AT カット水晶振動子による小型荷重センサの設計と製作*

鳴海圭亮^{*1}, 朝倉 歩^{*2}, 林 育 菁^{*3}
福田敏男^{*4}, 新井史人^{*5}Design and Fabrication of Compact Load Sensor Using
AT-Cut Quartz Crystal ResonatorsKeisuke NARUMI, Ayumi ASAKURA, Yu-Ching LIN,
Toshio FUKUDA and Fumihito ARAI^{*6}^{*6} Department Bioengineering and Robotics, Tohoku University,
6-6-01 Aramaki-Aoba, Aoba-ku, Sendai-shi, Miyagi 980 8579 Japan

The load sensor with AT-cut quartz crystal resonator has the characteristic that the resonant frequency changes by the external force, which achieves high sensitivity, high-speed response, and wide measurement range by a simple structure. Also it has the superior feature in the temperature and frequency stability. On the other hand, the quartz crystal resonator had been hardly applied to a force measurement because of low degree of mechanical characteristic, that is, it is weak to the impact, bend, and tension. The objective of this study is to construct the sensor mechanism that safely maintain the quartz crystal resonator for the external force with flat structure. We designed and analyzed a novel retention mechanism of the quartz crystal resonator for the flat structure. The size of the retention mechanism is 6.0 mm×5.0 mm×4.4 mm. The sensitivity of this sensor is 360 Hz/N. Output fluctuation of the sensor was less than 0.05 ppm when the static pressure of 1.5 MPa was applied. The proposed load sensor is small, sensitive and stable for static force measurement.

Key Words: Sensor, Piezo-Element, Micro-Mechanism, Structural Design, Nano & Micro Machining

1. 緒 言

現在, ロボット, 医療および介護の分野で優れた荷重センサが必要とされている。測定対象としては, ベッド等に加わる荷重分布, 関節内の接触圧力の測定, 咬合力計測等が挙げられる。また, 低侵襲医療技術において, 内視鏡やカテーテル挿入時の先端荷重やマニピュレータの操作力の測定等が必要である。特に, ロボットが重い対象物から軽い対象物までを人間の手の様に同様に操作する際, また, 初期荷重が印加した状態での生体信号を計測する際には, 高感度とともに広計測範囲の荷重センサが必要になる。

従来の荷重センサには, ダイアフラム型センサ, ひずみゲージ式センサ⁽¹⁾および圧電振動形センサ⁽²⁾等があるが, 高感度, 広計測範囲, 高速度応答, 小型および高耐久性等をすべて満たすセンサは存在しないのが現状である。また, 上記センサはアナログ出力であるために AD 変換器を要し, ノイズ対策などの複雑な信

号処理が必要となる。

そこで, 本研究では圧電素子の一つである水晶に着目した。水晶は, 外部からの力に正確に比例した電荷を発生し, 高感度であり広い計測範囲を有し, 温度安定性や周波数安定性にも優れていることから, ガスセンサ⁽³⁾⁽⁴⁾, 温度センサ⁽⁵⁾⁽⁶⁾, 湿度センサ⁽⁷⁾⁽⁸⁾および DNA センサ⁽⁹⁾などの各種センサに用いられてきた。また同様に, 荷重センサとしても研究および開発されてきた。水晶を用いた荷重センサとしてはキスラー社製の水晶圧電式力センサ等がある。これらの荷重センサのセンシング原理は, 外部からの力により発生する電荷を検出することである。しかしこの原理を利用した荷重センサには, 電気的なドリフトの影響を受けやすいという欠点がある。

反面, 水晶を振動させた状態で使用する水晶振動子は, 外部からの力により共振周波数が変化するという特性⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾を持ち, 出力として電荷ではなく周波数を用いることで電気的なドリフトによる影響を受けにくくすることが可能である。また, 周波数出力を高速なデジタル信号として容易に処理できる。そこで本研究ではこの特性をセンシング原理として用いることとした。だが水晶振動子を荷重センサとして利用する際には, 水晶振動子の機械的な脆弱性に起因する技術的問題が

* 原稿受付 2008 年 12 月 25 日。

^{*1} 学生員, 東北大学大学院工学研究科(☎ 980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-01)。^{*2} (株)デンソー(☎ 448-8661 刈谷市昭和町 1-1)。^{*3} 東北大学原子分子材料科学高等研究機構。^{*4} 正員, フェロー, 名古屋大学大学院マイクロ・ナノシステム工学専攻(☎ 464-8061 名古屋市千種区不老町)。^{*5} 正員, フェロー, 東北大学大学院工学研究科。

E-mail: arai@imech.mech.tohoku.ac.jp

存在する。水晶振動子は衝撃、曲げおよび引張りに弱く、荷重センサとして利用するには自身を安定に保持する機構を必要とする。この脆弱性を考慮した研究^{(12)~(18)}も過去に報告されているが、荷重センサの小型化という課題については十分に研究されていない。水晶に限定せず小型化に関する従来研究を考えると、単結晶シリコン微小はりの共振を用いるものもあるが、高分解能かつ広計測範囲を有しているとはいえない⁽¹⁹⁾。

そこで本研究では、水晶振動子を微細加工技術により製作することでセンサ素子の小型化を実現し、また、水晶振動子を外力に対して安定に保持する機構を構築することにより、水晶振動子を用いた小型で安定な荷重センサを提案する。そして、本センサの基礎動作特性を調査する。

2. 水晶振動子

水晶振動子の断面模式図を図1に示す。本研究では他の水晶より時間および温度安定性に優れたATカット水晶を用いた。ATカット水晶振動子は外部からの印加電圧により、表裏で電極の重なる部分で厚みすべり振動を生じる。外力を矢印の方向から印加することにより共振周波数が変化する。

3. センサのシステム化

3・1 設計 上述したように、水晶振動子は単独では、引張り、曲げおよび衝撃に対して弱いため、これを安定に保持するべくセンサ保持機構の設計を行った。試作した機構の概観図を図2に示す。

従来は水晶振動子を縦に保持して上部から圧縮力を

Fig.1 Cross Section of quartz crystal resonator

Fig.2 Schematic diagram of sensor retention mechanism.

付加する構造が一般的である^(13,17~18)が、より安定させるため水晶振動子をばねにより横向きに保持するよう設計した。本構造において、上部からの垂直圧縮力は2本の板ばねによって水平方向からの圧縮力に変換される。板ばねの構造を図2のような上下二重構造にすることによって曲げモーメントは相殺され、水晶振動子に付与する曲げ応力を低減することができると考える。さらに、ばね構造により予期しない方向からの力に対しても曲げ応力が発生しにくい構造となっている。提案する保持機構の寸法は6 mm x 5 mm x 4.4 mm である。

3・2 FEMによる応力解析 静力学的に考えると、図2において水晶振動子には水平方向の圧縮力のみが付与し、曲げ応力は付与しないと考えられる。しかし、ばねの変形や材料特性を考慮してFEMによる応力解析を行った。FEM解析ソフトとしてCOMSOL Multiphysics (v 3.4, COMSOL社)を用いた。解析項目は水晶振動子に付与する荷重、本センサの変形量および本センサの許容応力である。

図3および図4は1 MPaの鉛直圧縮力をセンサの接触面上部から印加したときのFEM解析の結果である。簡略のために板ばねと水晶振動子のみを解析対象とし、外装は境界条件で代用させた。また、図3はx軸方向のみの引っ張りおよび圧縮応力の分布を示し、引っ張り応力を正とする。図4はy軸方向の変位量の分布を示す。荷重負荷前の形状は点線で、荷重負荷後の形状は変位を1,000倍に強調して実線で示す。比較のため、図4(a)に示すような、鉛直方向からの圧縮応力を単純に水平方向に変換する機構である板ばね(Type A)と3・1で設計した図4(b)に示す上下二重構造の板ばね(Type B)の、異なる2つの構造の解析を行った。

図3より、水晶振動子には一様なx軸方向の圧縮応力が加わることが確認できた。図4(a)と(b)を比較すると、Type Aでは水晶振動子が曲げ応力を受けて場所によって0.015 μm から0.057 μm のたわみが確認できる。

Fig.3 Stresses distribution in x axis. (Type B.)

それに対し、Type B のような構造とすることで曲げ応力が減少し、たわみが殆ど発生しないことが確認できる。また、1 MPa の鉛直圧縮力においてセンサの変形量は最大でもわずか $0.102 \mu\text{m}$ であり、本センサの高剛性を確認できる。

次に、センサに本来予期しない方向から力を印加したときの構造解析を行った。図 5 は x 軸および y 軸方向から 1 MPa の圧縮応力を印加したときの、水晶振動子に付与する曲げ応力の分布図である。図 5(a) は一般的な水晶振動子の保持機構 (Type C)、図 5(b)、(c) は Type B において x 軸および y 軸方向から力を印加した場合の解析結果を示す。図 5(b)、(c) より、横方向からの荷重を保持機構により吸収し、水晶振動子には曲げ応力がほとんど付与されていないことが確認できる。図 5(a) と (b) を比較すると、Type B の水晶振動子に付与する曲げ応力は Type C と比べて最大で $1/150$ であり、(a) と (c) との比較においても最大で $1/20$ である。よって、Type B の保持機構は高剛性であることが確認でき、予期しない方向からの力に対してより安定であると考えられる。

最後に、本センサの許容応力および過負荷に対する解析を行った。ばねの設計において、静的荷重の場合許容応力は引張り強さの 75% までとることができる。JIS 規格によると、今回板ばねの材料として用いたリン

青銅の引張り強さは厚みが 0.2 mm 以上のものについて $470\sim 835 \text{ MPa}$ であり、リン青銅を用いたばねの許容応力は 350 MPa となる。解析の結果、ばねの応力集中を受ける部分の引張り応力が 350 MPa に達するのはセンサの接触面に 235 MPa の圧力を印加したときであることがわかった。よって本センサの許容応力は約 235 MPa である。また、ばねの断面積が 1.8 mm^2 であるから、本センサの鉛直方向の過負荷は 130 N である。

4. 実験

4・1・1 水晶振動子の設計・製作 本研究では、図 6 に示すような AT カット水晶振動子を設計した。安定な振動を得る上では厚みすべり振動以外の振動を

Fig.4 Displacement distribution in y axis. (a) Type A. (b) Type B.

Fig.5 Bending stresses distribution. Type B

生じることは好ましくないため、電極形状を円形とすることでこれらの振動の低減を図った。さらに、AT-cut 水晶振動子の X 軸の 34.8° の方向から外力を加えるように設計した。これは、村岡らによって応力感度が最もよくなることが報告されている⁽²⁰⁾。

水晶振動子製作のプロセスを図 7 に示す。まず AT カット水晶表面にフォトリソグラフィにより図 6 に示す電極パターンを複数転写し、Cr-Au をスパッタし、そしてレジストを剥離液によって除去することで水晶上に複数の目的形状の電極を形成した。上記の工程を水晶の両面にわたって行い、個々の電極ごとにカットすることで複数の水晶振動子を一度に製作した。ここで、レジストの剥離を容易にするためにはレジスト壁面を逆テーパ型にすることが求められる。そこで本研究では、イメージ反転タイプのフォトレジストである AZ-5214E (Clariant Corporation) を用いた。AZ-5214E は通常ポジ型のフォトレジストであるが、通常のマスク露光に加え、加熱および全面露光工程によりイメージを反転させることができる。その際、図 7(e) に示すような逆テーパ型の壁面が形成される。

4・1・2 水晶振動子の特性 製作した水晶振動子の周波数特性を、インピーダンスアナライザ(E4991A,

Agilent Technologies)によって計測した。図 8 は水晶振動子のコンダクタンス特性とインピーダンス特性を示す。共振周波数付近で急激なインピーダンスおよびコンダクタンス変化が起こることが確認できる。また、製作した水晶振動子の Q 値 (Quality factor)⁽²¹⁾ は約 16,000 であった。

4・2 水晶振動子保持機構の製作 ワイヤ放電加工を用いてセンサ保持機構を製作した。板ばねの材料には優れたばね特性を有するリン青銅を用い、外装には SUS304 を用いた。製作したセンサ保持機構の写真を図 9 に示す。寸法は幅 6.0×奥行き 5.0×高さ 4.4 mm である。

4・3 共振回路の設計・製作 水晶振動子は外部からの電圧印加のショックにより振動を生じるが、その振動は長く続かない。また、水晶振動子のインピーダンス特性は共振周波数の奇数倍ごとに急激に変化し、これらの周波数で水晶振動子は発振する。ある特定の周波数（ここでは共振周波数）の持続した発振を得るためには、周波数を選択して増幅させるための回路が必要である。図 10 に水晶振動子のための基本的な共振回路を示す。水晶振動子に負荷容量コンデンサを接続して周波数選択回路を構築し、フィードバック抵抗と CMOS インバータからなる増幅器を接続することで、

Fig.6 Schematic diagram of the quartz crystal resonator

Fig.8 Impedance and conductance characteristics of quartz crystal resonator.

Fig.7 Fabrication process chart of quartz crystal resonator.

Fig.9 Photograph of sensor retention mechanism. (Without quartz crystal resonator)

ある特定の周波数の持続した発振を得ることができる。

プリント基板加工機 (DFM-400, MITS Electronics) を用いてガラスエポキシ基板上に回路パターンを作成し、抵抗およびコンデンサ等のチップを実装し共振回路を製作した。ここで、回路定数は各水晶振動子にトライアル・アンド・エラーにより設定する必要がある。表 1 にある水晶振動子における回路定数を示す。基板寸法は長さおよび幅 12.0 mm, 厚さ 1.6 mm である。

4・4 荷重負荷実験 4・2 で製作したセンサ保持機構を用いて水晶振動子を保持し、水晶振動子の電極と導線を導電性接着材で接着し、そして共振回路に配線してセンサが完成した。荷重負荷実験システムを図 11 に示す。共振回路に 4.5 V_{PP} の電圧を直流電源 (PMC 500-0.1A, KIKUSUI ELECTRONICS Corporation) から印加して水晶振動子を発振させ、発振の確認をオシロスコープ (TDS 3014, Tektronix Ltd.) で行い、出力を周波数カウンタ (53131A, Agilent technologies) を用いて計測した。ステージを上昇させ荷重センサを天井に押し付けることにより荷重センサに荷重を印加し、ロードセル (9031A, KISTLER corporation) によって計測した。図 11 の実験システムを用いて、荷重を 45 N (接触面積は $6.0 \times 5.0 = 30 \text{ mm}^2$ であり、圧力に換算すると 1.5 MPa) まで印加したときの本センサの出力特性を図 12 に示す。同図より、荷重と共振周波数の間に単調増加の関係が認められ、荷重センサとしての基礎動作特性を確認できる。同図において、荷重負荷時の出力変化を丸 (・) で、除荷時の出力変化を十字 (+) で示し

ている。ここから、本センサのヒステリシスは 1.59%, 非直線性は 2.49% と算出できる。また、センサの感度は 360 Hz/N である。

次に、本センサ出力の時間安定性について考察する。図 13(a) は電源 ON 直後の時間に対する出力安定性を、図 13(b) は 1.5 MPa の圧縮応力印加時における出力安定性を示す。図 13(a) より、本センサの出力は電源 ON 後数分で安定化する。また図 13(b) より、高負荷時にも出力の変動は 0.05 ppm 以下であることが示され、本センサにより静荷重が測定可能であることを実験的に確認した。よって本センサは静荷重の計測が可能であり、時間に対する安定性を備えていることが解る。ここで、出力変動は荷重に換算して最大 2.25 mN である。よって本センサは従来研究⁽¹⁸⁾と比較して小型化であり、かつ感度および測定範囲に関して優れた性能を持つことが確認できた。

また、本実験においては鉛直圧縮力のみによる計測を行った。鉛直方向以外からの力をセンサに与えた場合の評価は今後の課題とする。

Fig.11 Experimental setup.

Fig.12 Performance of force sensor with quartz crystal resonator. (Temperature: 21.0°C, Humidity: 38%, Input: 4.5 V)

Table 1 Parameters for oscillation circuit

f [MHz]	R_i [Ω]	C_0 [pF]	C_1 [fF]	L_1 [mH]
16.62	1223	2.18	1.48	6.19

R_f [M Ω]	R_d [Ω]	C_d, C_g [pF]
1	10	1

f : Resonant frequency, R_i , C_0 , C_1 , L_1 : Circuit constant of a quartz crystal

Fig.13 Static loading stability of sensor output. (a)Immediately after Power-On. (b)Under Impressed Pressure of 1.5 MPa
(Temperature: 21.0°C, Humidity: 38%, Input: 4.5 V)

5. 結 言

本研究では、微細加工技術により製作した水晶振動子を用いた超小型荷重センサ機構を提案した。提案手法によれば、従来より安定な構造の荷重センサを実現できることをFEMによる構造解析により確認した。次に、共振周波数と鉛直方向からの静荷重との間に単調増加の関係が認められ、製作したセンサシステムが荷重センサとして利用できることを実験的に確認した。

謝 辞

本研究はマイクロ・メカトロニクスに関する共同研究の助成および文部科学省の科研費（18860005）の助成を得た。

文 献

(1) J. G. da Silva, A. A. de Carvalho, and D. D. da Silva, A Strain Gauge Tactile Sensor for Finger-Mounted Applications, *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, Vol. 51, No.1 (2002), pp. 18–22.

(2) URL:<http://www.olympus.co.jp>, Dec. 1999, (accessed 2007-3-16)
 (3) M.T. S.R. Gomes, A.C. Duarte, J. A.B.P. Oliveira, Detection of CO₂ using a quartz crystal microbalance, *Sens. Actuators B*, Vol. 26–27 (1995), pp. 191–194.
 (4) M.T. S.R. Gomes, M. I.S. Verissimo, J. A.B.P. Oliveira, Detection of volatile amines using a quartz crystal with gold electrodes, *Sens. Actuators B*, Vol. 57 (1999), pp. 261–267.
 (5) L. Spassov, V. Georgiev, L. Vergov, N. Vladimirova, Thermosensitive quartz resonators at cryogenic temperatures, *Sens. Actuators A*, Vol. 62 (1997), pp. 484–487.
 (6) T.G. Leblois, C.R. Tellier, Some investigations on doubly-rotated quartz resonant temperature sensors, *Sens. Actuators A*, Vol. 99 (2002), pp. 256–269.
 (7) F.P. Delannoy, B. Sorli, A. Boyer, Quartz Crystal Microbalance (QCM) used as humidity sensor, *Sens. Actuators A*, Vol. 84 (2000), pp. 285–291.
 (8) Y. Zhang, K. Yu, R. Xu, D. Jiang, L. Luo, and Z. Zhu, Quartz crystal microbalance coated with carbon nanotube films used as humidity sensor, *Sens. Actuators A*, Vol. 120 (2005), pp. 142–145.
 (9) K. Kon, N. Tsukahara, M. Shimomura, DNA sensing with a quartz crystal device for determination of microorganisms, *Sens. Actuators B*, Vol. 123 (2007), pp. 647–650.
 (10) A. Ballato and R. Bechman, Effect of initial stress in vibrating quartz plates, *Proc. IRE*, Vol. 48 (1960), pp. 261–262.
 (11) J. Ratajski, Force frequency coefficient of singly rotated vibrating quartz crystals, *IBM J. Dev. Res.* (1968), pp. 92–99.
 (12) E. Bens, M. Groschl, W. Burger, and M. Schmid, Sensors based on piezoelectric resonators, *Sens. Actuators A*, Vol. 48 (1995), pp. 1–21.
 (13) B. Dumlet, R. Bourquin, and N. Shibanova, Frequency-output force sensor using a multimode doubly rotated quartz resonator, *Sens. Actuators A*, Vol. 48 (1995), pp. 109–116.
 (14) S. Muraoka, Force sensor with quartz resonators by differential method, *Trans. SICE*, Vol. 33, No. 12 (1997), p. 1117–1123.
 (15) L. D. Clayotn, E. P. EerNisse, Quartz Thickness-shear mode pressure sensor design for enhanced sensitivity, *IEEE Trans. Ultrason., Ferroelect., Freq. Contr.*, Vol. 45, No. 5 (1998), pp. 1196–1203.
 (16) Y.G. Dong, J.S. Wang, G.P. Feng, and X.H. Wang, Self-Temperature-Testing of the Quartz Resonant Force Sensor, *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, Vol. 48, NO. 6 (1999), pp. 1038–1040.
 (17) E.P. EerNisse, Review of Thickness-Shear Mode Quartz Resonator Sensors for Temperature and Pressure, *IEEE Sens. J.*, Vol. 1, NO. 1 (2001-1), pp. 79–87.
 (18) Z. Wang, H. Zhu, Y. Dong, and G. Feng, A thickness-shear quartz force sensor with dual-mode temperature compensation, *IEEE Sens. J.*, Vol. 3, No. 4 (2003-8), pp. 490–497.
 (19) F. R. Blom, S. Bouwstra, J. H. J. Fluitman, M. Elwenspoek, Resonating Silicon Beam Force Sensor, *Sens. Actuators*, Vol. 17, (1989), pp. 513–519.
 (20) S. Muraoka, H. Nishimura, Characteristics of a rectangular AT cut quartz resonator as a force sensor, *Trans. SICE*, Vol. 32, No. 4 (1997), pp. 604–606.
 P. Kim, Microcontroller oscillator design guide, AN588 by Microchip Technology Inc., (1997)