

真空管タイプ低周波数水晶振動子を用いた発振回路の構成について

On the configuration of oscillator circuit using a tube-type low-frequency crystal resonator

*作田 幸憲¹

*Yukinori.Sakuta¹

Abstract: We found many number of the old quartz crystal resonators in a prepare-process for CST-Museum. One of these resonators is a resonator having 4 terminals to seem such as NT-cut resonator which does not use in present. There is not a detail of this resonator. So In this paper, we tried to examine about this resonator.

1. まえがき

2017年7月より公開される CST-Museum の担当学科が電子工学科となることに関連して、過去に行われた水晶振動子、発振器に係わる仕事を調べた。この調査を通じて、多くの水晶振動子が見つかった。

電子工学科 初代主任の高木 昇先生が開発に係わった振動子も含め、昭和初期から昭和 30 年代辺りのものまで、現在では使用されなくなった型式の振動子も多数見つかった。

本稿では、真空管タイプの振動子を取上げ、その特性や発振回路の構成などについて検討を加えたので報告する。

2. ガラス管封入型水晶振動子

写真 1 に示す水晶振動子（共振周波数 15 kHz, 昭和 30 年 2 月製）は、図 1(a)に示すように 4 つの電極をもつ振動子で、屈曲振動する振動子である NT カット振動子^[1]と思われるものである。屈曲振動は、AB 間に加わる電界と CD 間に加わる電界が逆になり、図 2 に示すように一方の辺が伸びるのに対して、他方の辺が縮むような振動を交互に繰り返すような振動であり、低周波数振動を発生させるために考案された振動子である。

振動子はガラス管に封入され、8 ピンの真空管ソケットを用いて使用する構成となっているが、電極に対するピン配置が不明のため、まず文献による調査を行った。文献[1]の中に図 1(b)に示すような規格があることを見つけたが、実際の振動子の電極 A~D に対するピンは 2~8 の偶数ピンであることは同じであったが、それぞれ独立していることがわかった。

また、この振動子は図 3(a)に示すように、端子 BD を共通とし、3 端子回路網としての利用する方法もあるとのことであるが、今回の検討では近年の振動子の構成と同じく、2 端子回路として利用することとした。このとき、振動子は図 3(b)に示すように、端子 AC 及び端子 BD を一緒にし、2 端子とすることにより、通常的水晶振動子の等価回路となる。

3. 等価定数の測定

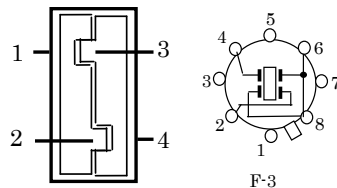
水晶振動子の等価定数を測定する方法については、古くより種々の方法が考案されてきた^{[2][3]}が、近年の測定では、高周波化の要請に伴い、ネットワークアナライザを使用する方法が多くなった。このようなことから、今回のような低周波振動子の等価定数を容易に測定する道具がないのが実情となっている。

図 4 は水晶振動子に直列に容量を接続した場合の等価回路が元の等価回路と同じ構成となることから、これを利用して測定することとした。両回路には下記のような関係がある^[4]。

$$C_0' = \frac{C_s C_0}{C_s + C_0}, R_1' = R_1 \left(1 + \frac{C_0}{C_s}\right)^2, L_1' = L_1 \left(1 + \frac{C_0}{C_s}\right)^2,$$

$$C_1' = \frac{C_1 C_s^2}{(C_s + C_0)(C_1 + C_s + C_0)} \quad (1)$$

図 5 は測定に使用した回路構成を示している。L₁' と C₁' の共振状態(ω₁'=1/√L₁'C₁')で、振動子部分は R₁' と C₀' の並列回路



(a) electrode (side view) (b) pin-contact due to Ref.[1]

Picture 1 Tube-type resonator (Octal pins)

Figure 1 Tube-type resonator

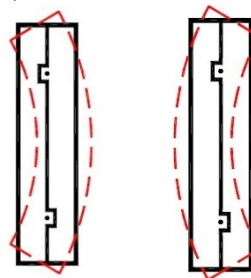


Figure 2 Vibration mode of NT-cut resonator

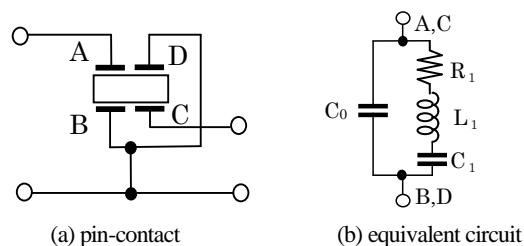


Figure 3 NT-cut resonator

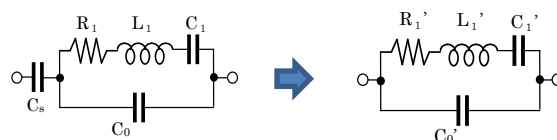


Figure 4 Equivalent circuit of the crystal resonator with series capacity

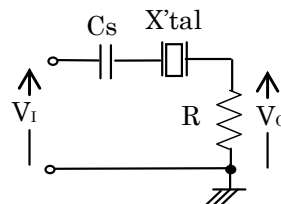


Figure 5 Configuration to measure equivalent parameters.

1:日大理工・教員・電子

となるが、一般に、 $R_1' \ll 1/\omega_1' C_0'$ であることから、図 5 の V_1 と V_0 は同位相となる。このとき、共振周波数 f_1' は次式で表せる。

$$f_1' \cong f_1 \cdot \left\{ 1 + \frac{1}{2} \cdot \frac{C_1}{C_s + C_0} \right\} \quad (2)$$

上式より、 $C_s = \infty$ 大では $f_1' \cong f_1$ となり、いくつかの C_s により f_1' を測定すれば、連立方程式を解くことにより、 C_1 、 C_0 を求めることができ、併せて、 V_1 、 V_0 より R_1 も求めることができる。

表 1 は、このような方法で求めた等価回路定数である。結果より、等価抵抗は数 kΩ 程度あり、Q 値は 5 万弱あることがわかった。また、共振周波数は低周波数であることもあるが、極めて等価インダクタンスが大きいことがわかった。

Table 1 Equivalent parameters of crystal resonator

f_r [Hz]	R_1 [kΩ]	L_1 [H]	C_0 [pF]	Q
15 000.94	3.8	1886	31.3	47×10^3

※ C_0 is including socket's capacitor.

4. 発振回路の構成

次に、この振動子を発振させることについて検討した。文献 [1] によれば、図 3(a) の 3 端子構成で用いる回路構成が記載されていた。この振動子を用いていた時代の発振回路は真空管によって作られていたと考えられるが、ここではバイポーラトランジスタを用い、図 3(b) の 2 端子構成で発振回路を構成することについて検討した。

図 6 は検討した発振回路の構成を示している。発振時に、水晶振動子は誘導性インピーダンスで働くため、発振回路は同図 (b) に示すような等価回路で表すことができる。すなわち、振動子は抵抗 R_Q とインダクタ L_Q の直列接続で表され、回路側は負性抵抗 $R_L (< 0)$ とキャパシタ C_L の直列接続で表される。

この回路が発振するとき、下記のような条件が必要となる。

- 電力条件： $|R_L| \geq R_Q$ (3)

- 周波数条件： $\omega_0 L_Q = 1/\omega_0 C_L$ (4)

このとき、発振周波数 f_0 は、次式となる。

$$f_0 = 1/2\pi \sqrt{L_Q C_L} \quad (5)$$

一般に、式(3)については、 $|R_L|$ が $5 \times R_1$ 程度は必要であるとされていることより、この条件を満たし、乾電池(≒9V)でも駆動できるような回路構成を考えることとした。

図 6 の回路の小信号等価回路より、 R_L 、 C_L を算出すると、次式のように求められる。

$$R_L = -\frac{g_m}{\omega_0^2 C_1 C_2} \cong -\frac{I_{EQ}}{0.025 \cdot \omega_0^2 C_1 C_2}, C_L = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2} \quad (6)$$

式(6)は、 $1/(\omega_0 C_2) \ll R_e$ 、 $1/(\omega_0 C_1) \ll h_{fe}$ となるような条件の下で誘導した。しかし、この条件を満たそうと考えたとき、低電源電圧でトランジスタを駆動させるためには、 R_e やブリーダ抵抗を大きくすることが難しく、また、発振周波数が 15kHz 近傍であるため、 C_1 、 C_2 のインピーダンスを小さくさせるためには、大容量のキャパシタを用いる必要が生じることがわかった。

ここでは、上記の条件を満たすため、高 h_{fe} のトランジスタ (2SC1345, $h_{fe} \geq 600$) を使用し、発振回路を作製した。

電源電圧 9V に対して、トランジスタの直流動作点 (V_{CEQ} , I_{CQ}) が (5V, 1mA) 程度となるよう回路定数を定めた。

表 2 に、使用した回路定数値を示す。この値を基に、 R_L と C_L を算出すると、 $R_L \cong -23k\Omega$ 、 $C_L \cong 6700pF$ 程度になると見積もられた。

写真 2 に発振波形を示す。(a) は、エミッタ端子における電圧波形 (DC 結合) で、歪んだ波形ではあるが、7V_{pp} で発振した。

(b) は電流波形で振動子とアースの間に抵抗 100Ω を挿入し、そのときの 100Ω 両端の波形を撮影したものである。縦軸の値は

電流の換算値を示し、0.8 mA_{p-p} で発振していることが分かる。

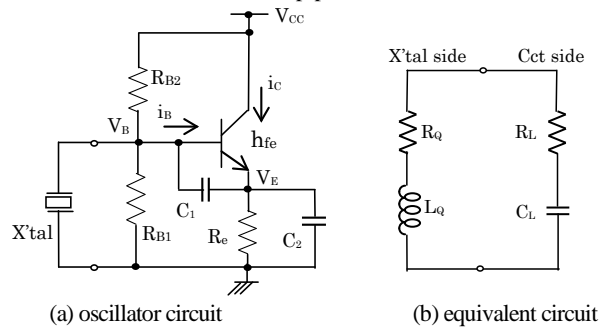
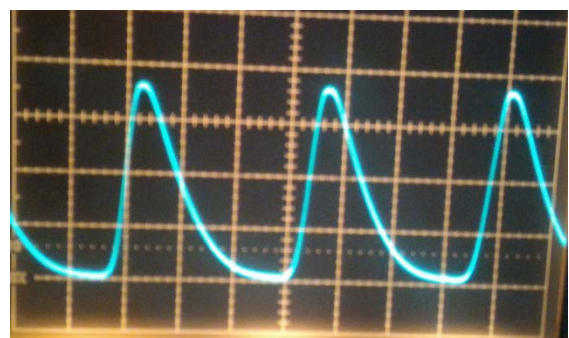


Figure 6 Crystal oscillator circuit and its equivalent circuit

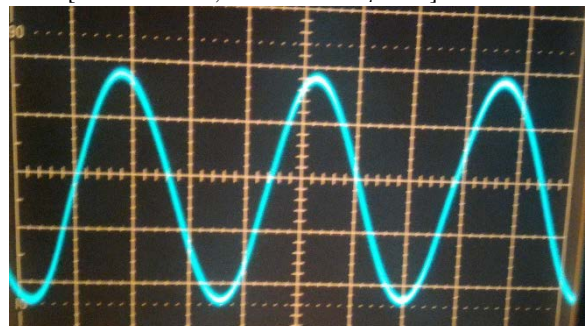
Table 2 Parameters of oscillator circuit

V_{cc} [V]	R_{B1} [kΩ]	R_{B2} [kΩ]	R_e [kΩ]	C_1 [nF]	C_2 [nF]
9.0	330	270	3.9	20	10



(a) output voltage (v_E : DC-coupling)

[Vertical: 2 V/div, Horizontal: 20 μs/div]



(b) crystal current [Vertical: 0.2 mA/div, Horizontal: 20 μs/div]

Picture 2 Oscillating wave forms

5. まとめ

以上、低周波数水晶振動子の等価定数測定と発振回路の構成について検討した。62 年前に製造されたものではあるが、十分発振可能であり、当時の製造技術の高さを知ることができた。

今回の検討を通じて、従来の論文などでは明らかとされていない振動子の端子配置等の情報を知ることができた。

6. 参考文献

- [1] 滝貞雄：“人工水晶とその電氣的応用”，日刊工業新聞社 (1974.05).
- [2] IEC publication 60444：“Measurement of quartz crystal unit parameters”.
- [3] 作田幸憲，渡邊充紘，今池健，関根好文：“超高周波水晶振動子の周波数特性測定に関する一検討”，電気学会論文誌，132-A, 10, pp.871-877 (2012.10).
- [4] 川上正光：“改訂基礎電気回路 I”，p.105, コロナ社 (2008.12)