力センサとしての矩形 AT カット水晶振動子

村岡 茂 信*・西村 博 之**

Characteristics of a Rectangular AT Cut Quartz Resonator as a Force Sensor

Shigenobu MURAOKA* and Hiroyuki NISHIMURA**

Characteristics of a quartz resonator as a force sensor are discussed. The sensor with frequency output has many advantages. Ultimate tensile stress, stress sensitivity and its temperature coefficients being functions of a direction of force, and the accuracy are presented.

Key words: force sensor, quartz resonator, frequency output

1. はじめに

水晶振動子は、外力により共振周波数が増減するので、力センサとして利用できる。このセンサは、水晶振動子が衝撃力に弱いのでその保持に工夫を要するが、出力が周波数であるため、これを周波数カウンタにより容易にデジタル化でき、マイクロプロセッサとの接続も容易で、ノイズにも強い。このため水晶振動子は各種の力センサに用いられる可能性がある。ここでは、水晶振動子を力センサに用いる場合の基礎データとして、静的な力に関する実験結果を報告する。

2. 応力感度とその温度係数

Fig. 1(a)に示す長さ L 、幅 W 、厚さ T の矩形 AT カット水晶振動子の主面に平行に外力 F を加える場合を考える。C-C 断面での F による平均垂直応力を σ (符号は引張で正、圧縮で負) とすると

$$\sigma = F/(WT) \quad (1)$$

となる。ここで、水晶振動子の共振周波数 f を σ に関し、つぎのように直線近似する¹⁾。

$$f = A - B\sigma \quad (2)$$

A は $\sigma=0$ すなわち外力 F を加えないときの周波数、 B は単位応力あたりの周波数変化量である。ここで

$$\delta = (f - A)/A, \quad \beta = B/A \quad (3)$$

とおき、 δ を周波数変化率、 β を応力感度と呼ぶことにする。この δ と β を用いて (2) 式を書き換えると

$$\delta = -\beta\sigma \quad (4)$$

となる。つぎに、 β を温度 t に関して

$$\beta = \beta_0 + \beta_1 t \quad (5)$$

Fig. 1 (a) AT cut quartz resonator used in experiment
(b) AT cut quartz resonator fixed to holders

のように直線近似する²⁾。ここで、 β_0 は $t=0^\circ\text{C}$ での応力感度、 β_1 は応力感度の温度係数である。つぎに、外力 F の方向 ϕ を、 F が水晶振動子の X 軸となす角 (Fig. 1 参照) とし、 β_0 、 β_1 を ϕ に関して³⁾。

$$\beta_0 = \mu_0 + \mu_1 \cos 2\phi \quad (6)$$

$$\beta_1 = \nu_0 + \nu_1 \cos 2\phi \quad (7)$$

のように近似する²⁾。(7)式より外力の方向 ϕ が

$$\phi = (1/2) \cos^{-1}(-\nu_0/\nu_1) \quad (8)$$

のとき、 β_1 は 0、 β は次式のようにになる。

$$\beta = \beta_0 = \mu_0 - \mu_1(\nu_0/\nu_1) \quad (9)$$

このように矩形 AT カット水晶振動子による力センサの応力感度やその温度係数は、係数 μ_0 、 μ_1 、 ν_0 、 ν_1 の値があらかじめわかかっておれば、外力の方向 ϕ から計算できる。つぎにこれらの係数の値を実験的に求める。

2.1 実験に使用した水晶振動子

実験には、周波数温度特性が室温付近でほぼフラットで、外力を対向する辺に等分布荷重として加えやすい矩形 AT カット水晶振動子を用いた。この諸元を Table 1 に示す。外力は、Fig. 1(b) のようにマウントした水晶振動子に板ばねを介して加えた。水晶振動子の引っ張り強さは、基本周波数が 10 MHz、 ϕ が 35° の水晶振動子 3 個について調べた結果、いずれも平均垂直応力 σ が 150

* 大阪工業大学工学部 大阪市旭区大宮 5-16-1

** 大阪市水道局 大阪市北区南扇町 6-28

* Osaka Institute of Technology, 16-1, Omiya 5 Chome, Asahi-ku, Osaka

** Osaka Municipal Waterworks Bureau, 6-28, Minamiogimati, Kita-ku, Osaka
(Received September 7, 1995)
(Revised October 30, 1995)

Table 1 Specification of AT cut quartz resonator used in experiment

Operating frequency f [MHz]		10(Fundamental)				15 (3rd overtone)				
Cut angle		$-34^{\circ}05'30''\sim-35^{\circ}12'30''^{(5)}$								
Mode of vibration		Thickness-shear								
Thickness	T [mm]	0.17				0.33				
Width	W [mm]	8				8				
Length	L [mm]	10				10				
Azimuth angle of force direction ϕ [$^{\circ}$]		0	32	35	37	0	32	35	38	55
Number of samples		5	5	5	5	5	5	5	5	5

MPa 程度となり, E. P. Eernisse らが報告している AT カット水晶振動子の Y 軸方向の値 140~170 MPa⁴⁾ と同程度であった。

2.2 実験方法

Fig. 2 のように水晶振動子を実験槽内に吊り下げ, 実験槽の湿度を $45 \pm 5\%$ に保ち, 温度を $5 \sim 50^{\circ}\text{C}$ の範囲で約 5°C ずつ変化させた。各温度ごとに, 水晶振動子に加える外力を, 1 個 5 N に相当する分銅 6 個を内蔵する分銅加除装置により, 0~30 N (σ に換算すると, 10 MHz の水晶振動子では 0~22.50 MPa, 15 MHz の振動子では 0~11.25 MPa) の範囲で 5 N ずつ変化させた。なお, 水晶振動子には初期応力として $0.5 \sim 3 \text{ MPa}$ がかかっている。周波数は周波数カウンタにより 1 Hz のオダまで測定した。再現性を調べるため, 45 個の水晶振動子について以上の実験を 3 回繰り返した。

2.3 実験結果

(1) 応力感度

各温度で, 周波数変化率 δ を (4) 式により応力 σ で回帰し, 応力感度 β と残差の標準偏差 S_{β} を求めた。Fig. 3 (a) は基本周波数が 10 MHz の水晶振動子の, 25°C での (4) 式の関係を外力の方向 ϕ をパラメータにとって描いたものである。○, ◎, ⊕, ● の各印はそれぞれ ϕ が 0° , 32° , 35° , 37° に対する実験点で, 実線は回帰線である。このように, δ と σ の間には, 残差 S_{β} が 1×10^{-6} 以下の直線関係がある。

(2) 応力感度の温度特性

応力感度 β を, (5) 式により温度 t で回帰し, β_0 , β_1 および回帰による残差の標準偏差 S_{β} を求めた。Fig. 3 (b) は, Fig. 3 (a) と同一の水晶振動子について, 応力感度の温度特性を示したものである。○, ◎, ⊕, ● 印は, ϕ が 0° , 32° , 35° , 37° の実験点で, 実線は回帰直線である。また, 残差 S_{β} は, β_0 の $1/900 \sim 1/2500$ 程度で, $\pm 2S_{\beta}$ の範囲を破線で示してある。

(3) 応力感度とその温度係数

β_0 と β_1 を, それぞれ (6), (7) 式により ϕ で回帰し, 係数 μ_0 , μ_1 , 残差の標準偏差 S_{β_0} , および, 係数 ν_0 , ν_1 , 残差の標準偏差 S_{β_1} を求めた。(6), (7) 式にこれらの値を代入し, $\pm 2S_{\beta_0}$, $\pm 2S_{\beta_1}$ を付して示すと

$$\beta_0 = 14.1 + 13.1 \cos 2\phi \pm 1.1 \quad [\times 10^{-12} \text{Pa}^{-1}] \quad (10)$$

$$\beta_1 = -9.9 + 28.4 \cos 2\phi \pm 5.5 \quad [\times 10^{-15} \text{Pa}^{-1} \text{K}^{-1}]$$

Fig. 2 Apparatus for applying force to quartz resonator

(11)

となる。Fig. 4 はこれらの関係を示したもので, ●印は前項の β_0 と β_1 の値, 実線は回帰線, 破線は (10), (11) 式を示している。上側が β_0 , 下側が β_1 で, β_1 が 0 となる ϕ は 34.8° , そのときの β は β_0 と等しく $18.7 \times 10^{-12} \text{Pa}^{-1}$ となっている。

3. 精 度

応力感度の温度特性は, 2.3 節 (3) で示した外力の方向の調節や, 差動構造により改善できるので, 温度特性を除外して精度を考察する。

45 個の水晶振動子について, 10 種類の温度で, 3 回ずつ実験し, 応力感度 β と残差の標準偏差 S_{β} を各 1350 個求めた。各水晶振動子の同じ条件での 3 個の β の最大と最小の差を $\Delta\beta$, 平均値を β_{mean} とし, β の再現性を $\Delta\beta/\beta_{\text{mean}}$ で評価することにし, 同じ条件の 3 個の S_{β} の最大のもを $S_{\beta\text{max}}$, 最大応力を σ_{max} とし, 周波数変化率 δ の σ に対する非直線性やばらつきを $2S_{\beta\text{max}}/(\beta_{\text{mean}}\sigma_{\text{max}})$ で評価することにし,

$$\sqrt{\{\Delta\beta/\beta_{\text{mean}}\}^2 + \{2S_{\beta\text{max}}/(\beta_{\text{mean}}\sigma_{\text{max}})\}^2} \quad (A)$$

で精度を評価することにする。 σ_{max} を実験での最大値とすると, (A) の精度は 450 個求まり, その平均値は 3.0×10^{-3} , 標準偏差が 3.5×10^{-3} となった。引張強さが 150

Fig. 3 (a) Ratio of frequency shift δ induced by the change in mean normal stress σ in C-C cross section on AT cut quartz resonator oscillating at 10 MHz
(b) Variation of stress sensitivity β according to the change in temperature t on AT cut quartz resonator oscillating at 10 MHz

Fig. 4 Variation of stress sensitivity β_0 and its temperature coefficient β_1 according to the change in force direction ϕ

MPa 程度であることを考慮すると、 $\sigma_{\max}$ の値は今回の実験での値 11.25 または 22.5 MPa よりかなり大きくできるので、この精度はさらに良好な値にできる。

4. おわりに

水晶振動子を力センサに用いるための基礎データとして、矩形 AT カット水晶振動子について以下の諸点を示した。①主面に平行で X 軸と 35° の方向での水晶振動子の引張強さが 150 MPa 程度であること、② 5~50°C の温

度範囲での、応力感度 β_0 およびその温度係数 β_1 と外力の方向 ϕ の関係、および回帰による残差の標準偏差、③水晶振動子による力センサの精度の目安。

今後は、水晶振動子の動特性を明らかにし、また外力を加えるための機構も考案して、触覚センサなどの力センサを実現する予定である。

謝 辞

本研究の実施にあたり、大阪工業大学教授前田親良先生、大阪工業大学元教授増尾龍一先生からご助言をいただいた。また、東洋通信機(株)より水晶振動子のご提供をいただき、その製作で東洋通信機(株)振動子部の庄司友一氏、市場開発部の谷水正之氏に、発振回路の製作で東洋通信機(株)中央研究所の平岡宏一氏、製造管理部の瀬谷昌弘氏にご助力を仰いだ。記して謝意を表する。

参 考 文 献

- 1) C. R. Mingins, R. W. Perry and L. C. Barcus: Transient Reactions to Stress Changes in Vibrating Crystal Plates, Proc. of the 20th S. F. C., 50/69(1966)
- 2) C. R. Dauwalter: The Temperature Dependence of the Force Sensitivity of AT-Cut Quartz Crystals, Proc. of the 26th S. F. C., 108/112(1972)
- 3) S. Muraoka, R. Masuo and C. Maeda: Temperature Dependence of Force Sensitivity of a Quartz Resonator Used in Force Sensor, ACTA IMEKO 1991, 379/384(1992)
- 4) E. P. Eernisse and R. W. Ward: Quartz Resonator Sensors in Extreme Environments, Proc. of the 45th S. F. C., 254/260(1991)
- 5) The IEEE Sonics and Ultrasonics group: IEEE Standard on Piezoelectricity, IEEE Transactions on Sonics and Ultrasonics, SU-31, 2(1984)