力が飽和し、加速度を積分して速度に換算すると実際の速度より減少するためである。今回開発したZ軸加速度センサは、クリップの問題を解消でき、エアバッグ衝突判定の精度向上に貢献できる。

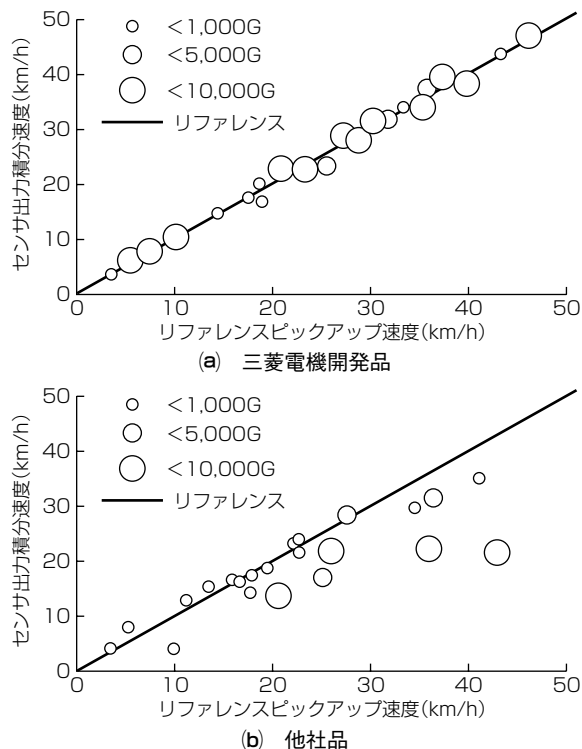


図6. 加速度センサ衝突模擬試験による速度誤差比較

4. む す び

標準的な表面マイクロマシンプロセスで作製でき、独自の変位変換機構を持つエアバッグ用Z軸加速度センサを開発した。検出プレートと検出電極間のスクイズフィルムダンピング効果を利用し、検出加速度レンジを超える高周波・高加速度が入力されてもクリップが発生せず、正確な速度検出が可能であることを示した。また、センサ感度と共振周波数を独立に設計できるため、用途に応じた最適な感度周波数特性を設定できることを示した。

参考文献

- (1) 平田善明, ほか: ダンピング効果を利用したメカニカル変位変換型Z軸加速度センサによる衝突速度検出の改善, 電気学会論文誌E, **132**, No.9, 296~302 (2012)
- (2) 平田善明, ほか: 変位変換機構を有するZ軸加速度センサ, 平成21年電気学会全国大会講演論文集, 3-196 (2009)
- (3) Hirata, Y., et al.: A new z-axis capacitive accelerometer with high impact durability, Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems Conference, 1158~1161 (2009)
- (4) Tsugai, M., et al.: A Charge Balanced C-V Converter for a Differential Capacitance Sensor, IEEJ Transactions on Sensors and Micromachines, **123**, No. 9, 357~362 (2003)