



高周波出力を得る方法

【序文】

近年、IoT などの普及に伴い、インターネットのバックボーンを流れるトラフィック量は増加の一途を辿っており、通信の高速化、大容量化が進んでいます。このように高速化する通信インフラには、高周波、かつ出力信号の安定した信号源を強く求められます。一般に、MHz 帯の AT カット水晶で高い周波数を発振させるには、水晶片を薄くする必要があり（AT カットの水晶の周波数は厚みで周波数が決まるため）、それには加工手法や機械的な強度、発振のしやすさといった観点で限界があります。加工精度にもよりますが水晶では基本波で 70MHz 程度が限界とされております。そのため当社では約 70MHz 以上を高周波領域として位置づけております。高周波領域を実現するため 4 つの手段（技術）があります。

一つ目は比較的扱いやすい 20 MHz 帯の発振周波数を有する AT カット水晶振動子に、位相同期（PLL）回路を使って高周波の安定した信号を作り出す方法。

二つ目はフォトリソ加工による振動部分のみを薄く加工した逆メサ型 AT カット水晶振動子：HFF（High Frequency Fundamental）水晶振動子を使って高周波の安定した信号を作り出す方法。

三つ目は弾性表面波（SAW/Surface Acoustic Wave）を応用し基本波で高周波を直接発振させる SAW 共振子を使って高周波の安定した信号を作り出す方法。

四つ目は AT カット水晶振動子の高次で振動する振動モード（オーバートーン）を使って高周波の安定した信号を作り出す方法です。

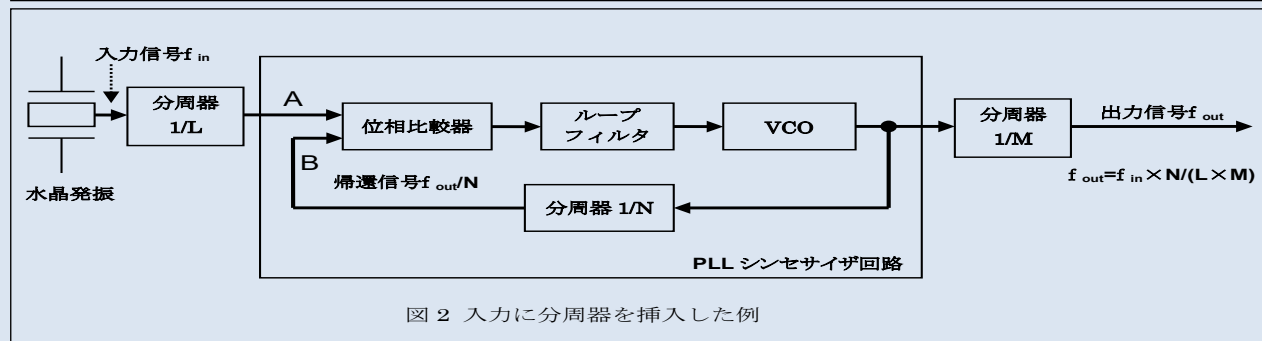
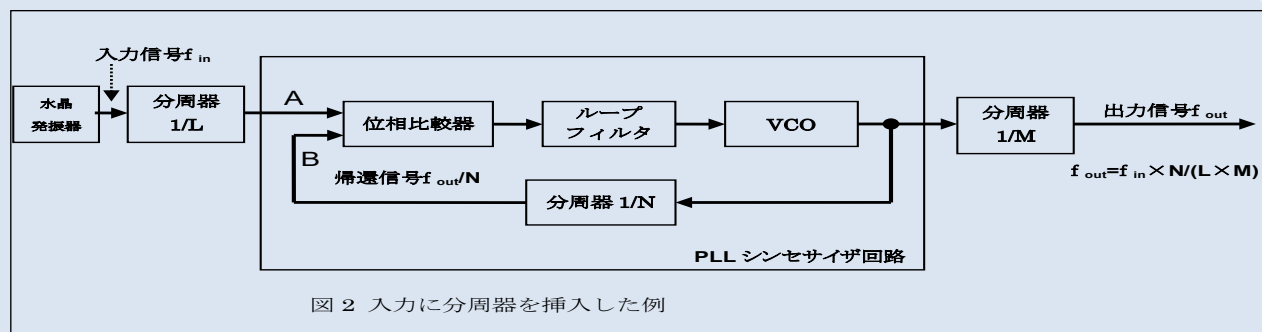
ここでは、総合的な判断からエプソンが開発を推進している一つ目の PLL 回路と二つ目の逆メサ型 AT カット水晶振動子：HFF 水晶振動子を使った方法、すなわち発振回路側で実現する方法と水晶素子側で実現する方法の概略に関して解説します。

1. PLL 回路の概略とエプソン製品:プログラマブル水晶発振器

【1】PLL 回路

高周波の安定した周波数を作り出す要素技術の一つ、PLL 回路に関して解説します。

PLL 回路は無線通信機器を搭載した機器の普及に伴って、半導体技術が飛躍的に進歩してきました。その中でも特に、PLL 回路技術の進歩は目覚ましいものがあります。PLL 回路は、入力の基準信号に同期した出力信号を発生させる回路です。位相比較器、ループフィルタ、電圧制御発振器（VCO）という基本構成で、入力信号に正確に同期した信号を生み出します。周波数逡倍回路と異なり、元信号を出力に使いません。PLL 回路では元信号と周波数が異なる同期された信号を VCO によって生み出します。



PLL 回路の VCO 出力と位相比較器への入力の間に分周器を挿入し、入力信号と分周された信号の同期により、VCO 出力は入力信号を分周倍した周波数に制御されます。入力信号が水晶発振器などの安定したものを使い、分周器の分周数を切り替えるようにすれば、VCO の出力は水晶発振器と同じ精度で分周数倍された信号が得られます。これが周波数シンセサイザの原理です。

この原理を使い、AT カット水晶振動子の MHz 帯の出力を PLL 回路に入力し、無線通信用途の GHz 帯の搬送波を生成する信号を作り出しています。

PLL 回路を用いて入力周波数の何倍も高い周波数を作るには、この分周器の使い方が鍵になります。入力周波数の N 倍の出力を得る方法は、図 1 に示した回路構成です。また細かい出力周波数の設定をおこなうためには、図 2 のように PLL 回路の入出力前後に分周回路を入れる方法もあります。

PLL 回路で周波数設定分解能を上げる手段として水晶発振源の直後に分周器を設定するのが一般的ですが、周波数設定分解能を上げるために分周数を大きく取ると、結果として位相比較周波数が低くなり、PLL の応答性の低下や、ループ利得低下が発生し、出力波形のジッタや位相雑音特性に悪影響となってあらわれます。

この問題を解決する手法として Fractional (小数分周) PLL というものもあります。

【2】Integer (整数分周) PLL と Fractional (小数分周) PLL の特徴

PLL 回路には大きく分けて整数分周 (Integer) と小数分周 (Fractional) のタイプがあります。どちらも源振を利用し高周波を出力します。ここでは大きな特徴に関して解説します。

Integer (整数分周) は文字通り、入力周波数の整数倍の出力周波数を作り出すことができます。例えば 1 MHz の源振から 100 MHz を出力したい場合、分周器のカウンタ設定値は 100 となります。

これに対して Fractional (小数分周) は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。これは事実上任意に周波数を選択できる利点があり (細かい周波数設定分解能を得られる)、それらの特徴を生かし周波数初期偏差を精度よくコントロールできます。しかしその反面、回路設計は複雑で、IC の面積も Integer と比較すると大きくなるため、特有のスプリアスが発生しやすくなりますが、Fractional PLL も近年では技術の進歩により欠点であったスプリアス発生低減化が進んでおります。

【3】エプソンの持つ製品群：プログラマブル水晶発振器と特徴

これまで説明してきたように高周波出力を得る方法として PLL 回路を用いた手法に関してみてきましたが、この手法の一番の特徴は、任意の周波数を自由に作れる・・・つまり高い周波数を含め必要な周波数を必要なときに得られることにあります。

エプソンでは先に紹介した Fractional PLL を採用した SG-8018、SG-8101 シリーズを多彩なサイズの製品ラインアップを取り揃え用意しております（表 1）。また SG-8000 シリーズの周波数書き込みができるプログラミングツールとしてお客様向けの ROM Writer (SG-Writer II) もご用意しております。

SG-8018、SG-8101 シリーズは AT カットの水晶振動子を使用しており、AT カット水晶振動子は一定の温度安定度を保つ 3 次曲線の温度特性をもつため、一般的に温度に対し回路補正を行わず広い範囲で滑らかな特性（周波数の不連続なジャンプがない状態）を持った製品を提供することが可能です。

（Si-MEMS 発振器のような 1 次直線で大きな温度特性を持つものは、温度に対して一定の安定度を保つように回路補正を行うため、周波数の不連続なジャンプが発生することがあります。）

更に PLL 回路を使用しているにも関わらず、一般の SPXO に近いジッタ特性を持ち（SG-8101 の約 1/25）、+125 °C まで動作可能な SG-820x シリーズもラインアップしています。

詳細はテクニカルノート [こちら⇒ プログラマブル SPXO の低ジッタ化技術](#) をご覧ください。

これら水晶の持つ高精度な特性と PLL 回路技術で実現された任意の周波数を自由に得られる利便性において多くのお客様にご採用頂ければと思います。



表 1 : プログラマブル水晶発振器の推奨製品ラインアップ

製品名	外形寸法 [mm]	出力	電源電圧 [V]	出力周波数範囲 [MHz]	周波数温度特性 (周波数偏差 / 温度範囲) [$\times 10^{-6}$ / °C to °C]
SG-8018CA SG-8018CB SG-8018CE SG-8018CG	CA : 7.0 x 5.0 x 1.3 CB : 5.0 x 3.2 x 1.1 CE : 3.2 x 2.5 x 1.05 CG : 2.5 x 2.0 x 0.7	CMOS	1.8 2.5 3.3	0.67 to 170	± 50 / -40 to +105
SG-8101CA SG-8101CB SG-8101CE SG-8101CG	CA : 7.0 x 5.0 x 1.3 CB : 5.0 x 3.2 x 1.1 CE : 3.2 x 2.5 x 1.05 CG : 2.5 x 2.0 x 0.7	CMOS	1.8 2.5 3.3	0.67 to 170	± 15 / -40 to +85 ± 20 / -40 to +105 ± 50 / -40 to +105
SG-8101CGA (AEC-Q100)	2.5 x 2.0 x 0.7	CMOS	1.8 2.5 3.3	0.67 to 170	± 15 / -40 to +85 ± 20 / -40 to +105 ± 50 / -40 to +125 ± 100 / -40 to +125
SG-8200CG SG-8200CJ	2.5 x 2.0 x 0.74 2.0 x 1.6 x 0.6	CMOS	1.8 2.5 3.3	1.2 to 170	± 50 / -40 to +125
SG-8201CG SG-8201CJ	2.5 x 2.0 x 0.74 2.0 x 1.6 x 0.6	CMOS	1.8 2.5 3.3	1.2 to 170	± 15 / -40 to +105 ± 25 / -40 to +125
SG-8201CJA (AEC-Q100)	2.0 x 1.6 x 0.6	CMOS	1.8 2.5 3.3	1.2 to 170	± 15 / -40 to +105 ± 25 / -40 to +125 ± 50 / -40 to +125

2. 逆メサ型 AT カット水晶振動子：HFF 水晶振動子の概略と特性紹介

【1】逆メサ型 AT カット水晶振動子：HFF 水晶振動子について

メサとはスペイン語で「周囲が急な崖で囲まれる台状の地形」を意味しており、半導体トランジスタなどで断面を台形の形に加工したものを一般的に「メサ型構造」と呼んでおります。逆メサ型 AT カット水晶振動子：HFF 水晶振動子（以下 HFF 水晶振動子）とは、AT カット水晶片の一部分（振動部分）を台形の形に凹まし薄くした構造（メサ構造の逆）を指します。HFF 水晶振動子の構造を図 1 に示します。AT カット水晶振動子の水晶片の板厚は、薄くするほど高周波を発振する振動子となりますが、一般的に機械的な研磨で安定量産化できる限界レベルの周波数は基本波で 70 MHz 程度（板厚でおよそ 24 μm ）とされており、それ以上の周波数を AT カット水晶振動子で求めるのであれば、高次で振動する振動モード（3rd オーバートーン）を使用する（50 MHz ～ 150 MHz）方法が一般的です。このため、高い周波数を得るには 3 次オーバートーンなどの振動モードを複雑な回路で制御する必要があります。エプソンではフォトリソ加工により、水晶片の励振部のみを数ミクロンという極薄な構造にすることで、チップの強度を保ちながら、高周波での基本発振を可能にする技術を用いてこの問題を解決しております。

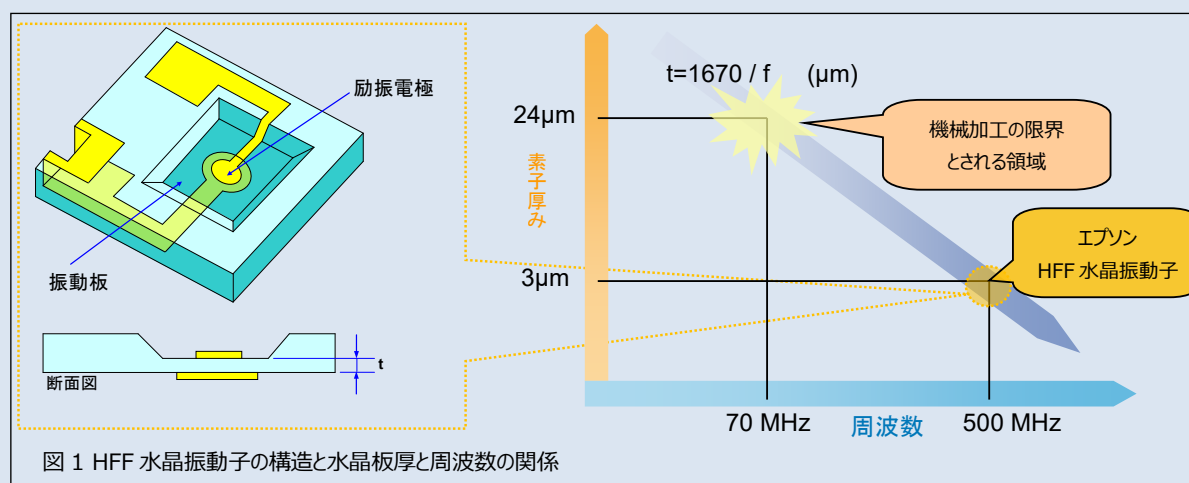
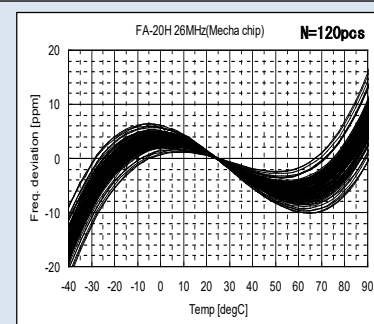
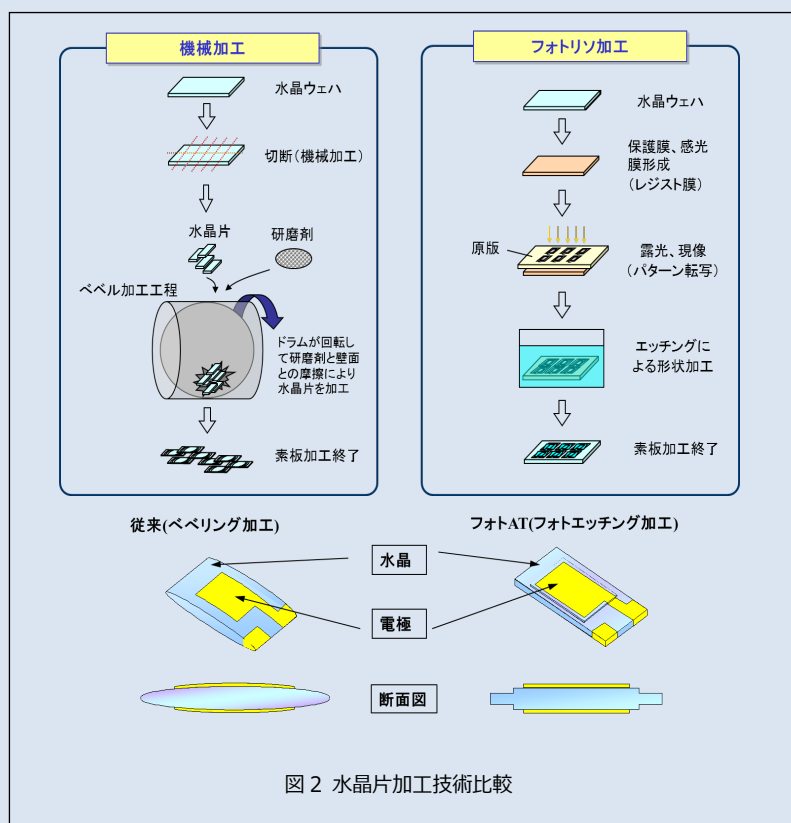


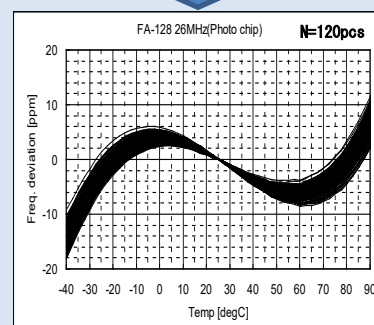
図 1 HFF 水晶振動子の構造と水晶板厚と周波数の関係

【2】フォトリソ加工について

水晶素材にフォトリソ加工を用いて精密微細な加工を施し、小型・高性能な水晶デバイスが提供できます。フォトリソ加工を用いた製品は今回紹介している HFF 水晶振動子の他にも、音叉型振動子の溝構造の微細加工や、AT カット振動子のメサ構造加工などにも応用されています。今回は AT カット振動子のメサ構造加工を例にフォトリソ加工について説明致します。AT カット振動子に代表される厚みすべり振動の理想的な振動は振動片の中央部のみが振動し、周辺部が振動しないようにすることです。MHz 帯 AT カット振動子の中でも特に低い周波数帯では、ベリング加工（コンベックス）を実施すること（振動片の中央部と周辺の厚みを変化させること）でこの効果が得られます。従来の機械加工方式とフォトリソ加工を取り入れた方式の概略を図 2 に示します。機械加工では水晶チップの自重を生かし加工するため、水晶チップが小さくなると加工が困難になると同時に、ばらつきも大きくなり特性にも影響します。これに対しフォトリソ加工では、水晶チップの大小に関わらず水晶片の形状均一化が可能となり、超小型の水晶チップにおいても、機械加工に比べばらつきを小さくすることができ、図 3 のような優れた温度特性を実現することができます。



2520 サイズ振動子(機械加工)の温度特性



2016 サイズ振動子(フォトリソ加工)の温度特性

図 3 温度特性ばらつき比較

以上のように、高周波の領域においてもフォトリソ加工を用い、図 1 のような逆メサ構造にすることにより、水晶チップの強度を保ちながら、高周波での基本波発振を可能にし、安定した性能を持った製品の供給に繋がっております。

【3】HFF 水晶振動子を使用した製品とその特徴

高周波の基本波発振である HFF 水晶振動子を用いたエプソン製品を表 2、3 に示します。

表 2 は SPXO (Simple Packaged Crystal Oscillator)、表 3 は VCXO (Voltage Controlled Crystal Oscillator) の推奨製品ラインアップです。ここで VCXO とは外部からの制御電圧によって周波数を可変できる製品であり、主に基地局や光伝送装置での用途に利用されております。

近年ではデータ通信の高速化や大容量化が進み、これまでよりも高周波で、かつ安定した信号源に対するニーズが高まってきており、そのため高周波でありながら AT カット振動子のような良好な温度特性、優れたノイズ特性が必要となっております。



表 2 : HFF 水晶振動子使用 SPXO 推奨製品ラインアップ

機種	外形寸法 [mm]	出力	出力周波数範囲 [MHz]	電源電圧 [V] Typ.	周波数温度特性 (周波数偏差 / 温度範囲) [$\times 10^{-6}$ / $^{\circ}\text{C}$ to $^{\circ}\text{C}$]
SG2016EHN	2.0 x 1.6 x 0.63	LV-PECL	25 to 500	2.5 3.3	+/- 20 / -40 to +85 +/- 20 / -40 to +105
SG2016VHN	2.0 x 1.6 x 0.63	LVDS	25 to 500	1.8 2.5 3.3	+/- 20 / -40 to +85 +/- 20 / -40 to +105
SG2016HHN	2.0 x 1.6 x 0.63	HCSL	25 to 500	2.5 3.3	+/- 20 / -40 to +85 +/- 20 / -40 to +105
SG2016EGN	2.0 x 1.6 x 0.63	LV-PECL	25 to 500	2.5 3.3	+/-25 / -40 to +85 +/-50 / -40 to +85 +/-25 / -40 to +105 +/-50 / -40 to +105
SG2016VGN	2.0 x 1.6 x 0.63	LVDS	25 to 500	1.8 2.5 3.3	+/-25 / -40 to +85 +/-50 / -40 to +85 +/-25 / -40 to +105 +/-50 / -40 to +105
SG2016HGN	2.0 x 1.6 x 0.63	HCSL	25 to 500	2.5 3.3	+/-25 / -40 to +85 +/-50 / -40 to +85 +/-25 / -40 to +105 +/-50 / -40 to +105
SG2520EHN	2.5 x 2.0 x 0.74	LV-PECL	25 to 500	2.5 3.3	+/- 20 / -40 to +85 +/- 20 / -40 to +105
SG2520VHN	2.5 x 2.0 x 0.74	LVDS	25 to 500	1.8 2.5 3.3	+/- 20 / -40 to +85 +/- 20 / -40 to +105
SG2520HHN	2.5 x 2.0 x 0.74	HCSL	25 to 500	2.5 3.3	+/- 20 / -40 to +85 +/- 20 / -40 to +105
SG2520EGN	2.5 x 2.0 x 0.74	LV-PECL	25 to 500	2.5 3.3	+/-25 / -40 to +85 +/-50 / -40 to +85 +/-25 / -40 to +105 +/-50 / -40 to +105
SG2520VGN	2.5 x 2.0 x 0.74	LVDS	25 to 500	1.8 2.5 3.3	+/-25 / -40 to +85 +/-50 / -40 to +85 +/-25 / -40 to +105 +/-50 / -40 to +105
SG2520HGN	2.5 x 2.0 x 0.74	HCSL	25 to 500	2.5 3.3	+/-25 / -40 to +85 +/-50 / -40 to +85 +/-25 / -40 to +105 +/-50 / -40 to +105



表 3 : HFF 水晶振動子使用 VCXO 推奨製品ラインアップ

電源電圧:3.3 V Typ. 制御電圧 : 1.65 ± 1.65 V

機種	外形 寸法 [mm]	出力	出力 周波数範 囲 [MHz]	周波数温度特性 (周波数偏差 / 温度範囲) [$\times 10^{-6}$ / $^{\circ}\text{C}$ to $^{\circ}\text{C}$]	絶対周波数 可変範囲 [$\times 10^{-6}$] Min.
VG3225EFN	3.2 x 2.5 x 1.05	LV-PECL	25 to 500	+/-50 / -40 to 85 +/-50 / -40 to 105	+/- 50 : 25 to 42.5 MHz , 50 to 85 MHz , 100 to 170 MHz +/- 20, +/- 10 : 25 MHz to 250 MHz +/- 10 : 250 MHz to 500 MHz (+85 $^{\circ}\text{C}$ Max.)
VG5032EFN	5.0 x 3.2 x 1.3	LV-PECL	25 to 250	+/-50 / -40 to 85 +/-50 / -40 to 105	+/- 50 : 25 to 42.5 MHz , 50 to 85 MHz , 100 to 170 MHz +/- 20, +/- 10 : 25 MHz to 250 MHz
VG7050EFN	7.0 x 5.0 x 1.5	LV-PECL	25 to 250	+/-50 / -40 to 85 +/-50 / -40 to 105	+/- 50 : 25 to 42.5 MHz , 50 to 85 MHz , 100 to 170 MHz +/- 20, +/- 10 : 25 MHz to 250 MHz
VG3225VFN	3.2 x 2.5 x 1.05	LVDS	25 to 500	+/-50 / -40 to 85 +/-50 / -40 to 105	+/- 50 : 25 to 42.5 MHz , 50 to 85 MHz , 100 to 170 MHz +/- 20, +/- 10 : 25 MHz to 250 MHz +/- 10 : 250 MHz to 500 MHz (+85 $^{\circ}\text{C}$ Max.)
VG5032VFN	5.0 x 3.2 x 1.3	LVDS	25 to 250	+/-50 / -40 to 85 +/-50 / -40 to 105	+/- 50 : 25 to 42.5 MHz , 50 to 85 MHz , 100 to 170 MHz +/- 20, +/- 10 : 25 MHz to 250 MHz
VG7050VFN	7.0 x 5.0 x 1.5	LVDS	25 to 250	+/-50 / -40 to 85 +/-50 / -40 to 105	+/- 50 : 25 to 42.5 MHz , 50 to 85 MHz , 100 to 170 MHz +/- 20, +/- 10 : 25 MHz to 250 MHz



3.最後に・・・

近年通信機器やネットワーク機器に高周波の信号源は不可欠ですが、お客様が使用するアプリケーションや希望する仕様を満たすための高周波出力を生む電子部品には様々な選択肢が存在します。

エプソンでは高周波出力を得る電子部品として「任意の周波数を自由に得られる利便性をもったプログラマブル発振器」、「良好な温度特性を持つ基本波ダイレクト AT カット水晶発振器」を紹介してまいりました。どの製品も様々な特徴を持っていますが、すべての製品は水晶本来の持つ高安定・高精度な特性を生かしており、お客様の使用用途により幅広い選択肢をご提供できることと思います。今回の Technical Notes により、水晶部品の持つ高い安定性をご理解頂き、多くのお客様の様々なアプリケーションにおける電子部品選択の際のお役に立つことを望みます。