

トランスミッション法による水晶の Q^{-1} - f_r - T 特性測定用 に製作した自動追尾計測系の動作特性および精度

實松 武志*, 梶田 邦孝**, 青木 孝志***

Properties and Accuracies of an Automated Pursuing Measuring System Made for Obtaining Q^{-1} - f_r - T Characteristics of Quartz Resonators by the Transmission Method

Takeshi JITSUMATSU*, Kunitaka KAJITA**
and Takashi AOKI***

(Received May 13, 1994)

Properties and accuracies of an automated system made for measuring Q^{-1} - f_r - T characteristics of low and high Q quartz resonators by the transmission method were evaluated, where Q , f_r and T stand for the quality factor, the resonance frequency and the temperature, respectively. Accuracies were increased by using the interpolation method for repetitively measured data. The $\sigma_r(f)$ and $\sigma_r(Q^{-1})$ were dependent on f_s/f_r and Q , where $\sigma_r(f)$ and $\sigma_r(Q^{-1})$ stand for relative errors for the f and Q^{-1} , respectively. Here f_s/f_r means a stepping rate, f_s being a frequency step for the measurement. For a quartz resonator whose Q is in the order of $\sim 10^4$, we obtained $\sigma_r(f) < 2 \times 10^{-7}$ and $\sigma_r(Q^{-1}) < 1 \times 10^{-3}$ with a frequency step $f_s = 1\text{Hz}$. As for the relative errors for repetitive installing of the resonators into the system, we obtained $\sigma_r(f) < 3 \times 10^{-7}$ and $\sigma_r(Q^{-1}) < 1 \times 10^{-3}$.

1. はじめに

放射線照射等により水晶結晶中に導入された格子欠陥や焼鈍による格子欠陥の変化が引き起こす非弾性効果の変化の調査は、 Q^{-1} - T 特性において生ずる非弾性吸収ピークの変化、および f_r - T 特性の変化を観察することによって可能となる¹⁻⁴⁾。ここで Q , f および T はそれぞれ共振の先鋭度、共振周波数および温度を意味する。

従って温度掃引の測定が不可欠となるが、このときの温度変化によって共振点がずれていくため、測定すべき

周波数領域の自動検索・追尾が必要となる。また温度掃引のほかにトランスミッション法においては周波数掃引も同時に進行させなくてはならない。これらのことを指定された一定の温度上昇速度 dT/dt で、精度よく、迅速に行うためにはパーソナルコンピュータの支援による自動測定系の製作が必要となる。

筆者等は、上述のようなトランスミッション法による測定において共振周波数領域の自動検索・追尾機能をもたせた Q^{-1} - T 特性および f_r - T 特性の自動測定を、あまり高価にならず比較的簡便な方法で製作することの必要性に基づいてパーソナルコンピュータをコントローラとして計測機器と温度を制御し、測定、計算、グラフ表示

*名古屋第一高等学校 (Nagoya Daiichi High School)

**石井産業株式会社 (Ishii Sangyo Co. Ltd)

***工業物理学科 (Department of Engineering Physics)

等の自動化を図り、精度ならびに再現性の向上を目指すと同時に、この自動測定系の性能の評価と問題点の考察を行ったので報告する。

2. 実験方法

2.1 水晶振動子の基本特性の自動測定系の製作

一般に研究を行うにあたっては可能なかぎり安価に計測系を組む必要があるため、従来より本実験室が所有する旧式の機器(例えば、恒温槽、パソコン、etc.)も生かして使用するものとする。またアンプやインターフェース、チェンバー、等々の不足するものは自作することにした。

図1に筆者等の製作した自動測定系を示す。パーソナルコンピュータ(NEC, PC-9801VX, 1988年製)をコントローラとしてGP-IB(Contec GP-IB-2M₍₉₈₎01)バスによって周波数シンセサイザ(TOA Frequency Synthesizer, FS-1321, 周波数安定度 $=\pm 2 \times 10^{-8}$ / day)を制御し、またI/Oインターフェース(自作)によってステッピングモータを制御している。周波数シンセサイザからの一定の出力電圧をトランスミッション回路に入力した時、水晶振動子を通る電流により発生する抵抗 R の両端の電圧(これを出力電圧 V と呼ぶことにする)を高周波電圧計(National RF Milli-volt Meter, VP-9602A)を用いて測定した。高周波電圧計の測定レンジはそのremote control 端子から測定レンジ

の信号が出力されるので、これを用いてI/Oインターフェースを介して読取る。

出力電圧 V (アナログ出力)はゲイン10倍のアンプ(自作)を通しA/Dコンバータ(Contec ADA12-8/2₍₉₈₎)から読取り、(測定レンジ) $\times$ (アナログ出力)を測定値とする。水晶振動子が置かれた空間の温度は小型薄膜白金温度センサ(東レ製 Pt-1000 型)をデジタル・サーモメータ(Thinky TX-1200N-0.1)に接続して測定した。このサーモメータは温度に比例したアナログ出力(100.0 $^{\circ}\text{C} \rightarrow 1,000\text{mV}$, 0.0 $^{\circ}\text{C} \rightarrow 0\text{mV}$)を有している。このアナログ出力をアンプおよびA/Dコンバータを介してパーソナルコンピュータで読取った。

本実験室が所有する温度可変型恒温槽(Electropto, EW-102 型)は1970年製の旧式のものであるので温度設定はプログラム制御式ではなく、また外部コントロール端子もついていなくて、手動の温度設定用10回転ヘリカルポテンシオメータがその前面パネルについているだけである。そこで、これをステッピングモータの軸につなぎI/Oインターフェースを介してパーソナルコンピュータによりステッピングモータをコントロールし、常に恒温槽の温度上昇速度が一定の測定値になるようにした。もちろんこのようなメカニカルな方法を用いる代りに電子的制御方法があるが、本実験では、この恒温槽の内部に立ち入らずにヘリポットをそのまま生かす方法を採用した。実際これで問題はなかった。

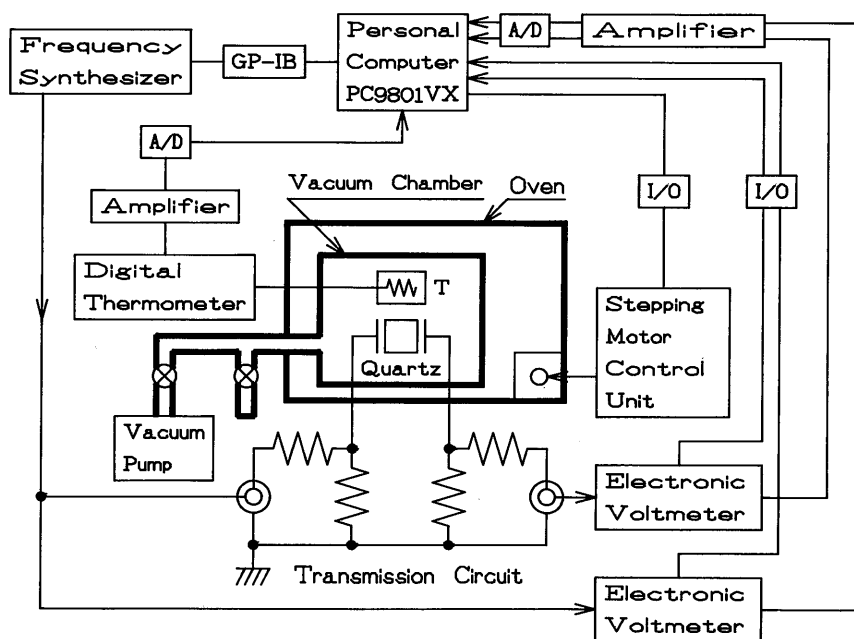


図1 自動測定系の全体図。

水晶の共振曲線を図 2 に示したが、この図より Q は算出される。即ち

$$Q = \omega_0 / (\omega_2 - \omega_1) \quad (1)$$

図 3 に共振曲線の測定および計算過程の流れ図を示す。本実験では Q 値の異なる二個の水晶振動子を測定し比

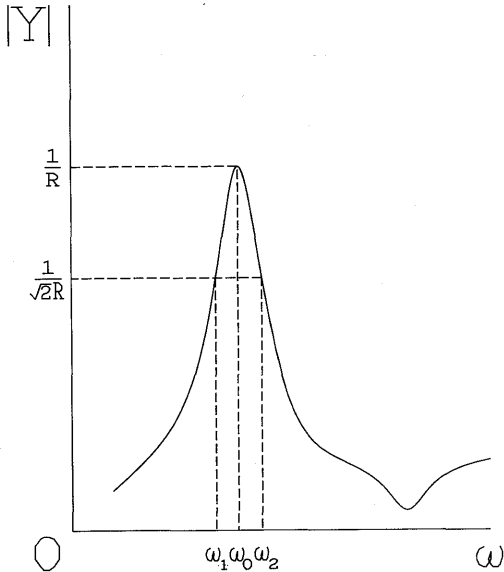


図 2 水晶振動子のインピーダンス Y の絶対値の周波数特性。

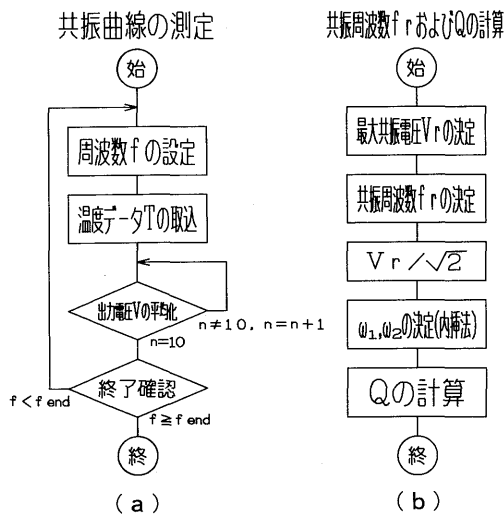


図 3 自動測定系による測定および計算の流れ図。(a) 水晶振動子の共振曲線の測定。(b) 共振曲線からの共振周波数 f_r および Q の計算。

較を行った。図 4 (a) および (b) に、この水晶振動子の

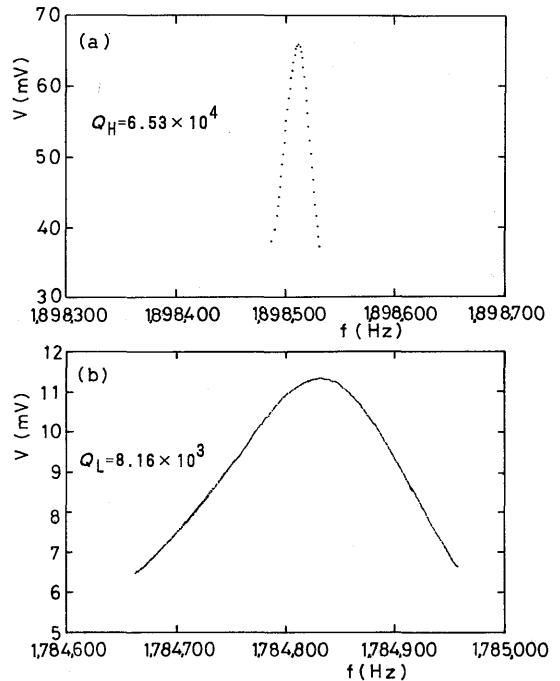


図 4 自動測定系による水晶振動子の共振曲線の測定例。(a) 水晶振動子 QR_H の共振曲線 ($f_s=1\text{Hz}$, 10 回アベレーシング)。(b) 水晶振動子 QR_L の共振曲線 ($f_s=1\text{Hz}$, 10 回アベレーシング)。

共振曲線 (V - f 特性) の測定例を示した。図 4 (a) および (b) で周波数ステップ f_s は 1Hz であり、1 個のプロットは V の測定においてアベレーシングの回数 = 10 回からなる。以下、図 4 (a) および (b) の水晶振動子を、それぞれ QR_H および QR_L と呼ぶことにする。図 4 (a) および (b) の Q 値は、それぞれ $Q_H=6.53 \times 10^4$, $Q_L=8.16 \times 10^3$ である。したがって、 QR_H と QR_L の Q 値は約 1 桁の差がある。

図 4 に示す曲線から共振周波数、共振電圧および Q 値の計算をパーソナルコンピュータで行う。共振曲線において最大の電圧値が共振電圧 V_r であり、そのときの f が共振周波数 f_r であるが、共振電圧 V_r に対応する周波数が測定データとしていくつかある場合は加重平均をとって共振周波数 f_r とした。 Q 値の算出方法は、まず $V_r / 2^{1/2}$ の電圧値と隣り合う二つのプロット間で内挿法を用いて ω_1 , ω_2 を算出する。この内挿法を用いることにより精度は約 1~1.5 桁向上した。このようにして導き出した ω_1 , ω_2 および $f_r (= \omega_0 / 2\pi)$ から式 (1) を用いて Q 値を算出した。

なお、本自動計測システムにより水晶振動子の f_r - T および Q^{-1} - T 特性の自動計測が始まり、温度が上昇するたびに測定がなされると、 f_r - T 特性および V_r - T 特性のグラフがディスプレイ上に表示され刻々と測定内容

がモニターできるようにした。ここで V_r はほぼ Q に比例するので V_r - T 特性はほぼ Q - T 特性に近いものとなる。

このプログラミングにおいては、温度の上昇に際して共振曲線の周波数帯域がシフトした時、測定する周波数帯域を自動的に追尾できるようにした。その方法について述べる。図5に示すように温度 T のときの共振電流の周波数に対する曲線（即ち共振曲線）は温度を少し上げて $T + \Delta T$ にするとわずかにずれることになる。共振曲線の測定が一番初めにはスタート時の共振周波数を与えてやる必要があるが、その後は自動的に最大共振電圧 V_r からスタート周波数 f_{sr} を決定して全て自動測定となるようにした。その方法は図5に示すように共振電流のピーク値を100%とすると、その60%以上のところの共振曲線を測定する。スタート周波数 f_{sr} から周波数を増加させていくと共振電流がピーク値を通過して、やがて減少し、再び共振電流のピーク値の60%レベル（図5の f_{stp} の位置）になったときに測定を終了し、温度が ΔT だけ上昇するのを待つ。温度が $T + \Delta T$ になったら次の測定を開始するが、そのスタート周波数は、常に一つ前に測定した共振特性のデータを元に、共振電流のピーク値の60%の周波数をパソコンに計算させて決定するという方法で温度が ΔT だけ上がるたびに共振特性を取り続けた。このような自動追尾方式によって温度が目的とする最終温度に達するまで共振特性のデータが自動的に取り込まれる。なお周波数掃引が負（ $-\Delta f / \Delta T$ ）の場合も上記に準じて行った。

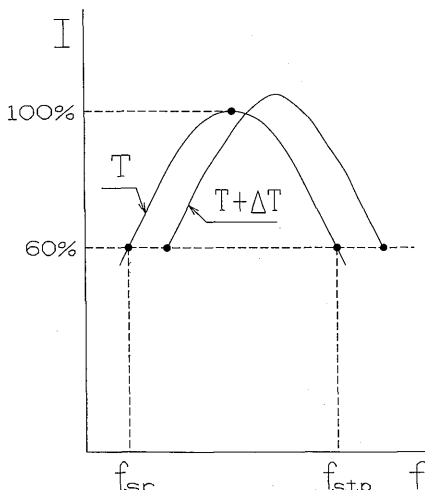


図5 掃引周波数帯域自動追尾方式の説明のための図。周波数 f に対する電流 I の曲線は ΔT の温度変化により微小量変化する。

2.2 水晶振動子の作製

本実験に供した水晶振動子の構造を図6に示す。

12mm×12mmのAT-Cut板（厚み0.960mm）の水晶板をプラノコンベックス型（これが前述のQR_L）およびバイコンベックス型（これが前述のQR_H）に研磨加工し、さらに鏡面研磨を施した後、フッ化水素酸（HF:55%含有）で約30秒（約25℃）のエッチングをした。この水晶表面に3,000Åの厚さのAu薄膜の電極を鍵穴状に蒸着し、水晶板の端にPt線を導電性接着剤で取り付けた。このようにして作製した水晶振動子は姿勢を一定に保たせるためにCu製のマウント台に固定した。

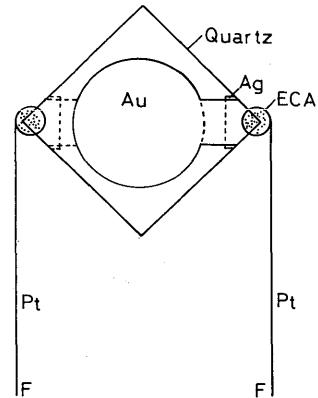


図6 本実験に用いた水晶振動子の構造。ECAは導電性接着剤（Electroconductive adhesive）。

2.3 水晶振動子の基本特性の自動測定系の特性評価

本自動測定系の特性評価は、(a)測定の精度、(b)測定に要する時間、(c)データ占有容量および(d)データの再現性について行った。

水晶振動子は、小型薄膜白金温度センサと共に真空チェンバーの中に入れ、一定の真空度 9×10^{-3} Torrに排気した。この真空チェンバーを温度可変型恒温槽の中に入れ、温度掃引を行った。

ある一つの温度において、一つの共振曲線を約0.6 V_r 以上の電圧範囲で周波数スイープする時間を周波数掃引時間 t_s とする。温度上昇速度 dT/dt が一定条件下で測定を行うためには、周波数掃引時間 t_s と温度上昇速度 dT/dt の積がステップ ΔT （例えば1℃おきに測定する場合は $\Delta T = 1^\circ\text{C}$ ）よりかなり小さいことが要求される。すなわち

$$(dT/dt) \cdot t_s \ll \Delta T \quad (2)$$

である。 dT/dt および f_s が一定の測定においては、水晶の Q 値が小さいと、周波数掃引時間 t_s が大きくなり、式(2)の左辺も大きくなり、磁気ディスクのデータ占有容量 M も大きくなる。そこで筆者等は、 Q および f_s を変化させたときの f 、 Q^{-1} の測定精度、周波数掃引時間、および t_s 、 M の関係を調べた。

上述の測定は一つの f_s に対し10回ずつ測定し、その平均値をとって相対誤差を求めた。 f_s の測定はストップ・ウォッチを用いた。一つの共振曲線(V - f 特性)を測定するとき、高周波電圧計の自動レンジの切替が起こらない時と起る時とがあり、起るときは最大2回であった。切替時間は安定のために十分な時間(1回の切替時間=3.25秒)を取った。以上の測定は全て一定温度(20℃)で行った。

水晶振動子の照射実験¹⁻³⁾および焼鈍実験⁴⁾においては照射または焼鈍毎に水晶振動子をマウント台から脱着を繰り返す必要が生じる。そこで水晶振動子を取り付けては測定し、外し、また取り付けては測定という脱着を何度も繰り返して測定し取り付け法の再現性を調べた。

3. 実験結果および考察

図7に二つの水晶振動子 QR_H および QR_L の f_s と周波

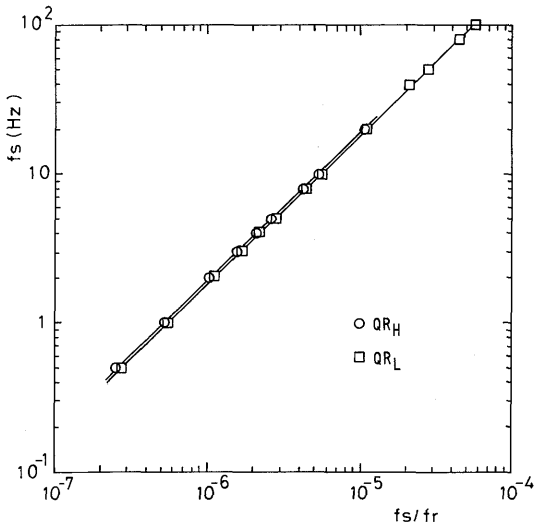


図7 QR_H および QR_L に対する f_s/f_r と f_s の関係。

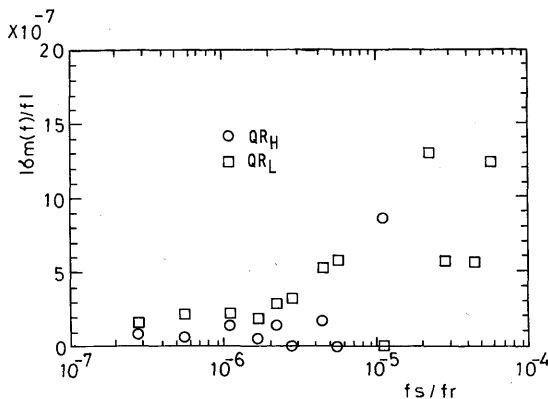


図8 f_s/f_r に対する共振周波数の平均値の相対誤差 $|\sigma_m(f)/f|$ 。

数ステップ率 f_s/f_r の関係を示した。同図のように二本の直線には大きな差がない。これは図4に示すように QR_H と QR_L の共振周波数に大きな差がないためである。

図8は共振周波数の測定値の平均値(10回測定の平均)の相対誤差 $|\sigma_m(f)/f|$ と周波数ステップ率 f_s/f_r の関係である。ここで $\sigma_m(f)$ は共振周波数の平均誤差を意味する。

図8に示すように共振周波数の相対誤差は f_s/f_r が大きくなるほど(即ち周波数ステップ f_s が大きくなるほど)大きくなる傾向が見られる。周波数ステップ f_s が大きくなると、周波数の分解能が悪くなるから $|\sigma_m(f)/f|$ が大きくなるのは当然の結果であろう。 QR_H の $|\sigma_m(f)/f|$ は f_s/f_r が小さいところにおいては、あまり大きな変動はなくほぼ一定の小さな値を示している。図8および図9に示すように、 QR_H の方が QR_L よりも $|\sigma_m(f)/f|$ および $|\sigma_m(Q^{-1})/Q^{-1}|$ は小さい。この原因は、図4(a)(b)の共振曲線から分るとおり、 QR_H の方は QR_L に比べ曲線が鋭いため共振周波数の誤差が小さくなるためである。

図8から明らかなように $|\sigma_m(f)/f|$ については QR_H の方は周波数ステップ $f_s \sim 10\text{Hz}$ (即ち $f_s/f_r \sim 5 \times 10^{-6}$)以下なら約 2×10^{-7} 以下であるし、 QR_L も $f_s \sim 5\text{Hz}$ (即ち $f_s/f_r \sim 2.8 \times 10^{-6}$)以下なら約 2×10^{-7} 以下におさまっている。

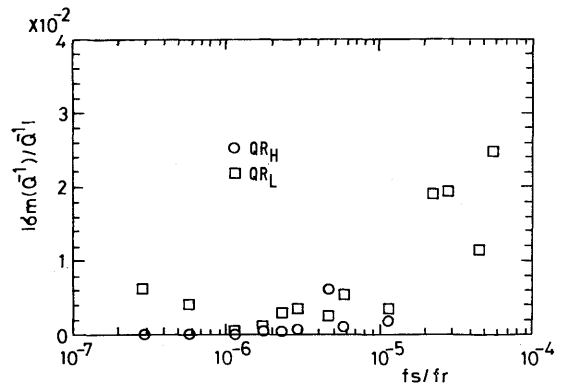


図9 f_s/f_r に対する Q^{-1} の平均値の相対誤差 $|\sigma_m(Q^{-1})/Q^{-1}|$ 。

図9は Q^{-1} の測定値の平均の相対誤差 $|\sigma_m(Q^{-1})/Q^{-1}|$ と周波数ステップ率 f_s/f_r の関係である。ここで $\sigma_m(Q^{-1})$ は Q^{-1} の平均誤差を意味する。

図9から判るように周波数ステップが大きくなるほど Q^{-1} の相対誤差も大きくなる傾向が見られる。この原因は、 Q を求めるための式(1)の計算で共振周波数が必要なので、周波数の相対誤差同様に、 f_s が大きくなると Q^{-1} の $|\sigma_m(Q^{-1})/Q^{-1}|$ が大きくなるのであろう。 QR_H の $|\sigma_m(Q^{-1})/Q^{-1}|$ は $f_s < \sim 10\text{Hz}$ ($f_s/f_r <$

$\sim 5 \times 10^{-6}$) においては, あまり大きな変動はなくほぼ一定の小さな値 1×10^{-3} 以下を示している。QR_Lの $|\sigma_m(Q^{-1})/Q^{-1}|$ は $f_s < 5\text{Hz}$ ($f_s/f_r < 2.8 \times 10^{-8}$) ならば約 0.8×10^{-2} を示している。

筆者等の内部摩擦の研究における実際の測定では QR_L のように低い Q 値の水晶振動子を用いることはなく, QR_H の Q 値程度の大きな Q 値の水晶振動子を用い, また f_s は 1Hz で行っている。従って, このような条件下 (高い Q 値で $f_s = 1\text{Hz}$) では測定精度は, その相対誤差において共振周波数に対して約 1×10^{-7} , Q^{-1} に対して約 1×10^{-3} 以下ということになる。

図 10 に周波数掃引時間 t_s (t_s には高周波電圧計のレンジ切替時間は含めない) と周波数ステップ率 f_s/f_r の関

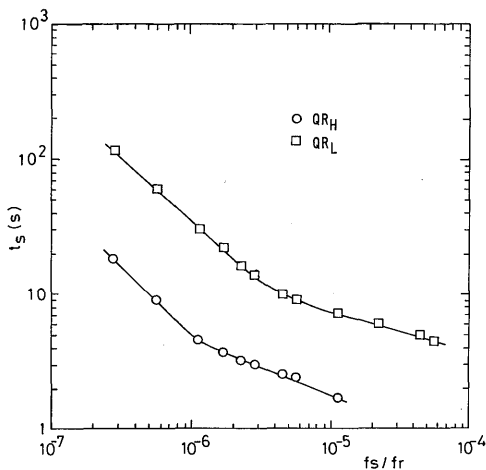


図10 f_s/f_r に対する一共振曲線当りの周波数掃引時間 t_s 。

係を示す。ここで f_s は図 7 から求まる。図 10 から判るように QR_L の t_s は QR_H の t_s より 1 桁大きい。

例えば $\Delta T = 1^\circ\text{C}$ で $dT/dt = 1^\circ\text{C}/\text{min}$ (最高温度上昇速度) とするなら

$$t_s \ll 60 \text{ (s)} \quad (3)$$

であることが望ましい。このことから Q 値の大きい水晶振動子は式 (3) を満たすことは簡単であるが, Q 値の小さい水晶振動子については f_s を少し大きくしてやらないと式 (3) を満たさなくなる。しかし f_s を大きくすると前述のように f と Q^{-1} の測定誤差が大きくなるため, f_s を大きくするには限度がある。従って Q の小さな水晶振動子の場合には f_s を十分注意して選ぶことになろう。たとえば QR_L に対しては $|\sigma_m(f)/f| \sim 2 \times 10^{-7}$, $|\sigma_m(Q^{-1})/Q^{-1}| \sim 1 \times 10^{-2}$ の誤差に留めて, かつ t_s を $f_s =$

1Hz のときの QR_H の値程度にするならば $f_s = 4 \sim 5\text{Hz}$ を要する。図 10 から明らかなように $f_s/f_r < S$ のとき

$$t_s \propto (f_s/f_r)^{-1} \quad (4)$$

$f_s/f_r > S$ のとき

$$t_s \propto (f_s/f_r)^{-1/2} \quad (5)$$

なる関係がみられる。但しここで S は QR_H に対しては約 10^{-6} , QR_L に対しては 3×10^{-6} である。

図 11 に磁気ディスクのデータ占有容量 M と周波数ステップ率 f_s/f_r の関係を示した。筆者等は測定に 5inch, 2HD の磁気ディスクを用いた。このディスクの総容量 M_t は 1,250,304 (Bytes) である。 Q^{-1} - T および f - T 特性を測定するとき, $20 \sim 100^\circ\text{C}$ の温度範囲を $\Delta T = 1^\circ\text{C}$ で温度スweepするなら, 80 回共振曲線を測定することになる。例えば, $f_s = 0.5\text{Hz}$ であると 80 回共振曲線を測定すると,

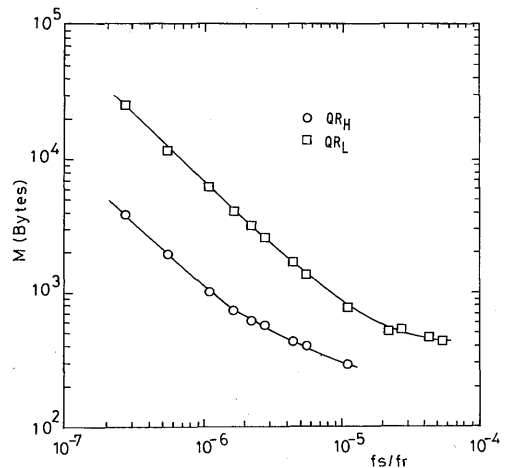


図11 f_s/f_r に対する磁気ディスクのデータ占有容量 M 。

$$\text{QR}_L: M \sim 2.3 \times 10^4 \times 80 = 1.84 \times 10^6 \text{ (bytes)} \quad (6)$$

$$\text{QR}_H: M \sim 4.0 \times 10^3 \times 80 = 3.20 \times 10^5 \text{ (bytes)} \quad (7)$$

$f_s = 1\text{Hz}$ で, 80 回共振曲線を測定すると,

$$\text{QR}_L: M \sim 1.2 \times 10^4 \times 80 = 9.60 \times 10^5 \text{ (bytes)} \quad (8)$$

$$\text{QR}_H: M \sim 2.0 \times 10^3 \times 80 = 1.60 \times 10^5 \text{ (bytes)} \quad (9)$$

となる。

従って一枚のディスクの総容量 M_L と比較すると、 QR_H についてはデータ占有容量には余裕があるが、 QR_L については $f_s = 1\text{Hz}$ で温度特性がcaろうじて1回とれ、 $f_s = 0.5\text{Hz}$ ではディスクの総容量を越えている。もちろんデータを複数のディスクに分けて記憶することも可能ではあるが、後で行うデータ処理・加工が不便になる点と、ディスクの節約を考えると、できるだけ1枚のディスクに収めたい。例えば、測定精度を $|\sigma_m(f)/f| \sim 2 \times 10^{-7}$ 、 $|\sigma_m(Q^{-1})/Q^{-1}| \sim 1 \times 10^{-3}$ に保ちつつ、 M を $f_s = 1\text{Hz}$ のときの QR_H の値 ($1.60 \times 10^8 \text{Bytes}$) 程度にするならば QR_L 場合は、 f_s を $4 \sim 5\text{Hz}$ にする必要がある。

しかしながら QR_L のように Q 値の小さい水晶振動子は前述のように我々の内部摩擦等の研究における測定には使用せず、 QR_H の Q 値程度の水晶振動子を用いることから以上のようなことはさほど気を使うことはない¹⁻⁴⁾。 M についても図11に示したように大略(4)(5)式と同様な傾向がみられる。

水晶振動子の取り付けの再現性については f_s を 1Hz で、水晶振動子の取り外し、取り付けを5回繰返し、その都度10回ずつ共振周波数 f_r と Q^{-1} を測定した。 f_r と Q^{-1} の測定結果を平均して(10回の測定の平均)一回の取り付けごとの相対誤差を求めた。その結果、 f および Q^{-1} に対し、それぞれ

$$\Delta f / f \sim 3 \times 10^{-7} \quad (10)$$

$$\Delta Q^{-1} / Q^{-1} \sim 10^{-3} \quad (11)$$

であった。したがって、水晶振動子の取り付けの再現性については、共振周波数の相対誤差および Q^{-1} の相対誤差とも測定に与える影響は無視できる程度に小さいといえる。

4. 結 論

本システムについて Q および f_s (または f_s/f_r) をパラメータとしたときの f_r および Q^{-1} の測定精度、 t_s および M の関係を調べたところ、以下のことが分かった。

(1) 用いる水晶振動子の Q 値に対応して f_s (または f_s/f_r) の値を最適値に選定することによって $\sigma_m(f)/f$ および $\sigma_m(Q^{-1})/Q^{-1}$ を必要とされるレベル以下に設定できるが、これは f_s および M にも関係するので、これらの値からの制約が存在する。

(2) t_s は $f_s/f_r < S$ のとき、ほぼ $(f_s/f_r)^{-1}$ に比例し、 $f_s/f_r > S$ のとき、ほぼ $(f_s/f_r)^{-1/2}$ に比例する。ここで S は QR_H に対しては $S(QR_H) \sim 10^{-6}$ 、 QR_L に対しては $S(QR_L) \sim 3 \times 10^{-6}$ である。 M についても大略こ

れと同様な傾向がみられる。

(3) $|\sigma_m(f)/f|$ については QR_H は $f_s \sim 10\text{Hz}$ ($f_s/f_r \sim 5 \times 10^{-6}$) 以下なら約 2×10^{-7} 以下であり、 QR_L も $f_s \sim 5\text{Hz}$ ($f_s \sim 2.8 \times 10^{-6}$) 以下なら約 2×10^{-7} 以下におさまる。

(4) QR_H の $|\sigma_m(Q^{-1})/Q^{-1}|$ は $f_s < \sim 10\text{Hz}$ ($f_s/f_r < \sim 5 \times 10^{-6}$) においては約 1×10^{-3} を示している。 QR_L の $|\sigma_m(Q^{-1})/Q^{-1}|$ は $f_s < 5\text{Hz}$ ($f_s/f_r < 2.8 \times 10^{-6}$) においては約 0.8×10^{-3} を示している。

(5) 水晶振動子の取り付けの再現性については、周波数については約 3×10^{-7} 以下に、 Q^{-1} については約 10^{-3} 以下となる。これらは筆者等の前述の研究目的¹⁻⁴⁾ に対し十分間に合う精度である。

本自動測定系による f および Q^{-1} の測定精度は、筆者等が取扱う Q が 10^4 オーダーの水晶振動子に対し $f_s = 1\text{Hz}$ の時、相対誤差にして、それぞれ f に対し約 2×10^{-7} 以下、 Q^{-1} に対し約 1×10^{-3} 以下であるといえる。

温度スペクトル測定時における周波数掃引時間 t_s については、 $Q = 6.53 \times 10^4$ 程度の水晶振動子に対しては f_s が小さくても式(2)の関係を満たすので $f_s = 1\text{Hz}$ 位が適切である。また $f_s = 1\text{Hz}$ では一つの温度特性を得る測定における M は約 $1.60 \times 10^8 \text{bytes}$ であり、これは M_L より数倍小さくなり、データ処理とディスク節約上都合がよい。

比較的ローコスト (といっても筆者等のシステムよりかなり高価) の市販のあるアナライザを調べたところ、 Q^{-1} の測定に関しては精度の配慮がなされていないため、 $|\sigma_m(Q^{-1})/Q^{-1}|$ の値は $10^{-1} \sim 5 \times 10^{-2}$ 程度であった。筆者等のシステムにおける精度の向上は上述したように、結局適切な内挿法・アベレーシング法の採用、および適切な f_s を選ぶことによる。

またトランスミッション法による水晶の f_r - Q^{-1} - T 特性の計測に関し、本システムのように自動追尾式で、ある程度可変な計測機能を有し、 Q^{-1} 、 f_r 、 R (等価抵抗) 等の測定値に関し十分な精度をもち、筆者等の $(f_r$ - Q^{-1} - T 特性を精度良く測定するという) 研究目的に適するような装置は現時点ではもちろん市販されてはいない。このような事情により、筆者等の研究目的に合う上記システムを試作し、その特性を調査したわけであるが、上述のように十分に役に立つものである。

参 考 文 献

- 1) T.Aoki, K.Norisawa and M.Sakisaka: "Frequency Change and Elastic Constants of Quartz Irradiated by 1MeV Electrons", Jpn.J.Appl. Phys.15,5 (1976) pp.749-754.
- 2) T.Aoki, K.Norisawa and M.Sakisaka: "Optical

- Absorption Study for Quartz Resonators Irradiated by MeV Electrons”, Jpn.J.Appl.Phys. **15**,11 (1976) pp.2131-2135.
- 3) T.Aoki and K.Wada: “Optical and Anelastic Absorptions and Resonator Frequency of Electron Irradiated Quartz” Jpn.J.Appl.Phys.**17**,6 (1978) pp.1015-1022.
- 4) 青木孝志, 實松武志: 導電性接着剤の焼鈍による特性変化および水晶振動子への影響, 中部大学工学部紀要, **29**(1993)pp.133-141.