

水晶、Si、セラミック、LC材料の持つ特性と特徴

水晶発振器と SiMEMS 発振器との比較

【序文】

さまざまな電子機器には基準となる信号が必要ですが、その基準信号を得るための手段として水晶デバイスを使う以外にも複数の方法が存在します。例えばインダクタンス(L)とキャパシタンス(C)を組み合わせた共振現象によって周波数を発振させるLC発振器や、キャパシタンス(C)と抵抗(R)で構成した充放電回路を使って基準となる周波数を発振させるCR発振器、またチタン酸ジルコニウム酸鉛(PZT)を主体とした圧電セラミックスを用いたセラミック発振器や、MEMS(Micro Electro Mechanical Systems)テクノロジーを活用したシリコン(Si)ベースの発振器などがあります。上記に挙げた複数の種類の発振器からどれか1つを選択するときには基準となるのは使用用途(アプリケーション)です。

一般的にマイコン用クロック信号など低めの周波数で周波数精度の要求もそこまで高くない用途には多くの場合低価格であることが特徴のセラミック発振器が使用されます。セラミック発振器の発振周波数はおよそ200kHz~100MHzで、常温での周波数偏差は一般に0.1%~0.5%程度と言われております。低価格は利点ですが、温度変化に対する発振周波数の変動が大きく、総合的な周波数安定度は±1.1%程度と低精度です。無線通信機器などには高周波で周波数精度の要求も高いため、そのような用途には水晶発振器が多く使用されます。近年ではSiベースの発振器(Si-MEMS発振器)なども性能を上げてきていますが、それぞれの方式には根本的な性能差があります。今回はそれぞれの材料が持つ特徴に関して解説していきます。

【1】振動子・共振子としての比較

基準信号を発生する発振器に用いられる振動子・共振子の基本は、圧電結晶に対し電圧をかけると機械的な応力が発生する現象(逆圧電現象)を利用する圧電駆動型、高電圧をかけた時に発生する静電気を利用する静電駆動型などさまざまですが、その特性は用いる結晶(材料)の性質に大きく依存します。

EPSONでは水晶をベースにした電子部品を提供しておりますが、「序文」でも紹介したとおりさまざまな材料からなる振動子・共振子が存在しているので、その一般的な特徴を表1にまとめ、各々の特徴について以下に解説します。

表1：各材料による振動子・共振子特性の比較

振動子・共振子材料	周波数初期偏差	周波数温度特性	Q値
水晶	◎	◎	◎
Si	×	×	○
セラミック	△	△	△
LC,CR	×	×	×

【1-1】LC、CR共振子

LC共振は、名前のとおりインダクタンス(L)とキャパシタンス(C)で構成された構造であり、比較的高い周波数と周波数可変範囲を広く必要とする用途を得意とします。しかしその反面、精度や安定度は高くありません。また低い周波数に対しては共振条件を満たすためにインダクタンスを大きくする必要があり、部品としても大きなコイルを使わなければならないため小型化には不向きです。小型化が必要な場合にはインダクタンスを使わないCR共振を利用することもできますが、高い周波数への対応が困難となる欠点もあります。

【1-2】 セラミック共振子

序文でも紹介したセラミック共振子は、チタン酸ジルコニウム酸鉛(PZT)を主体とした圧電体を焼き固めた材料を使用した共振子になります。精度面では LC 発振器よりもよいですが、周波数初期偏差は±0.5%程度と大きいので、低めの周波数で周波数精度の要求もそこまで高くない用途で多く使用されています。

温度特性に関してはセラミックとして固められる材料の配合により変化がつけられるため、柔軟な対応が可能である反面、材料の微妙な配分誤差や製造バラツキ等が特性のバラツキに影響を与えるため、再現性を確保するのが非常に難しいとされています。

その中でセラミック共振子の特徴として、立ち上がり時間が速いことがあげられます。立ち上がり時間は発振回路の素子に影響しますが、一般的に周波数が高い、負荷容量が小さい、かつ共振子の Q 値が低いほど発振が速くなる傾向があります。表 1 にも示したとおり、セラミック共振子の Q 値は水晶や Si と比較して低いので、立ち上がりに関しては有利と言えます。以上のことから、それほど精度を気にしないが、立ち上がり時間の速さに重点をおくアプリケーションへの採用例が多くみられます。

【1-3】 Si 共振子

Si 共振子は単結晶の Si を材料として用いており、材料の持つ Q 値はセラミックよりも良いが水晶よりは悪くなります。さらに半導体製造技術を使用したウエハの一括処理生産により、安価かつ小型な製品を作り出すことが可能です。しかしその生産性の利便性ゆえに個々の共振子での調整が難しく、周波数の初期偏差に関しては製造工程でのバラツキがそのまま反映される形となります。現状では個々の共振子の周波数精度は補正回路によりある程度行われています。

さらに単結晶 Si の持つ温度特性は-20~-30ppm/°Cの 1 次直線を示すため、温度による変化量が大きくなってしまいます。従って使用される場合には温度補正を行った Si-MEMS 発振器として、ある程度の精度を持つ製品として市場に供給されています。

【1-4】 水晶振動子

最後に水晶振動子ですが、名前のとおり水晶(SiO₂)材料をベースにしているため、その結晶性の高さから優れた高い Q 値を持ちインピーダンス特性に優れております。さらに異方性結晶のためカット方法によっては生活温度付近に変曲点を持つ 3 次曲線の温度特性が得られ広い温度範囲で安定した特性を示すことができます。製造工程の工夫により個別に周波数調整が行われるため、周波数初期偏差も数 ppm(100 万分の 1)オーダーの高い精度を持ち、無線通信機器などの高い精度を要求するアプリケーションへの採用が多くみられます。共振子単体として見た場合、とても高い精度を有する部品であると言えるでしょう。

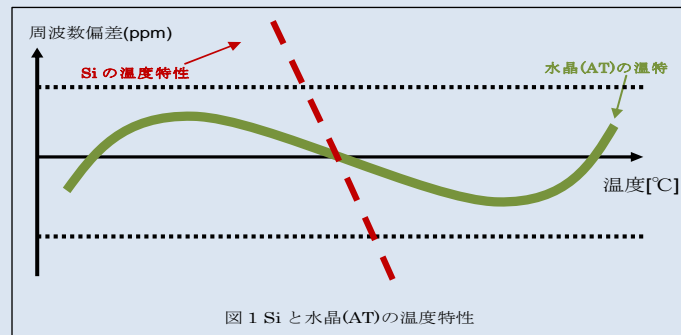
ここまで見てきたように、材料それぞれの持つ特性を踏まえた上で用途にあった製品を使用するのが望ましいです。次の章では話題の Si 共振子を使った発振器(Si-MEMS 発振器)と水晶振動子を使った発振器の違いを解説します。

【2】 水晶振動子と Si 共振子としての温度特性の比較

【1】でも取り上げた周波数温度特性に関してもう少し詳しく見ていきます。

水晶と Si の温度特性を図 1 に示します。水晶の持つ温度特性は図 1 に示されるように生活温度付近に変曲点を持ち広い温度範囲で安定した特性を示します(AT カット水晶振動子の温特)。この結果が示すものは、無調整

でも温度変化の大きいシチュエーションで安定した精度を保てることから、幅広いアプリケーションに対応できる性能を有することです。



それに対し Si 共振子の温度特性は $-20\sim-30\text{ppm}/\text{C}$ の1次直線を示します。

このことは上記特性を有する共振子を用い発振器を構成する場合、結晶本来の特性である温度特性の補正を必ず行う必要があります。また水晶振動子は個別に周波数を調整することから初期偏差も ppm オーダーのバラツキ幅で推移しますが、Si 共振子の場合、生産性利便上の観点からウェハ一括処理を行うため、個別調整の手間を掛けない限り初期偏差のバラツキ幅が大きくなります。以上の理由から、Si-MEMS 共振子は補正回路を持つ発振器として用いられることが大前提となり、水晶と比較すると回路側の負担(消費電力が大きい)が大きくなる可能性が考えられます。

このように振動子・共振子として大きな特性差がありますが、次項では、実際市場で使用される発振器での性能差を示します。

[3] 水晶発振器と Si-MEMS 発振器の特性

基準信号に要求される仕様は用途によってさまざまではありますが、一般的には「発振周波数初期偏差」、「温度に対する周波数安定度」、「ノイズやジッタの特性」などを指標として選定されます。

Si-MEMS 発振器は文字どおり Si 共振子のもつ温度特性を周辺回路により補正し安定性を確保しています。

その補正として使われる周辺回路が、Fractional-N PLL(以下 Frac-N PLL)回路と呼ばれるものです。

Frac-N PLL とは小数分周器を用いた PLL 回路のことであり、入力周波数の小数倍の出力周波数を作り出すことができます。この方法を用いて Si 共振子の各温度点における分周比を変え、出力信号の発振周波数を制御し温度補正を行っています。この方法を使用して温度補正した例を図 2 に示す。

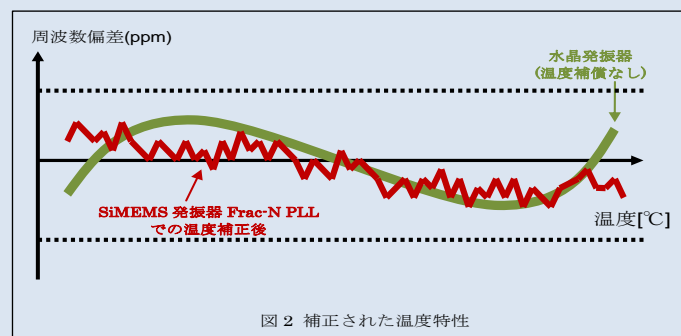


図 2 の茶色で示した特性が Frac-N PLL にて温度補正をかけたあとの特性になります。

前述したように、Si 共振子の温度特性は材料の性質から 1 次直線を示すため、補正自体は簡単な補正式で実行することが可能ですが、水晶振動子の温度特性と比較してとても大きな変化量のため、アナログ的な温度補正が行えません。従って使用温度領域を細分化し、各領域において分周比を切り替えながら、Frac-N PLL のようなデジタル回路によりきめ細かく補正します。しかし分周比切替え時に図 2 に示されるような不連続な周波数

ジャンプが生じる事があり、発振周波数の不連続な温度点では出力信号の位相が変化してしまい、ノイズやジッタの特性の劣化が進みます。位相変調技術を基に通信している無線通信機器で使用了場合、ノイズ発生時には、正しい変復調ができず、正確なデータの送受信ができなくなることが考えられます。

水晶振動子をベースとした発振器では温度補正なし(無調整)でも広い温度範囲に対応できること、また温度補正のためには PLL を使わない(PLL 回路で分周比を変える製品においても源振のみ)ため、温度変化に対しても水晶の本来持つ滑らかな温度特性(周波数の不連続なジャンプがない状態)を維持できます。

その結果、ノイズやジッタの劣化もなく、先に示した無線通信機器での問題が起きる可能性は極めて低いといえます。

もちろん Si 共振子も素子そのものに対し(寸法管理、電極材変更など)工夫し個別に温度補正をおこない、初期値のみ分周比を変える対応も可能ですが、反面、Si-MEMS 本来の良さである生産性(ウエハー一括処理)や安価な対応などの利点が損なわれてしまう結果となります。

最後に、昨今の通信機器業界の動向として、電子部品の振動子・共振子化が加速しております。

そうした流れの中では、無調整でも特性の安定した水晶振動子のニーズがさらに高まっていくと思われます。ユーザーが電子部品を選択する際は材料の持つ特性を十分理解した上で、かつ用途にあった部品を選択する必要があります。EPSON の水晶デバイスはそうしたニーズにあった製品ラインナップの拡充と高い信頼性を兼ね備えた製品を今後も提供してまいります。