

水晶発振器と Si-MEMS 発振器との特性比較

電子機器や通信システム機器に求められる発振器の性能比較

【序文】

さまざまな電子機器や通信システム機器などの構築において信号源となる発振器の選択はシステムそのものの性能を左右する重要な役割を担います。私たちが過去に配信してきた White Paper「通信システムに必要な信号品質と基準信号源」において、発振器に使用される源振や構造の違いにより特徴・特性が変わることや、その特性がシステムに及ぼす影響など基準信号源選択の重要性を説明してきました。そこで今回は基準信号源となる 2 つのタイプの発振器「①水晶振動子を源振にした基本波発振器」と「②Si 共振子を源振に PLL を使用した Si-MEMS 発振器」に関し、基準信号源に必要な特性の実測を行い、性能比較を行った内容を紹介しします。

【発振器の構造および特徴】

水晶発振器は水晶振動子の基本波発振を源振とし構成された発振器であり、Si-MEMS 発振器は Si 共振子を源振とし温度補正を行うための回路及び任意の周波数を得るための PLL 回路を組み構成された発振器です。今回特性比較を行う発振器の基本構造を図 1 に示します。この基本構造を見てもわかるとおり、シンプル構造を持つ水晶発振器に対し、Si-MEMS 発振器は、共振子部分・PLL 部分・温度補正部分を持つ複雑な構造をしています。この複雑な構造の影響により、ノイズの増幅、消費電流の増加など、発振器の性能として様々な違いが生じます。この構造の違いによる発振器の特徴を表 1(次ページ)に示します。そこで私たちは基準信号源に必要とされる特性に関し、水晶発振器と Si-MEMS 発振器の性能比較を行ったので紹介する。

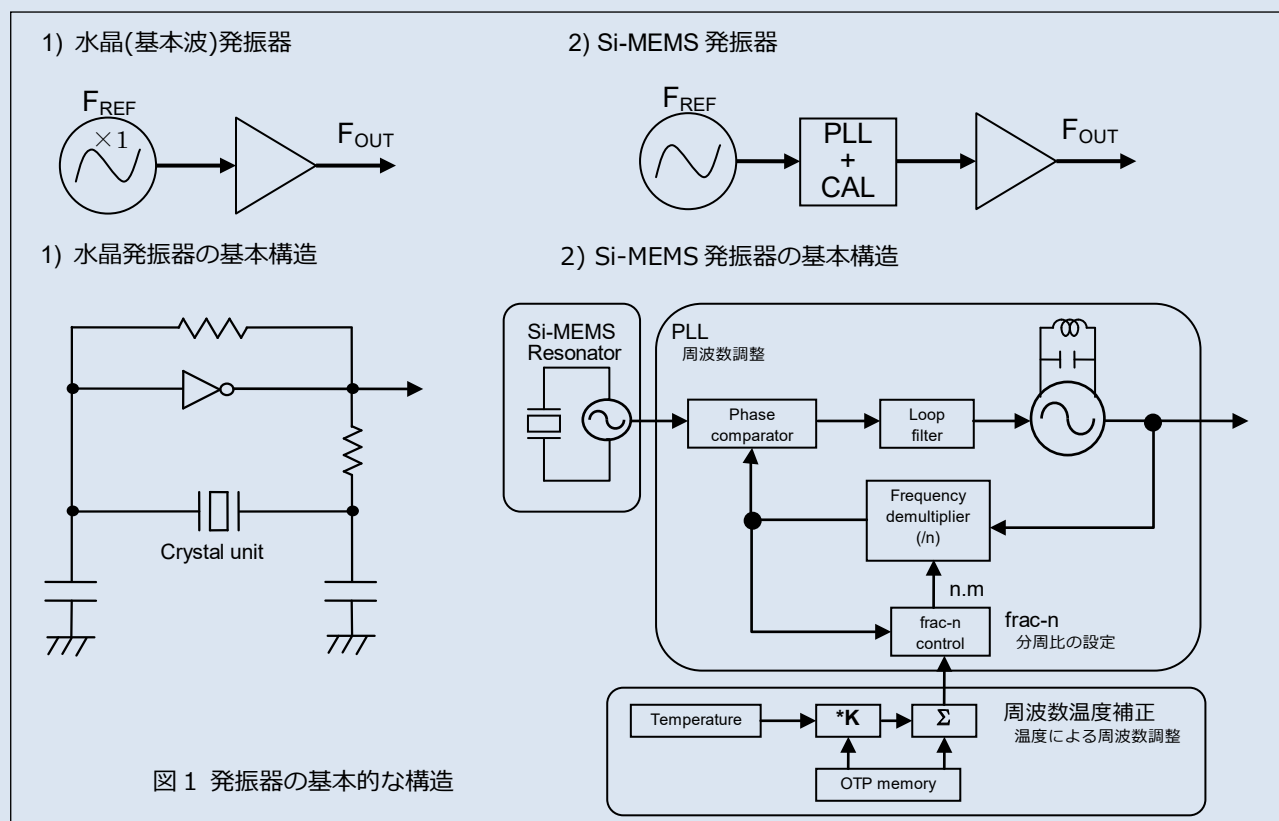


表 1 発振器構造の違いによる特徴

発振器の構造(種類)	特 徴
水晶(基本波)発振器	水晶の基本波発振を用いることにより回路構成がシンプルとなり消費電流を低く抑えることができ、ノイズやジッタの特性に優れた性能を持つ。
Si-MEMS 発振器	PLL にて任意の周波数を容易に得られるが、回路構成が複雑になり消費電流が大きくなる。また Si-MEMS 共振子の温度補正を行う Fractional-n PLL により発生する不連続な周波数ジャンプの影響によりノイズやジッタの特性が劣化する。

【水晶発振器と Si-MEMS 発振器との特性比較】

電子機器や通信システム機器に求められる発振器の性能として以下の項目に関し水晶発振器と Si-MEMS 発振器の実測比較を行いました。比較にはエプソン製水晶発振器と 2 種類の Si-MEMS 発振器を用いております。

なお今回の測定結果に関しましてはエプソン社内独自に実施した内容となり、実際の製品の特性を保証するものではありませんのでご注意ください。

・ 比較項目

- 1)周波数温度特性 → 温度変化における周波数の安定性は？
- 2)位相雑音・位相ジッタ → 通信機器での重要なファクターであるノイズ性能は？
- 3)消費電流 → 消費される電流値は？
- 4)発振起動特性 → 電源投入後の起動特性と安定性は？
- 5)周波数安定度 → 周波数の安定性は？

1)周波数温度特性

周波数温度特性測定においては、低温-40℃で安定後、+2.0℃/min の温度勾配で+85℃までを連続的に変化させ取得しました。その結果を図 2 に示します。

水晶発振器(エプソン基本波 SPXO)の温度特性は AT 振動子の持つ連続的な 3 次曲線となりますが、簡易温度補正機能を備えた水晶発振器(エプソン簡易温度補正 SPXO)のように広い温度範囲で安定した特性を実現する製品もあります。これに対し Si-MEMS 発振器も水晶発振器と同じように広い温度範囲で良好な周波数温度特性を持つように見えます。しかし Si-MEMS 発振器は Si 共振子のもつ 1 次直線の温度特性を Fractional-N PLL 回路によりきめ細かく補正し安定性を確保するため、図 3 の拡大図に見られるように分周比切替時に不連続な周波数ジャンプ(温度特性のギザギザ)が生じていることがわかります。このように発振周波数の不連続な温度点においては出力信号の位相が変化するため、このあと説明するノイズやジッタの特性劣化に影響を及ぼします。

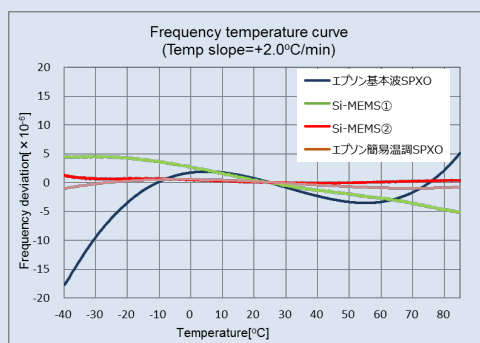


図 2 : 各製品の周波数温度特性測定結果

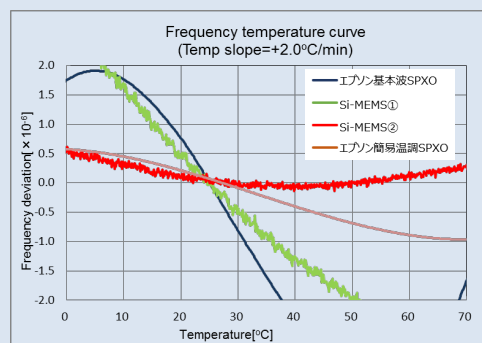


図 3: 温度特性拡大図

2)位相雑音・位相ジッタ

水晶発振器と Si-MEMS 発振器の位相雑音特性の実測結果(電源電圧 3.3V、温度+25℃にて測定)を図 4 に示します。Si-MEMS 発振器の位相雑音特性は図 4 に示す通り位相雑音曲線の一部が持ち上がる特性となりますが、これは Si-MEMS 発振器の基本構造(図 1)の影響によるものです。Si-MEMS 発振器は PLL が電圧制御発振器(以下 VCO)に対し源振でロックをかけ通倍された周波数を出力する構造上、位相雑音特性は Si-MEMS 発振回路と PLL の 2 つの要素の影響を受けることになります(一般的に Si-MEMS 発振回路は水晶発振回路よりも近傍の位相雑音特性が劣り、高域側では VCO の位相雑音特性が現れるため位相雑音が下がる傾向となる)。

また Si-MEMS 発振器の中にも図 4 の Si-MEMS②に見られるような良好な位相雑音特性を持つ製品も存在します。この製品のように高域側での位相雑音を低減する手段として用いられているのが VCO/PLL 回路の位相雑音を下げる方法です。一般的には位相雑音低減のため VCO/PLL 回路に工夫をすると消費電流は非常に大きくなります。さらに分周比切替えの影響により発生するスプリアスも消費電流の増大でより顕著となります。

次に位相ジッタの実測結果を表 2 に示します。

位相ジッタ値に関しては、指標の 1 つである 12k~20MHz での位相ジッタ量(SONET SDH の規格)にて比較を行いました。PLL 回路を使用する発振器では、通倍数が多いほど位相雑音特性は劣化し、発生するスプリアスで位相ジッタに悪影響を及ぼします。Si-MEMS②に関しては位相雑音特性の改善のための工夫から位相ジッタもかなり良好な値を示しています。ただし発振器構造上の影響から、水晶発振器の持つ値の実現までには至っておりません。

仮に位相ジッタの悪い基準信号源の発振器を、位相変調技術を基に通信する無線通信機器等に使用すると、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行えなくなり、最悪の場合は通信機器としての役割が果たせなくなります。

表 2 : 各製品の位相ジッタ測定結果

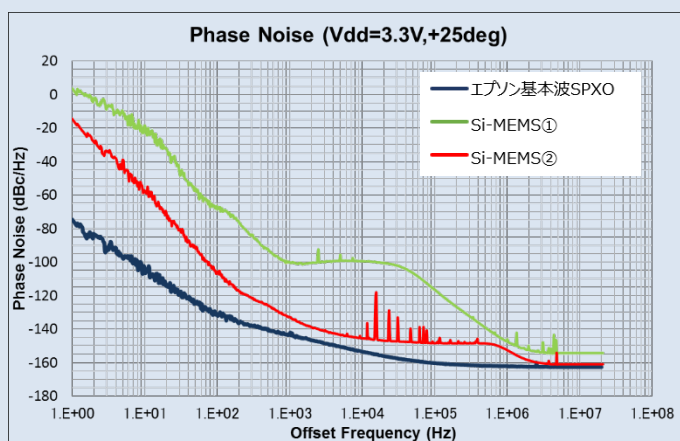


図 4 : 各製品の位相雑音特性測定結果

製品	周波数	位相ジッタ (オフセット周波数 : 12kHz~20MHz)
水晶発振器 (エプソン基本波 SPXO)	25 MHz	0.32 ps
Si-MEMS 発振器①	25 MHz	15.2 ps
Si-MEMS 発振器②	19.2 MHz	0.76 ps

3) 消費電流

各発振器の消費電流の実測結果(電源電圧 3.3V、温度+25℃、負荷条件 10pF にて測定)を表 3 に示します。

水晶発振器は源振の基本波発振やシンプルな回路構成の恩恵を受け消費電流が最も低い値を示します。

これに対し Si-MEMS 発振器では、複雑な回路の影響もあり、Si-MEMS 発振器①で 7.1mA、また位相雑音・位相ジッタの項でも説明したとおり、良好な位相雑音特性を示す Si-MEMS 発振器②においては 31.5mA と桁違いの電流を消費していることがわかります。従って位相雑音を良くすることと低消費電流を維持することは互いにトレードオフの関係になるため、発振器を用いたシステム構築の際には十分注意が必要です。

表 3：各製品の消費電流測定結果

製品	周波数	消費電流
水晶発振器(エプソン基本波 SPXO)	25 MHz	1.5mA
Si-MEMS 発振器①	25 MHz	7.1mA
Si-MEMS 発振器②	19.2 MHz	31.5mA

4) 発振起動特性

各発振器の電源投入後の起動特性(電源電圧 3.3V、温度+25℃、0~0.5 秒(1msec step)にて測定)を図 5 に示します。

周波数偏差が $\pm 1.0 \times 10^{-6}$ 以内に安定する時間で比較すると、水晶発振器の発振周波数が 1.5ms 以内なのにに対し、Si-MEMS①は 90ms 程度、また位相ジッタ特性の良い Si-MEMS②においては 250ms 程度経過していることがわかります。さらに Si-MEMS での周波数補正方式の影響から Si-MEMS 発振器は起動後も離散的な周波数の揺らぎが観察できます。

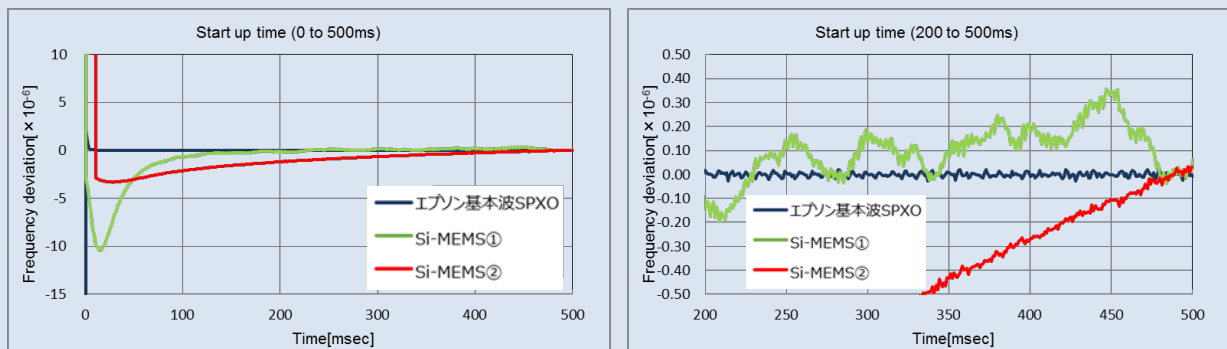


図 5：各製品の発振起動特性結果

5) 周波数安定度

各発振器の周波数安定度実測結果(電源電圧 3.3V、温度+25℃、50 秒間測定)を図 6 に示します。

Si-MEMS 発振器の周波数安定度に関しては、4)項にもあるとおり PLL 回路での補正による不連続な周波数ジャンプの影響が表れています。特に消費電流の低い Si-MEMS①に関しては信号強度が弱いため、周波数の安定度に関して $\pm 0.6 \times 10^{-6}$ 程度の揺らぎが常に発生しています。Si-MEMS②に関してはその点は改善されていますが、水晶発振器の安定度までには及びません。この現象が長い時間測定しても同じ結果であり、Si-MEMS①は絶えず揺らぎが継続していることを示します。

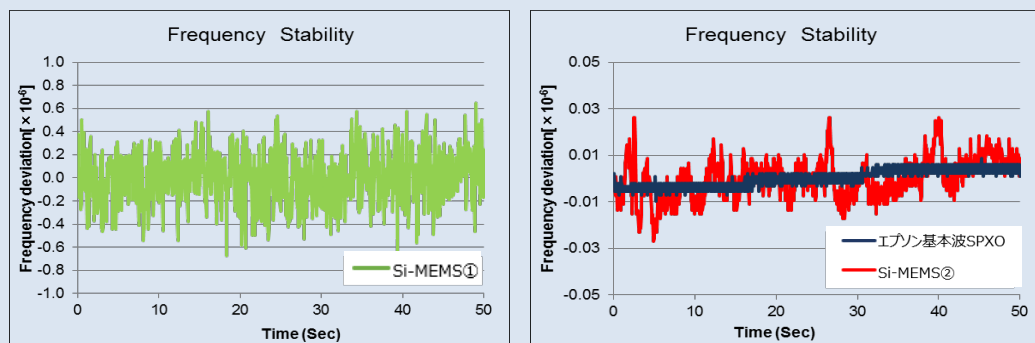


図 6：各製品の周波数安定度測定結果

【まとめ】

表 4 に 1)~5)項での評価結果をまとめたものを示します。

表 4：各製品の評価結果まとめ

評価項目	水晶発振器（エプソン基本波 SPXO）	Si-MEMS 発振器①	Si-MEMS 発振器②
1)周波数温度特性	○ 3 次曲線	△ きめ細かく補正し安定性を確保 但し不連続な周波数ジャンプあり	
2)位相ジッタ	◎ 0.32ps	× 15.2ps	○ 0.76ps
3)消費電流	◎ 1.5mA	△ 7.1mA	× 31.5mA
4)発振起動特性	◎ 1.5ms 以内	× 90ms 程度	× 250ms 程度
5)周波数安定度	◎ ±0.01×10 ⁻⁶ 以下の安定度	× ±0.6×10 ⁻⁶ 程度の安定度 但し常時揺らぎあり	○ ±0.03×10 ⁻⁶ 程度の安定度 但し常時揺らぎあり
総合評価	◎	×	△

ここまで水晶発振器と Si-MEMS 発振器の特性比較を行ってきましたが評価結果一覧のとおり、水晶を源振とした発振器は全ての項目で高い精度・高い安定性を兼ね備えた電子デバイスであることがわかります。

特に設備投資が予想される高速通信システム等に使用する基準信号源として、Si-MEMS 発振器のようなリスク要素の大きい製品(正確なデータの送受信ができず、最悪の場合、通信機器としての役割が果たせなくなるリスク)を使用するよりも、温度変化に対し線形的かつ安定した特性を持ち、キャリア近傍(低域側)からフロアレベル(高域側)まで安定した位相雑音特性を有し、消費電流も低く抑えられ、起動安定性に優れ、高精度な周波数安定度を持つ水晶発振器を使用するほうが、信頼性の高い安定したシステム構築に繋がります。

今後エプソンでは水晶の持つ高精度・高安定な特性を生かし、お客様のアプリケーションに必要な性能を有した電子デバイス製品を順次リリースし、お客様のニーズに応えてまいります。