

発振回路の評価方法(2)

発振回路を評価するための作業(発振余裕度、励振レベル編)

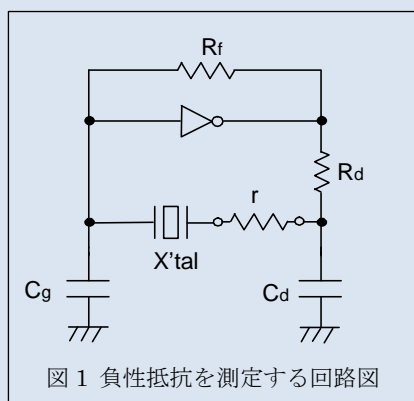
【序文】

一般的に安定な発振を得るためには、水晶振動子と発振回路のマッチングが重要になります。マッチングがうまくとれていない回路構成では、十分な周波数の安定度が得られない、発振が止まってしまう、発振が安定しないなどの問題が生じます。水晶振動子をマイコンとともに使用するときには、発振回路の評価が必要で、その水晶振動子と発振回路のマッチングを確認するには最低限、「発振周波数(周波数マッチング)」「発振余裕度(負性抵抗)」「励振レベル」の3つの評価作業が必要となります。今回は周波数のマッチングに関して解説しましたが、今回は発振余裕度(負性抵抗)と励振レベルの評価方法について解説します。

【1】 発振余裕度(負性抵抗)の評価

発振回路の負性抵抗特性と発振余裕度を簡単に評価する方法として、水晶振動子の **HOT** 端子部に抵抗を挿入し、発振するかしないかを調べる(負性抵抗 R_N を調べる)手法があります。挿入する抵抗の値(損失の大きさ)を変えることで発振回路の能力を調べることができます。

図 1 に負性抵抗を測定する回路図を示します。負性抵抗の絶対値は、挿入した抵抗値 r と水晶振動子の負荷接続時の等価抵抗(R_e)を合わせた値になります。(1)式



$$|-R_N| = \text{挿入抵抗} r + R_e \quad \dots (1) \text{式}$$

ここで水晶振動子の負荷時等価抵抗(R_e)は、以下の(2)式で求められます。

R_1 は水晶振動子の負荷容量がないときの等価直列抵抗です。

$$R_e = R_1 \times \left[1 + \frac{C_0}{C_L} \right]^2 \quad \dots (2) \text{式}$$

前回「発振回路の評価方法(1)」で紹介した水晶振動子の定数(R_1 が 33.7Ω 、 C_0 が 1.11pF 、 C_L が 7.8pF)を使い、上記(2)式で R_e を計算すると 44Ω になります。

このときの R_1 は水晶振動子の実測値であり、規格値ではありません。仮に、規格値の最大値として R_1 が 57Ω となっている場合、 R_e は負荷容量の影響で 74Ω に増加するのでご注意ください。

図2は負性抵抗測定のために、抵抗を挿入した例です。

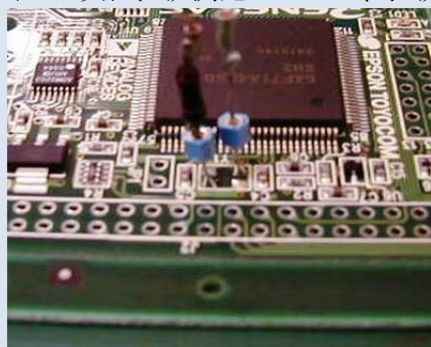


図2 負性抵抗を測定するために抵抗を挿入した様子

表1 負性抵抗 R_N を基に発振余裕度 (R_N/R_e) を計算した例

挿入抵抗値 (Ω)	負性抵抗 (計算値)(Ω)	発振余裕度	オシロスコープによる 発振の確認
500	545	7	OK
1000	1045	14	OK
1600	1645	22	OK
2000	2045	-	発振しない

図2の状態、オシロスコープにて波形を確認します。挿入抵抗 r を、小さい値から大きい値に徐々に変え、発振しなくなるポイントを探します。このとき、抵抗を挿入したことによる発振出力の低下や発振周波数の変化は無視し、単に発振したかしないかのみで判定します。

次に負性抵抗 R_N が決まったら、発振余裕度 (R_N/R_e) を計算します(上記表1)。

発振余裕度が低いと、回路の特性ばらつきによる発振の不安定、不発振、発振立ち上がり時間が長くなるなどの不具合現象が発生してしまうので注意が必要となります。

通常発振余裕度は5倍以上あれば問題ありません(発振回路が十分に水晶振動子を励振する能力(増幅度)を有していることを意味します)。もし発振余裕度が5倍以下の場合は、発振回路の回路定数を変更し、負性抵抗 R_N を大きくするか、もしくは水晶振動子の等価直列抵抗 R_e を小さくして、発振余裕度を5倍以上に保つようすることを推奨します。

トリマコンデンサ (C_g や C_d)、制限抵抗 (R_d) といった発振回路の回路定数を小さくすると負性抵抗が大きくなり、発振余裕度も大きくなりますが、回路定数が変わると発振回路の負荷容量も変化してしまい、発振周波数も変わるので注意が必要です。水晶振動子の等価直列抵抗 R_1 そのものを小さくしたい場合は、水晶メーカーへの問い合わせが必要となります。

【2】励振レベルの評価

励振レベルとは、水晶振動子が振動しているときの消費電力を指します。励振レベルは通常、水晶振動子の仕様内に抑えることが望ましく、一般的な目安としては $100\mu\text{W}$ 以下を推奨しますが、水晶メーカーごとに若干異なるので注意が必要です。

励振レベルが高い場合、発振周波数が変動したり、安定度が低下したり、等価回路パラメータが変化したり、周波数ひずみが発生したりといった現象を引き起こします。最悪の場合、異常発振を繰り返したり、故障を招いてしまうこともあります。ちなみに励振レベル (P) は下記(3)式で求められます。

$$P = I^2 \times R_e \quad \dots (3) \text{ 式}$$

ここで、 I は水晶振動子に流れる電流、 R_e は水晶振動子の負荷時の等価抵抗です。もし、規格よりも励振レベルが大きくなってしまった場合、発振回路の定数を調整し、水晶振動子に流れる電流を小さくする必要があります。励振レベルを抑えるには C_g または C_d を小さくすればよいのですが、発振回路の負荷容量も変化します。最も簡単な方法は R_d を大きくすることですが、損失が大きくなり、負性抵抗が小さくなるという点で注意が必要です。励振レベルは直接測定できる値ではありません。

発振回路と組み合わせて動作している水晶振動子の HOT 端子に測定プローブをあて、オシロスコープで

印加電圧 V_{pp} を測定し、その実効値を基に水晶振動子に流れる電流を計算します。

図 3 に励振レベルの測定の様子を示します。

評価用の水晶振動子の端子に電流プローブを通し、それをプリント基板の Xtal 部に載せます。

その後オシロスコープで発振を確認したら、波形を基に V_{pp} を測定します。

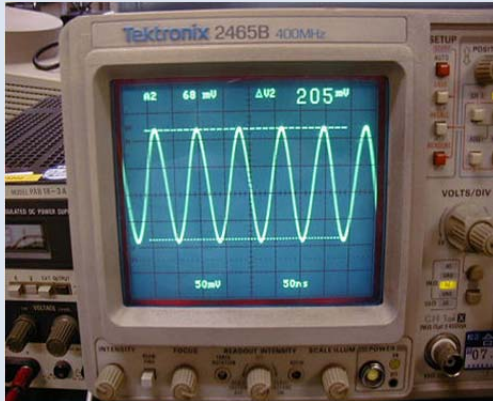


図 3 励振レベル測定の様子

例えば、オシロスコープの波形から $V_{pp}=0.205V$ 、測定プローブの設定が $1mA/div$ 、プローブインピーダンス 50Ω 、オシロスコープの測定レンジが $50mV/div$ 、水晶振動子の負荷時等価抵抗 R_e が 45Ω としますと、

$$V_{pp}/50[mV/div]=205/50=4.1div$$

$$4.1/(2\sqrt{2})=1.45div$$

$50[mV/div]/50\Omega=1mA/div$ なので、水晶振動子に流れる電流 I は、 $1.45div \times 1mA/div=1.45mA$ となります。

励振レベル P は前ページの(3)式から $1.45 \times 1.45 \times 45=95\mu W$ と計算できます。

【3】最後に

前回、今回と 2 回に分けて発振回路の評価方法を解説してきましたが、最適な発振回路を作るには(1)周波数マッチング、(2)発振余裕度(負性抵抗)、(3)励振レベル、それぞれの最適化が必要になります。

どの項目に対しても最適な回路定数を設定できるのが望ましいですが、適合しないケースも発生します。その時の対処法に関しまして最後にまとめておきます。

表 2 周波数マッチング、負性抵抗、励振レベルの評価結果と対処法

周波数マッチング	負性抵抗	励振レベル	対処法
OK	OK	OK	A
OK	OK	NG	B
OK	NG	OK	C
NG	OK	OK	D
NG	NG	NG	E
OK	NG	NG	F
NG	OK	NG	G
NG	NG	OK	H

A・・・評価時の回路定数で問題ありません。

B・・・励振レベルに関して水晶振動子の仕様の見直しが必要。今回の評価結果の励振レベルが水晶振動子に問題ないかを確認してください。

C・・・負性抵抗に関して水晶振動子の仕様の見直しが必要。発振余裕度が 5 倍以上になるように水晶振動子の等価直列抵抗の規格値 R_1 を変更できないかを検討。

D・・・周波数マッチングに関し、あらかじめ規定した標準の負荷容量を、水晶振動子を実装する実基板上での負荷容量に合わせ込む検討が必要。

E・・・「B+C+D」を組み合わせた対処が必要。

F・・・「B+C」を組み合わせた対処が必要。

G・・・「B+D」を組み合わせた対処が必要。

H・・・「C+D」を組み合わせた対処が必要。

前回、今回の情報が、信頼性の高い発振回路を設計する際の参考になることを望みます。