

本ホワイトペーパーは、エプソンのホワイトペーパー「水晶発振器と Si-MEMS 発振器の比較」を受け SiTime MEMS 発振器技術のアップデートを行ったものです。エプソンのホワイトペーパーでは、2011 年に発売された水晶発振器と SiTime MEMS 発振器、そして同時期に発売されたマイクロチップ発振器を比較しています。その後、MEMS 技術、アナログ技術、システム技術で画期的な進歩を遂げました。当社の MEMS 発振器は 2013 年に性能面で水晶技術を上回り、クライアントに大きな技術的価値を提供しています。本ホワイトペーパーでは、当初のエプソンホワイトペーパーで取り上げたエプソンデバイス SG-210*B の性能データも掲載していますが、より高性能な差動出力発振器、SiTime SiT9501 と、SiT9501 と機能的には酷似していても性能的には大きく劣るエプソン高性能発振器 EG-2121 に焦点を当て、その特徴を紹介しています。

主張: 水晶発振器は シンプルな構造かつ 低消費電力、低ジッタを実現している

パート 1. 「シンプルな構造」 - 製造方法の違い

この「シンプルな構造」という主張は、水晶振動子と MEMS 振動子のブロック図を比較したものです。まず水晶振動子と MEMS 振動子の製造工程を比較することが必要です。水晶振動子やパッケージ、発振回路を搭載した IC など、水晶発振器の製造は MEMS 発振器に比べて、非常に複雑かつ製造上での清浄度も低くなります。図 1 に一般的な水晶製造工程の流れを表示しており、23 の工程で構成されています。ポイントは水晶の製造工程の方が、オールシリコン MEMS 工程よりも大幅に多いことと、水晶工程のうち 4 工程はパッケージの蓋を開けた状態で行われていることです。これらの工程（赤い四角で囲った部分）では、水晶デバイスは特に汚染物質の影響を受けやすくなります。汚染物質を最小限にするための対策はとられていますが、完璧に排除することはできず、経年劣化の促進や信頼性の問題につながっています。

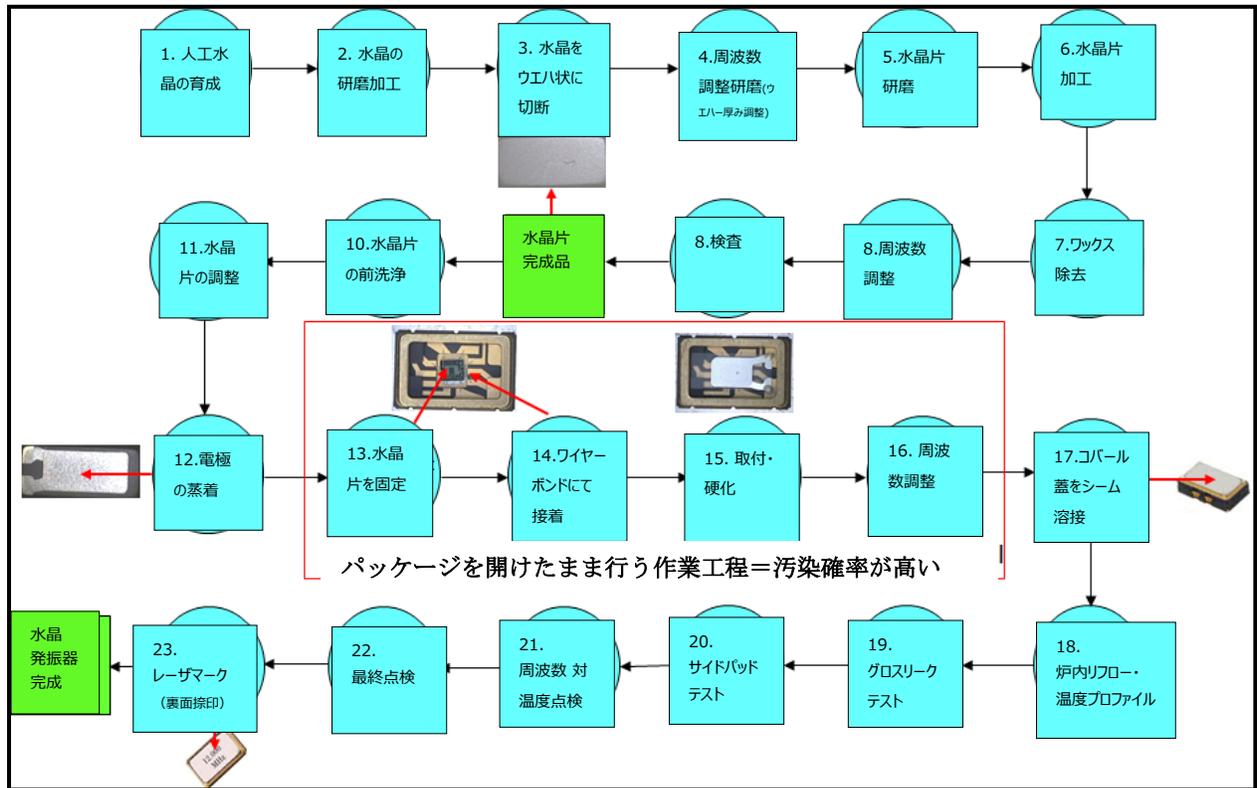


図 1. 水晶発振器製造工程

MEMS 発振器の製造は、主要な製造工程が 12 で行われ、振動子の製造工程は、半導体ディープサブミクロンウエハファブ特有の半導体ウエハクリーニング工程で行われます。清浄度は ppb レベルまで管理され、振動子は MEMS Epi-Seal™ プロセスによりウエハの時点で密閉されます。

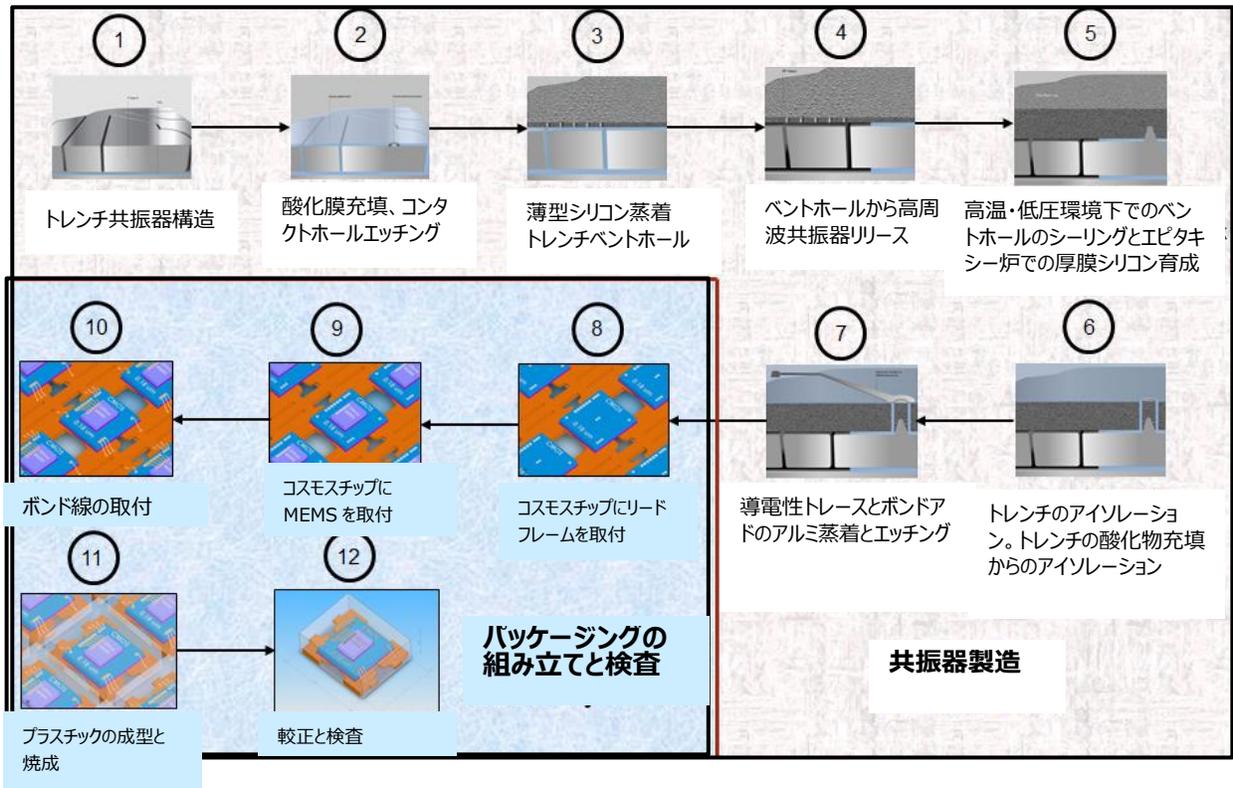


図 2. MEMS 発振器製造工程

このウルトラクリーンな製造工程が、業界最高の品質と信頼性を実現しています。図 3 は SiTime 社の MEMS 発振器の平均故障間隔 (MTBF) が 19 億時間であるのに対し、水晶発振器ベンダー 2 社はそれぞれ 3800 万時間、2800 万時間であることを示しています。3800 万時間は十分ですが、この MTBF を 1 年間に 1 万台の出荷システムに適用すると、1 年あたり 2~3 個の故障が発生している計算となります。一方、SiTime MEMS の MTBF は 19 億時間なので、1 年間に 0.04 個の故障に相当し、図 4 に示すように 1 年間に 1 個の故障が発生する確率はわずか 4% です。

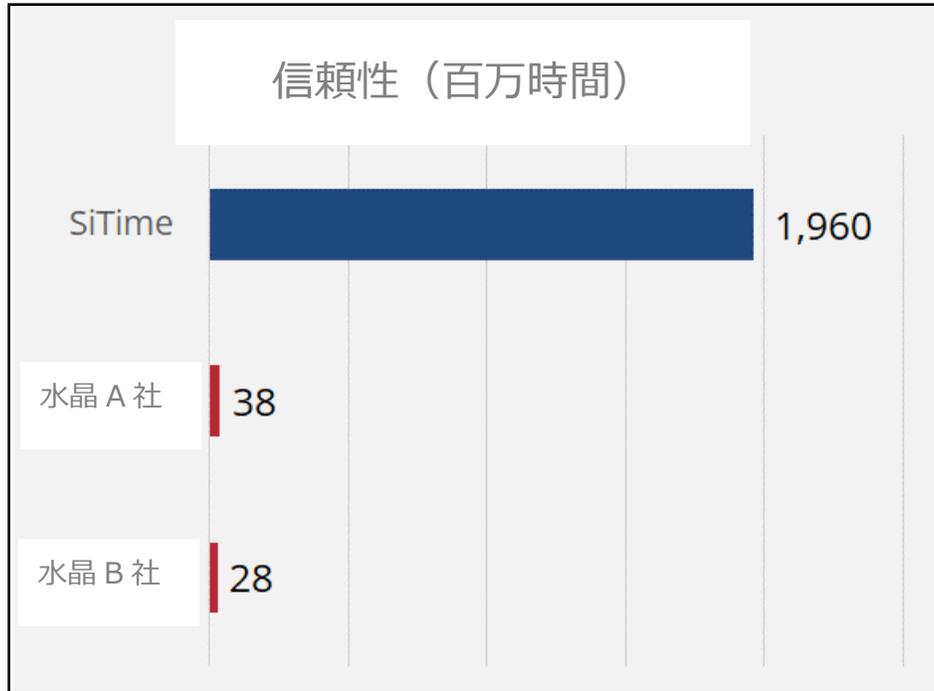


図 3. MEMS 対 水晶発振器: 平均故障間隔 (MTBF)比較

ベンダー	MTBF (百万時間)	1万台あたりの 年間故障予測数
SiTime	1,960	0.04
水晶 A 社	38	2.3
水晶 B 社	28	3.1

図 4. MEMS 対 水晶発振器: 1万台あたりの年間故障予測数

パート 2. 「シンプルな構造」 - デバイスの物理的構造の違い

SiTime MEMS 発振器が PLL (Phase Locked Loop) 技術を使用しているのは事実ですが、水晶発振器ベンダーも Epson SG-8018 や SG-8002 などが PLL を使用しています。Epson SG-8018 発振器のデータシートには、68ps の位相ジッタ (12kHz~20MHz) が記載されており、エプソンホワイトペーパーで言及されている「Si-MEMS1」発振器よりも 4 倍以上特性が悪いことが示されています。Epson EG-2122 などの表面弾性波 (SAW) 発振器は、この論文の後半で SiTime MEMS 発振器、SiT9501 および SiT9365 と比較されます。重要なのは、ひとつの設計で全ての発振器を作成することができないことです。発振器は、異なるアプリケーションを目的とした、異なる電力・性能特性、個々の構造を持つ必要があります。

SiT9501 差動出力 XO 製品群の構造を図 5 に示します。これは、MEMS 共振器と温度補償回路を備えた整数 PLL を使用しています。PLL と温度補償回路は電力コストがかかりますが、これらの構造の部品は、優れた柔軟性と性能を提供します。そのメリットは以下の通りです。

- プログラム可能な出力周波数 - PLL を使用しない水晶発振器は、周波数ごとに異なる水晶振動子を使用する必要があります。そのため、水晶片の製造納期が比較的長く、セラミックパッケージのサプライチェーンにも制約があることから、物流が複雑になってしまいます。SiTime MEMS 発振器は、単一の MEMS 振動子を使用し、出力周波数はオンデマンドで組み立てた後にプログラムされるため、納期が大幅に短縮され、物流が簡素化されます。
- プログラム可能な出力フォーマット、電圧スイング、DC レベル (FlexSwing™) により、シグナルインテグリティを最適化し、差動クロック入力を使用するすべてのチップセットをサポートします。
- 温度補償機能により、-40°C~105°C の広い温度範囲で ±20ppm の XO を実現し、業界最高の短期周波数安定度を提供しています。

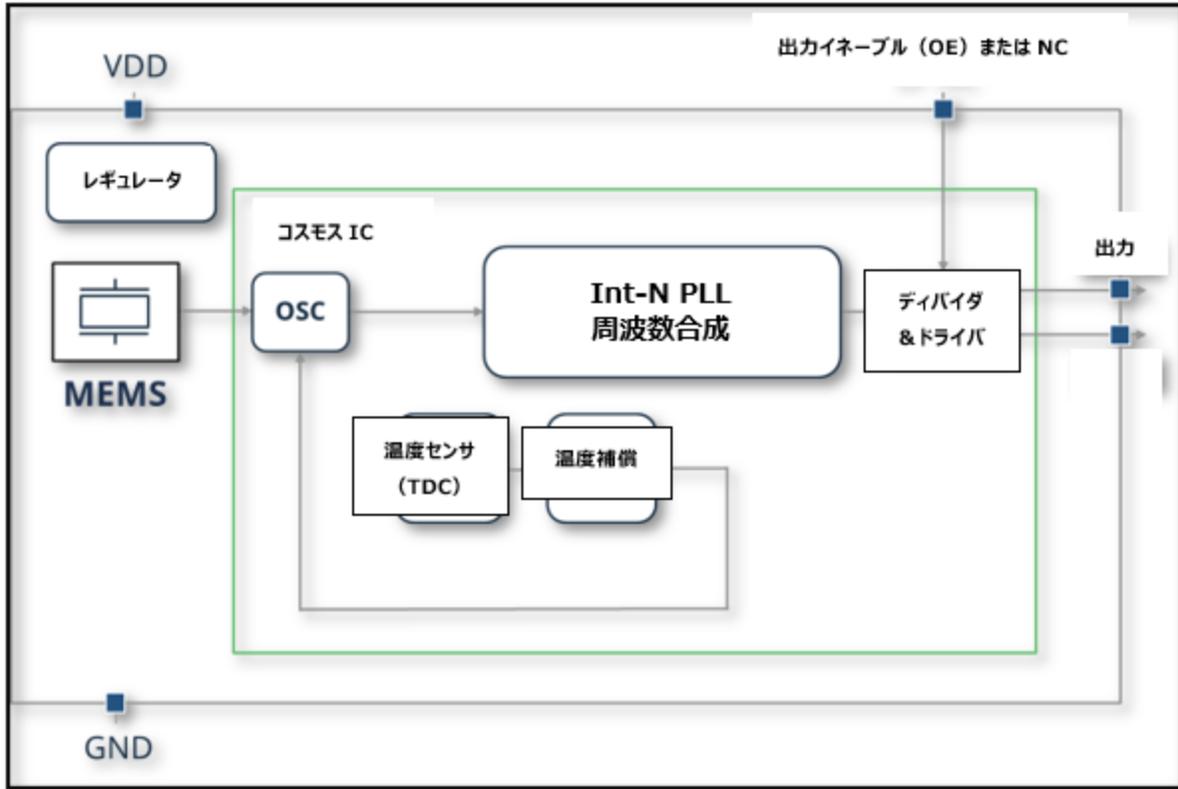


図 5. SiTime SiT9501 製品群の構造

パート 3. 低ジッタ

もう一つの重要な主張は、水晶のシンプル構造は、PLL を使用したデバイスよりも低いジッタを実現しているという点です。この点を証明するために、エプソンは 2011 年の SiTime デバイスの位相ノイズとジッタの例を示しました。現在、SiTime 製品群の差動出力型発振器は、PLL 性能を劇的に向上させ、ジッタを大幅に低減しています。図 6 内にある 156.25 MHz の SiT9501 XO の位相ノイズプロットは、12kHz から 20MHz までの積分位相ジッタ (IPJ) がわずか 0.075ps であることを示しています。これは前世代の MEMS 発振器に比べて大きな改善であり、多くのアプリケーションで要求される性能を大幅に上回っています。また、エプソンホワイトペーパーで言及されている SG-210S*B の性能 (25MHz で 0.320ps) 、SG-210*B と比較して 4.3 倍低いジッタ、Epson EG-2121 の最低ジッタよりも 3 倍低いジッタを実現しています。

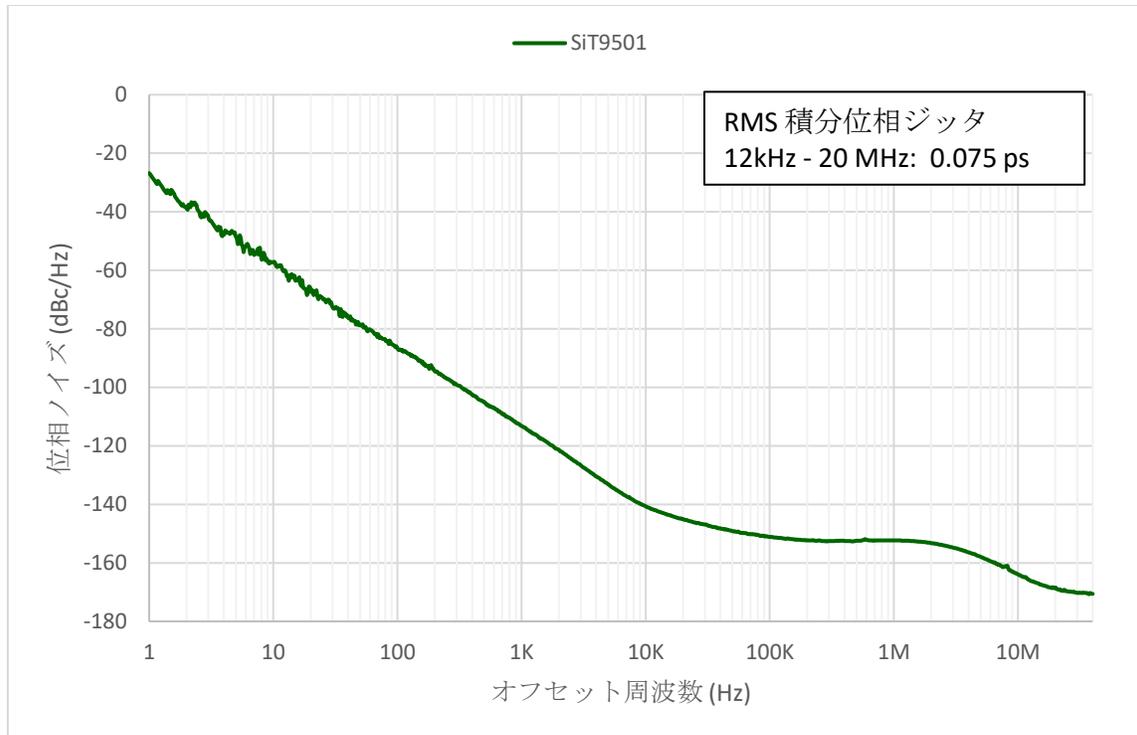


図 6. SiT9501 位相ノイズ 156.25 MHz 出力周波数

振動環境下でのジッタ

アプリケーションによっては、振動などの環境ストレスがあっても良好な性能を維持することが重要です。MEMS 振動子は、水晶振動子や SAW 振動子に比べ、質量が非常に小さいため、耐振動性に優れています。水晶振動子の質量は、MEMS 振動子の 1000 倍から 3000 倍であり、これは、ある加速度から MEMS 振動子にかかる力のはるかに低いことを意味しています。図 7 は、SiTime 製 SiT9365 と Epson、TI、Pericom の発振器を、振幅 7.5g rms、振動数 15MHz~2kHz のランダム振動の影響を受けて位相ノイズ性能を比較したものです。各発振器の積分位相ジッタ（積分範囲 10Hz~10kHz）を振動の有無で示しました。SiT9365 では積分位相ジッタの大きな増加は見られませんが、水晶の競合発振器では 2.5 倍~6 倍と大きなジッタの増加が見られました。Epson SG-7050 発振器では、0.97ps から 4.6ps と 3.8 倍の増加を示しています。

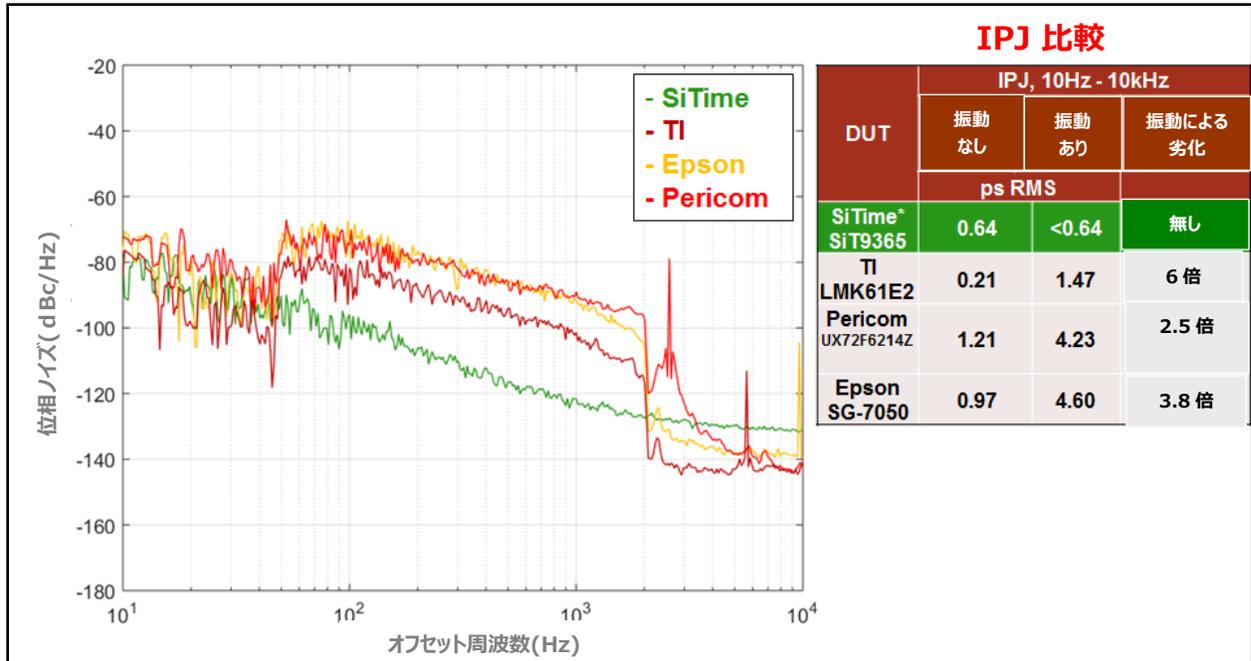


図 7. ランダム振動環境下での位相ノイズと積分位相互ジッタ

電源ノイズがある際のジッタについて

もう一つの環境ストレスは、発振器電源に混入する電気ノイズです。一般的なノイズ源は、DC-DC コンバータやリニアレギュレータで、この電気ノイズに対する耐性を示す指標として、PSNR（電源ノイズ耐性）が知られています。PSNR は様々な周波数の 50mV 正弦波信号を発振器の電源端子に AC カップリングし、クロック出力のジッタに与える影響を測定することで検査されます。PSNR の数値である ps/mV（picoseconds per millivolt）単位が低いほど、ジッタが小さく、性能が高いことを示しています。

図 8 は SiT9501 と EG-2121 の PSNR を比較したものです。200kHz～2MHz の一般的なスイッチング・レギュレータの周波数範囲において、SiT9501 が大幅に優れた性能を発揮しています。200kHz では 8.6 倍、一般的な DC-DC コンバータのスイッチング周波数である 2MHz では 40 倍も優れていることが証明されています。

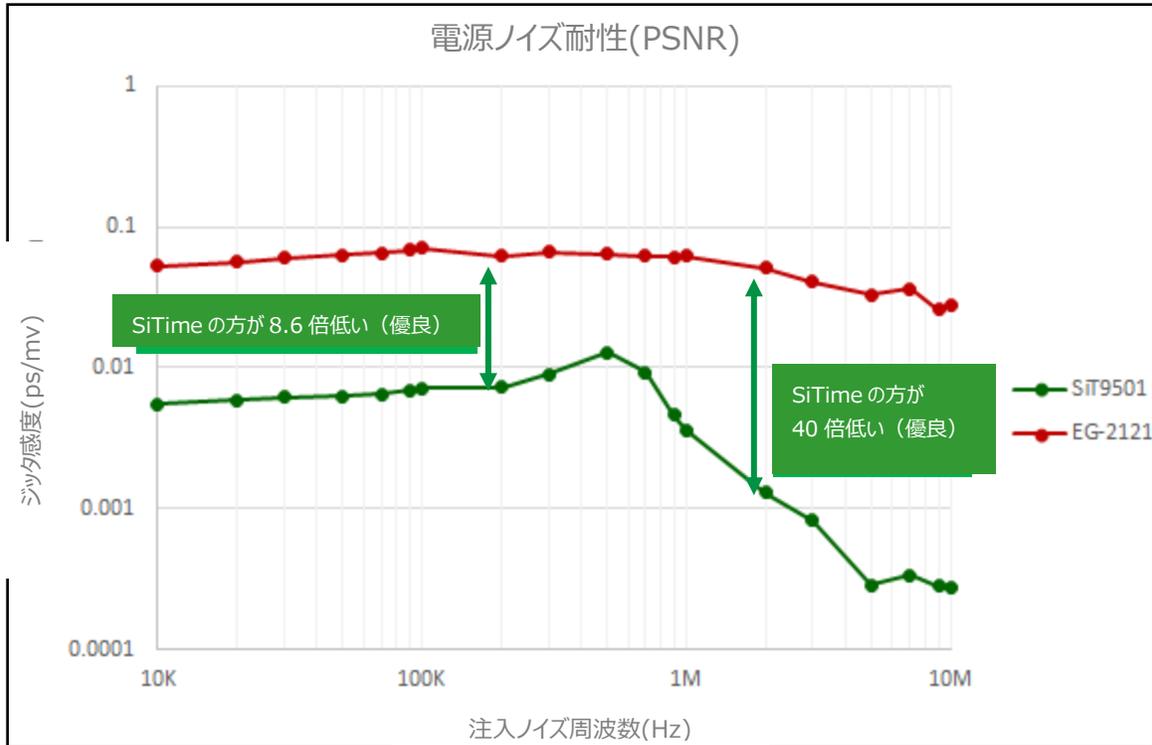


図 8. 電源ノイズ耐性

パート 4. 低消費電力

最新の SiTime 差動発振器は、Epson EG-2121 を含む競合の水晶や SAW 発振器より低消費電力です。PLL 設計では、ジッタ性能と低消費電力をトレードオフにすることが可能であり、SiTime は他の製品群でも、ほとんどの一般的な発振器よりも大幅に低い電力を実現しています。表 1 は、いくつかの SiTime とエプソンの発振器の消費電力を一覧にしています。

製品名	最大 IDD	注釈
SiTime SiT9501, 156.25MHz	48.4mA	PLL 搭載の発振器。様々な温度帯による周波数安定度、短期周波数安定度(STFS)ともに最高レベル
Epson EG-2121, 156.25MHz	80mA	SAW 発振器、PLL 非搭載。様々な温度帯に対する周波数安定度、短期周波数安定度(STFS)は良くない
SiTime SiT8021, 25MHz.	0.32mA	PLL を最適化し、低消費電力を実現
Epson SG-210S*B, 25MHz	1.6mA	水晶発振器 (PLL 非搭載)

表 1. 消費電力

SiT9501 と EG-2121 は、どちらも低ジッタで高周波に対応できる高性能な発振器です。SiT9501 は、出力周波数をプログラム化できる事と温度補償のための PLL を搭載し、最大消費電流は 48.4mA で、エプソンの SAW 発振器 EG-2121 より 39.5%低くなっています。SiTime は、優れたジッタ性能を維持しながら PLL の低消費電力化を進め、EG-2121 の性能を凌駕しています。

Epson SG-210S*B は、Epson EG-2121 よりも性能クラスが低く（ジッタ性能が劣等）、PLL なしの場合には 1.6mA と低消費電力。SiTime 社の SiT8021 は PLL を搭載し、SG-210S*B の 5 倍低い IDD で最適化されています。このほかにも、SiTime のポートフォリオには、以下の表 2 に示すように、あらゆるアプリケーション・セグメント向けに異なる電力・性能特性を持つ発振器が豊富に提供されています。

製品名	MAX IDD	ジッタ及び他事項
SiT9501 – 156.25 MHz 差動出力	34 mA	積分位相ジッタ、最大 0.1ps、12k~20M
SiTime 1602 – 20 MHz 単一出力	3.8 mA	積分位相ジッタ、最大 2.0ps、12k~20M
SiT8021 – 20 MHz 単一出力	0.25 mA	周期ジッタ、最大 110ps rms
SiT1576 – 1 MHz 単一出力	0.013 mA	周期ジッタ、最大 4.5 ns rms
SiT1532 – 32.768 KHz 単一出力	0.0014 mA	周期ジッタ、最大 35 ns rms

表 2. SiTime 製品の電力・性能の特性一覧

主張：MEMS 発振器の周波数 温度特性曲線は「安定性に欠ける」

エプソンのホワイトペーパーでは、全体的な周波数温度特性では MEMSXO の優位性を認めています。MEMS 温度補償回路による周波数温度特性曲線の周波数ジャンプについても触れています。

図 9 は、SiTime SiT9501 と Epson EG-2121 の周波数温度特性を比較したものです。この図から明らかのように、SiTime SiT9501 は温度補償により温度に対する周波数の変動が約 10 倍低く、周波数のジャンプや安定性に欠ける箇所がない、滑らかなプロファイルを実現していることがわかり

ます。当社の最近の発振器製品は、高次多項式曲線適合と高帯域幅の温度デジタル変換器（TDC）により、温度補償が大幅に改善されていることを実証しています。

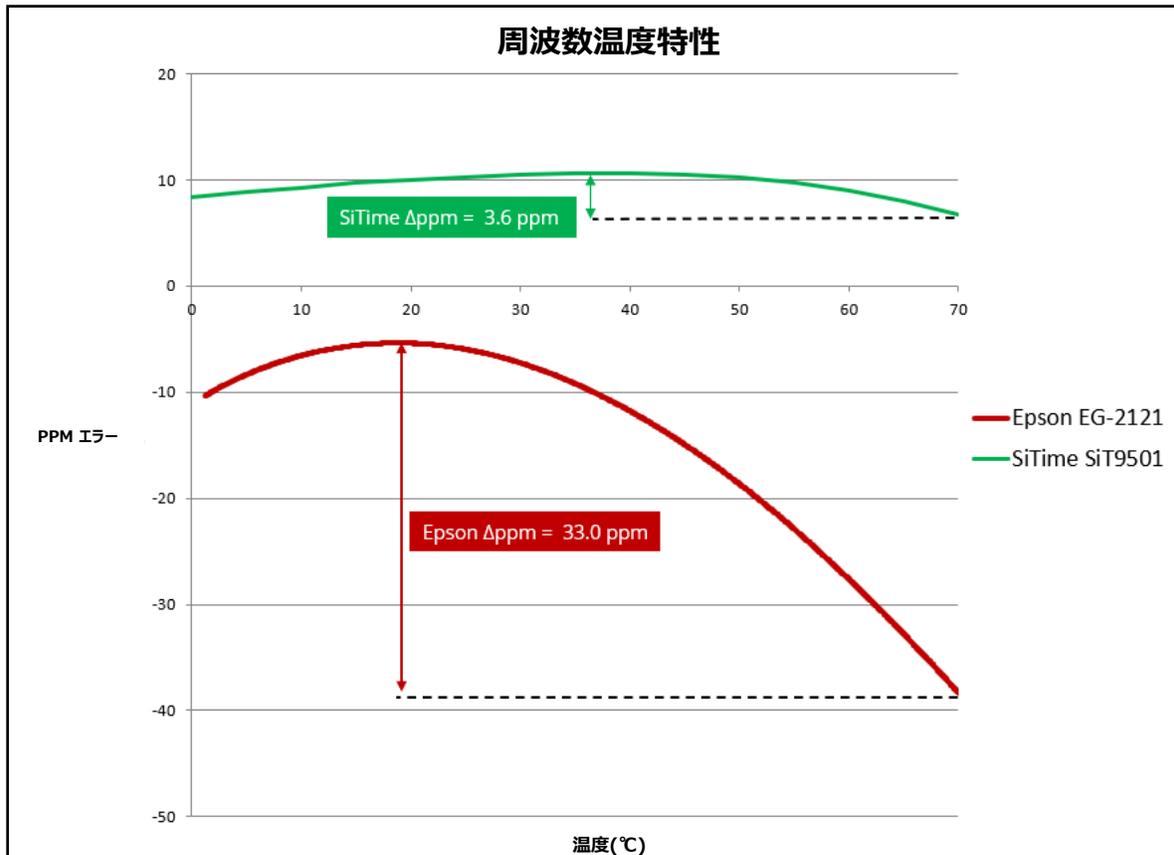


図 9. 周波数温度特性

主張: MEMS 発振器は短時間周波数安定度が低い

SiT9501 製品群は、温度に対する優れた周波数安定性を実現する温度補償技術を組み込んでいます。この温度補償回路は、すべての SiTime XO、VCXO、TCXO で利用可能であり、TCXO は最も優れた温度安定性性能を有しています。

短い時間間隔での非常に小さな温度変化でも出力周波数に影響を与えるため、温度補償により短期的な周波数安定度を向上します。

図 10 は、SiTime の差動 XO と Epson EG-2121 XO の短期周波数安定度を示しています。表が示すように SiT9501 の全体的な偏差はエプソンの発振器よりもはるかに低く、主に全ての SiTime 発

振器に内蔵されている温度補償によるものです。水晶と SAW の XO には、通常、温度補償が組み込まれていません。50 秒間の最大偏差は、エプソンの発振器の 22ppb に対して、SiTime の発振器は 6ppb となっています。

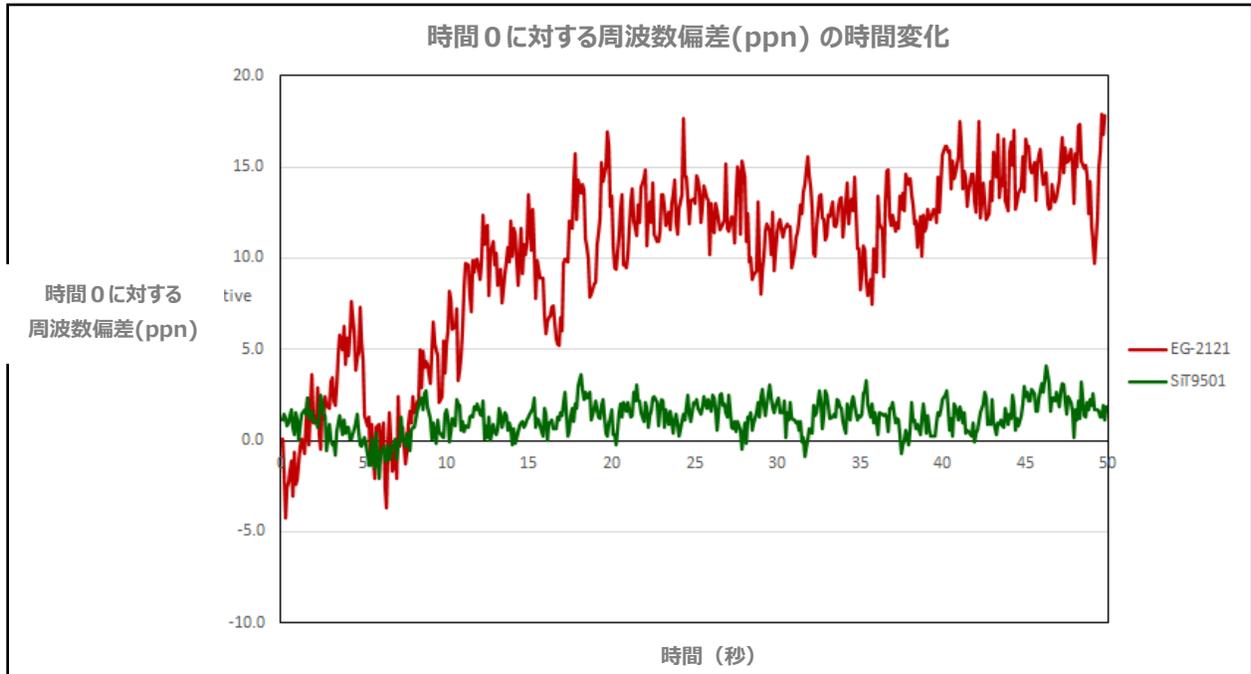


図 10. 短期周波数安定性 周波数データ

短期安定性を特徴づけるもう一つの方法は（前述に示したように生の周波数データを示す以外の方法で）、アラン分散／偏差のような統計的手段を用いることです。アラン分散は、時間的に隣接する周波数サンプルの分数周波数偏差の二乗和に比例します。アラン偏差は、単純にアラン分散の平方根です。標準分散／標準偏差と酷似していますが、アラン分散は 2 標本分散であり、各標本は標準偏差のように母集団の平均値ではなく、前の標本と比較されます。これらの隣接する頻度サンプルの平均化区間は通常 τ と表示されます。アラン偏差の式は次の通りです。

$$\sigma_y(\tau) = \sqrt{\frac{1}{2(M-1)} \sum_{i=1}^{M-1} (y_{i+1} - y_i)^2}$$

$\sigma_y(\sigma)$ は短期的な周波数の不安定さを表す指標なので、数値が小さいほど性能が良いことを表しています。この周波数トレンドデータのアラン変動を計算すると、アラン偏差対周波数サンプル平均化時間のプロットは以下の図 11 のようになります。

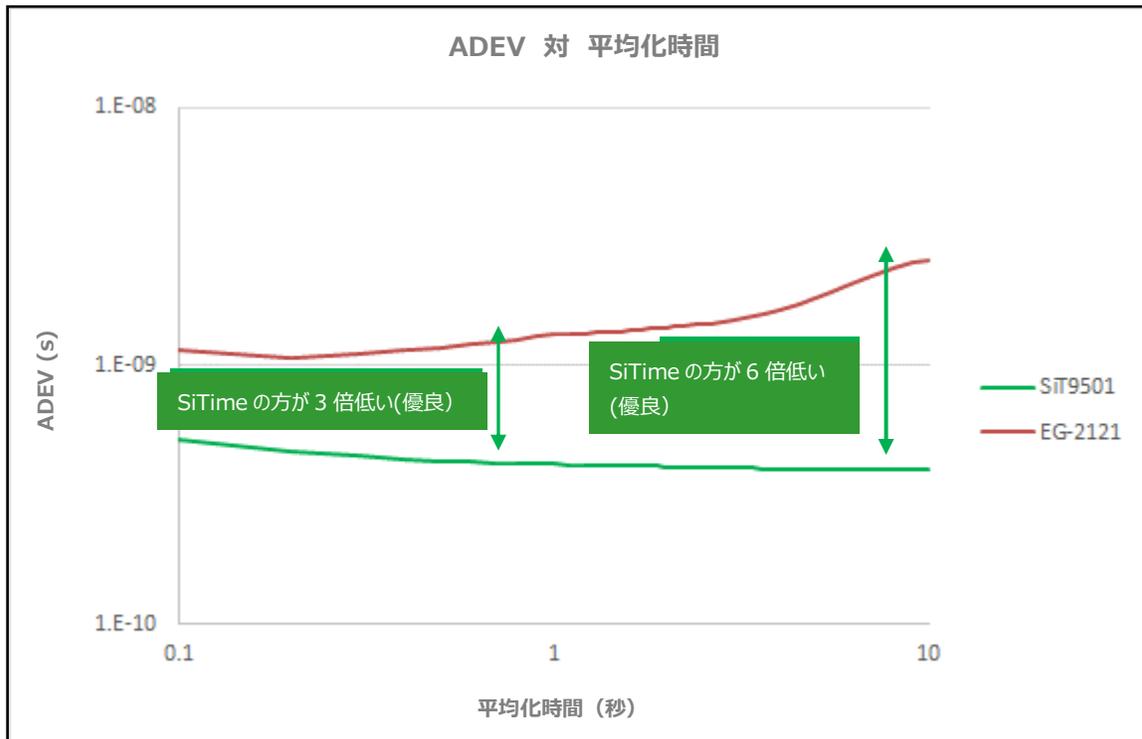


図 11. アラン偏差対周波数サンプル平均化時間 τ

アラン偏差値のプロットからわかるように（図 10 の周波数トレンドデータからも直感的にわかる）、SiTime SiT9501 は Epson EG-2121 よりもはるかに優れた性能を持っています。平均時間 10 秒の場合、SiTime SiT9501 は Epson EG-2121 より約 6 倍 ADEV が低い（優良）という事が分かります。

まとめ

本ホワイトペーパーでは、位相ノイズや位相ジッタ、消費電力、周波数安定度、電源ノイズ耐性など、発振器にとって重要な性能指標について述べてきました。

表 3 は、SiT9501 と EG-2121 の性能比較をまとめたものです。すべての項目で、SiT9501 で実証された SiTime MEMS 技術は Epson EG-2121 のそれを大きく上回っていることが分かります。

パラメータ	SiTime SiT9501	Epson EG-2121	注釈
最大積分位相ジッタ 156.25 MHz, 12k-20M	100 fs	300 fs	SiTime の方が 3 倍低い (優良)。高帯域化、低 BER を実現している。
最大供給電流	48.4 mA	80 mA	SiTime はエプソンの約 60% の電流
電圧オプション	3.3V, 2.5V, 1.8V	2.5V	SiTime は様々な電圧オプションを提供。1.8V は 2.5V に比べて大幅な電力削減を提供します。
最大動作電力 LVPECL 出力	121 mW	200mW	SiTime はエプソンの約半分の電力で作動。OPEX を削減しシステム熱を低減
最大起動時間	5 msec	10 msec	SiTime の方が 2 倍速く優良
周波数安定度	±20ppm	±50ppm	SiTime の方が 2.5 倍低く優良
動作温度範囲	-40° C ~ 105° C	-5° C ~ 85° C	個人用以外の多くのアプリケーションでは産業用の -40° C ~ 85° C 以上が必要とされています。SiTime は -40° C ~ 105° C の厳しい環境下でも利用することが可能です
PSNR @ 2,000 kHz, 50 mV 注入ノイズ	0.00129 ps/mV	0.05133 ps/mV	SiTime は約 40 倍の低ノイズを実現、電気ノイズの多いシステムでの動作を可能にしています
10 秒間の ADEV	4E-10	2.6E-9	SiTime は 6 倍低い。短期周波数安定度が優良
パッケージのフットプリント 2016 = 2.0mm x 1.6mm	3225 2520 2016	7050	小型・軽量パッケージにより、重要な NIC、モバイル、IoT アプリケーションの基盤面積を節約。2016 パッケージは 7050 パッケージの 1/10 の大きさです

表 3. SiTime SiT9501 と Epson EG-2121 の性能比較