

デジタル掃引法による -18.5° X カット

水晶振動片の Q 値測定

松 田 勲 植 木 雄 一*

大 浦 宣 徳** 倉 持 内 武**

Digital Measurement of the Q -value of a -18.5° X-Cut Bar Utilizing the Radio Frequency Monitor

Isao MATSUDA, Yuichi UEKI, Nobunori OURA, and Naimu KURAMOCHI

A resonator set in a gap type holder in vacuum is connected to a radio frequency monitor and excited at 200 kHz of its second overtone at room temperature. The measurement is performed by sweeping the exciting frequency from the computer-controlled measurement system at a step of 1mHz over about 1.3 Hz around the resonant frequency. A maximum Q -value of 2.2×10^7 is obtained by processing the data acquired from the measurement of the resonant curve of the resonator. This surpasses by 10 % of the value estimated by Mason in Physical Acoustics, Vol.1, Part A, p.335, Academic Press, 1964.

1. ま え が き

近年高品質な人工水晶がつくられるようになりその材質評価法として不純物の OH 基が示す赤外吸収や dislocation などと水晶振動子の Q 値との関係が議論されてきた¹⁻³⁾。水晶振動子の Q 値により材質評価をするためには振動子の弾性振動損失のみによって決まる Q 値を測定する必要がある。しかし、材質本来の Q 値を正しく測定することは難しく、従来の 5 次オーバートーン 5 MHz プラノコンベックス状 R_1 板振動子による方法¹³⁾には研磨工程についての規定がないなど問題点が残されている。そこで水晶の材質評価法の一つとして -18.5° X カット棒状振動片の Q 値による評

価法が提案され⁴⁾、検討されている⁵⁻⁶⁾。これは長辺を Y 軸から -18.5° 傾けた棒状振動片で、主振動と他の振動との結合を十分小さくして、副振動の影響のない振動子を設計できる。この方法では研磨歪みによる損失が無視できるような研磨工程⁷⁾でポリシング仕上げたものを試料として用いる。さらに支持、音響放射、電極膜による損失等を極力少なくし弾性損失のみ測定できるようにするために、真空中で空隙型電極により励振して水晶周波計法⁸⁾により Q 値を測定している。また、支持の不安定さをなくすために -18.5° X カット 200 kHz 2 次オーバートーン振動子の 2 つの振動の節をナイフエッジで支持している⁵⁾。

これまでの測定法^{5), 6), 9)}では水晶振動片の共振曲線を X-Y レコーダに描かせ、図から Q 値計算に必要なパラメータを読みとっていたので得られた結果に分散が大きく信頼性の向上が望まれてい

* 現在 関東精器(株)

** 東京工業大学精密工学研究所
昭和 61 年 9 月 24 日受理

た．そこで本研究ではこの評価法を確立するために測定の信頼性を上げることを目的としてパーソナルコンピュータ（パソコン）をコントローラとして用いて計測器を制御し，測定を自動化して Q 値測定の精度及び再現性の向上を図った．

2. 水晶周波計法による Q 値測定

図1に水晶周波計の原理を示す．この回路で水

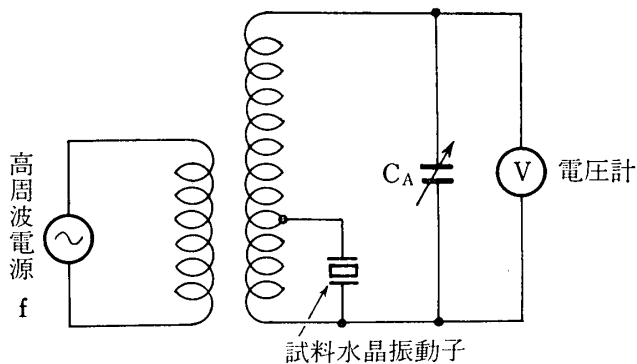


図1 水晶周波計の原理図

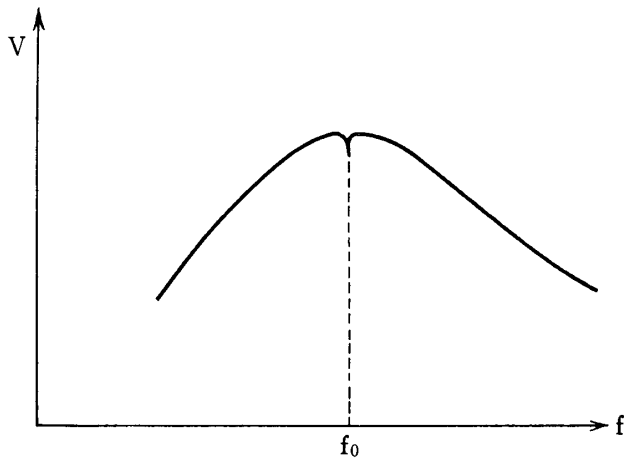


図2 水晶周波計の共振曲線

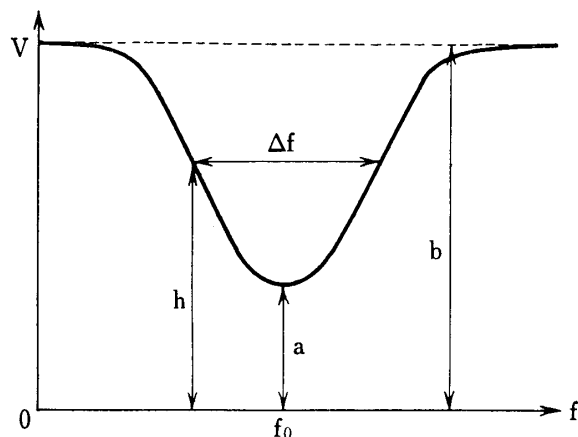


図3 Q 値測定パラメータ((1)式)

晶振動片の共振周波数と，水晶振動片を含めたLC回路の共振周波数とを一致させておく．この状態で高周波電源の周波数を掃引し，LC回路の両端の電圧を測定すると図2に示すようにLC回路の同調曲線の頂上で水晶振動片が共振してインピーダンスが急激に変化するため鋭い谷ができる．LC回路の Q が水晶振動片の Q にくらべてはるかに低いため，図3のように $4f$ の数倍程度に周波数を掃引すると一定の出力の途中で急に出力が落ち込んでいるような曲線が得られる．このとき図のようにパラメータを設定すると水晶振動片の Q 値は次式で表わされる⁸⁾．

$$Q = \frac{f_0}{4f} \frac{b}{a} \sqrt{\frac{h^2 - a^2}{b^2 - h^2}} \quad (1)$$

ただし f_0 : 水晶振動片の2端子インピーダンスのリアクタンス分が0のときの周波数

$4f$: 任意の端子電圧 h を与える周波数幅

b : タンク回路の端子電圧が一定になっている部分の電圧

しかし b の値の測定が他のパラメータに比べて不正確になりがちであるので，図4に示すようなパラメータを設定し，(1)式を変形して b を含まない式(2)を用いた．

$$Q_k = \sqrt{\frac{h_i^2 h_j^2 (X^2 - Y^2) - a^2 (X^2 h_i^2 - Y^2 h_j^2)}{X^2 Y^2 (h_i^2 - h_j^2)}} \quad (2)$$

$$\text{ただし } X = \frac{a 4f_i}{f_0}, \quad Y = \frac{a 4f_j}{f_0}$$

$$i=1, 2, 3 \quad j=2, 3, 1 \quad k=3, 1, 2$$

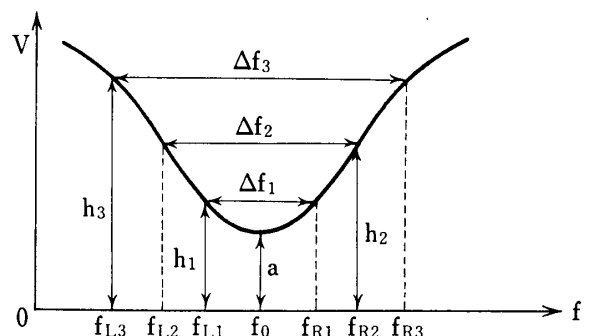


図4 Q 値測定パラメータ ((2)式)

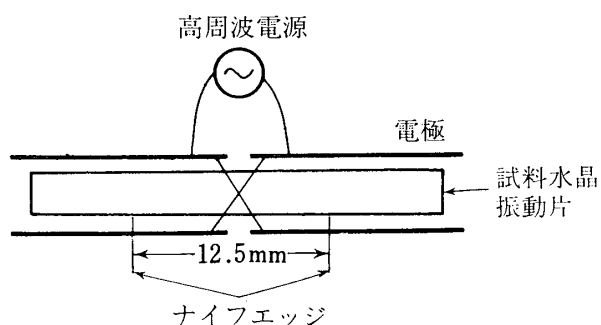


図 5 空隙型ホルダー

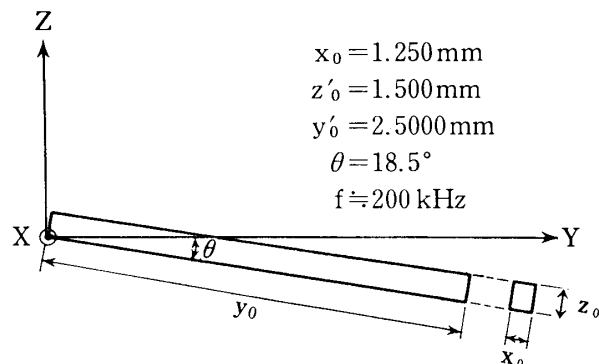
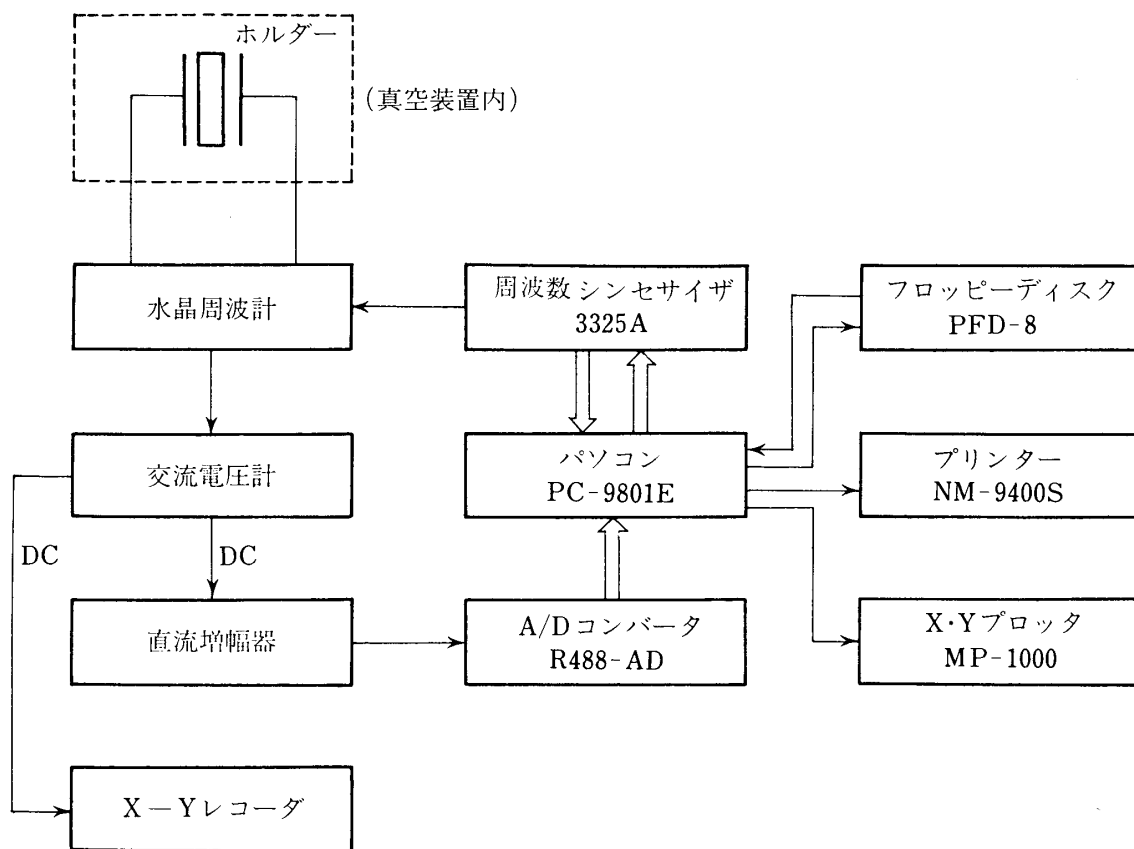


図 6 試料水晶振動片の形状

図 7 Q 値自動測定系 (⇔は HP-IB を表わす)

水晶振動片は、空隙型ホルダーで支持し、 1×10^{-5} Torr 程度の真空装置内においた。空隙型ホルダーの構造を図 5 に示す。電極はガラスに銀蒸着して作成し、電極と試料との間隔は $50 \mu\text{m}$ とした。上電極と下電極はオーバートーンを励振するために 2 分割してあり、電極を互に逆極性になるように接続して励振した。試料水晶振動片は図 6 に示す寸法のもので、2 次オーバートーンであるので節が 2 カ所あり、その間隔は全長の 2 分の 1 で 12.5 mm となる。したがってナイフエッジの

間隔を 12.5 mm とした。またホルダーには水晶振動片がずれたときに落ちないようにストッパーが設けてある。

3. デジタル掃引による Q 値自動測定系

Q 値自動測定系を図 7 に示す。パソコン、周波数シンセサイザ、A/D コンバータは HP-IB バスで結ばれパソコンをコントローラとして、測定システムを制御する。パソコンに掃引開始周波数、掃引終了周波数、シンセサイザ出力レベル、デー

タ個数を入力すると測定すべき共振曲線上の一測定点ごとにパソコンがコントローラとしてシンセサイザに出力周波数を指示し、データを取り込む。測定条件により、まずシンセサイザの周波数設定間隔が計算され、これが設定分解能の1mHz以下になったときは、設定間隔を1mHzにおきかえる。これにより一測定点ごとの周波数を最小1mHzの分解能で設定できることになる。一測定点ごとにシンセサイザの実際の出力周波数及びA/D変換された水晶周波計の出力をパソコンに

取り込む。約7分で1000個の測定が終了するとただちに測定された共振曲線が周波数および電圧目盛付でCRT画面上に表示される。Q値計算には図4のパラメータ $h_1 \sim h_3$ としてそれぞれ $(b-a)/4+a$, $(b-a)/2+a$, $3(b-a)/4+a$ の各点の測定値を用いた。Q値としては $Q_1 \sim Q_3$ の平均値をとった。この方法によるQ値測定例を図8(a)~(c)に示す。図中には3カ所のQ値の計算値とそれらを平均したQ値を表示してあるが、その平均値からのずれは5%以内となっている。図9に

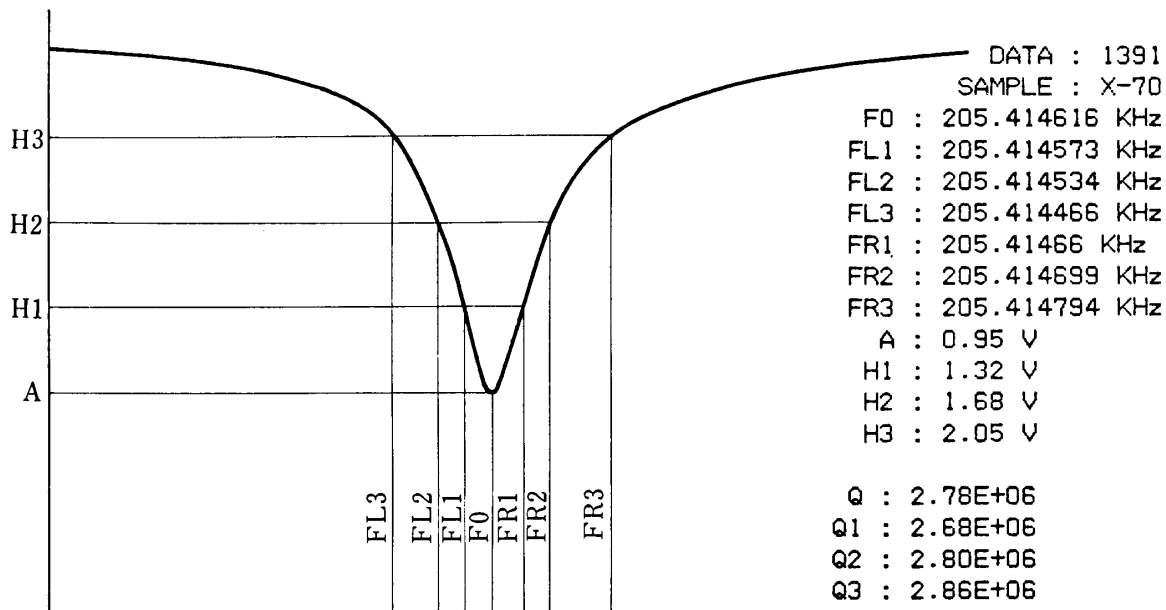


図8 (a) 共振曲線測定例

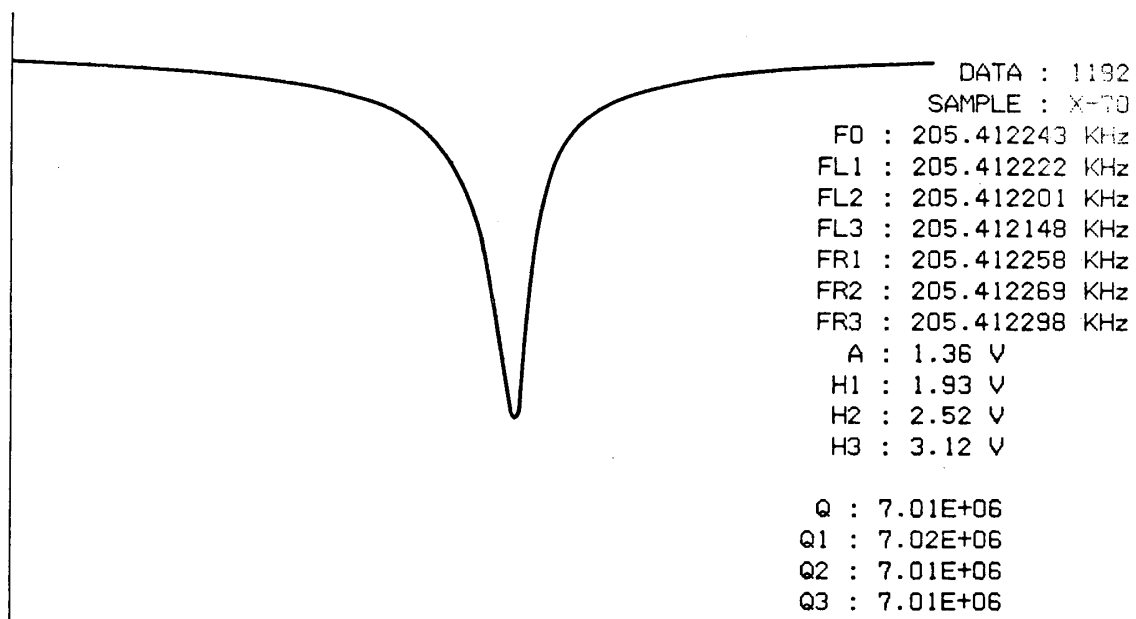


図8 (b) 共振曲線測定例

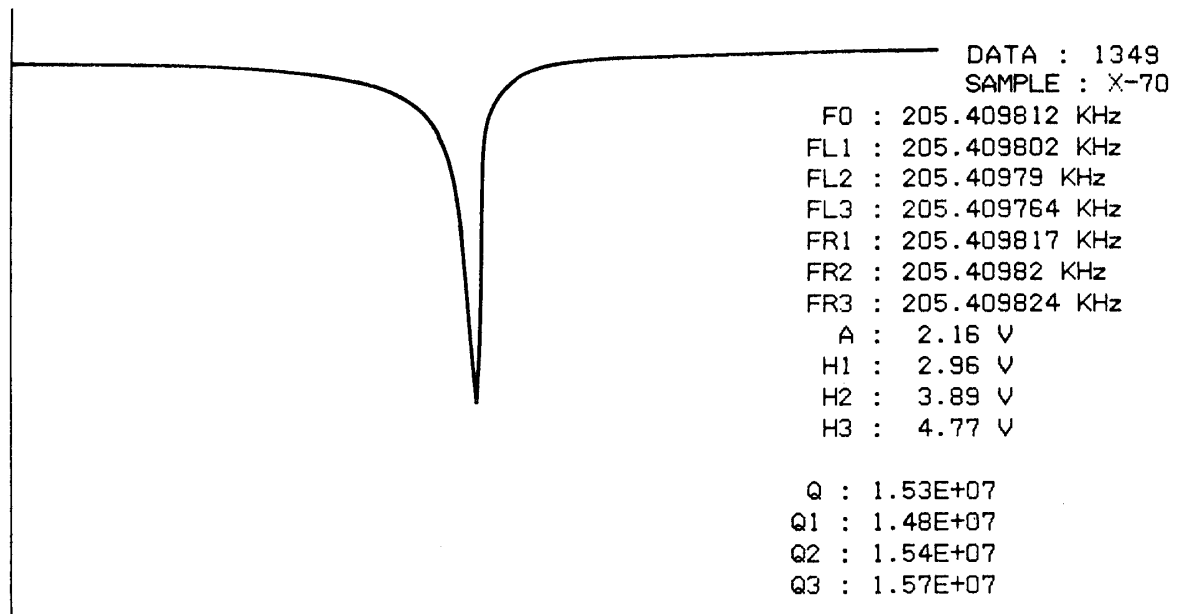


図 8 (c) 共振曲線測定例

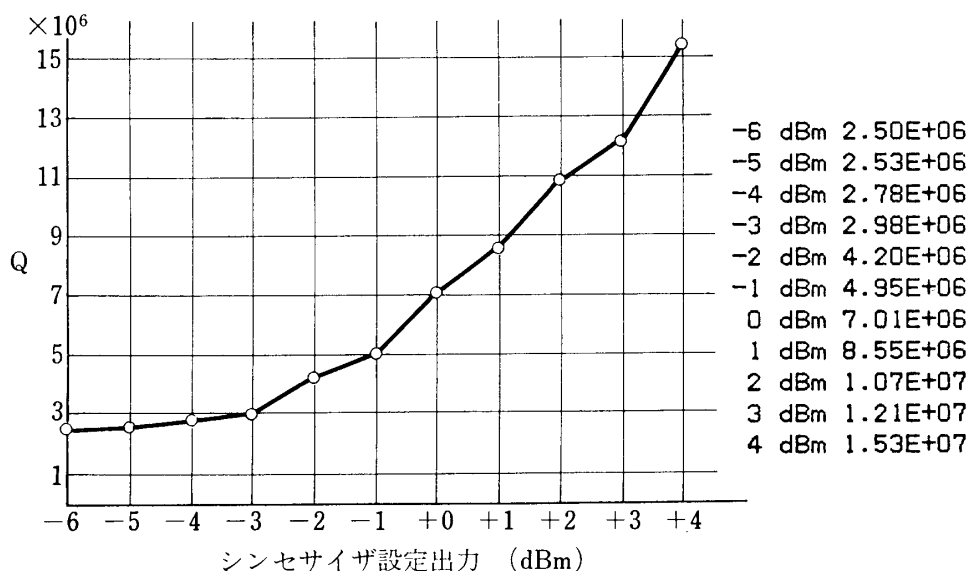


図 9 励振レベル-Q 値特性

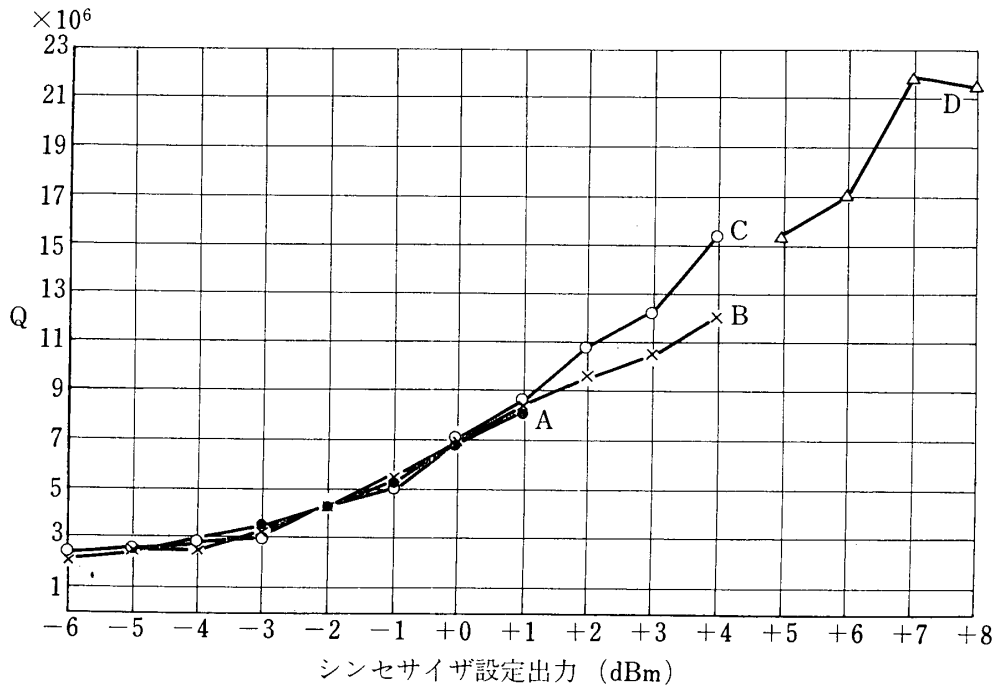
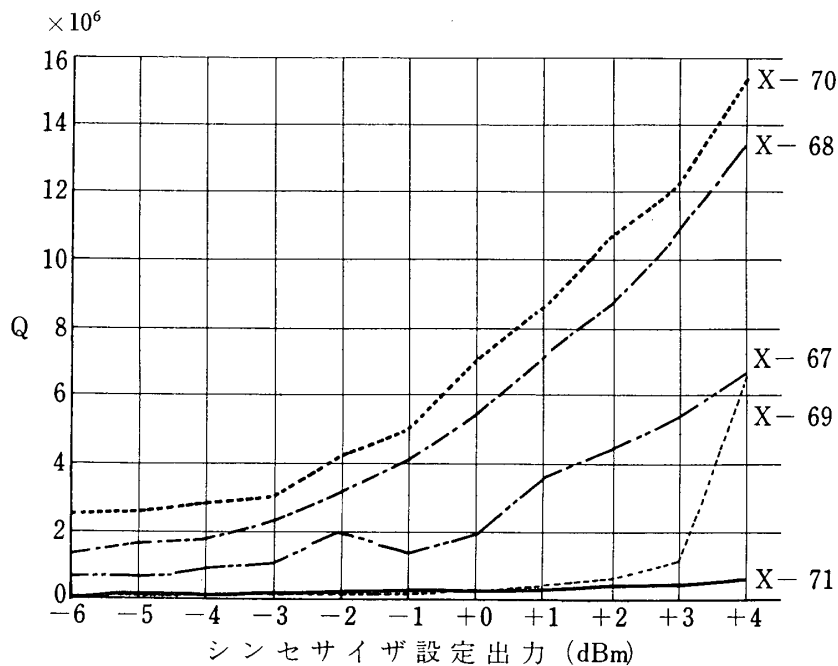
水晶振動片の Q 値の励振レベル特性として、シンセサイザで設定した出力レベルと Q 値の関係を示す。ここでは設定出力レベルが -6 dBm から $+4$ dBm まで高くなると Q 値が 2.5×10^6 から 1.5×10^7 まで変化している。

4. Q 値の測定結果

測定を自動化する以前の測定では、ある出力レベルの Q 値を求める場合何回かの測定値の分散の中で最高の値を示すものをその出力レベルの Q 値と考えた。それは理想的には弾性損失のみによ

って Q がきまるはずであり Q 値の高いものは低いものにくらべて弾性損失以外の損失が少ないと考えたからである。

はじめにデジタル掃引法によって Q 値測定の信頼性がどれ程向上するかを評価するために一つの試料について繰り返し測定を行った。結果を図 10 に示す。パソコンでシンセサイザ出力を -6 dBm に設定し、 Q 値を求め、以下、順次 1 dB ずつ増加させて同様に Q 値を求め A 曲線を得た。次に大気中にもどし水晶振動片をセットし直して再び真空にする。このようにして B, C 曲線も

図 10 Q 値測定の再現性図 11 試料による Q 値の違い

求めた。B, C 曲線を測定した際 +5 dBm に設定出力レベルを上げたときに水晶振動片が支持位置からずれてしまい、測定不能になった。しかしさらに高い出力レベルでの Q 値を測定するため大気中で水晶振動片の支持位置をセットし直して、+5 dBm から測定を再開したところ +8 dBm まで測定できた。それ以上では再び水晶振動片の支持位置がずれてしまい測定不可能となった。図に

おいて励振レベルが -6 dBm から $+1$ dBm までの低い範囲では、測定値がほぼ一致している。2~4 dBm では多少違いがあるが、D 曲線は概略 A~C と連続しているとみてよく、測定の再現性は十分あると考えられる。

さらに5つの試料について測定した結果を図11に示すが、試料による Q 値の違いがはっきり現われている。

5. 考察および今後の問題点

測定された Q 値は励振レベルが高くなるにつれて上昇し、図 10 ではシンセサイザの設定出力が +7 dBm で 2.2×10^7 となっている。この値は、従来、この方式の -18.5°X カット 200 kHz 水晶振動片に対し報告されている最高 Q 値である 5.1×10^6 ⁹⁾ に比べ、約 4 倍である。しかし Warner が求めた水晶振動子の周波数- Q 値の関係曲線¹⁰⁾ に対して、Mason が与えた Most probable internal friction curves¹¹⁾ によれば、200 kHz 水晶振動子の最高 Q 値は約 1.9×10^7 であり、ここで得られた値はそれより約 10% 高い。

一方、Sherman によれば、最良の水晶においては、 $Qf \approx 10^{13}$ となる¹²⁾ が、この式で 200 kHz 水晶振動子の Q 値を計算すると $Q = 5 \times 10^7$ となる。したがって、本研究で得られた最高 Q 値は、そのほぼ半分となる。

本研究で従来報告されている棒状水晶振動片の Q 値に比べて最高の Q 値が得られた理由としては次のようなことが考えられる。いま水晶振動片の応答時間を検討するために自由減衰振動を考えてみると、その振幅は時間を t 、共振角周波数を ω_0 とすると、 $\exp\left(-\frac{\omega_0}{2Q}t\right)$ で減衰する。したがって $Q = 2.2 \times 10^7$ の場合、応答時間として初期値の 10% になるまでの時間をとれば 80.5 秒、1% になるまでの時間をとれば 161 秒となる。これは逆に考えると、ある時点で急に共振周波数で励振したときに出力電圧が落ちつくまでに時間がかかることを意味しており、共振曲線全体を掃引するのに 100 秒程度しか時間をかけないとすれば、水晶振動片が十分応答していない可能性がある。

アナログ掃引では図 4 に示す $4f_1$, $4f_2$ などの 2 点間の周波数差を、レコーダの記録から読みとらなくてはならない。そのために、図中の h_1 , h_2 などを共振曲線の左右でそろえて測定するのに大変な手間がかかる。それに対して本研究ではデジタル掃引で 1 mHz の周波数まで計算機にとりこめるので、これらの計算処理が容易に行えるの

が最大の特長である。

また測定された Q 値は励振レベルが高くなるにつれて上昇している。この理由として ① 水晶振動片の振動の節が正確にはナイフエッジにのっていないこと ② ナ이프エッジの間隔が振動片の長辺寸法の 2 分の 1 として設定されているが、実際の振動の節の間隔と正確に一致していない可能性があること、等が考えられる。水晶振動片を励振すると励振が強くなるにつれて振動片が動き易くなり摩擦が小さくなるため、振動片内に蓄えられるエネルギーの増加に比べて振動片の支持による損失が相対的に小さくなっているものと考えられ、本来の水晶振動片の Q 値すなわち弾性損失のみによる Q 値に近づいていると思われる。本研究ではナイフエッジ間隔を固定としたが、これを可変にしてナイフエッジ間隔と Q 値との関係を調べることも今後必要であろう。

さらに図 8 において共振曲線が左右非対称になっているが、これは LC 共振回路の共振周波数と水晶振動片の共振周波数が正確には一致していないためである。共振曲線の非対称性に応じてコンデンサの容量を自動的に変えるように工夫すれば可能であろう。

減衰時間について考察したように、 Q 値と掃引時間の関係を調べることは今後の課題である。

6. ま と め

水晶振動子の材質本来の Q 値を求めることを目的に、デジタル掃引による -18.5°X カット 200 kHz オーバートン棒状水晶振動片の Q 値自動測定システムを開発した。試料容器内の支持点へ試料水晶振動片を設定する以外、測定をすべてパーソナルコンピュータで制御できるようにした。本方法では、測定時間を任意に選ぶことができ、 Q 値の高い共振にも対応できるため、200 kHz で 2.2×10^7 という高い Q 値を示す試料に対しても再現性よく測定できた。

参 考 文 献

- 1) D. M. Dodd and D. B. Fraser, "The 3000~3900 cm^{-1} Absorption Band and Anelasticity in Cry-

- stalline α -Quartz," J. Phys. Chem. Solids, Vol. 26 (1965) p. 673.
- 2) B. Sawyer, "Q Capability Indications from Infrared Absorption Measurements for Na_2CO_3 Process Cultured Quartz," IEEE Trans. SUS, Vol. SU-19(1972) p. 41.
 - 3) N. C. Lias et al., "The Growth of High Acoustic Q Quartz at High Growth Rates," J. Crystal Growth, Vol. 18, (1973) p. 1
 - 4) H. Fukuyo, K. Ota, and T. Hashiguchi, "A Method of Estimating the Quality of Resonator Quartz Crystal," Bull. Tokyo Inst. Tech., No. 95, p. 43(1969)
 - 5) H. Fukuyo, N. Oura, and F. Shishido, "The Quality Evaluation of Quartz by Measuring the Q-Value of the Second Overtone of Y-Bar," Bull. Tokyo Inst. Tech. No. 131, p. 1, (1975)
 - 6) H. Fukuyo, N. Oura, and F. Shishido, "A New Quality Evaluation Method of Raw Quartz by Measuring the Q-Value of Y-Bar Resonator," in Proc. 31st Annual Frequency Control Symposium, p. 117(1977)
 - 7) H. Fukuyo, N. Oura, N. Kitajima, and H. Kono, "The refractive-index distribution normal to the polished surface of fused quartz measured by ellipsometry," J. Appl. phys., Vol. 50, No. 5, p. 3653(1979)
 - 8) 古賀, 福与「水晶周波計」電気通信学会誌, Vol. 33 (昭和 25-8) p. 398.
 - 9) 福与, 大浦, 倉持, 穴戸, 永島, 恩田, 「振動子用水晶の材質評価法の検討」電子通信学会技術研究報告, Vol. 79, No. 27, US79-10, p. 37(1979)
 - 10) A. W. Warner, "Design and Performance of Ultraprecise 2.5-mc Quartz Crystal Units," Bell System Technical Journal, Vol. 39, p. 1193(1960)
 - 11) W. P. Mason, "Use of Piezoelectric Crystals and Mechanical Resonators in Filters and Oscillators," in Physical Acoustics, Vol. 1 Part A, p. 335(Academic Press, 1964)
 - 12) J. H. Sherman, Jr., "Intrinsic Q of Quartz," IEEE Trans. on Sonics and Ultrasonics. Vol. SU-27, No. 1, p. 45(1980)
 - 13) 日本工業規格: 人工水晶 JIS C 6704 (1975)