

M-2

超高周波水晶振動子の等価パラメータの測定
 -並列容量の評価-

Measurement of the equivalent parameters in super-high frequency crystal resonator
 -Evaluation of the parallel capacitance-

渡邊充紘¹, ○船津拓未², 作田幸憲³, 今池 健³, 関根好文³

Mitsuhiro Watanabe¹, *Takumi Funatsu², Yukinori Sakuta³, Takeshi Imaike³, Yoshifumi Sekine³

Abstract: We discuss a measurement method of the equivalent circuit's parameters in super-high frequency crystal resonator. In this paper we evaluate the measured value of the parallel capacitance.

1. まえがき

近年の微細加工技術の進歩に伴って VHF・UHF 帯に及ぶ水晶振動子の特性を測定することが必要になっている。そこで、我々はマイクロストリップライン形共振器(以下 μ 回路と記す)の反共振状態を利用して高 Q な水晶振動子の特性を抽出する方法^[1]を検討している。基本的に μ 回路は分布定数回路となるが、共振周波数近傍の特性が集中定数回路によって表現可能なことを明らかにした^[2]。

本稿では、 μ 回路の集中定数表現の最適化について議論すると共に、これを用いた水晶振動子の並列容量の測定法について検討したので報告する。

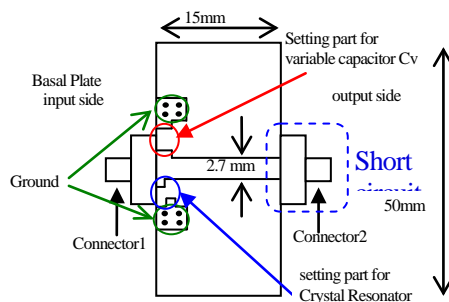


図1 μ 回路の構成

2. マイクロストリップ形共振器の特性

図 1 に、先に提案した μ 回路の構成^[1]を示す。これは終端を短絡し、ショートスタブの根方に水晶振動子とトリマコンデンサを並列に設置する構成となっている。終端短絡時の μ 回路の入力端より見たインピーダンス Z_s は、 Z_w を特性インピーダンス、 $\gamma (= \alpha + j\beta)$ を伝搬定数、 l を線路の長さとする、次式のように示せる。

$$Z_s = Z_w \frac{\sinh \gamma l}{\cosh \gamma l} = Z_w \frac{1 - e^{-2\alpha l} e^{-j2\beta l}}{1 + e^{-2\alpha l} e^{-j2\beta l}} \quad (1)$$

ここで、位相定数 β は $\beta = 2\pi/\lambda$, $\lambda = v/f$ (v :伝搬速度, f :周波数)であることから、 $\beta = 2\pi f/v$ と表せ、 β の値は信号源の周波数によって変化することがわかる。

今、周波数 f_p で $2\beta l = \pi$ となるように線路長 l を作製した場合、 $l = v/4f_p$ となることより、式(1)中の $2\beta l$ は

$$2\beta l = 2 \frac{2\pi}{\lambda} l = \frac{4\pi f}{v} \cdot \frac{v}{4f_p} = \pi \cdot \frac{f}{f_p} \quad (2)$$

と表わすこともでき、 $Y_s = 1/Z_s$ は式(3)のように導ける

$$Y_s = Y_w \frac{1 - e^{-4\alpha l} - j2e^{-2\alpha l} \sin(\pi \cdot f/f_p)}{1 + e^{-4\alpha l} - 2e^{-2\alpha l} \cos(\pi \cdot f/f_p)} \quad (3)$$

但し、 $Y_w = 1/Z_w$

式(3)で $f = f_p + \Delta f$ とし、 $\varepsilon \equiv \Delta f/f_p$, $|\varepsilon| \ll 1$ の下で Y_s を近似すると、式(3)は次式のように表すことができる。

$$Y_s = Y_w \frac{1 - e^{-4\alpha l} + j2\pi e^{-2\alpha l} \cdot \varepsilon}{(1 + e^{-2\alpha l})^2 - \pi^2 e^{-2\alpha l} \cdot \varepsilon^2} \quad (4)$$

更に、 $2 \cosh \alpha l / \pi > |\varepsilon|$ の周波数範囲では、式(4)は式(5)のように表せる。

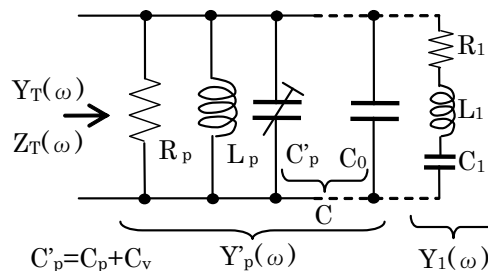


図 2 振動子装着時の μ 回路の等価回路

$$Y_s = Y_w \tanh(\alpha l) \cdot \left\{ 1 + j \frac{\pi}{2} \frac{\varepsilon}{\cosh(\alpha l) \cdot \sinh(\alpha l)} \right\} \quad (5)$$

一方、抵抗 R_p , コイル L_p , 容量 C_p の並列接続よりなる回路の合成アドミタンス Y_p は次式のように表せる。

$$Y_p = G_p + j2\pi f C_p - j \frac{1}{2\pi f L_p} \quad (6)$$

$$= G_p \left\{ 1 + j \frac{2\pi f C_p}{G_p} \left(\frac{f}{f_p} - \frac{f_p}{f} \right) \right\} \\ \therefore Y_p \cong G_p \cdot (1 + j2Q_p \cdot \varepsilon) \quad (7)$$

但し、 $\varepsilon \equiv \frac{\Delta f}{f_p}$, $Q_p \equiv \frac{2\pi f_p C_p}{G_p}$, $G_p = \frac{1}{R_p}$, $f_p = \frac{1}{2\pi \sqrt{L_p C_p}}$

式(5)と式(7)を比較すると、共振周波数近傍の近似式が同一の形式で表現可能なことが分かる。よって、次式の関係が得られる。

$$G_p = Y_w \tanh(\alpha l), \quad Q_p = \frac{\pi}{4} \frac{1}{\cosh(\alpha l) \sinh(\alpha l)} \quad (8)$$

図 2 は、 μ 回路に水晶振動子を装着したときの等価回路と

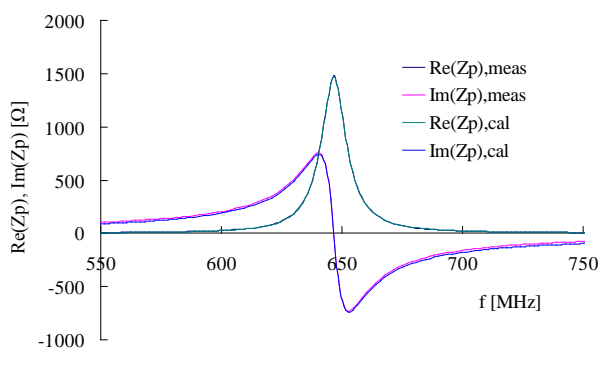


図 3 μ 回路の周波数特性

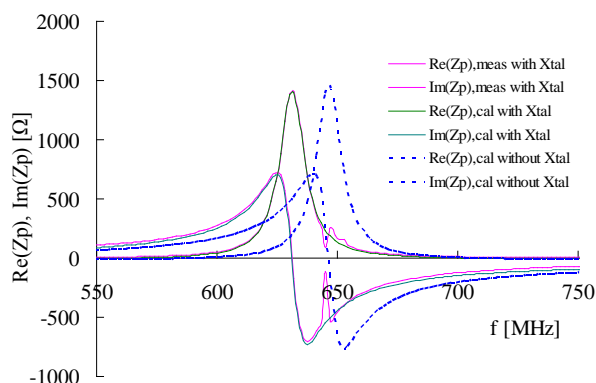


図 4 水晶振動子装着時の周波数特性

表 1 パラメータ値による計算値と測定値との標準偏差

抽出に用いた周波数範囲(データ数)	$\pm 1\%$ (9)	$\pm 3\%$ (21)	$\pm 5\%$ (35)	$\pm 7\%$ (49)
Rp [k Ω]	1.480	1.476	1.470	1.460
Lp [nH]	7.105	7.095	7.115	7.115
Cp [pF]	8.527	8.543	8.530	8.530
($\pm 10\%$ 範囲での) Zp の標準偏差 [Ω]	15.659	13.618	17.328	17.835

して想定した図を示している。回路全体の特性は、 μ 回路と振動子の並列容量 C_o よりなる並列共振特性と振動子の等価直列共振特性によることが想定される。

図 3 は、 μ 回路のみのインピーダンス-周波数特性の一例を示すもので、測定値とそれをフィッティングさせたときの計算値を示している。計算に用いたフィッティング・パラメータは $R_p=1.480k\Omega$, $L_p=7.105nH$, $C_p=8.527pF$ で、式(6)による値と測定値との二乗誤差を最小とする様に求めた。

表 1 は、測定値と計算値との差を標準偏差として表したもので、 $f_p(=647MHz)$ を中心に数%の範囲のデータを用いて最小二乗法により算出したパラメータ値を利用した。同表の結果より、パラメータ抽出に用いるデータの周波数範囲に最適値があることがわかり、標準偏差が最小となるのは $f_p \pm 3\%$ のデータを用いたときであることがわかった。

3. 水晶振動子の並列容量の測定

図 4 は、図 3 の特性をもつ μ 回路に 644MHz の水晶振動子を装着したときの測定結果および C_o を含めた μ 回路の計算結果を表している。また、比較のため図 3 の結果(計算値)も破線で示した。測定値の 644MHz 付近には、水晶振動子の直列共振回路による応答があることも確認できるが、 Q 値が高いため、 C_o を含めた μ 回路の共振点を乱すような働きはしていないと思われる。なお、 C_o を含めた μ 回路のフィッティング・パラメータは $R_p=1.431k\Omega$, $L_p=7.105nH$, $C=C_p+C_o=8.945pF$ であった。

図 4 を見ると、水晶振動子を装着した場合、 C_o が追加されたことにより μ 回路の並列共振周波数が低周波数側にシフトしたことがわかる。また、 $Re(Z_p)$ の最大値が若干ではあるが、小さくなったこともわかった。

共振周波数のシフト量より、 C_o の値を算出すると 0.402pF

表 2 異なる周波数における C_o 及び R_o の測定値

測定周波数 [MHz]	C_o [pF]	R_o [k Ω]
647	0.402	43.0
760	0.443	46.5
847	0.401	51.6
972	0.411	38.6

程度であることがわかった。また、 $Re(Z_p)$ の最大値の減少から換算すると、水晶振動子を装着したとき、 C_o の他に 43k Ω 程度の抵抗分 R_o も付け加わったことが分かった。

R_o の原因として想定されるものの一つとして、パッケージの損失が考えられる。HF 帯の can タイプのパッケージでは損失分が問題になったことがないため、いくつかの周波数について測定を行った。

表 2 は、その結果の一例を示すもので、650MHz~1GHz 近くまでの周波数に対して C_o はほぼ 0.4pF であったのに対して、 R_o は比較的大きく変化していた。

4. まとめ

以上、超高周波水晶振動子の並列容量を測定することを目的に、 μ 回路の共振特性を利用した測定法について検討した。まず、 μ 回路の共振特性を表現する等価パラメータ値の最適化について議論した。また、この結果に基づいて、水晶振動子の並列容量を測定することを検討した。一方、水晶振動子装着時に損失分も同時に測定され、この原因を含め、詳細な検討が必要であることが明らかになった。

今後は、この点の検討と共に、圧電性が強く影響することが想定される共振周波数近傍の並列容量についても検討する予定である。

5. 参考文献

- [1] Mitsuhiro Watanabe, Hiroki Iijima, Kunihiko Tamura, Takeshi Imaike, Yukinori Sakuta, Yoshifumi Sekine : " Extraction of frequency response of GHz band Crystal Resonator", Proc. of the 2011 International Technical Conference on Circuit/Systems, computers and Communications, MA3-2 (2011).
- [2] 船津拓未, 渡邊充紘, 作田幸憲, 今池 健, 関根好文 : " マイクロストリップ共振器の等価回路表現に関する検討", 電気学会基礎・材料・共通部門大会, I3 (2012-09).