

平成22年6月25日現在

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2007～2009

課題番号：19560047

研究課題名（和文）周波数変化型高感度2軸加速度センサに関する研究

研究課題名（英文）Study of Frequency-Change-Type High-Sensitivity Two-Axis Acceleration Sensor

研究代表者

菅原 澄夫（SUGAWARA SUMIO）

石巻専修大学・理工学部・教授

研究者番号：00007179

研究成果の概要（和文）：本研究は、新しい周波数変化型高感度2軸加速度センサを提案し、有限要素法による設計を行い、実験的にその妥当性を検証したものである。加速度を周波数の変化として検出することを特徴とする本センサは、加速度と周波数変化の関係が直線となり好ましい。また、加速度の印加方向の吟味及び折り曲げ支持棒の適用により高感度化を図り、重力場を利用して感度測定を行い、有限要素法による解析値とも良く一致することが検証された。

研究成果の概要（英文）：The construction of a frequency-change-type two-axis acceleration sensor is proposed and is designed using the finite-element method. The analyzed relationship between the applied acceleration and the resonance frequency change becomes linear in this construction. Moreover, methods for realizing high sensitivity are proposed. Selecting the axis to apply the acceleration and using bent support bars are both effective methods to increase sensor sensitivity. The sensor characteristics are measured in the gravitational field. As a result, the analyzed characteristics of the sensor agreed with the experimental ones.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	1,000,000	300,000	1,300,000
2008年度	1,100,000	330,000	1,430,000
2009年度	1,400,000	420,000	1,820,000
年度			
年度			
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：応用物理学・工学基礎，応用物理学一般

キーワード：加速度センサ，力センサ，横振動子，軸力，有限要素法，周波数変化、2軸センサ，折り曲げ支持棒

1. 研究開始当初の背景

現在，マスコによる低価格で超小型の高感度MEMS加速度センサが要求されており，車

両やロボットなど運動物体の姿勢制御用センサにおける加速度センサなどとして期待され、多軸化の傾向にある。

本研究では、軸力によって横振動子の共振周波数が変化する現象を利用して、このような加速度センサを開発しようとするものである。この原理を用いたセンサとしては、国内では面内振動利用の横振動棒や水晶2脚振動子をそれぞれ2個利用した1軸センサ構成が提案されて来たが^{(1), (2)}、複数の横振動棒を組み合わせた振動子を用いる限りにおいては本質的に高感度化は不可能であった。これに対して、申請者らは時期をほぼ同じくして高感度力センサとして利用できる新しい横振動子を考案し^{(3), (4)}、これを利用して周波数変化型の高感度加速度センサが構成できることを提案すると共に^{(5), (6)}、さらには単結晶シリコンを用いた高感度1軸MEMS加速度センサを実現させた⁽⁷⁾。このことによって、周波数変化型加速度センサはマスポロ化の可能なMEMSセンサとして十分適用可能であることが明らかになった。その他、MEMS加速度センサとしては、単結晶シリコンのピエゾ抵抗効果や容量変化による加速度検出を利用した構成が一般的でよく知られている⁽⁸⁾。しかし、前者のピエゾ抵抗効果を利用した構成は高性能化が期待できず、簡易型センサの応用に留まっている。また、後者の容量変化を利用した構成はその構造の複雑さに起因する信頼性の点で問題があり、高価な駆動回路や信号処理回路の使用も避けられない。国内では、この一般的な1軸及び3軸の加速度センサについては報告例が見られるが、1個のセンサで2軸方向の加速度を検知するセンサ構成については未開発になっている⁽⁸⁾。特に、本研究におけるセンサのように面垂直振動する新構造の横振動子を力センサとして組み込み、しかも2軸方向の加速度検知が可能な周波数変化型の高感度加速度センサについては開発例が見当たらず、そのMEMSセンサへの応用が大いに期待されている。

一方、外国特許においては、軸力を利用した1軸加速度センサとして、1990年に2脚水晶振動子1個あるいは複数個組み合わせたセンサ構成が報告されているが⁽⁹⁾、この場合高感度化は不可能で立体構成のためマスポロ化も難しい。また、最近単結晶シリコン構造体を利用して容量変化により検出する加速度センサについて報告されているが、新規性はない。本研究におけるセンサのような新しい周波数変化型の高感度な2軸センサ構成については、外国においても開発例は見当たらない。

本研究は、このように現在内外で皆無の新しい加速度センサ構成に関するもので、何と言っても単結晶シリコンを構造体としたマイクロマシニングによるマスポロに適し

た簡素な構成に成り得ること、また共振周波数が振動子の板厚で決定されるためセンサ間の製造ばらつきが小さいことなどが特長で、高感度で低価格の2軸センサが構成できる意義は極めて大きく、その成果は大いに期待されている。この新構成の2軸加速度センサについては、既に研究の一部を学会で報告して来た⁽¹⁰⁾。

【参考文献】

- (1) T. Koitabashi, S. Kudo, S. Okada, and Y. Tomikawa, Finite Element Method Simulation of a New One-Chip-Style Quartz Crystal Motion Sensor with Two Functions of Gyro and Acceleration Detection, Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 40, No. 9B, 2001, 5756-5760.
- (2) T. Koitabashi, S. Kudo, S. Okada, and Y. Tomikawa, Improvement of a One-Chip-Style Quartz Crystal Motion Sensor for Detection of Angular Velocity and Acceleration, Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 41, No. 5B, 2002, 3403-3408.
- (3) 菅原澄夫, 高橋 淳, 富川義朗, 軸力による共振周波数変化を利用した平面型力センサの有限要素法解析, 日本音響学会講演論文集(II), No. 3-P-10, Oct., 2001, 1199-2000.
- (4) S. Sugawara, J. Takahashi, and Y. Tomikawa, Construction of a Flat-Type Force Sensor Using the Resonance Frequency Shift by Axial Force, Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 41, Part 1, No. 5B, 2002, 3433-3438.
- (5) 菅原澄夫, 高橋 淳, 共振周波数変化を利用した平面型加速度センサについて, 日本音響学会講演論文集(II), No. 2-Q-18, Mar., 2002, 1115-1116.
- (6) J. Takahashi, S. Sugawara, and J. Terada, Basic Consideration of a Flat-Type Acceleration Sensor Utilizing the Resonance Frequency Shift in the Flexural Vibrator, Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 42, Part 1, No. 5B, 2003, 3124-3129.
- (7) 菅原澄夫, 寺田二郎, 周波数変化型単結晶シリコン加速度センサの構成, 第25回超音波エレクトロニクスの基礎と応用に関するシンポジウム講演予稿集, No. P2-14, Oct., 2004, 185-186. (2004-10).
- (8) 工業調査会編, センサ/計測モジュール

活用技術百科”, 1996, 112-115.

(9) US Patent, No. 4,939,935 (1990).

(10) 例えば, 菅原澄夫, 鈴木博之, 佐々木保晃, 周波数変化型2軸加速度センサの構成について, 東北地区若手研究者研究発表会論文集, No. YS-4-58, 2006, 115-116.

2. 研究の目的

本研究は, 横振動棒の共振周波数が軸力によって変化する現象を利用して, 加速度を周波数変化として検出可能な国内外に皆無の全く新しい構造の2軸加速度センサを実現することを目的としている。具体的には, 新構造センサに関するこれまでの申請者らの研究成果に基づき, 申請期間中に新構造センサの有限要素法による設計を行い, その試作を行うと共にセンサ特性の実験的検証を行い, 解析結果の妥当性を検証する。

3. 研究の方法

本センサに関する研究には既に取りかかって来ており, センサ構成の考案並びにその構造設計に関しては一部終了しており, これらの結果を踏まえて以下のように3年間に渡って計画した。

(1) 平成19年度

①センサ基本構造の支持棒形状の考案と設計

図1が初年度検討する2軸加速度センサの基本構造で, 表1はセンサの加速度 α に起因する軸力($F=M\alpha$, M :質量)の方向と振動子1, 2の共振周波数変化量 Δf の関係である。 Δf の大きさと組合せから, 加速度の大きさと印加方向が検出可能で, 本構成では2軸方向の感度が等しくなることを既に公表している。図2はその特性例で, 金属(SUS304)を用いて外形寸法を約 $90.0 \times 95.8 \times 10.2\text{mm}^3$ とした場合である。また, 図3は使用する横振動子の面外1次モードを示している。

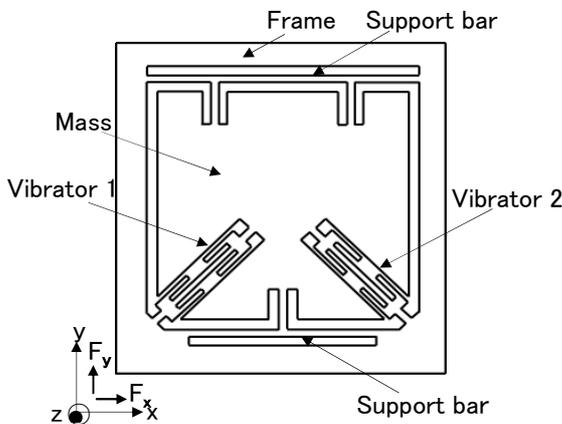


図1. 2軸加速度センサの基本構造

表1. 軸力 F と共振周波数変化 Δf の関係

	Vibrator 1	Vibrator 2
$F_x > 0$	$\Delta f > 0$	$\Delta f > 0$
$F_x < 0$	$\Delta f < 0$	$\Delta f < 0$
$F_y > 0$	$\Delta f < 0$	$\Delta f > 0$
$F_y < 0$	$\Delta f > 0$	$\Delta f < 0$

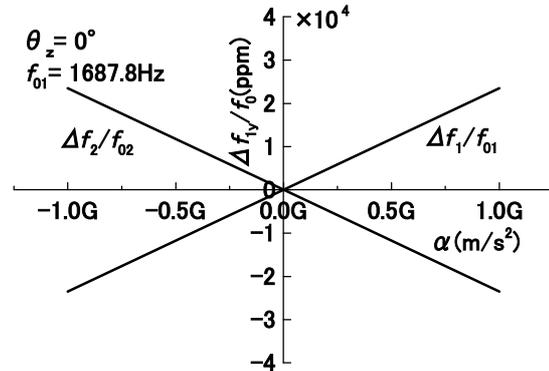


図2. 2軸センサの印加加速度特性例

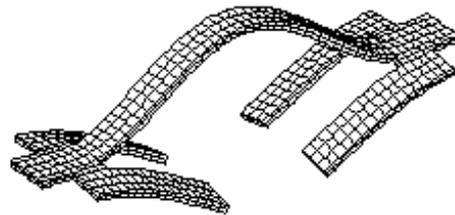


図3. 横振動子の面外1次モード

②センサ試料の製作と特性測定

金属(SUS304)センサ試料の試作実験により, 本構成の妥当性をまず検証する。センサの横振動子部分に圧電セラミックスを接着させて圧電型センサを構成して, 重力場を利用して回転台により傾斜角を変化させ, $\pm 1G$ の範囲内で加速度を印加させた場合の周波数変化率 $\Delta f/f_0$ を測定する。

(2) 平成20年度

①センサの高感度化の工夫

まず, 支持棒を折り曲げて2軸方向の支持スチフネス値が小さくて等しくなる支持形状を明らかにする。

次いで, 折り曲げ支持棒を採用した高感度センサを z 軸回りに回転させ, 感度の最大となる条件を明らかにする。

②高感度センサの特性の検討

さらに, これら二つの高感度化の工夫を併用したセンサ特性について検討する。

(3) 平成21年度

①横振動子の感度の検討

各種横振動子の力センサとしての感度比較を行い、本加速度センサに使用している構造が好ましいことを確認する。

②高感度センサの特性改良

最終的に好ましいセンサ特性を得るための各部の寸法変更や調整を行う。

4. 研究成果

本研究では、新しい周波数変化型2軸加速度センサを提案し、その高感度化の工夫を行うと共に、金属センサ試料を試作してその実験的検証を行った。

(1) 新しい2軸加速度センサの提案

①本センサの基本構造は、図1のような互いに45°に対称配置された2個の横振動子、質量、支持棒及びフレームより構成されており、これまでに見られない特徴ある構造を有している。図4は、金属(SUS304)を用いて外形寸法が約90.0×95.8×10.2mm³の2軸加速度センサを試作した結果である。

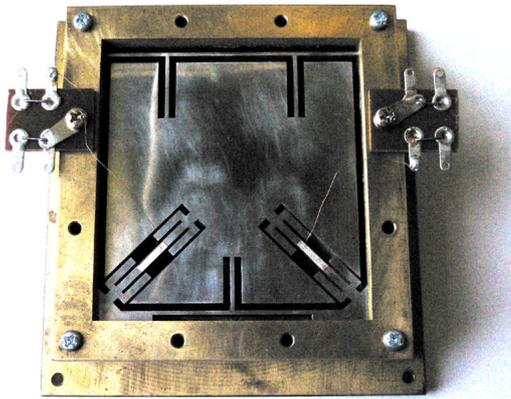


図4. 2軸センサの基本構造の試作結果

②センサの基本構造では、π型および逆T型支持棒の使用が提案されており、有限要素法解析によりxおよびyの2軸方向への支持スチフネスが等しくなるように、その各部寸法値が決定されている。

③本センサを試作し、加速度と共振周波数の関係を測定したところ、有限要素法による解析結果とほぼ一致することが確かめられ、その結果の妥当性が確認された。

(2) 2軸センサの高感度化

センサの高感度化を図るため、以下の二通りの手法の併用を提案した。

①折り曲げ支持棒の適用

センサの基本構造で使用したπ及び逆T型支持棒の代わりに棒を折り曲げて2軸方向の支持スチフネス値が小さくて等しくなる形状を提案し、支持棒の全スチフネス値が約1/5

に低減させた。図5はこの場合のセンサ構造で、2軸方向共同一感度を持つ直線特性が実現できる。

図6は図4と外形寸法が等しい金属センサを試作した結果で、共振周波数 f_0 が約1.688kHz、印加する加速度1G (=9.8m/sec²)当たりの共振周波数変化率 $\Delta f/f_0$ として約23,498ppmなる値が実現された。

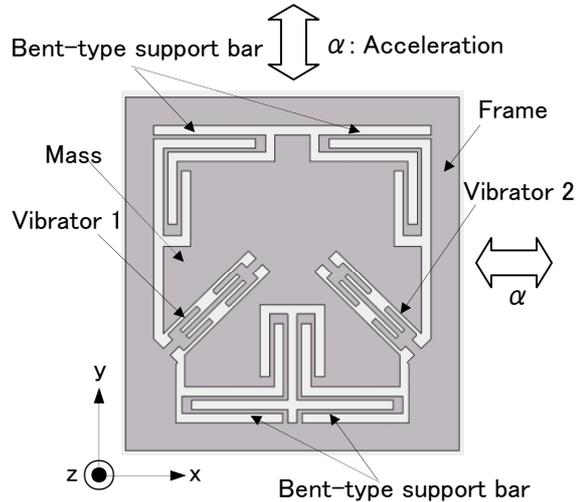


図5. 折り曲げ支持棒を用いた高感度センサ

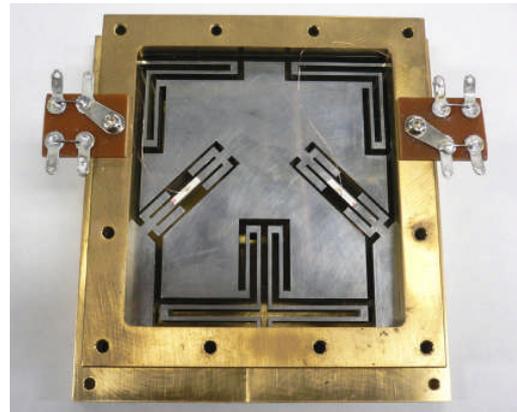


図6. 折り曲げ支持棒利用の2軸加速度センサの試作結果

センサの感度は基本構造と比較して、外形寸法が等しい場合はこの場合殆ど感度の増加は無く、折り曲げ支持棒を利用した効果は見られなかった。この理由は、センサの外形寸法を等しく設計したために、折り曲げ支持棒の適用によってセンサの質量部分が減少し、折り曲げ支持棒使用による高感度化の効果が現れなかったことに起因している。また同一質量の場合はその効果は大きく、感度が32%増加した。

②加速度の印加方向の検討

折り曲げ支持棒を適用した高感度センサを

図7のようにz軸回りに -45° 回転させて $\theta_z = -45^\circ$ として使用すると、感度が41%増加するはずのところ、外形寸法が等しい場合は34%、同一質量の場合39%それぞれ感度が増加する。41%とならないのは、加速度が印加されたとき、質量が僅か回転していることに起因するものと考えられ、最終的にはこれらの高感度化の工夫によって両者はそれぞれ34%、71%の感度増加が図れる。

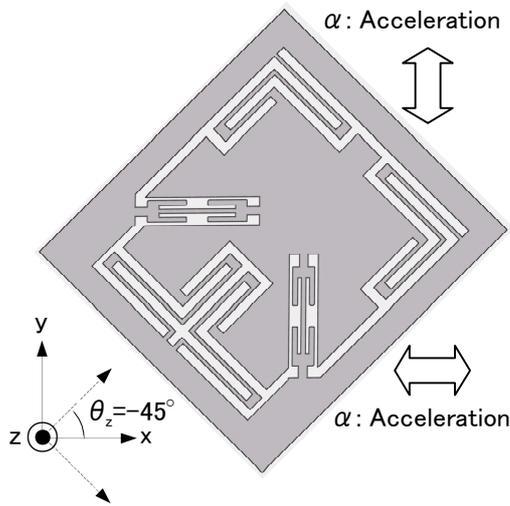


図7. $\theta_z = -45^\circ$ として使用する加速度センサ

4. 加速度センサ用横振動子の検討

加速度センサに使用可能な各種の金属横振動子を提案し、両端での振動変位及び軸力による共振周波数変化について有限要素法解析を行った。

(1) 面内モード及び面外モードで振動する各種横振動子の力センサとしての感度比較を行ったところ、本加速度センサに使用した構造が著しく高感度となり、好ましい構造であることが実験的にも確認された。

(2) この場合、横振動子の感度の実測値は、駆動用圧電セラミックス接着の影響で解析値より約34%低下した。

5. 2軸加速度センサの特性改善

(1) 2軸センサにおける感度低下の原因は、前同様の横振動子に駆動のため接着された圧電セラミックスの影響であった。

(2) 2軸センサをセンサ面に垂直なz軸回りに -45° 回転して使用すると感度が41%増加し好ましくなることが予想されるが、本来検出されるべき軸方向の加速度以外に約6.1%の他軸方向の加速度の影響が図8(a)のように現れることが明らかになった。

(3) この原因はセンサの質量が2軸方向の加速度に対して何れもわずかに回転し完全な

並進運動していないことに起因しており、図9のようなセンサの重心を移動させて質量の回転を可能な限り無くした構成ではその影響は図8(b)のように約0.54%に低減でき、良好な2軸センサ特性が実現できることが明らかにされた。図10はセンサにx軸方向に加速度が印加された場合の運動を解析した結果で、同図(a)で現れていた質量の回転が重心を移動させた構成では同図(b)のように回転が殆ど発生していない。

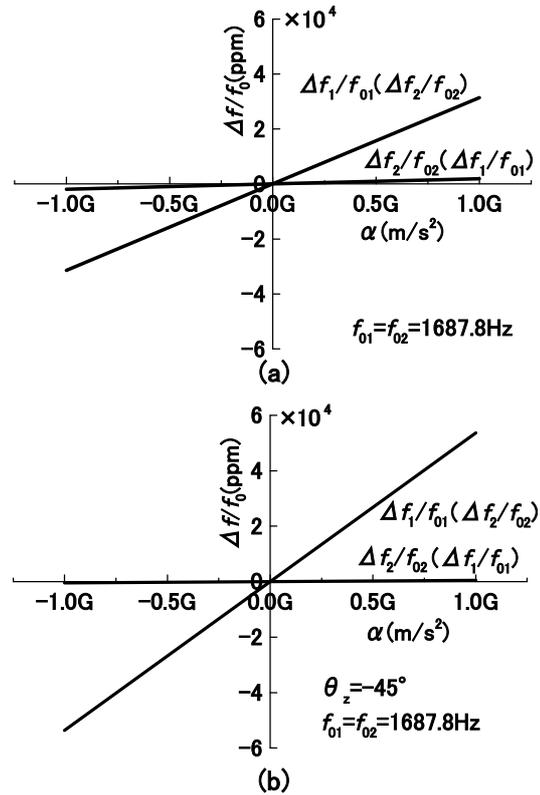


図8. 2軸センサの特性改善結果, (a)質量の回転が僅か発生している場合, (b)回転が最小に抑えられた場合

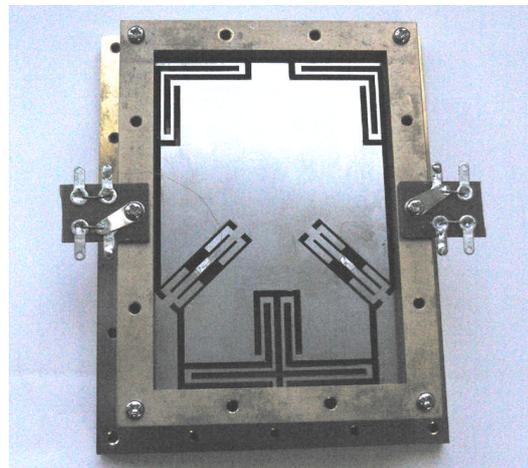


図9. 重心移動した2軸センサの試作結果

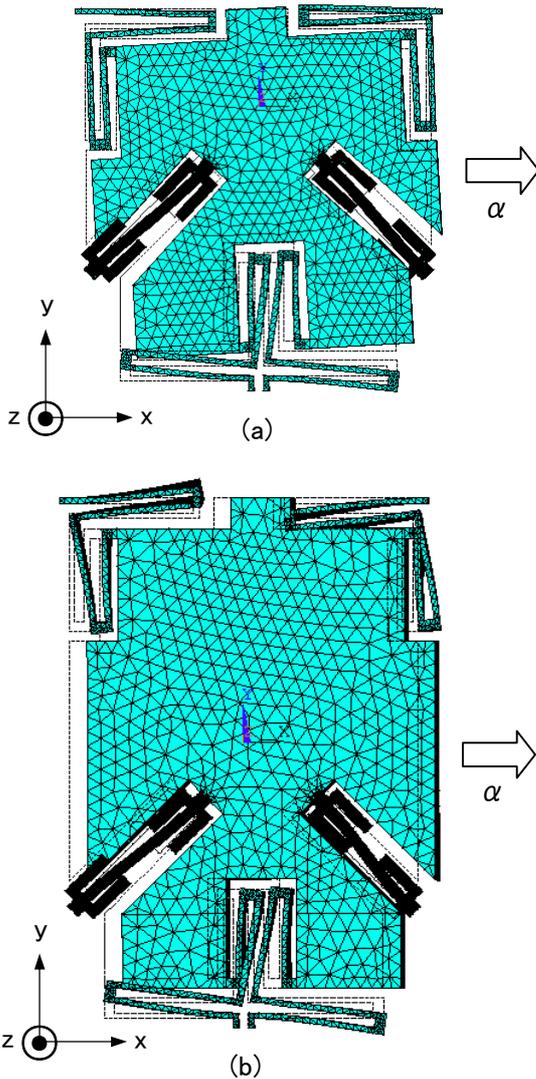


図 10. 2 軸センサの加速度印加時の運動、
(a)質量の回転が生じる場合、(b)
質量の回転がない場合

(4) 図 11 はシリコン単結晶を用いた場合の図 1 に示される基本構造のセンサ特性で、また図 12 は折り曲げ支持棒を用いた構造の特性である。なお、センサの外形は両者共ほぼ $4.0 \times 4.2 \times 0.5 \text{mm}^3$ である。

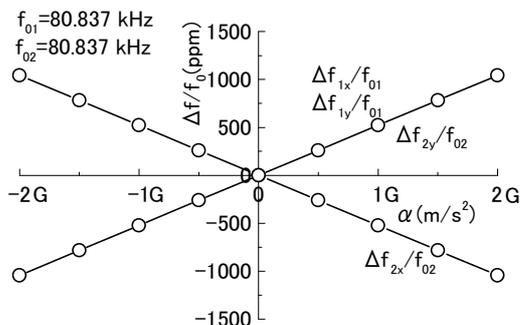


図 11. 基本構造のシリコン単結晶センサの特性

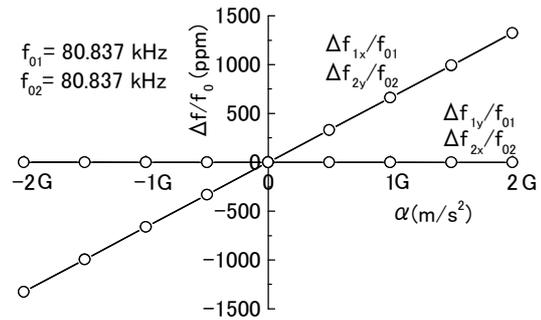


図 12. 折り曲げ支持棒を使用したシリコン単結晶センサの特性

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 7 件)

- ① Sumio Sugawara, Hiroyuki SUZUKI, and Takashi Saito, Construction of Frequency-Change-Type Single-Crystal Silicon Two-Axis Acceleration Sensor, Jpn. J. Appl. Phys., 査読有, Vol. 46, No. 7B, 2007, 4652-4655.
- ② 菅原澄夫, 周波数変化型単結晶シリコン 2 軸加速度センサの高感度化に関する研究, 超音波TECHNO, 査読無, Vol. 20, No. 3, 2008, 64-66.
- ③ 菅原澄夫, 周波数変化型単結晶シリコン加速度センサの傾斜角センサへの応用, 超音波TECHNO, 査読無, Vol. 20, No. 4, 2008, 74-76.
- ④ Sumio Sugawara, Tokiharu Watanabe, and Jiro Terada, Application of Frequency-Change-Type Single-Crystal Silicon Acceleration Sensors to Inclination Angle Sensor, Jpn. J. Appl. Phys., 査読有, Vol. 47, No. 5, 2008, 4048-4051.
- ⑤ Sumio Sugawara, and Jumpei Koike, Theoretical Studies of Realizing High Sensitivity for Frequency-Change-Type Single-Crystal Silicon Two-Axis Acceleration Sensor, Jpn. J. Appl. Phys., 査読有, Vol. 47, No. 8, 2008, 6578-6582.
- ⑥ Sumio Sugawara, Masaki Yamakawa, and Subaru Kudo, Finite Analysis of Sensitivity of Frequency-Change Force Sensor, Jpn. J. Appl. Phys., 査読有, Vol. 48, 2009, 07GF04-1-07GF04-5.
- ⑦ 菅原 澄夫, 周波数変化型単結晶シリコン加速度センサの傾斜角センサへの応用, 月刊「化学工業」, 査読無, Vol. 60, No. 9, 2009, 45-49.

[学会発表] (計4件)

- ① Sumio Sugawara, and Tokiharu Watanabe, Application of Frequency-Change-Type Single-Crystal Silicon Acceleration Sensors to Inclination Angle Sensor, Symp. on Ultrason. Electron., Nov., 2007, Tsukuba.
- ② Sumio Sugawara, and Jumpei Koike, Realization of High Sensitivity of Frequency-Change-Type Single-Crystal Silicon Two-Axis Acceleration Sensor, Symp. on Ultrason. Electron., Nov., 2007, Tsukuba.
- ③ Sumio Sugawara, and Masaki Yamakawa, A Study on Sensitivity of Frequency-Change-Type Force Sensor, Proc. of Symp. on Ultrason. Electron., Vol. 29, No. 1P4-7, Nov., 2008, 107-108.
- ④ Sumio Sugawara, and Yu Kajiwara, Experimental Study of Sensitivity of Frequency-Change-Type Two-Axis Acceleration Sensor, Symp. on Ultrason. Electron., Nov., 2009, Kyoto.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

菅原 澄夫 (SUGAWARA SUMIO)
石巻専修大学・理工学部・教授
研究者番号：00007179

(2) 研究分担者

工藤すばる (KUDO SUBARU)
石巻専修大学・理工学部・教授
研究者番号：20214968