

# 共振型マイクロ加速度センサに関する研究 (第1報)

—基本設計と20倍拡大モデルによる原理検証—

佐藤健夫\*\* 寒川 潮\*\*\* 楠川量啓† 河田耕一††

Study on a Resonance Type Micro Acceleration Sensor (1st Report)  
- Design and the Basic Evaluation with the 20-times Enlarged Model -

Takeo SATO, Ushio SANGAWA, Kazuhiro KUSUKAWA and Koichi KAWATA

Sensors that detect the mechanical quantity are shifting from the bulk type to the MEMS type for the miniaturization, the cost reduction, and high reliability.<sup>1)~4)</sup> Regarding the acceleration sensor, the resistance type and the capacitance type made by the MEMS technology have been commercialized. However, the sensitivity is still a weak point to those sensors. It is considered that there is an advantage of sensitivity in the resonance type because the mechanical resonance is used.

In this study, we clarified the relation between sensitivity and the size concerning the newly designed resonance type acceleration sensor by the numerical simulation. Next we evaluated the sensor characteristics with the 20-times enlarged model. As a conclusion, it was confirmed that the resonance type had a potential for realizing the high sensitivity micro acceleration sensor.

**Key words:** acceleration sensor, resonance, frequency, miniaturization, MEMS, PZT

## 1. 緒 言

力学量を検出するセンサは、小型化、低コスト化、高信頼性実現のためにバルク型から半導体プロセスを応用したMEMSセンサへ移行している。力学センサの一つである加速度センサも、抵抗値変化や静電容量変化により加速度を検出するタイプのものが、MEMSにより実用に供されるようになってきている。しかしながら、小型化に伴う出力低下を補う高感度化が依然として課題となっている。

振動型は、構造体の固有振動数の変化を検出するものであり、小型化した場合においても加速度の高感度検出が可能と考えられる。

本研究では、筆者らが考案した共振型のマイクロ加速度センサについてまずシミュレーションにより構造体各部位の寸法と加速度検出感度の関係を明らかにした。

次に、汎用の加工法によって製作可能なサイズの拡大モデルを用い、動作原理の検証および基本性能の見極めを行い、本考案センサが振動型加速度センサとして有用であることを検証した。

## 2. 共振型マイクロ加速度センサの位置づけ

従来の加速度センサの方式について比較・評価を行った結果を表1に示す。大別すると圧電方式と半導体方式に分類される。

バルクタイプの圧電方式は自動車用のサスペンション、エアバッグ等に商用化されている。感度的には良好であるが、直流成分の検出ができない、バルクの圧電体を使用しているため小型化が困難という欠点がある。

一方半導体方式は歪ゲージタイプ、静電容量タイプで実用化が進むが、小型化、量産面で優れるものの、感度が低くS/Nが取りにくいという欠点がある。

このため、マイクロ化した場合にも、高い感度性が得られ、低加速度領域でも安定出力が得られる加速センサとして、圧電体を用いた共振型センサに着目し、研究を進めた。

## 3. 共振型マイクロ加速度センサの構造と加速度の検出原理

本研究で考案した共振型マイクロ加速度センサの全体構造を図1左側に、ダイヤフラム部の断面拡大図を図1右側に示す。

考案したセンサは①加速度Gが外力として加わることでたわみ変形を生ずる片持ち梁部、②片持ち梁部の根本近傍に設けられた長さに対し十分厚みが薄い矩形断面のダイヤフラム

Table 1 Comparison of acceleration sensors

	PZT Bulk Type		MEMS Type	
	Disk (Peripheral fixed)	Cantilever beam	Capacitance	Strain resistance
Structure and Sensing mechanism				
DC sensing	No	No	Yes	Yes
Sensitivity	○	○	△	△
Temperature characteristic	△	△	○	△
Self Test function	◎	○	△	×
Dropping impact	◎	△	○	△

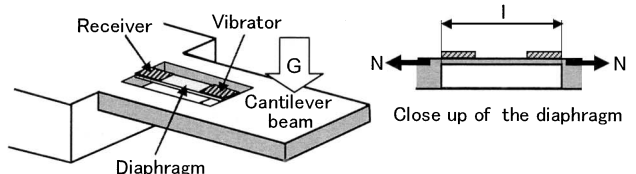


Fig.1 Structure of the designed resonance type acceleration sensor

\* 原稿受付 平成 19 年 8 月 24 日

\*\* 正会員 パナソニックモバイルコミュニケーションズ (株)  
(横浜市都筑区佐江戸町 600 番地)

\*\*\* 松下電器産業(株) (京都府相楽郡精華町光台 3-4)

† 高知工科大学 (高知県香美市土佐山田町宮ノ口 185)

†† 正会員 高知工科大学

部, ③ダイヤフラム部を共振周波数で振動させるための励振体, ④ダイヤフラムの振動を電気信号に変換する受信部の大きく4つの部分から構成されている。

次に加速度の検出原理について述べる。長さに比べ厚みが十分薄く, 幅に比べ長さが十分長いテープ状の両端固定のダイヤフラムの共振周波数は, 力学的には糸や膜の振動と同様であると考えて良いため, ダイヤフラムの質量を  $m$ , 長さを  $l$  とするとダイヤフラムの各次数の共振周波数  $f_i$  とダイヤフラムの張力  $N$  との関係は式 (1) で与えられる。

$$f_i \propto \sqrt{\frac{N}{m l}} \quad i = 1, 2, 3, \dots \quad (1)$$

片持ち梁が加速度の印加によりたわみ変形を起こすと図1右側に示すように長さ  $l$  のダイヤフラム部に加わる張力  $N$  が変化する。励振体への入力信号と受信部からの出力信号の位相比較等の手段により共振周波数の変化を検出することで, この張力変化を求めることが出来る。すなわち加速度で生じる梁のたわみ変形をダイヤフラムの共振周波数の変化として捉えることで, 加速度の検出を行うものである。

#### 4. 共振型加速度センサの特性解析

##### 4.1 梁部の構造と検出感度

印加加速度により発生する梁部たわみが, ダイヤフラムに加わる張力変化を生じさせる。そのため梁部の構造は, 加速度センサ感度を決定する重要な役割を担う。

まず, 梁部の構造と加速度の定性的な関係を求める。前章で述べたように長さに比べ厚みが十分薄く, 幅に比べ長さが十分長い両端固定のダイヤフラムの共振周波数は, 式 (1) で表現される。しかしながら本構造においては, ダイヤフラムに加わる張力がゼロであってもダイヤフラム自身は振動する。このため共振周波数は, 式 (1) と若干異なり, 式 (2) のように内部応力  $\delta$  がオフセットとして存在した共振形態をとると考えられる。

$$f \propto \sqrt{\frac{N}{m l} + \delta} \quad (2)$$

共振周波数の変化によって加速度を検知する場合のセンサの分解能は, 加速度  $g$  の変化に対する共振周波数の変化分であるので,  $[df/dg]$  で表わされる。加速度がゼロ付近の  $[df/dg]$  をもってセンサ分解能を定義すると, 加速度によって変化するのは張力  $N$  だけであり,  $g=0$  においては,  $N=0$  と見なせるため, 式 (2) より

$$\frac{df}{dg}_{g=0} \propto \frac{1}{m l \sqrt{\delta}} \frac{dN}{dg}_{g=0} \quad (3)$$

となる。式 (3) の係数  $(1/ml\sqrt{\delta})$  は, ダイヤフラムの構造によってのみ決定される定数であるので,

$$\frac{df}{dg}_{g=0} \propto \frac{dN}{dg}_{g=0} \quad (4)$$

となり, 印加加速度による共振周波数変化と張力の変化は比例関係にある。このため高感度化のためには, 張力変化を大きく生じさせる構造体の設計が重要である。

まず, 梁部の構造と加速度および張力の関係を見積もる。梁部は図2に示すように, 単一厚みの矩形の片持ち梁である。梁の固定端付近の窓によりダイヤフラムが梁と分離されている。ダイ

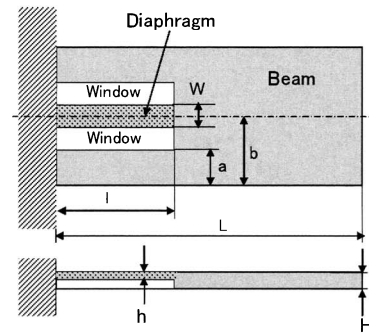


Fig.2 Dimensions of the beam and the diaphragm

Table 2 Relations between the detection resolution of acceleration and parameters of a cantilever beam

Parameter of beam	Detection resolution
Density $\rho$	Proportion
Young's modulus E	Inverse proportion
$b/a$	Proportion
$L-l$	Proportion to the second power
Thickness H	Inverse proportion

ヤフラムに加わる張力  $N$  は, ダイヤフラム固定端における垂直応力をダイヤフラム断面で積分したものとなるため次式で与えられる。

$$N = -\frac{W}{2l} \frac{E_0}{E} \rho g b (L-l)^2 (H-h) h H \quad (5)$$

但し  $l = \frac{1}{6} a H^3$

ここで,  $W$  はダイヤフラムの幅,  $l$  は梁の窓形成部の断面2次モーメント, 梁とダイヤフラムのヤング率がそれぞれ  $E, E_0$ ,  $\rho$  は梁を構成する物質の密度,  $g$  は加速度の大きさ,  $a$  は梁部片側の幅,  $b$  は梁の幅の  $1/2$ ,  $l$  はダイヤフラムの長さ,  $L$  は梁の長さ,  $H$  は梁の厚み,  $h$  はダイヤフラムの厚みである。

梁の厚みに比べダイヤフラムが十分薄いと, 上式は以下のように近似できる。

$$N = -3W \frac{E_0}{E} \rho g b (L-l)^2 \left(\frac{h}{H}\right) \quad (6)$$

梁部にのみ関係する項のみ抽出すると分解能は式 (4) から以下のようになる。

$$\frac{df}{dg}_{g=0} \propto \rho \left(\frac{1}{E}\right) \left(\frac{b}{a}\right) (L-l)^2 \left(\frac{1}{H}\right) \quad (7)$$

式 (7) より導いた周波数の検出分解能と梁部寸法の関係を表2に示す。

これらから加速度の検出感度は, 梁材料のヤング率  $E$  が小さい程, 梁部横幅の固定端との結合幅が小さい程 ( $b/a$  が大きい程), 良好で, ダイヤフラム長に対し梁部長が長く, 梁部の厚みが薄い程検出感度が高くなる事がわかる。

##### 4.2 共振周波数とダイヤフラムの寸法との関係

次にダイヤフラムの各部分の寸法と共振周波数の関係について考察を行う。

ダイヤフラムの振動モデルは, 図3に示すような両端固定の厚さが十分に薄い梁に張力  $N$  が加わり, 外力として周期的振動  $P(x,t)$  が働いた場合を想定した。

ダイヤフラムの物性および寸法は, 表3に示す値を等倍 (1倍

サイズ)として定め、式(8)に示す運動方程式を” Mathematica”により数値的に解くことにより、ダイヤフラム寸法を変化させた場合の共振周波数を求めた。

$$\hat{E}I \frac{\partial^4 y}{\partial x^4}(x,t) - N \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} + \rho A \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = P(x,y) \quad (8)$$

ここで $\hat{E}$ ,  $I$  および  $A$  は各々ダイヤフラムのヤング率から導かれる定数, 断面2次モーメント, 梁の断面積であり,  $\hat{E} = E/(1-\nu^2)$ ,  $I = Wh^3/12$ ,  $A = Wh$  で与えられる。

またダイヤフラム寸法を変化させるに当たって, 拡大率の概念を導入するが, これはダイヤフラムの長さ, 幅, 厚みを一定倍率で変化させることを意味し, 拡大率が  $n$  の評価モデルにおけるダイヤフラム長は  $l = n l_0$  の関係にある。  $l_0$  は等倍モデルにおけるダイヤフラム長である。 本計算においては, ダイヤフラム両端の圧電体および梁の幅方向の振動モードは考慮していない。 以下に, 1次共振周波数に関する計算結果を示すが, 高次の共振周波数においても各変数との関係はそのまま当てはまる。

#### 4.2.1 1次共振周波数と拡大率との関係

拡大率  $n$  を変化させた時の1次共振周波数の計算結果を図4に示す。

両者は,  $f = 73.8/n$  [KHz]の回帰直線と与えられ, 拡大率  $n$  と1次共振周波数は反比例の関係にあることがわかる。 すなわちダイヤフラムの全体を10倍にすると共振周波数は, 1/10となることを意味している。

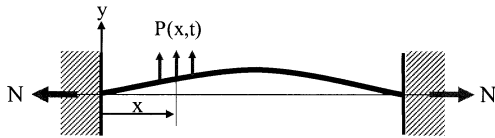


Fig.3 An analytical model of the diaphragm

Table 3 Parameters of the real size diaphragm

Mechanical Properties	Material	4-2Alloy
	Young's modulus : $E$	150GPa
	Poisson ratio : $\nu$	0.3
	Density : $\rho$	8.03 g/cm <sup>3</sup>
Dimensions (real size)	Length : $l$	0.5mm
	Width : $W$	0.1mm
	Thickness : $h$	4 $\mu$ m

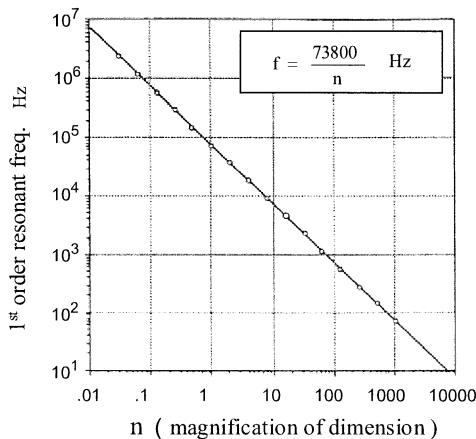


Fig.4 Relation between the first resonant frequency and the magnification of dimension

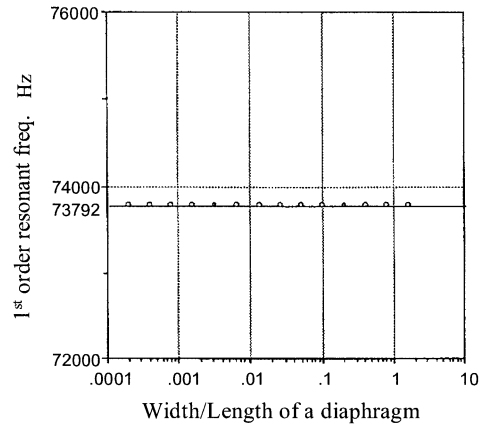


Fig.5 Relation between the first resonant frequency and the width/length of a diaphragm

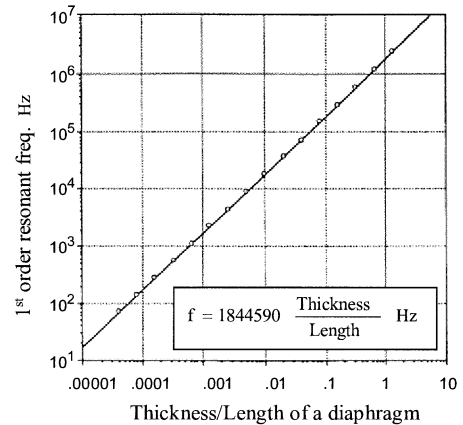


Fig.6 Relation between the first resonant frequency and the thickness/length of a diaphragm

#### 4.2.2 1次共振周波数とダイヤフラム幅との関係

ダイヤフラム幅と1次共振周波数の関係を求めるため, ダイヤフラム幅/ダイヤフラム長 =  $W/l$  をパラメータとして1次共振周波数を計算した。 結果を図5に示す。 ダイヤフラム長  $l$  を一定とおいた場合, 図5からダイヤフラム幅  $W$  を変化させても1次共振周波数は, 一定であり, ダイヤフラムの幅に依存しないことがわかる。

#### 4.2.3 1次共振周波数とダイヤフラム厚との関係

ダイヤフラムの厚さを変化させ (計算はダイヤフラムの厚みとダイヤフラムの長さの比を変化させて行った) 時の1次共振周波数の計算結果を図6に示す。

1次共振周波数は, ダイヤフラム厚み/ダイヤフラム長 =  $h/l$  の増加に伴いリニアに増加していることがわかる。 すなわち 1次共振周波数はダイヤフラム部分の厚さに比例し, 長さに反比例する。

#### 4.2.4 1次共振周波数と密度との関係

密度を変化させた時の共振周波数の計算結果を図7に示す。 両者の関係は  $f = 209/\sqrt{\rho}$  [KHz] と近似される。 このことから1次共振周波数は密度の1/2乗に反比例していることがわかる。

#### 4.2.5 1次共振周波数とヤング率との関係

図8に $\hat{E}$ を変化させた時の1次共振周波数の計算結果を示す。 両者の関係は,  $f = 18.354 \sqrt{\hat{E}}$  と表現できる。

$\hat{E} = E/(1-\nu^2)$  であるため, 共振周波数はダイヤフラムのヤング率  $E$  の1/2乗に比例していることがわかる。

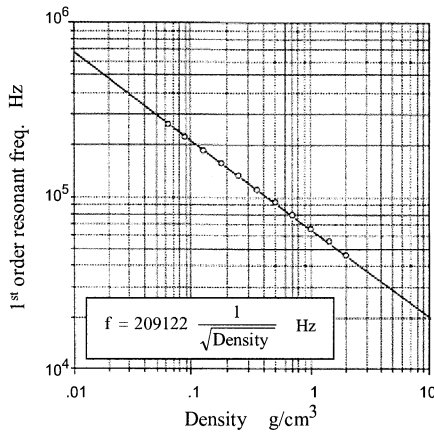


Fig.7 Relation between the first resonant frequency and the density of a diaphragm

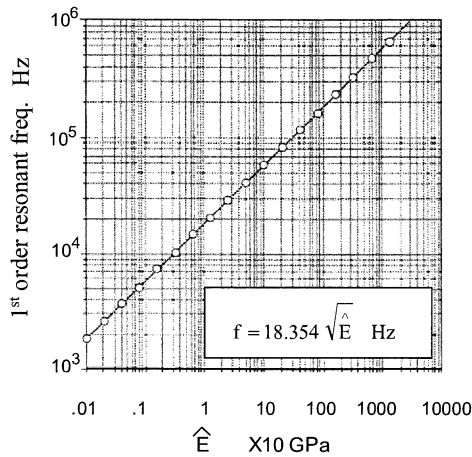


Fig.8 Relation between the first resonant frequency and the Young's modulus of a diaphragm

Table4 Relation between the parameters of the diaphragm and the first resonant frequency

Parameter	Resonance Frequency
Expansion ratio	Inverse proportion
Width	Independent
Thickness	Proportion
Density	Inverse proportion to the 1/2th power
Young's modulus $\hat{E} = E / (1 - \sigma^2)$	Proportion to the 1/2th power

4.2.6 解析結果のまとめ

以上まとめると、ダイヤフラムの各変数と1次共振周波数の関係は表4のようになる。

等倍モデル (幅  $W_0$ , 厚さ  $h_0$ , 長さ  $l_0$ , 密度  $\rho_0$ , 定数  $\hat{E}_0$ ) の1次共振周波数を  $f_0$  とするとき,  $n$  倍に拡大されたモデル (幅  $W$ , 厚さ  $h$ , 長さ  $l$ , 密度  $\rho$ , 定数  $\hat{E}$ ) の共振周波数  $f$  は, 図6および図7, 8 から導かれる  $f/f_0 = (h/l)/(h_0/l_0)$ ,  $f/f_0 = \sqrt{E/E_0}$ ,  $f_0/f = 1/\sqrt{\rho/\rho_0}$  の関係を用いると式(9)で表現される

$$f = f_0 \left( \frac{T}{T_0} \right) \sqrt{\frac{\hat{E}}{\rho}} \quad (9)$$

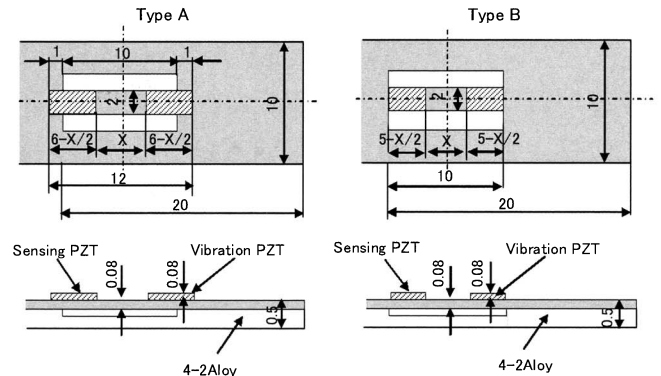


Fig.9 Structure and dimensions of the 20 times expansion model

等倍時の値を代入すると上式はさらに次のように簡略化できる。

$$f = 203.5 \frac{h [\mu\text{m}]}{n} \sqrt{\frac{\hat{E} [\text{GPa}]}{\rho [\text{g/cm}^3]}} \quad (10)$$

本構造のマイクロ加速度センサを試作, 評価するに当たっては, まず既存の評価法が適応可能な素材とサイズでモデルを製作し, その評価結果に基づいて徐々にモデルのスケールダウンと素材選択を行う方が, 設計の見通しがつきやすい上に課題が明確になる。式(10)を用いることで, 本来目標とするサイズの何倍も大きく, しかも素材が異なるモデルの実験から得た共振周波数や分解能をもとに本来のサイズのセンサの概略特性を推測することが可能になる。

5. 拡大モデルによる原理検証

5.1 拡大モデルにおける振動特性

5.1.1 拡大モデルの形状

表3に示す等倍寸法に対し, ダイヤフラム部寸法を20倍に拡大した図9に示すセンサ構造を試作し, 振動特性を評価した。

梁に加わる加速度をダイヤフラムの共振周波数変化としてとらえるため, ダイヤフラム両端の上面に励振および受信用に厚さ0.08mmのPZTを接着により配置した。ダイヤフラムとPZTの相対位置は, ダイヤフラムの振動モードが主として1次モードを想定したタイプA(図9左側)と3次モードを想定したタイプB(図9右側)の2タイプを試作した。梁, ダイヤフラムとも材料は4-2アロイであり, 各寸法はmmであり, 左側が受信用, 右側が励振用のPZTである。

5.1.2 拡大モデルの共振特性

上記2タイプのモデルについてPZT間の距離  $X$  をパラメータとして, 4V<sub>p-p</sub>の正弦波を励振側のPZTに印加し, ダイヤフラムを振動させ受信側のPZT出力より共振周波数の変化をスペクトラムアナライザで測定した。測定結果を図10に示す。上段には各タイプの周波数応答の一例を下段には  $X$  を変化 ( $X$  の変化に伴いPZT長も変化) させたときの受信側PZTからの出力を示す。

図10上段の図からわかるように, 各モデルとも1次共振を5KHz近傍, 2次共振が14KHz近傍, 3次共振を29KHz近傍に保有する。下段の図からタイプBは, 目論み通り3次モードでの出力が高い。感度が最も高くなるのは,  $X=2\text{mm}$  の時である。タイプAは1次共振での出力が高く, 最大感度は  $X=4\text{mm}$  の時である。

20倍拡大モデルについて計算から求めた各モードの共振周波数とタイプBの測定結果との対比を行った結果を表5に示す。

実験結果は計算結果に対し30%程度低い値を示しているが, 傾

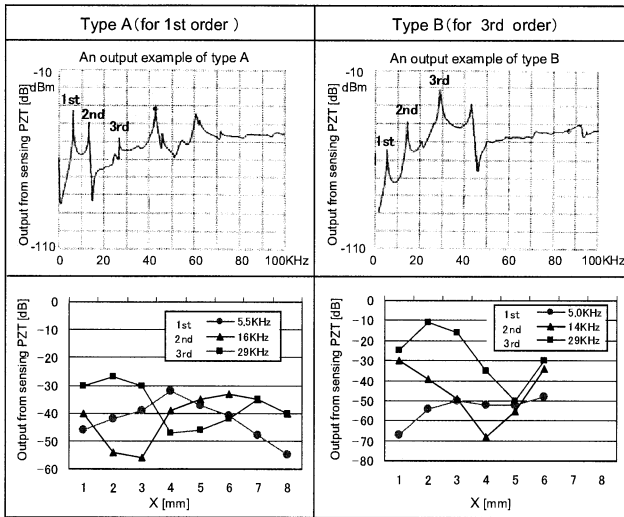


Fig.10 Measurement results of frequency response of the 20- times models

Table5 Comparison between experiment results and calculation value for resonant frequencies

Order	Calculation [Hz]	Experiment [Hz]	Deviation [%] (Cal.- Exp.) × 100 / Exp.
1	3,688	5,500	-33
2	10,167	14,000	-27
3	19,931	29,000	-31
4	32,947	42,000	-22

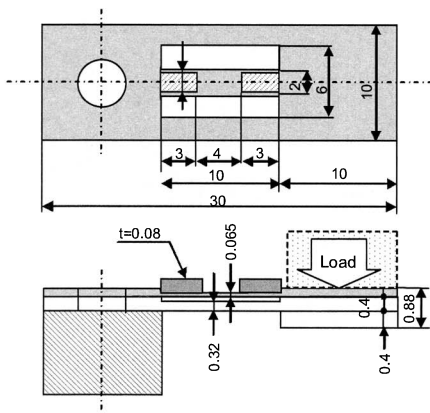


Fig.11 Acceleration sensor of 20- times dimension

向は一致しており、4.2.6節で述べた拡大モデル評価結果を基にマイクロ化を進める手法の適用が可能である。ただし、実験結果は、構造体の個体差によるばらつきが10%程度存在しており製作の高精度が必要である。

5.2 拡大モデルの加速度検出特性

図9に示したタイプB: X=4mmを用い、慣性質量も付加し、図11に示す加速度センサとして完成させた。

片持ち梁の先端に静荷重を印加することで、擬似的に加速度を印加した状態を作り、加速度変化に対しての3次共振周波数の変化を測定した。

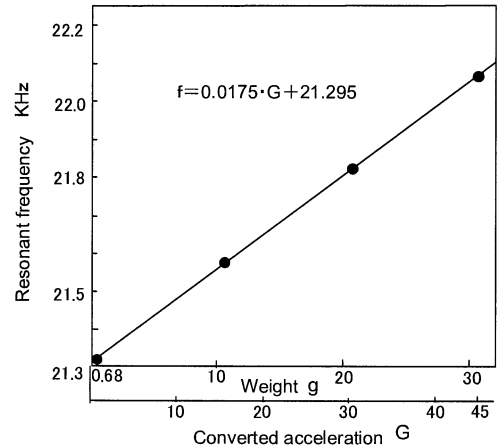


Fig.12 Acceleration sensitivity of 20- times model (3rd order resonant frequency type)

測定結果を図12に示す。横軸の加速度は、静荷重を梁の自重を除いた等価加速度である。

この図から、印加加速度に対しリニアなダイヤフラムの3次の共振周波数変化が得られており、加速度センサとして良好な特性を有していることがわかる。また検出感度も1Gあたり17.5Hz、800ppmの特性を有することが確認できた。実サイズでは、計算上共振周波数が20倍以上高くなるため、さらなる高感度化が期待できる。

6. 結 言

本研究では、次のような結果を得た。

- (1) マイクロ化においても高感度が期待できる片持ち梁構造の共振型の加速度センサを考案した。
- (2) 考案した共振型加速度センサについて、シミュレーションにより①センサの分解能と梁寸法の関係、②ダイヤフラムの構造寸法と共振周波数の関係を明らかにした。
- (3) さらに20倍の拡大モデルによる原理検証を行い、1次から3次にわたる共振モードの確認と1Gあたり800ppmの周波数変化感度を確認し、共振型加速度センサとして十分な基本特性を有することを検証した。
- (4) 以上の検討により、共振型加速度センサとして原理的に実現の目処を得られたため、今後は、モデルの構造の最適化と、マイクロ化の研究を進めて行く。

参 考 文 献

- 1) L.M. Roylance and J.B. Angell, A Batch-Fabricated Silicon Accelerometer, IEEE-Trans. on Electron Devices, ED-26, 12, (1979) 1911.
- 2) S. Suzuki and S. Tuchtani, Semiconductor Capacitance-type Accelerometer with PWM Electrostatic Servo Technique, Sensors and Actuators, A21-A23, (1990) 316.
- 3) K.Yamada, and T.Kuriyama, A new model mode controlling method for a surface format surrounding mass accelerometer Transducers '91, (1991) 655.
- 4) H.Seidel, U.Fritsch, R.Cottinger and J.Schlke, A Piezoresistive Silicon Accelerometer with Monolithically Integrated CMOS -circuitry, Transducers'95, (1995) 597.