

小形低周波水晶振動子の特性とその発振回路について (その1)※

本 多 誠 一, 岡 崎 英 次

Characteristics of the Miniature Type Low Frequency Quartz-Crystal Vibrators and the Oscillator Circuits Using the Vibrators

Seiichi HONDA, Eizi OKAZAKI

Abstract:— In order to make these things smaller, such as the standard low frequency oscillator, the X'tal clock and others, we have to make smaller the size of the X'tal vibrator which have to them.

We made miniature type X-Y flexion vibrators, they are 40 mm in the length and 0.5mm in the width and the thickness, by the Co-operation of a certain company.

Then we studied their electrical characteristics experimentally and the critically and the oscillation circuits using the vibrators are studied.

1. 緒 言

低周波標準発振器, 水晶時計等を小形化するためには, 発振回路はトランジスタを使用して小形化するとともに, 水晶振動子自身も小形化しなければならない。振動子を小形化することはその工作が困難であることは当然であるが, 振動子の定数も発振することが困難な値になり, 発振回路をそれに適するように設計しなければならない。こゝでは某社の協力によつて試作した長さ40mm, 巾及び厚味0.5mmの棒状 X-Y 撓み振動子についてその電気的等価諸定数を測定し, その定数に適するトランジスタ発振回路を試作実験したので, その結果について報告する。

なお, 上記寸法の水晶振動子は現在実用化されているものに比較すれば体積にして約 $\frac{1}{5}$ 程度の大きさであり, 共振周波数も約 $\frac{1}{5}$ 程度に低くなつている。

※ 本研究は文部省科学研究費の補助による。

2. 水晶振動子等価定数の測定

2.1 測定法

水晶の等価回路を図1のようにする。

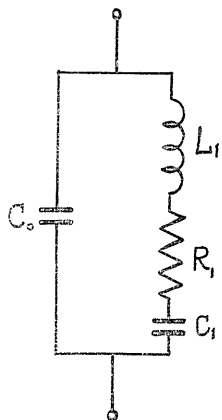


図 1

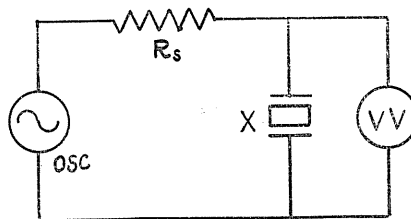


図 2

R₁および直列共振周波数の測定

図2の回路で可変周波数発振器 OSC より R_s (1 MΩ を使用) を通じて供試振動子 X に電圧を与え、両端間の電圧を真空管電圧計 VV (実際にはシンクロスコープを使用した。シンクロスコープの読みは電圧計程正確ではないが、波形歪等を監視出来るので便利である。) で読む。VV の読みが最小になるように OSC の周波数を調節すれば、その周波数が直列共振周波数 f₀ である。(この読みはフレクシーカウンターが無いのであまり正確ではない。また OSC の出力電圧を V₀、共振時の VV の読みを V₁ とすれば直列抵抗 R₁ は

$$R_1 = \frac{V_1}{V_0 - V_1} R_s \dots\dots\dots (1)$$

反共振周波数 f_a の測定

反共振周波数 f_a を求むるには、図3のような回路で VV の振れが最小になる周波数を求むればよいのであるが、実際問題としては f₀ と f_a 極めて接近しているので余程正確に読まないとその差 Δf_a は極めて誤差の大きいものとなる。実際の測定は図4のような回路で行なつた。同図で補助発振器 OSC-2 は f₀ に一致させておき、OSC-1 で f_a を求め、シンクロスコープ CRO のリサーチ波形で OSC-1 と OSC-2 との差周波数 Δf_a を求めることにした。

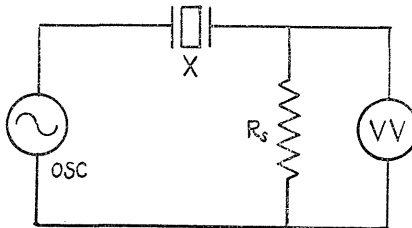


図 3

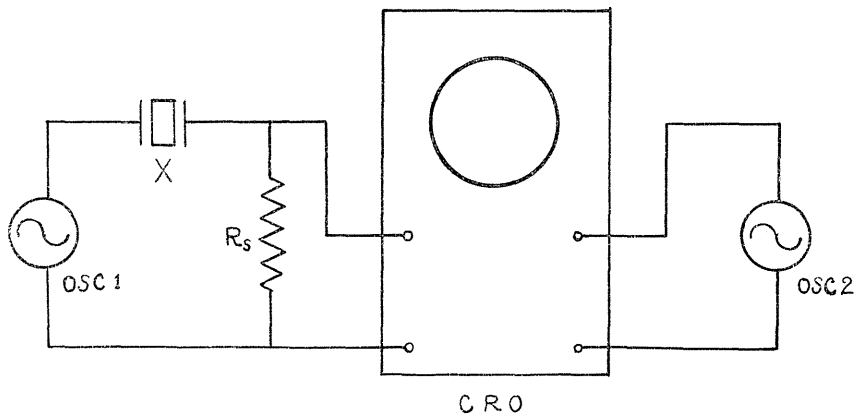


図 4

C₀の測定

f_0 附近以外の周波数でQメータ又はインピーダンスブリッジ等により静電容量を測定すればよい。この実験では図3と同じ回路でOSCの周波数を10kc, $R_s=250k\Omega$ として C_0 によるリアクタンスを求めた。

上記のようにして $R_1, \Delta f_a, C_0$ が求められれば容量比

$$\gamma = \frac{C_0}{C_1} = \frac{1}{2} \frac{f_0}{\Delta f_a} \dots\dots\dots (2)$$

として C_1 が求められ, また

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_1 C_1}} \dots\dots\dots (3)$$

の関係より L_1 が求められる。なお

$$Q = \frac{2\pi f_0 L_1}{R_1} \dots\dots\dots (4)$$

として Q も求められる。

2.2 測定結果

測定は試料2個について行なつたが, 上のような測定方法では相当の誤差(10%~20%)を含み, 2個の試料の差異がその誤差の範囲内でも判別出来なかつたので同一の結果として示すことにする。

$$\left. \begin{aligned} f_0 &= 1728.1 \text{ c/s} \quad \text{及び} \quad 1743.9 \text{ c/s} \quad (\text{東通の測定}) \\ C_0 &= 9.1 \text{ PF} \\ \gamma &= 435 \\ C_1 &= 0.021 \text{ PF} \\ L_1 &= 4 \times 10^5 \text{ H} \\ R_1 &= 350 \text{ k}\Omega \quad Q = 12500 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (5)$$

2.3 理論値との比較

前節の測定結果をみると容量比は435と予想外に小さな値を有している。このような小

さな値が理論上得られるかどうかを検討してみよう。

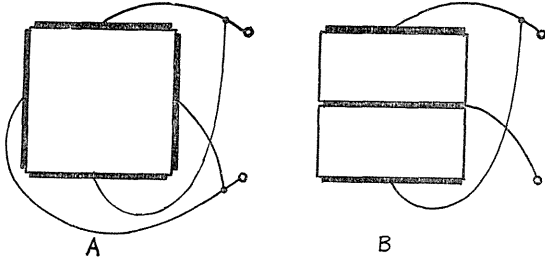


図 5

理論的に図5Aのような断面のX-Y撓み振動子内の電界分布を解くことは困難なので、こゝでは極めて粗雑ではあるが図5Bのような貼合せ形振動子と等しいものと考えことにする。なお振動子の長さ、巾、厚味をそれぞれ l, b, t とする。

共振周波数 f_0

材料の密度を ρ , ヤング率を E とすれば,

$$f_0 = 9.025 \frac{t}{l^2} \sqrt{\frac{E}{\rho}} \dots\dots\dots (6)^{(1)}$$

いま

$$\rho = 2.654^{(2)}$$

$$E = \frac{1}{S_{22}} = \frac{10^{12}}{1.295}^{(3)}$$

とすれば

$$f_0 = 1730 \text{ c/s}$$

となり実験とよく一致する。

静電容量静電 C_0

静電容量 C_0 は図5Bの場合厚み $t/2$ のものが2個並列にあるから、誘電率を K とすれば

$$C_0 = \frac{Klb}{\pi t} E. S. U = \frac{Klb}{\pi t} \times 1.11 \text{ PF} \dots\dots\dots (7)$$

いま $K=4.5^{(2)}$ として $C_0=6.4 \text{ PE}$

C_0 の実測値は 9.1 PF であるが図5Bのような大略の近似及びストレーキャパシターの影響を考えればこの程度の誤差は止むを得ないであろう。

容量比 r

図1の直列抵抗 R_1 を理論的に求めることは困難である。あとは容量比 r が求めれば L_1, C_1 等は f_0, C_0 および r より決定される。

さて水晶振動子による電気機械変換回路は図6のように考えられる。こゝで基本波共振の近傍では自由-自由棒の撓み振動について

$$m_1 = \frac{1}{4} \rho l b t \dots\dots\dots (8)$$

$$s_1 = \frac{\alpha_1^4}{4} \frac{k}{l^3} = 10.5 \frac{b t^3}{l^3} E \dots (9)$$

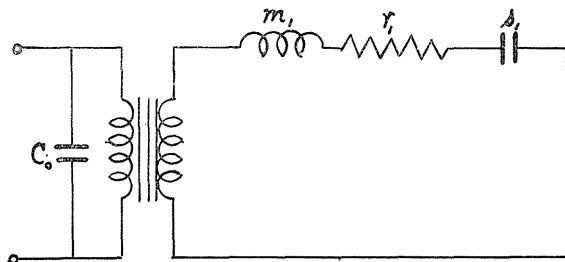


図 6

(α_1 および k については文献(1)参照。)

また力係数 A は圧電定数を e とすれば

$$A = \sigma_1 \frac{bt}{2l} e \dots\dots\dots (10)$$

ここで $\sigma_1 = \sigma_2 = 9.3$ 従つて

機械定数 s_1 を電気回路側に換算した容量 C_1 は

$$C_1 = \frac{A^2}{s_1} = \frac{\left(\sigma_1 \frac{bt}{2l} e\right)^2}{10.5 \frac{bt^3}{l^3} E} = \frac{\sigma_1^2 e^2}{4^2 E} \cdot \frac{bt}{l} e s u \dots\dots\dots (11)$$

ここで E, σ_1 に前記の値を用い $e = e_{12} = e_{11} = 4.77 \times 10^{-4} \text{ ESU}^{(3)}$ とすれば,

$C_1 = 1.0243 \text{ ESU} = 0.027 \text{ PF}$ 故に

$$r = c_0/c_1 = 6.4/0.027 = 236$$

C_1 の値は実測値 0.021 PF に対して, 計算値 0.027 PF と図5に示すような粗雑な仮定にもかかわらず比較的よく一致している。容量比は実測値 435 に対して計算値 236 と異なっているが, 容量比の実測にはストレーキャパシターも含まれているので止むを得ないであろう。

3. 発振回路の試作及び実験

使用した水晶は上述のようにインピータンスが高く, 通常のパイアス回路のように反共振を利用する回路でトランジスタと組合せるのは困難であるので, 直列共振点付近で使用する

回路を用いることにした。図7の回路で増中器の増中度を A , 入力インピータンスを R_i 振動子の直列抵抗を R_1 とすれば発振条件は

$$\frac{A R_i}{R_1 + R_i} > 1 \dots\dots\dots (12)$$

であることが必要である。例えば $R_1 = 350 \text{ k}\Omega$, $R_i = 5 \text{ k}\Omega$ とすれば A として約 37 db 以上が必要となる。そこで図8 A Bの回路を試作した。

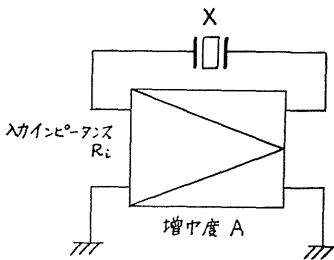


図 7

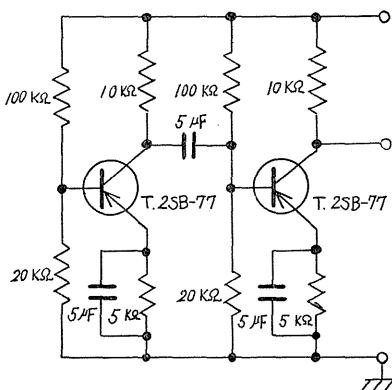


図 8 A

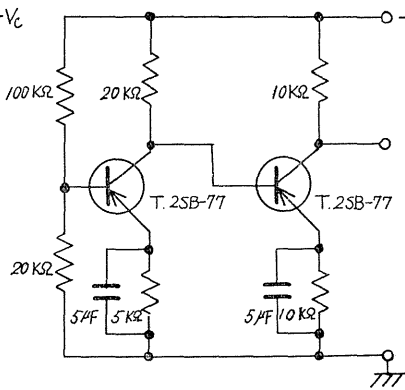


図 8 B

図8 A形 $A=66\text{ db}$, $R_i=13\text{ k}\Omega$
 $A=71\text{ db}$, $R_i=13\text{ k}\Omega$

図8の回路の入出力間に振動子を接続して実験すると容易に発振して出力波形は殆んど矩形に飽和している。更に図9の如きブリツジスタビライズの回路を用いれば水晶の高いQは見掛け上増大して周波数安定度

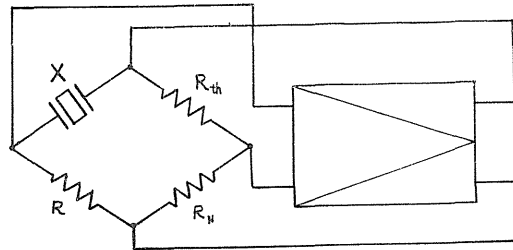


図 9

が良くなるはずである。 R_N 又は R_{th} には非直線抵抗を使用する。

図8の回路を安定化するために適当なサーミスタがなかつたので、A回路を図10のように変更した。次に変更方法について略記する。

図10は発振周波数の電流に着目すれば図9と同じになる。図9の増巾器の入出力端子は図10では i' 点及び o' 点に相当する。今此の増巾器の増巾度をA倍、入力抵抗を R_i とすれば発振条件は次式で

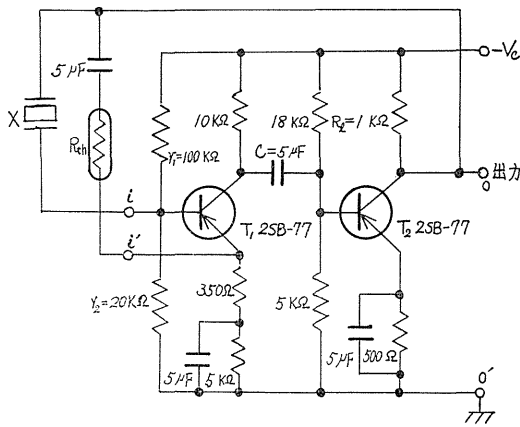


図 10

表わせる。

$$\frac{\frac{R_{th0}}{R_{th} + R_N} - \frac{R_1}{R_1 + R}}{R_i + \frac{R_1 R}{R_1 + R} + \frac{R_{th} R_N}{R_{th} + R_N}} \times A > 1 \dots\dots\dots(13)$$

但し

$$R = \frac{r_1 r_2}{r_1 + r_2}$$

R_{th0} ; 電流の小さい時のサーミスタの抵抗

R_1 ; 水晶の直列抵抗

又Aが充分大きければサーミスタの抵抗は

$$R_{th} = \frac{R_1 R_N}{R} \dots\dots\dots(14)$$

に近い値まで低下して安定する。したがって図10のトランジスタ T_2 の全負荷抵抗は此の変化の為に大巾に変動し、交流的動作点が移動する。表1は室温 8°C 及び 30°C における R_N の種々な値に対する発振所要の増巾度 A_0 及びサーミスタ抵抗値の変化範囲である。

図11は R_N を種々変化して出力電圧が正弦波である領域を求めたものである。負荷抵抗 R_i は $R_{th} \gg R_i$ という条件を満足させ (サーミスタの抵抗変化に対して出来るだけ T_2 の負荷の変動をさけるため。) 而も発振出来る値として $1\text{ k}\Omega$ にえらんである。この図から電源電圧変化の影響を最も受けない R_N の値は 350Ω であることがわかる。而し表1から $R_N=350\Omega$ は室温 30°C 以上で発振不能になる値であるが、実験では電源電圧を広範囲に

表 1

室温	R_N [Ω]	A_0 [倍]	R_{th} の変化範囲 [$k\Omega$]
8°C	200	77	11.5 ~ 2.7
	300	110	11.5 ~ 5.4
	400	230	11.5 ~ 8.0
	500	発振不能	
30°C	200	230	5 ~ 4.4
	300	発振不能	

計算に必要である 30°C のサーミスタ特性は大泉製作所発表のもの⁽⁵⁾ 8°C は実測値を用いた。

$R_1 = 350 k\Omega$

$R = 16 k\Omega$

R_{th} ; 大泉製 OS-B2

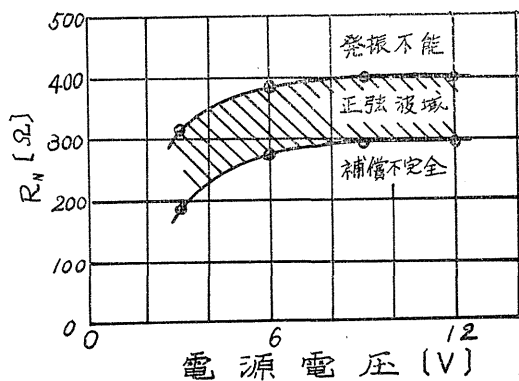


図 11

変化したかつたので此の値を使用した。(以上の実験及び推定値はサーミスタ OS-B2 とトランジスタ 2SB-77 2段の組合せでは安定な発振器を作ることが困難であることを示している。即ちサーミスタ抵抗の変化が出力電圧より室温に影響されているところで動作させなくてはならないからである。完全にするにはトランジスタに合ったサーミスタを作るか、又は β と許容コレクタ損失の大きいトランジ

スタを用いるかせねばならない。

次に T_1, T_2 にシリコントランジスタ 2 石を用いた水晶発振器で、どの程度に少ない消費電力で発振するかを理論的にしらべてみることにする。ゲルマニウムトランジスタでは、低電圧低電流で動作させると温度補償が困難なので、本実験ではシリコントランジスタを用いることにした。

図12のような発振器で低電圧電源、低電源電流で動作させることを主眼として発振条件を求めてみる。2石とも同一特性であるとすれば図12の等価回路として図13を得る。図13で文献(6)に依れば、

- (1) h_{12} は動作電流が小さくなる程小さくなり h_{11} は大きくなるので、トランジスタの入力抵抗は 1 段目 2 段目共に h_{11} と考えられる。
- (2) 1 段目の h_{22} は省略出来るが 2 段目は略せない。
- (3) $R_1 \gg h_{11}$ (但し水晶に依つては此の省略が出以なくなる。

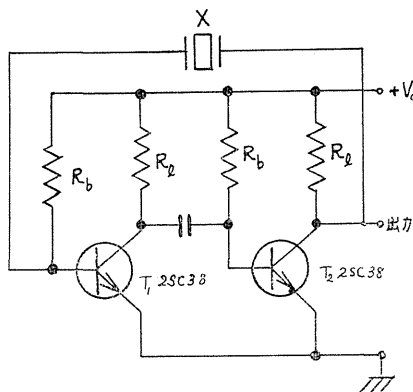


図 12

(4) $R_g \gg h_{11}$ $R_g \gg R_l$

図14に簡易化とした等価回路を示す。発振するためには

$$\frac{\beta^2 \frac{1}{h_{11}} \cdot \frac{1}{R_l}}{\left(\frac{1}{R_l} + \frac{1}{h_{11}}\right) \left(\frac{1}{R_l} + h_{22} + \frac{1}{R_l}\right)} > 1 \dots\dots\dots (15)$$

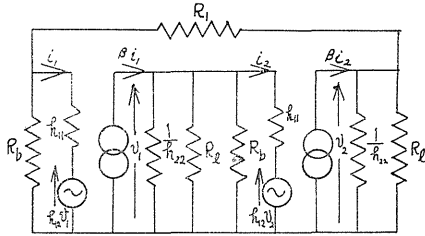


図 13

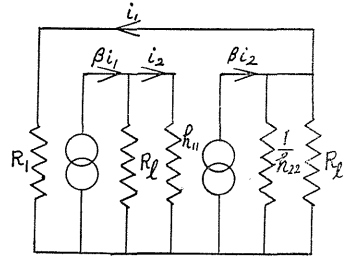


図 14

即ち発振を容易にするためには R_l を大きくすればよく、之はコレクタ電流をへらす手段にもなるが、過大にすぎると β の減少, h_{11} の増大で発振不能になる。文献(6)及び式(15)より電源電圧 0.9V の時の各定数を推定すれば表2のようになる。表中 I_b は R_l に於ける最適動作点推定値である。

表 2

文 献 (6) よ り					計 算 値				
R_l [kΩ]	I_b [μA]	I_c [μA]	h_{22} [μV]	h_{11} [kΩ]	$\beta_{(1)}$	消費電力 [μW]	発振所要の $\beta_{(2)}$	$M = \frac{\beta_{(1)}}{\beta_{(2)}}$	
10	3	25	1.5	15	14	60	9.5	1.5	
50	2	12	1	26	9	25	3.7	2.4	
50	1	6	1	50	6	13	4	1.5	
70	1	5	1	50	6	11	3.1	1.9	
100	1	5	1	50	6	11	2.6	2.3	

4. 実 験 結 果

4.1 電源電圧変動に依る周波数の変動

変動の測定法

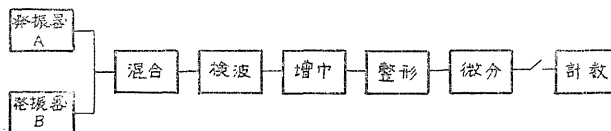


図 15

図15でA発振器は図10の回路に 1743.1 c/s の水晶を用いたもの、B 発振器は図 8 のB回

路に 1728.1c/s の水晶を用いたものである。発振器 B の電源電圧は 6V 一定として、水晶自体の周波数を発振して、発振器 A の電源電圧を 6V から上げてゆき、電源電圧変化に対する周波数の変化を 6V の時を 0% として求めることにした。周波数の変化は A 発振器と B 発振器の差の周波数約 15c/s の変化として計算装置に依りかぞえた。(実際には計数装置に差の周波数を 2 分だけ加えた。) 此の時間の相対的な誤差は測定値に影響を与える。計数装置の開閉はストップウォッチをたよりに手動で行なつた。此の様な方法でも 10^{-5} 程度の周波数変動は正確に、又多少の誤差を許すならば 10^{-6} 程度まで検出できることをたしかめてある。

測定結果

測定結果を図16に示す。即ち補償しない場合 (10図の R_{th} を取り去り $R_N = 350 \Omega$ をショートとする。) は 6V から 12V の間で平均に 1V 対して $-3.3 \times 10^{-5} \%$ の変動があるのに対して、補償した場合は $-1.2 \times 10^{-5} \%$ と変動が改善されている。更に結合コンデンサ (図10の C) を $5\mu F$ から $55\mu F$ にした時は $0.3 \times 10^{-5} \%$ と良くなっている。之は若干の位相特性の改善に依るものと思われる。故に適当なサーミスタで図 8 B の回路定数を変えずに補償出来たら更に良い変動特性を示すであろう。

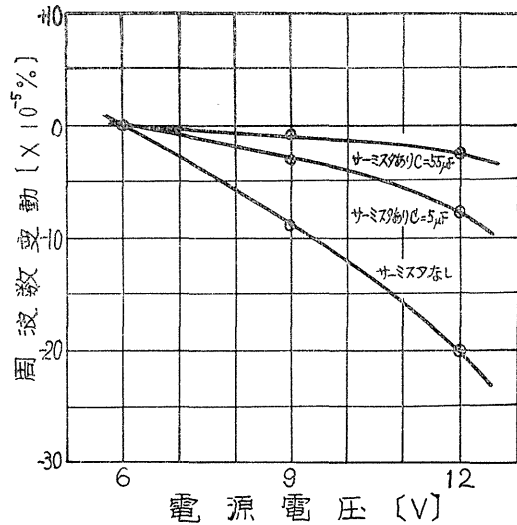


図 16

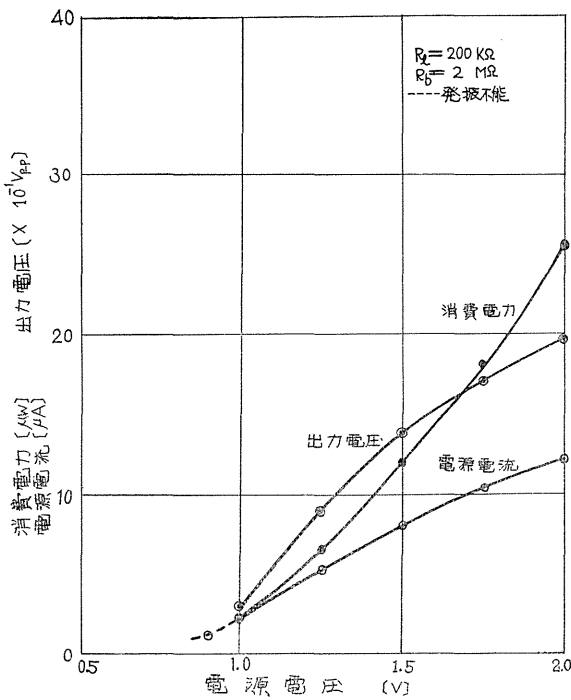


図 17

4.2 低電力動作の実験結果
 図17~図19に R_t 及び R_g の特定な値に対して、電源電圧 V_s を変化した場合の全電流、消費電力及び出力電圧の尖頭値を測定計算したものの、数例を示す。又図20は表 2 の M と発振停止

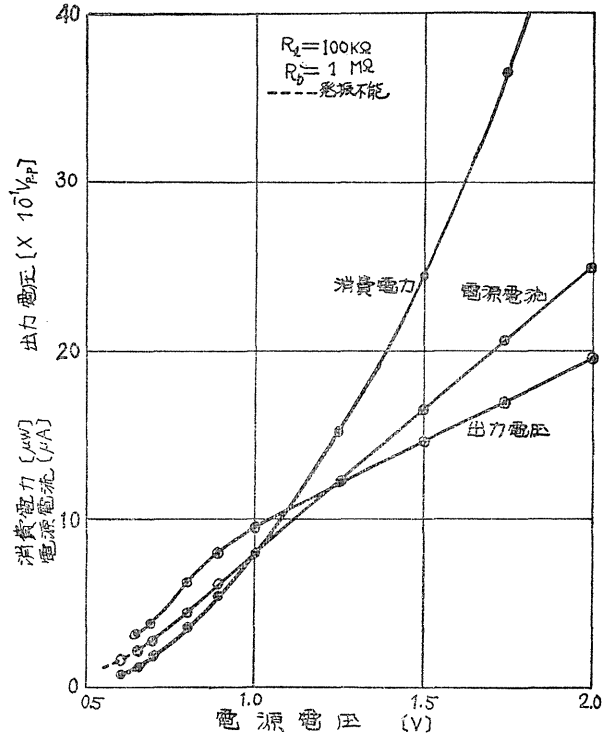


図 18

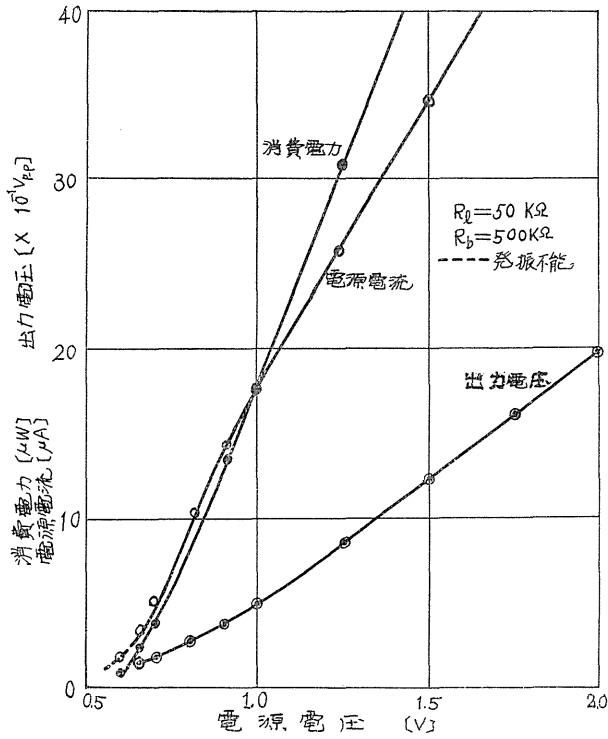


図 19

電圧の関係を示したものである。之等の結果より

- (1) 計算値との若干の違いは I_b を正しく合せなかつた為と思われる。(合せてもトランジスタのバラツキ等の為に実用化を考えれば無意味である。)
- (2) 図20では M の値が大きい程低電圧まで発振することを表わして、大体理論と一致している。
- (3) 出力電圧は電源電圧 1.5V 以上では殆んど電源電圧でさまる。

以上のことから特性表があれば低電圧低電流動作に於ても充分計算に依り設計出来ることがわかつたが、一般に此のような低電圧範囲に於けるトランジスタの特性は発表されていない。又トランジスタ及び水晶の特性に依つては必ずしも(15)式は使用出来なくなる。

5. 結 言

本実験に依り上述のように小形低周波水晶振動子を用いても発振が可能であり、またその周波数変動及び周波数安定度がブリツジスタビライズによつて向上し得ることが明らかになつた。一方発振器の消費電力は $2\mu\text{W}$ 前後という低電力でもよいことも判明した。なおブリツジスタビライズの外温に対する安定化及び温度による周波数変動等については追つて研究を続けたい。

振動子を試作された東洋通信機株式会社水晶事業部の各位、及び実験に協力された今仁将、戸部滋、藤井弘道の諸君に感謝する。

参 考 文 献

- (1) 鈴木 「機械振動定数表」
- (2) 古賀 「圧電気と高周波」
- (3) 「通信工学大鑑」
- (4) 抜山, 鈴木 「M形圧電振動子の振動姿態と其の電気音響定数」電通誌昭17.6月
- (5) 大泉製作所 「OS サーミスタカタログ」
- (6) 本田, 池田 「低電圧低電流におけるシリコントランジスタの特性とフリツプフロッツ回路の微小電力動作の研究」本集報

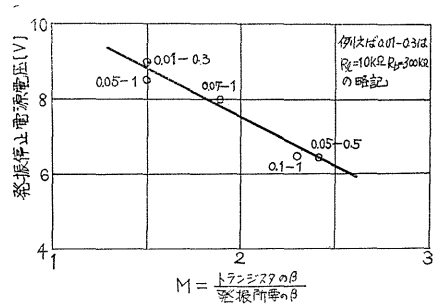


図 20

$$M = \frac{\text{トランジスタの}\beta}{\text{定数}\beta}$$