

SOI ウェハを用いた 5 軸モーションセンサとその設計一手法

正員 岡田 和廣* 非会員 角谷 哲哉*
 非会員 松 良幸* 正員 渡部 善幸**
 正員 三井 俊明** 正員 峯田 貴***
 正員 杉山 進****

5-Axis Motion Sensor using SOI Wafer and the Design Method

Kazuhiro Okada*, Member, Tetsuya Kakutani*, Non-member, Yoshiyuki Matsu*, Non-member,
 Yoshiyuki Watanabe**, Member, Toshiaki Mitsui**, Member, Takashi Mineta***, Member,
 Susumu Sugiyama****, Member

This paper presents a 5-axis motion sensor that can detect 3-axis acceleration and 2-axis angular rate capacitively. This sensor is fabricated by SOI bulk-micromachining, and is sealed vacuum by anodic bonding and activation of the non-evaporated getters. By applying Z-axis reference vibration of a proof mass with an electrostatic force at resonant frequency, 5-axis motions can be detected capacitively at non-resonant detection mode. How the resonant frequency of driving direction and detection direction of this sensor changed by size of the weight, beam width, beam thickness and beam length, was clarified. Three samples were made by this design method, and acceleration characteristic and angular rate characteristic were measured, and the effectiveness was shown.

キーワード：5 軸，モーション，加速度，角速度，ジャイロ，マイクロマシニング，コリオリ，SOI，RIE

Keywords : 5-axis, motion, acceleration, angular rate, gyro, micromachining, Coriolis, SOI, RIE

1. 緒 論

最近，加速度センサと角速度センサは，MEMS 技術の進歩により性能の向上，低価格，小型化が可能になり，それに伴い，自動車分野（シャシー制御，GPS ナビゲーション），ロボット分野，そして民生分野などの幅広い分野で使われるようになった。また，加速度センサや角速度センサの多軸化に伴い，最近では加速度と角速度を同時に検出する多軸モーションが多く分野で望まれている。現在，物体のモーションセンシングには，1 軸センサを複数組み合わせ

使われているが，サイズやコスト等の点で問題であった。

本論文で報告する MEMS 型 5 軸モーションセンサは 3 軸加速度成分 (A_x, A_y, A_z) と 2 軸角速度成分 (Ω_x, Ω_y) を 1 個の検出素子で同時に検出できることから，小型化・低価格化が可能であり，従来の多軸モーションセンサに比べ優位性が高い。著者らは既に，電磁駆動型の 5 軸モーションセンサ⁽¹⁾，Si-Si 直接接合構造の Si バルクマイクロマシニング技術を用いた 5 軸モーションセンサを報告し⁽²⁾，3 軸加速度と 2 軸角速度の検出原理を示した。これらセンサは実用化の点で，真空封止や組立てが困難という問題があった。

これらの問題を改善するため，Deep RIE を用いた SOI バルクマイクロマシニングと真空陽極接合によって，新しい SOI 構造の 5 軸モーションセンサを開発したので報告する。また，5 軸モーションセンサの角速度感度を向上させるために，駆動方向と検出方向の共振周波数を制御する必要がある。ここでは，センサの錘のサイズ，ビーム幅，ビーム厚とビーム長さを変えることで共振周波数がどのように変化するかを解析し，実際に作製した試料と比較することで，その設計方法の有効性を示す。

* 株式会社ワコー
 〒330-0854 埼玉県さいたま市大宮区桜木町 4-241-2
 WACOH Corporation

** 山形県工業技術センター
 〒990-2473 山形県山形市松栄 2-2-1
 Yamagata Research Institute of Technology

*** 弘前大学理工学部
 〒036-8561 青森県弘前市文京町 2-2-1
 Faculty of Science and Technology, Hirosaki University

**** 立命館大学理工学部
 〒525-8577 滋賀県草津市野路東 1 丁目 1-1
 College of Science and Engineering, Ritsumeikan University
 1-1-1 Noji-higashi, Kusatsu-shi, Shiga 525-8577

2. センサ構造と作製プロセス

今回開発したモーショセンサは、図 1 に示すように基板シリコン(sub-Si, $675 \mu\text{m}^3$), 埋め込み酸化層(BOX, $2 \mu\text{m}^3$) および活性層シリコン(act-Si, $20 \mu\text{m}^3$)から成る SOI ウェハをバルクマイクロマシニングによって加工し、その両面に低温接合用のガラスウェハ(旭テクノグラス社, SW-Z, $500 \mu\text{m}^3$)を真空中で陽極接合して作製した⁽³⁾。錘は、SOI 基板の活性層からなる十字型のシリコン梁によって保持される。上下の各ガラス表面に 5 個の電極が形成されている。下部ガラス基板上(ガラス-2)に形成された電極が錘周辺のシリコン柱を經由して、また、上部ガラス基板上(ガラス-1)の電極は柱の上面を經由して表面の配線用のパッドに繋がる。これを図 2 に示す。センサ内部からの配線のために、上部ガラス基板には貫通口が図 3 に示されるように空けられている。上部ガラス基板と下部ガラス基板には十字型の中心電極(T0 と B0)と周囲の電極(T1-T4 および B1-B4)が形成され、静電力駆動および容量検出のために使用される。

今回開発した 5 軸モーショセンサの外観写真を図 4 に示す。チップサイズは $5.0 \times 5.0 \times 1.7 \text{mm}^3$ である。このセン

サは、ガラス、SOI 基板およびガラスの 3 層から成る。錘を包含するキャビティの内部は空気層のダンピング効果を防ぐために、真空にする必要がある。そのために、キャビティ内に NEG ゲッターが内蔵されている。キャビティ内の真空封止は上下のガラス基板(ガラス-1 とガラス-2)と SOI 基板の真空中での陽極接合と、ゲッター材の活性化により可能となる。

次に、本センサの作製プロセスを図 5 に示す。

[Process-1] SOI ウェハは錘、梁、シリコン支柱、上部ギャップを形成するために、20wt%TMAH 水溶液によって両面からエッチングされる。BOX 層に穴を明け Au/Cr コンタクトパッドを形成することによって、基板 Si と活性層 Si の導通を取る。錘上面の Pt/Cr 金属層は、陽極接合中の貼り付き防止のために形成される。底面の Pt/Cr 金属層は Deep RIE の後にイオン衝撃からの保護のために形成される。

[Process-2] SOI ウェハと下部ガラスウェハ(ガラス-2)の陽極接合後に、基板 Si は、Deep RIE によってエッチングされ、錘、シリコン支柱およびゲッターを挿入するための NEG ポケットを形成する。

[Process-3] NEG ゲッター(非蒸着型ゲッター剤 SAES Getters Japan)は NEG ポケットに挿入される。上部ガラスウェハ(ガラス-1)は真空封止のため、 300°C , 30mTorr でガラス-1 に-1kV の電圧を印加することによって SOI ウェハと陽極接合される。最後に各電極を分離するためにガラス-1 の上面を浅くダイシングした後に、ウェハはチップに分割される。

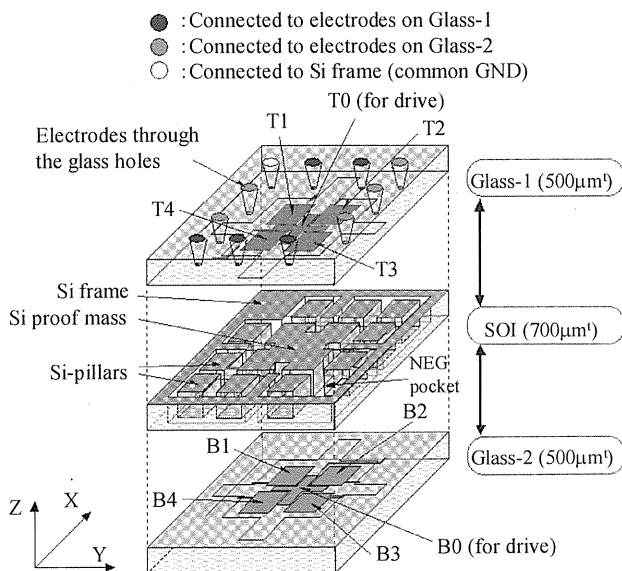


図 1 センサの構造
Fig. 1. Sensor structure.

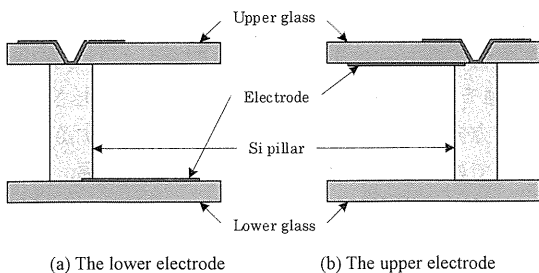


図 2 ガラス基板からの外部配線方法
Fig. 2. The wiring from glass substrates to the outside.

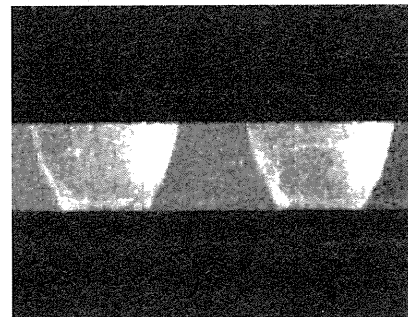


図 3 ガラス貫通口
Fig. 3. The through hole of the glass.

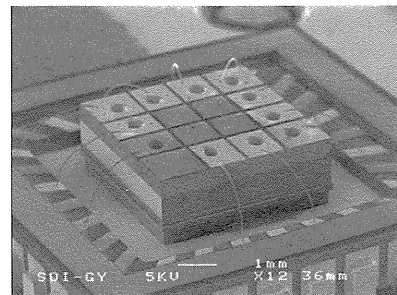


図 4 5 軸モーショセンサの外観写真
Fig. 4. Photograph of the 5-axis motion sensor.

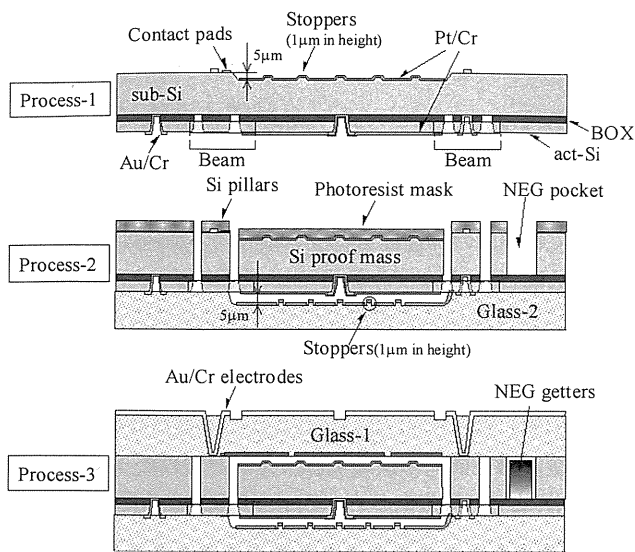


図5 センサ作製プロセス

Fig. 5. Fabrication process sequence of the sensor.

3. 原理

5軸モーショセンサは3軸加速度 (A_x, A_y, A_z) と2軸角速度 (Ω_x, Ω_y) を検出するものである。加速度の検出はニュートンの法則 ($F=ma$)、角速度の検出はコリオリの法則 ($F_c=2mV \cdot \Omega$) にそれぞれ基づく。

〈3・1〉 加速度の検出 錘に加速度が作用するとニュートンの法則から、加速度の方向に力が発生する。X(Y)軸方向に加速度が作用すると錘は図6(a)のように変位し、また、Z軸方向に加速度が作用すると錘は図6(b)のように変位する。この変位により、上部電極と錘の電極(共通電極)間の静電容量と下部電極と錘の電極(共通電極)間の静電容量がそれぞれ変化する。3軸の加速度成分 (A_x, A_y, A_z) はその変化量で求められる。

今回開発した5軸モーショセンサでは、以下の静電容量素子の組み合わせで、3軸加速度成分 (A_x, A_y, A_z) を検出した。

$$A_x(F_x) : C_{x+}(T1+T2) - C_{x-}(T3+T4)$$

$$A_y(F_y) : C_{y+}(B1+B4) - C_{y-}(B2+B3)$$

$$A_z(F_z) : C_{x+}(T1+T2) + C_{x-}(T3+T4)$$

〈3・2〉 角速度の検出 速度成分を持った物体に角速度が作用すると、コリオリ力が発生する。2軸角速度成分 (Ω_x, Ω_y) の検出のために、錘をZ軸方向に振動させる。ガラス-1の中央に配置された上部の固定電極(T0)と錘の電極(共通電極)間とガラス-2の固定電極(B0)と錘の電極(共通電極)間に位相の180度異なる交流信号を付加すると、十字型のシリコン梁によって保持され錘はクーロン力でZ軸に単振動する。この時、錘にY軸周りの角速度 Ω_y が作用すると、X軸方向にコリオリ力 F_{cx} が発生し、また、X軸周りの角速度 Ω_x が作用すると、Y軸方向にコリオリ力 F_{cy} が発生する。

$$F_{cx} = 2mV_z \cdot \Omega_y$$

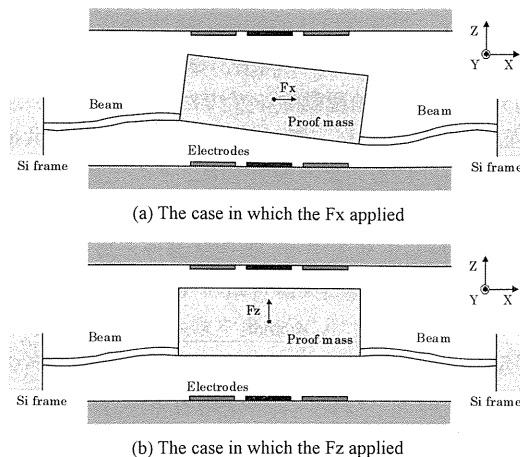


図6 力(加速度)が作用したときの錘の動き

Fig. 6. Mass movement in the acceleration.

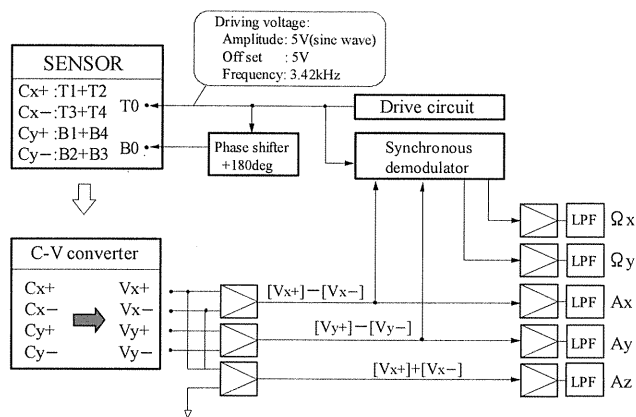


図7 5軸モーショセンサの回路ブロック図

Fig. 7. Circuit block diagram of 5-axis motion sensor.

$$F_{cy} = 2mV_z \cdot \Omega_x$$

このコリオリ力は錘の速度に同期し、錘の変位は図6(a)の加速度が作用したときの力(ニュートンの法則)が作用したときと同じようになる。この変位は速度が最大になった時すなわち原点を通過したとき最大となる。2軸の角速度成分 (Ω_x, Ω_y) は錘のX軸方向とY軸方向の変位を静電容量の変化で検出することで測定することができる。

今回開発した5軸モーショセンサでは、以下の静電容量素子の組み合わせで、2軸角速度 (Ω_x, Ω_y) を検出した。

$$\Omega_x(F_{cy}) : C_{y+}(B1+B4) - C_{y-}(B2+B3)$$

$$\Omega_y(F_{cx}) : C_{x+}(T1+T2) - C_{x-}(T3+T4)$$

〈3・3〉 加速度検出と角速度検出との弁別 加速度を検出することは力を検出することと等価であり、また同様に角速度を検出することも力を検出することと等価である。X軸方向の加速度 A_x を検出するためにはX軸方向の力 F_x を検出し、Y軸周りの角速度 Ω_y を検出するためにはX軸方向の力 F_{cx} を検出することになる。共に、同じ方向の力を検出することから回路的な工夫が必要になる。角速度による力 F_{cx} は錘の速度に同期した高い周波数で発生す

る。それに対し加速度は比較的低い周波数域を検出対象としている。

今回開発した 5 軸運動センサでは検出すべき加速度を 10Hz 程度と低く設定し、錘の駆動信号の周波数（共振周波数）を 3~5kHz になるよう設計した。そのため、加速度 A_x による力 F_x の周波数は最大 10Hz、角速度 Ω_y による力 F_x は 4kHz に同期して発生する。加速度信号と角速度信号の周

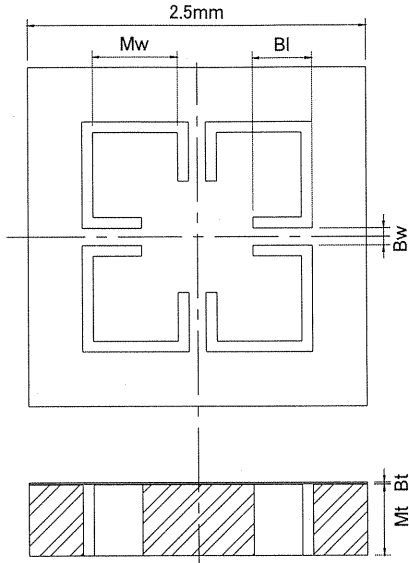


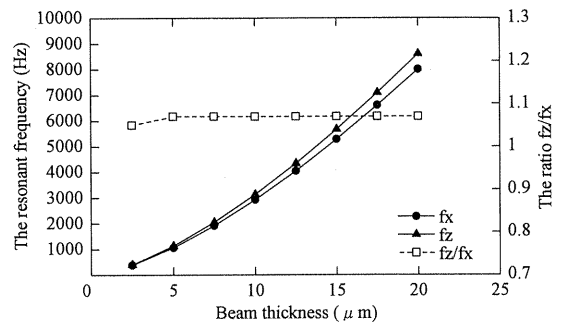
図 8 解析モデルの形状

Fig. 8. The dimensions of the analysis model.

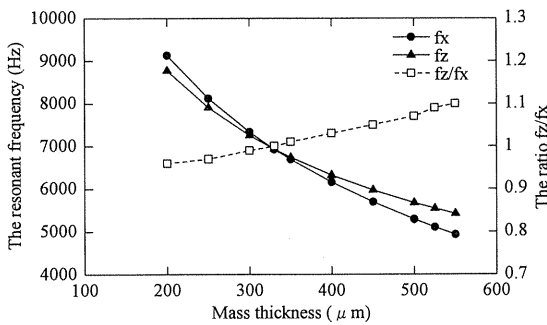
波数は 2 桁以上異なるため、フィルターで容易に加速度 A_x による力 F_x と角速度 Ω_y による力 F_{cx} を識別することができる。

図 7 に 5 軸モーションセンサ用信号処理回路のブロック図を示す。独自に開発した CV 変換回路でセンサからの容量 ($C_{x+}, C_{x-}, C_{y+}, C_{y-}$) を電圧 ($V_{x+}, V_{x-}, V_{y+}, V_{y-}$) に変換した。X 軸方向の加速度 A_x と Y 軸方向の加速度 A_y は差分回路 ($V_{x+}-V_{x-}, V_{y+}-V_{y-}$) とローパスフィルターを経由することで求められる。また、Z 軸方向の加速度は加算回路 ($V_{x+}+V_{x-}$) とローパスフィルターで求められる。

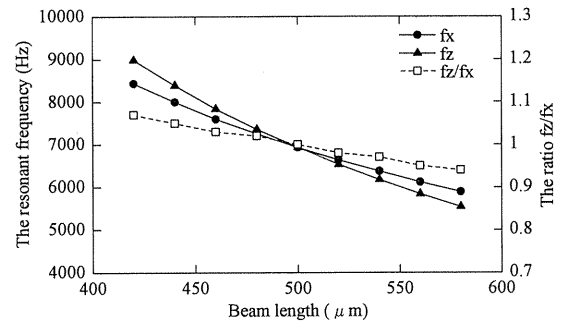
錘は上部電極 T0 と共通電極（錘）間、下部電極 B0 と共通電極（錘）間に 180 度位相の異なる交流信号を印加することで、Z 軸方向に単振動する。先ほど求めた X 軸方向の力 (F_{cx}) と Y 軸方向の力 (F_{cy}) に相当する電圧 ($V_{x+}-V_{x-}, V_{y+}-V_{y-}$) を駆動信号で同期検波し、増幅し、更にフ



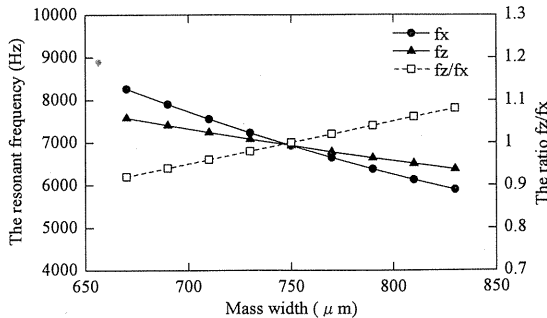
(c) The relationship between resonant frequency and Bt



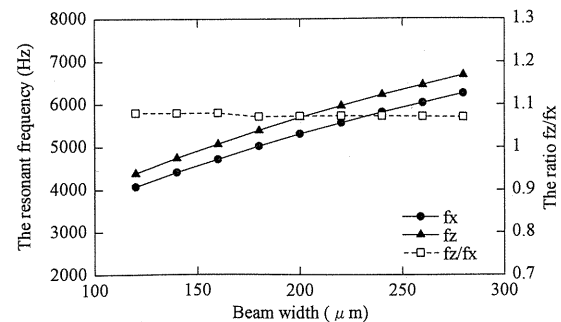
(a) The relationship between resonant frequency and Mt



(d) The relationship between resonant frequency and Bl



(b) The relationship between resonant frequency and Mw



(e) The relationship between resonant frequency and Bw

図 9 共振周波数の FEM 解析結果

Fig. 9. FEM analysis result of the resonant frequency.

フィルタリングすることで2軸角速度成分 (Ω_x, Ω_y) を求めることができる。

4. FEM 解析と設計

5軸モーションセンサは(3・2)節で述べたように、錘をZ軸方向に振動させ、X軸方向とY軸方向に発生するコリオリ力を計測することで2軸角速度成分が検出される。そのため、錘のZ軸方向の共振周波数とX(Y)軸方向の共振周波数は、その性能を決める上で重要なファクターとなる。例えば、Z軸方向の共振周波数とX(Y)軸方向の共振周波数が一致(縮退)すれば角速度感度は著しく高くなる。共振周波数の一致の度合いが、感度に大きく影響する。そこで5軸モーションセンサの各寸法を変えたときの共振周波数に与える影響を、FEM解析によって調査した。

解析モデルの形状を図8に示す。解析ではチップサイズを2.5mmに固定し、錘の厚さMt, 錘の幅Mw, ビーム厚さBt, ビーム長さBl, ビーム幅Bwをそれぞれ変えて解析を行い、X軸(Y軸)方向の共振周波数fxとZ軸方向の共振周波数fzを求めた。モデルの錘部分を節点数30,000, 要素数25,000にメッシュングし、4つのビームの端面を拘束してモーダル解析を行った。この解析に用いた図8のモデルは実際に作製したセンサの約1/2のサイズになっている。

図9に各パラメータについての解析結果をグラフで示す。

〈4・1〉 共振周波数 解析モデルの錘の厚さMt, 錘の幅Mw, ビーム厚さBt, ビーム長さBl, ビーム幅Bwの寸法に対し、

- 図9(a)は錘の厚さMtをパラメータ,
- 図9(b)は錘の幅Mwをパラメータ,
- 図9(c)はビーム厚さBtをパラメータ,
- 図9(d)はビーム長さBlをパラメータ,
- 図9(e)はビーム幅Bwをパラメータにしたときの、それぞれの解析結果である。

これらの図から共振周波数について見ると、錘の厚さ、錘の幅、ビーム長さに反比例し、ビーム厚さとビーム幅に比例している。

5軸モーションセンサにある4本のビームの内1本について見ると、先端の回転変位が拘束された片持ち梁と考えられる。したがってこのビーム部のばね定数kは(1)式で与えられる⁽⁴⁾。

$$k = \frac{nEwt^3}{l^3} \dots\dots\dots (1)$$

n: ビームの本数, E: ヤング率, t: ビームの厚み
w: ビームの幅 l: ビームの長さ

よって、Z軸方向の共振周波数fzは(2)式のように表される。

$$f_z = \frac{1}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{k}{m}} = \frac{1}{\pi} \cdot \sqrt{\frac{Ewt^3}{ml^3}} \dots\dots\dots (2)$$

この式では、荷重分布や内部損失などが考慮されていないが、Z軸方向の共振周波数fzについて以下の関係が成り立つと考えられる。

- ・質量の1/2乗に反比例する。
- ・ビーム厚さの3/2乗に比例する。
- ・ビーム長さの3/2乗に反比例する。
- ・ビーム幅の1/2乗に比例する。

また、X軸方向の共振周波数fxについても、(2)式にある定数を掛けた式になると考えられるのでfzと同様の関係が成り立つと考えられる。

これらの関係を図9の解析結果に適用し、最小二乗法で近似したときの相関係数を表1に示す。共振周波数は、すべてのパラメータについてよく相関が取れている。錘の厚さと錘の幅は振動子の質量を変えたことと同義なので、上述の共振周波数と各パラメータの関係と一致していると考えられる。

〈4・2〉 共振周波数の比率fz/fx 次に、図9の共振周波数の比率fz/fxについて見ると、ビーム厚さとビーム幅を変えても共振周波数の比率fz/fxは一定で変化しないことがわかった。

以上のことからモーションセンサの設計を行う場合、使用するSOI基板によって錘厚さとビーム厚さは決まるので、まず錘幅(つまり錘の質量)とビーム長さを変えてX軸方向の共振周波数fxとZ軸方向の共振周波数fzが一致する条件を見つけ、次にビーム幅とビーム厚を変えて目標とする共振周波数に合わせることで、効率的に設計が可能となる。

5. 実験結果

〈5・1〉 錘の共振特性 モーションセンサを設計する場合、駆動と検出の共振周波数が重要であることは先に述べた。今回の試作ではビームの長さの異なる3つの試料を作り、共振周波数のずれと感度について測定した。試料A, 試料B, 試料Cの測定で得られた共振周波数と各試料の実寸法でのFEM解析によって得られた共振周波数を表2に示す。

試料の共振特性は錘を各軸方向に駆動し、振動を別の電極で検出して測定した。印加駆動電圧のオフセット電圧は5Vに固定し、それに6Vppの交流信号を重畳させ、駆動周波数を1kHzから5kHzまで掃引した。各軸方向の共振ピー

表1 近似式の相関係数

Table 1. The correlation coefficient of the approximation.

		The approximation	The correlation coefficient (R)
Mass thickness (Mt)	fx	a/x ^{0.5} +b	0.999072
	fz	a/x ^{0.5} +b	0.999939
Mass width (Mw)	fx	a/x ^{0.5} +b	0.998536
	fz	a/x ^{0.5} +b	0.999681
Beam thickness (Bt)	fx	a*x ^{1.5} +b	0.999920
	fz	a*x ^{1.5} +b	0.999929
Beam length (Bl)	fx	a/x ^{1.5} +b	0.999965
	fz	a/x ^{1.5} +b	0.999993
Beam width (Bw)	fx	a*x ^{0.5} +b	0.999983
	fz	a*x ^{0.5} +b	0.999951

クと FEM 解析結果の傾向は一致し、また、図 9(d)に示した FEM 解析結果と同様に、Z 軸方向の共振周波数の変化が X 軸方向の共振周波数の変化より大きいことがわかる。しかし、測定値と FEM 解析の結果に若干の誤差がある。これは錘とビーム形成のためのエッチングのバラツキが主な原因と考えられる。これによって図 9(d)で示したビームの長さの違いによる共振周波数の変化が実証された。

〈5・2〉 3 軸加速度特性 3つの試料の静加速度特性について、重力加速度(±1G)を使い、各軸の加速度出力を調査した。その結果を表 3 に示す。ビームの短い試料 C が最も感度が低く、ビームの長い試料 A の感度が最も高かった。これはビームの長さとはバネ定数の関係を考えてと容易に説明できる。また、試料 B の静加速度特性を図 11 に示す。X 軸の感度が 310mV/G、Y 軸の感度が 290mV/G、Z 軸の感度が 850mV/G、非直線性が 3%以下、他軸感度が 5%以下となっている。その他の性能についても表 3 に示す。

〈5・3〉 2 軸角速度特性 試料 B とリファレンス用のジャイロセンサ(自動車のシャシー制御用センサ)をターンテーブル上に載せ、ターンテーブルを手動で半回転し、角速度特性を測定した。その結果を図 12 に示す。今回の測定に使用した回路はディスクリット部品を用いた手配線による回路にもかかわらず、本モーションセンサの信号はリファレンスジャイロセンサの出力に追従し、低ノイズであった。これは、本センサの角速度による容量変化が数 10aF/[deg/sec]とサーフェイス型の角速度センサと比べ、感度が 100 倍以上大きいためと思われる。

3 種類の試料の角速度感度を表 4 に示す。図 9(d)と共振周

表 2 試料の共振周波数

Table 2. The resonant frequency of the samples.

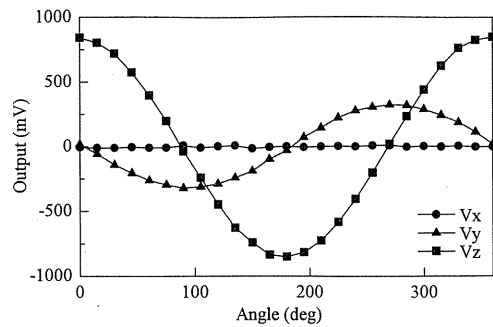
	Beam Length	Resonant frequency (kHz)			
		X-axis	Y-axis	Z-axis	
Sample A	0.6mm	Measured	3.69	3.61	3.77
		FEM	3.52	3.52	3.64
Sample B	0.5mm	Measured	3.75	3.82	3.97
		FEM	3.73	3.73	3.84
Sample C	0.4mm	Measured	4.11	4.03	4.31
		FEM	3.93	3.93	4.16

表 3 3 軸加速度特性

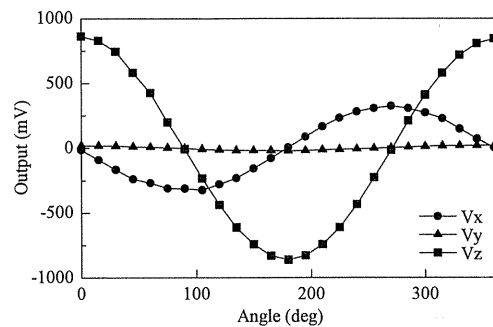
Table 3. 3-axis acceleration characteristics.

Sensitivity (mV/G)	Sample A			Sample B		Sample C	
	X-axis	Y-axis	Z-axis	Ax	Ay	Az	
	X-axis	320	310	270			
Non-linearity (%F.S.)				<3%			
				<3%			
				<2%			
Cross-axis sensitivity (%F.S.)	Sample B			Ax	Ay	Az	
	X-axis			100	2.3	4.1	
	Y-axis			4.9	100	4.6	
Z-axis			0.9	2.2	100		

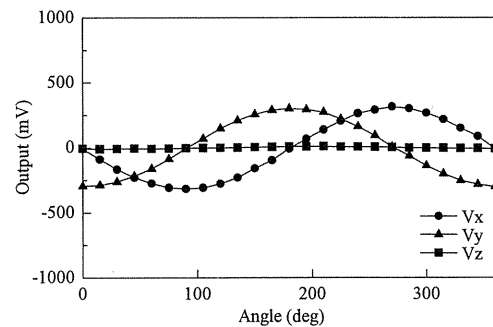
波数のずれ量から考え、感度の高い順から試料 A、試料 B、試料 C の順になるはずであるが、試料 B と試料 C はほぼ同等であった。また、表 2 に示された共振周波数から感度を



(a) Acceleration output in the X-axis rotating



(b) Acceleration output in the Y-axis rotating



(c) Acceleration output in the Z-axis rotating

図 11 3 軸加速度特性 (試料 B)

Fig. 11. 3-axis acceleration characteristics (Sample B).

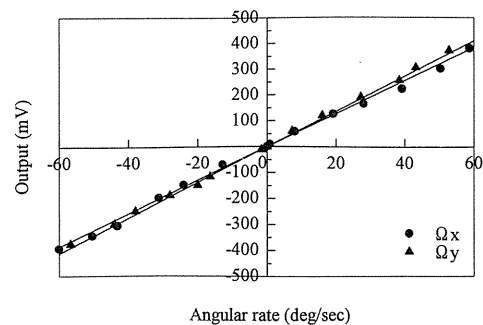


図 12 2 軸角速度特性 (試料 B)

Fig. 12. 2-axis angular rate characteristics (Sample B).

考えても、感度の高い順に試料 A, 試料 B, 試料 C の順になるはずである。今回の試作で試料 B と試料 C の感度がほぼ同じであった理由は錘のサイズ, ビームの厚さ, ビームの長さ, 電極間距離の違いなどが考えられるが, 加速度感度(表3参照)に於いて試料 A が最も高く, 試料 C が低いことから考え, 3つの試料の, 錘のサイズ, ビームの厚さ, 電極間距離はほぼ同じと考え, 異なる点は設計値どおり, ビームの長さだけと考えられる。次に, 角速度感度を決める他の要因について検討する。

真空封止されていないチップを用いて真空チャンバー中で真空度を変えながら試料 B の真空度と Q 値の関係を調べることによって, 図 13 の結果が得られた。真空度が上がると Q 値も向上する。極端な例として, 本センサのキャビティ内が大気圧では加速度センサの静加速度感度は正常となるが, 角速度センサの感度はない。これは Q 値が 1 のためである。本来なら試料 B の角速度感度が試料 C の感度より高いはずであるが, 同程度になった理由は, 錘を包含しているキャビティ内の真空度が他の試料より若干低いことに起因しているものと思われる。角速度センサを開発する場合, キャビティ内の真空度を維持するだけでなく, 真空度自身も重要となることが分かる。

本実験を通し, ビームの長さを変えた試料の共振周波数の変化, X(Y)軸と Z 軸の共振周波数の変化する割合の違い, 及び角速度の感度の違いから考え, 4章において示した設計方法は角速度センサを設計する上で設計の一助になることは確かである。

しかし, 角速度センサの性能を支配しているのは, 錘の共振周波数の一致度だけではなく, MEMS 構造体の寸法精度, 真空度に起因した Q 値, 共振周波数の値も十分に注意して設計・作製する必要がある。

6. 結 論

著者らは, Deep RIE と真空中陽極接合プロセスを使用した SOI バルクマイクロマシニングによる新しいタイプの 5 軸モーションセンサを開発した。錘をクーロン力で Z 軸方向に共振周波数で振動し, 非共振モードでコリオリ力を検出することで, 3 軸加速度成分 (A_x, A_y, A_z) と 2 軸角速度成分 (Ω_x, Ω_y) を検出することが可能であることを示した。

さらに, 錘を保持しているビームの厚さ及びその長さ, 錘のサイズを変えたときの X 軸方向の共振周波数と Z 軸方向の共振周波数の変化を調べ, その傾向が先端の回転変位が拘束された片持ち梁の共振周波数と同じであることが分かった。

また, 5 軸モーションセンサの設計手法を示し, 錘のサイズとビーム長さを変えて駆動の共振周波数と検出の共振周波数が一致する条件(応答周波数を考慮すれば若干ずらすのが良い)を見つけ, 次にビーム幅とビーム厚を変えて目標とする共振周波数に合わせることによって, 角速度感度の高いセンサの設計が可能となった。

(平成 17 年 9 月 30 日受付, 平成 18 年 2 月 9 日再受付)

表 4 2 軸角速度特性

Table 4. 2-axis angular rate characteristics.

Sensitivity (mV/deg/sec)	Sample A	Sample B	Sample C
Ω_x	9.1	6.4	6.5
Ω_y	8.3	6.9	6.2

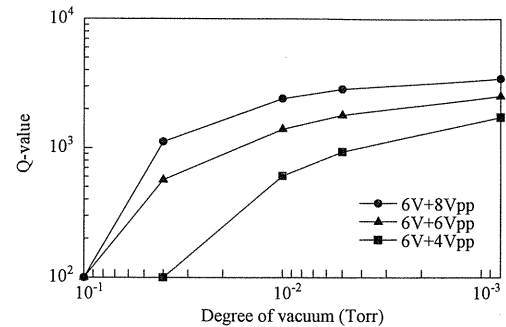


図 13 真空度と Q 値との関係

Fig. 13. The relationship between degree of vacuum and Q-value.

文 献

- (1) Y. Watanabe, T. Mitsui, T. Mineta, S. Kobayashi, N. Taniguchi, and K. Okada: "Five-Axis Capacitive Motion Sensor with Electrostatic Drive and Capacitive Detection Fabricated by Silicon Bulk Micromachining", *Sensors and Actuators A97-98*, pp.109-115 (2002-4)
- (2) N. Taniguchi, H. Itano, and K. Okada: "The 5-Axis Motion Sensor", *Technical Digest of the 16th Sensor Symposium*, pp.41-44 (1998)
- (3) Y. Watanabe, T. Mitsui, T. Mineta, Y. Matsu, and K. Okada: "SOI Micromachined 5-axis Motion Sensor using Resonant Electrostatic Drive and Non-Resonant Capacitive Detection Mode", *Digest of Technical Papers, Tranducers'05*, pp.511-514 (2005)
- (4) D. B. Schaechter and D. A. Levinson: "Interactive Computerized Symbolic Dynamics for the Dynamicist", *The Journal of the Astronautical Sciences*, Vol.36, No.4, pp.365-388 (1988-11, 12)

岡田 和 廣



(正員) 1974 年上智大学理工電気電子工学卒業。1976 年同大学院修士課程修了。1979 年からマイクロマシニング技術を利用したピエゾ抵抗型圧力センサの開発に従事。1988 年株式会社ワコー設立。マイクロマシニング技術, 圧電技術を利用した 3 軸加速度センサ, 3 軸角速度センサ, 6 軸モーションセンサの開発に従事。電子情報通信学会, IEEE 各会員。

角 谷 哲 哉



(非会員) 1987 年富山大学工学部電子工学科卒業。1989 年同大学院工学研究科修了。1990 年よりマイクロマシニング技術を用いたセンサの開発に従事。2004 年株式会社ワコー入社。圧電型 3 軸加速度センサ, 圧電型 3 軸角速度センサ, 静電容量型 6 軸力覚センサの開発に従事。

松 良 幸



(非会員) 1992年名古屋工業大学工学部電気電子工学科卒業。1994年東京工業大学総合理工学研究科物理情報工学修士課程修了。2001年株式会社ワコー入社。マイクロマシンング技術を利用した静電容量型加速度・角速度センサの開発に従事。現在6軸モーションセンサの開発に従事。

渡 部 善 幸



(正員) 1991年3月新潟大学理学部物理学科卒業。同年4月山形県工業技術センターに入所。2005年東北大学より博士(工学)学位取得。主として、慣性センサ、微細加工技術の開発に従事。

三 井 俊 明



(正員) 1992年東北大学理学部化学科卒業。1994年東北大学大学院理学研究科博士課程前期課程修了。同年秋田大学物質工学科助手。1997年山形県工業技術センター入所。主として慣性センサ、光MEMSデバイスの開発に従事。

峯 田 貴



(正員) 1986年東京工業大学総合理工学研究科材料科学専攻修士課程修了。同年(株)東芝入社、集積回路プロセス開発に従事。1991～2004年山形県工業技術センター勤務、マイクロマシン研究開発に従事。2002年東北大学機械電子工学専攻修了。博士(工学)。2004年より弘前大学理工学部助教授。マイクロナノファブリケーション、メカニカルセンサ、医療用MEMS技術の研究に従事。応用物理学会、表面技術協会各会員。

杉 山 進



(正員) 1970年名城大学理工学部電気工学科卒業。(株)豊田中央研究所入所後、主に半導体圧力センサの研究に従事。1992年シリコンデバイス研究室長。1994年東京工業大学より博士(工学)学位取得。1995年より立命館大学理工学部教授。主としてMEMS、集積化センサに関する研究に従事。2000年電気学会優秀技術活動賞特別賞、2004年文部科学大臣賞研究功績者受賞。応用物理学会、日本機械学会各会員。