

水晶振動子と水晶発振回路のしくみ

水晶振動子の特性を十分に引き出す発振回路のしくみを理解する

草野 淳

水晶振動子は、 Q 値^{注1}が高いことによって任意の安定した周波数を比較的容易に得ることのできる電子部品です。しかし、その周波数を最適に得るためには、水晶振動子の特性や特徴、発振回路のしくみを理解することが重要となります。ここでは、発振周波数帯が扱いやすいこと、および広範囲な温度に対して周波数の安定度に優れていることにより、多方面で採用されているATカット^{注2}水晶振動子に関して説明します。

(筆者)

ATカット水晶振動子の構造と等価回路

● 水晶チップの厚みと周波数は反比例

水晶振動子の材料となる天然水晶は、不純物の含有が多いため、現在の高性能な振動子にはそのままでは使用でき

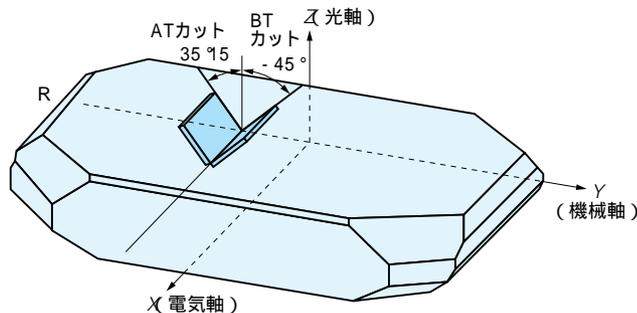


図1 人工水晶原石と切断方位

人工水晶は天然水晶を円筒状の鋼鉄製の高压炉の中で熔融し再結晶させたもので、不純物含有の少ない高純度の水晶原石。切断方位は水晶の特性を決定付ける重要な要素である。ATカット振動子はZ軸から35°15'で切り出した素子で、同じ厚みすべり振動をする。BTカットは-45°で切り出した素子。

ません。そこで、天然水晶をオートクレーブ^{注3}と呼ばれる耐圧性のある鋼鉄製の炉の中で溶解し、高温・高压下で時間をかけて結晶を成長させた高純度の人工水晶を使用します。

図1は、その「人工水晶原石」を示しています。私たちが一般的に目にする天然水晶とは形状が異なっています。これは各結晶軸によって再成長のスピードが異なるためです。この中で、Z軸から35°15'の角度で切り出した振動子をATカット振動子と呼んでいます。

ATカット振動子は、図2に示すように厚みすべりを繰り返す振動モードが特徴です。BTカット振動子も同じ振動モードを持っていますが、ATカットに比べ温度特性精度が劣るため、現在ではあまり使われていません。

また、もう一つの特徴はこの厚みが周波数を決定する重

- 注1： Q 値とは、発振のシャープさを表す値で、周波数安定性の指標となる。 Q 値が高いほど発振がシャープになり周波数は安定する。
- 注2：水晶は切断角度でさまざまな特性を表すが、その中でも周波数温度特性が最も優れた素子にATカット振動子がある。ATカット振動子は、水晶の結晶軸である光軸(Z軸)から35°15'の角度で切り出した素子。比較的作りやすく安価であるため、各種機器のクロック信号源や通信機器の基準周波数源に多用されている。
- 注3：オートクレーブとは人工水晶を高温・高压下で結晶成長させる鋼鉄製の円柱で、数mから数十mの高さがある。下の方に天然のクズ水晶(ラスカと言う)を入れ、アルカリ溶液を入れ溶解させる。蒸気となった水晶を上から吊るした種(たね)水晶に付着させながら結晶成長させる装置。

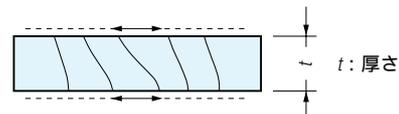


図2 厚みすべり振動

圧電素子である水晶は、電位を加えると結晶がひずむ。ATカット振動子は厚み方向にひずむのが特徴。この図は厚みすべりモードを素子の断面で模式的に表している。電荷密度が高い中央部がより大きくひずむ(振動する)。

Keyword

Q 値, ATカット水晶振動子, 厚みすべり, オーバートーン発振, 基本波発振, Cl 値, 浮遊容量, 負荷リアクタンス素子, DLD特性, コルピッツ型発振回路, 負性抵抗, カットオフ周波数

表1
パッケージ・サイズと周波数の関係
(エプソントヨコムのカタログより)

機種名	パッケージ・サイズ (mm)	周波数			24MHzの CI値(最大)
		10MHz	20MHz	50MHz	
FA-128	2.0 × 1.6 × 0.5		24MHz	54MHz	80Ω
FA-20H	2.5 × 2.0 × 0.55	16MHz		44MHz	60Ω
TSX-3225	3.2 × 2.5 × 0.6	12MHz		54MHz	40Ω
FA-238	3.2 × 2.5 × 0.6	16MHz		50MHz	40Ω
TSX-4025	4.0 × 2.5 × 0.7	12MHz		32MHz	30Ω
TSX-5032	5.0 × 3.2 × 0.8	10MHz		32MHz	20Ω

要な要素であるということです。厚みが1mmのときの発振周波数は1.67MHzになります。この値を周波数定数と呼んでおり、発振周波数 f_0 は次の式で表すことができます。

$$f_0 = 1.67 \times \frac{n}{t} \text{ [MHz]}$$

ここで、 n : オーバートン次数(1, 3, 5, ...の奇数)
 t : 厚み[mm]

この式から分かるように、発振周波数は厚みに反比例します。例えば、発振周波数が20MHzの基本波($n = 1$)であれば厚みは約83 μ m、50MHzの基本波であれば厚みは約

33 μ mとなります。

ATカット振動子の対応可能な発振周波数は、その水晶チップの大きさを無視すれば下限は800kHzです。上限は近年の技術革新によって基本波でも300MHz帯まで工業化が進んでいます。従って、高周波数帯でも回路が複雑になるオーバートン発振よりも基本波発振が主流となっています。また、周波数が高くなるほど厚みは薄くなり、機械的な強度が弱くなるので、その取り扱いおよび使用環境には十分考慮する必要があります。

一方、一般的に発振周波数と振動子サイズ(内蔵水晶チップ・サイズ)には相関があります。安定した周波数を得るためには、表1に示すように所望の周波数によって振動子サイズを選択する必要があります。例えば、12MHzの周波数が欲しい場合、3.2 × 2.5mm(以下3225と言う)サイズ以上の振動子であれば問題ありませんが、2.5 × 2.0mm(以下2520)や2.0 × 1.6mm(以下2016)サイズだと対応できません。これは、後述するようにCI(crystal impedance)値が上昇してしまうことによります。

さらに、ATカット振動子の温度特性は、図3に示すように3次曲線を描くのが特徴です。横軸が温度で縦軸は周波数変化量を表しています。各3次曲線は切断角度の基準となるZ軸からの角度35°15'からのズレを表しています。

このように、切断角度を変えることによりあらゆる規格に対応させることが可能となります。温度特性が3次曲線を描くことにより、ほかのカットの振動子と比べて広温度範囲で1桁以上安定した周波数が得られます。例えば、世界で一番使われているGSM方式の携帯電話の基準周波数である26MHzの場合、-30 から +85 の温度範囲で ±10ppm(26MHz ± 260Hz, ppmは100万分の1)以内を実現しています。

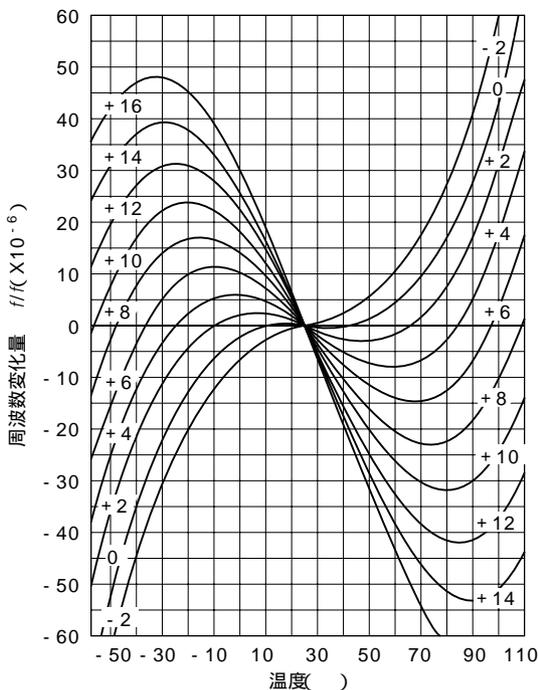


図3 ATカット振動子の温度特性

ATカット振動子は、3次の周波数温度特性を示すのが特徴。横軸は温度、縦軸は周波数の変化量で、25を基準として表している。図中の数値は切断角度35°15'からのズレを表しており、単位は「」(分)。