

## 頑丈なMEMS発振器で自動車の信頼性と性能を高める

自動車業界では、電子機器を使った機能やシステムが次々と開発され、同時に信頼性が高く頑丈な自動車用のタイミングソリューションの必要性が高まっています。近い将来、車1台に対し70個以上のタイミングデバイスが搭載されるとも言われています。過去数十年の間、タイミングデバイスは高い安定性と性能を備え、唯一の選択肢であった水晶振動子に頼っていました。しかし、MEMSタイミングソリューションがそれ以上の性能と信頼性を提供できるようになったため、急速に市場でのニーズが高まっています。さらに、MEMSタイミングソリューションは、自動運転技術が加速する自動車業界のアプリケーションに必要であり、長年のタイミングの問題点を解決する完璧な接続性と安全性を備えています。



現在、最も信頼性の高いタイミングデバイスはMEMS技術に基づいています。車両用のMEMSタイミングデバイスの主な特徴は以下の通りです。

- AEC-Q100 準拠 (グレード 1 ~ 4)、動作温度範囲は、 $-55^{\circ}\text{C}$ ~ $125^{\circ}\text{C}$ に拡大
- 1 MHz ~ 725 MHzまでの幅広い周波数帯域に対応
- 発振器の周波数安定度は  $\pm 20$  ppm, TCXO の安定度は  $\pm 0.1$  ppmと非常に優れている
- 最大 $10,000g$ の耐衝撃性と $70g$ の耐振動性を備え、水晶発振器の最大30倍の性能を誇る
- 水晶発振器よりも30倍優れた最大10億時間MTB (1FIT値以下) の高い信頼性
- 水晶発振器よりも50倍優れた $0.5\text{DPPM}$ 以下の優れた品質
- 2016年QFNの最小パッケージ
- プログラム可能なドライブ能力とスペクトラム拡散による独自の電磁干渉低減
- $-55^{\circ}\text{C}$ での低温発振保証付き
- アクティビティディップやマイクロジャンプがありません

## 車載用として実績のあるMEMS

加速度センサやジャイロ스코ープなどのMEMSセンサは、自動車の安全性能デバイスとして、長年にわたって使用されてきました。加速度センサは、速度の急激な変化を検知しエアバッグを作動させ、人命を守っています。ジャイロ스코ープは自動車の進行方向を常時監視することで、横滑り防止装置が自動補正することで、車の操縦性と安全性を向上させています。車載用MEMSセンサは故障が許されません。これらのデバイスは何百万台もの車で何十億マイルも走行した後も、設計した通りに機能することが証明されています。

同様に、MEMS振動子の信頼性は極めて高く、MEMSタイミングソリューションは、標準的な半導体製造方法を用いて、シリコンで製造されています。図1に示してあるように、水晶よりもはるかに高い半導体レベルの品質を提供しています。SiTimeは6シグマの設計・開発構想を採用し、20億個以上の出荷を行っていますが、MEMS振動子での故障返品は無く、0.5DPPM以下を維持しています。図2が示すように、SiTime部品の平均故障間隔(MTBF)は10億時間以上(FIT<1)であり、一般的な水晶デバイスの30倍の性能を有しています[1]、[2]。

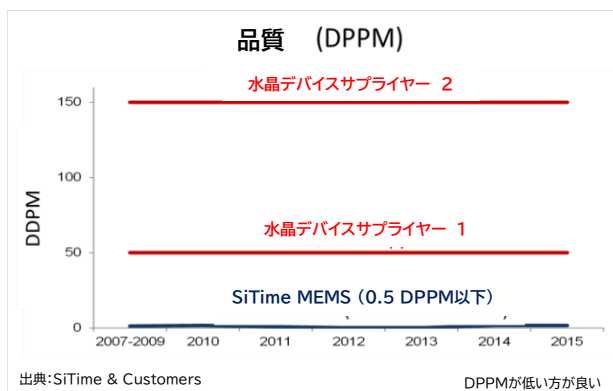


図 1: DPPM(100万個あたりの不良部品)による発振器の品質比較

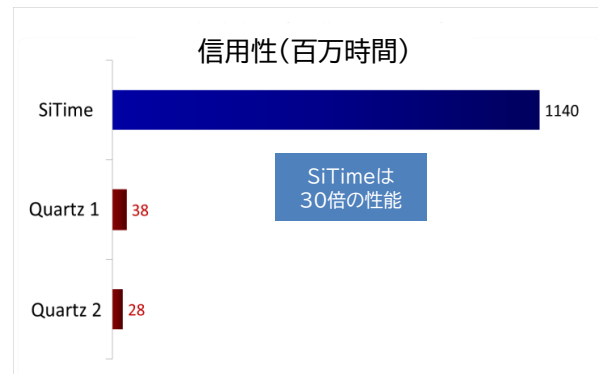


図 2: 発振器の平均故障間隔 (MTBF:100万時間) の信頼性比較表[2]

## シリコン MEMS 製造工程

SiTime のMEMS 振動子は、チタンの15倍の強度を持つ欠陥のない単結晶シリコンから製造されます [3]。SiTimeの振動子は特許取得済みのMEMS First™ および EpiSeal™ 製造工程を用いて生産され、振動子を1100°Cで焼き鈍しを行います。そのため、極端な温度環境に車が置かれてもMEMS振動子に悪影響を及ぼす事はありません [4]。この高温製造工程により、汚染物質を含まない密閉された高品質の振動子を生産する事が可能となります。振動子はシリコンダイの中に密閉されているため、外部からの衝撃を非常に受けにくい構造となっています。MEMS振動子は、標準的なCMOSチップと同様に扱う事ができ、一般的なICパッケージ工程を用いてパッケージ化されます。MEMS First製造工程、ISO/TS 16949認定の半導体サプライチェーン、一般的なパッケージ工程を使用することで、MEMS発振器はより高い品質と信頼性、そして実質的に無制限の製造キャパシティーを備えています。

一方、水晶振動子メーカーは専門的なサプライチェーンを採用しています。水晶の結晶はシリコンとは異なり、人工水晶を作るためだけの高圧炉で製造し、微細な欠陥のある部分はカットしなければならず、理想的な工程とは言えません。水晶振動子の故障率は50 ppm ~ 150 ppmとICの故障率とは桁違いに高いものとなっています。また水晶部品は特殊なパッケージ工程や材料（金属やエポキシなど）を使用するため、信頼性の懸念材料が追加されます。

## 自動車製造のためのMEMSパッケージ機能

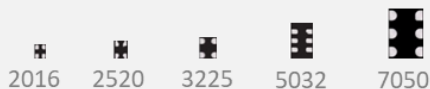


MEMS発振器はダイを積み重ねる方法で組み立てられます。MEMS振動子は、振動子の駆動と較正を行う発振器ICに搭載されています。ダイはプラスチック射出成形を用いて、MSL-1規格のパッケージに納められます。MEMS発振器は、最小2.0 x 1.6 mmのQFNパッケージにて提供されます。MEMSのQFNパッケージは水晶程知られていませんが、一般的な水晶発振器のPCBパッドレイアウトに適合できるように作られており、水晶デバイスから簡単に置き換えできる仕様となっています。

低コストで基板レベルの信頼性を高めるために、SiTimeはSOT23-5パッケージを提供しています。このパッケージはリード付き、非常に高い信頼性のはんだ接合で、必要に応じて用意に追加作業が可能な構造になっており、特に電子制御ユニット(ECU)やパワートレインアプリケーションにおいての扱いやすさも証明されています。さらにSOT23-5パッケージはX線検査

や電子検査に比べ低コストな光化学の手法を用いた、はんだ接合部の検査を行うAVI(自動目視検査)を用いることができます。

### 置き換え可能なQFN 発振器パッケージ



### はんだ付けの信頼性を 高めるリード線付 パッケージ



### MEMS発振器パッケージ

## 不要なノイズを低減したMEMS 発振器



現在コネクテッドカーは、高性能なインフォテインメントシステムやワイヤレスシステムが増えているため、設計者はこれらのシステム同士が敏感に反応し合う周波数に存在する電磁波に十分な注意を払う必要があります。大量のデータを高速で転送するAIサーバー、ECUやADASカメラモジュールでは、電磁干渉（EMI）が問題になることがあります。

ノイズの最大の原因はクロックで電磁干渉は最終段階になるまで検知されない事が多々あります。そのため最終段階での設計修正が発生し、予定外の遅延やコスト増につながる恐れがあります。



図 4: カメラモジュールなどに最適な電磁干渉低減機能を備えたMEMS発振器

この問題を解決するべく、SiTimeは初めてAEC-Q100準拠のスペクトラム拡散発振器(SSXO)であるSiT9025を発売しました。このデバイスは0.25%の分解能で4%までの広いスペクトラム範囲を持ち、2016の極小パッケージで提供されます。SiT9025はスペクトラム拡散クロックと、立ち上がり/立ち下り時間を調整してスルーレートを下げることができるFlexEdge™ プログラム可能なドライブ能力という2つの技術で電磁干渉を低減します。これらの技術を用いることで、SiT9025はノイズを最大30dB低減することが可能です。

SiT9025 SSXO、[SiT8924/25](#) および[SiT2024/25](#) 発振器はプログラム可能なFlexEdge™ を備えており、SiTimeのTime Machine II プログラマー [5]でサポートされています。設計者は自身のラボでこのツールを使い、電磁干渉低減発振器をプログラミングし、ノイズ低減とシステム性能の最適なバランスを実現するため、様々な状況で技術を試すことが可能です。SiTimeQFNデバイスは水晶発振器と簡単に交換する事が可能なため、基盤の変更や、高価な部品やシールドを使用することなく、コンプライアンステストに合格することができます。

## 頑丈なシリコンMEMS

自動車は機械的な衝撃や振動が頻繁に起こり、水晶発振器の性能を低下させ、故障の原因となります。このような過酷な状況の中で動作しながらも発振器はその役割を果たさなければいけません。発振器に信頼性がなければ、致命的な故障に繋がってしまいます。水晶発振器は一端のみが固定されている構造であるため、機械的な力に脆弱で、周波数のスパイク、位相ノイズやジッタの増加さらには、振動子の破損を引き起こす可能性があります。

一方、MEMS発振器は、質量が水晶振動子の1/1000~3000であるため、振動を受けにくい構造になっており、振動により誘発される加速度によって引き起こされる共振器にかかる力も減少させます。SiTimeのMEMS共振器はバルクモード振動で水平面内振動するため、本質的に耐振動性のある形状となっており、これにより、MEMS共振器は加速度による周波数の変化をppb/gで示した感度評価が低くなり、SiTimeの自動車用発振器は、0.1ppb/gの性能を2016サイズの極小プラスチックパッケージで実現しています。水晶デバイスでは低g感度性能を実現するには、大型の特殊なパッケージを用いる必要があります。

さらに、MEMS発振器は、電源や基板上の他のデバイスの電源がオン/オフされる際に増幅される電源ノイズにも耐久性を発揮します。電源ノイズが増加すると、出力クロックのジッタが増大し、システムのタイミングマージンに悪影響を及ぼす事があります。例えば、ADASシステムでは、ジッタが悪化するとセンサからエンジンへのデータ送信のスピードに影響を与えます。車両が置かれている状況が常に変化する路上では、データ送信の遅れは致命的な被害をもたらすこともあります。

SiTimeのSiT9386/87 差動発振器はRMS位相ジッタ（ランダム）が300fs typical以下で、電源ノイズ除去(PSNR)が0.02ps/mVです。これらのデバイスはカメラ、レーダ、ライダーその他のセンサから取り込まれる大量の重要データを処理する必要性のある自律走行や自動車用10G/40G/100G車載イーサネットアプリケーションにおける高性能AI処理に最適です。



図 5: 低ジッタの MEMS 発振器は衝撃、振動、電源ノイズ、熱勾配に強く、  
ADASシステムの車載イーサネットのタイミングに最適

実環境でのデバイスの性能をシュミレーションするため、SiTimeでは同じような仕様の様々な発振器を、標準化した試験方法を用いて、正弦波振動やランダム振動など様々な状況でテストしました。図6、7に示すようにSiTimeのMEMS発振器は、振動やボードノイズに対して優れた耐久性を示しています。試験方法や測定結果の詳細についてはSiTimeの技術論文「MEMSと水晶発振器

の衝撃・振動性能比較」 [6] および「シリコンMEMS発振器の耐振性と信頼性」 [2] を参照。

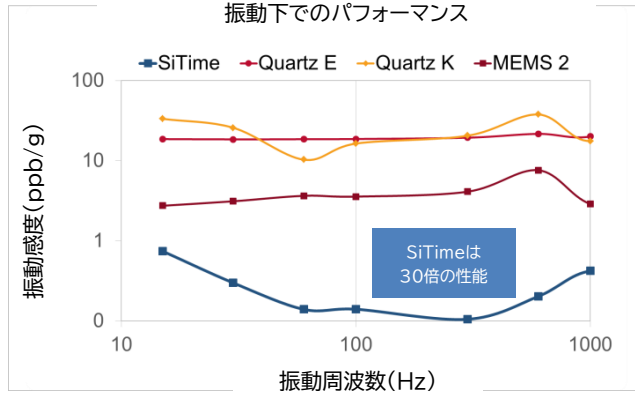


図 6: 発振器の正弦波振動に対する感度

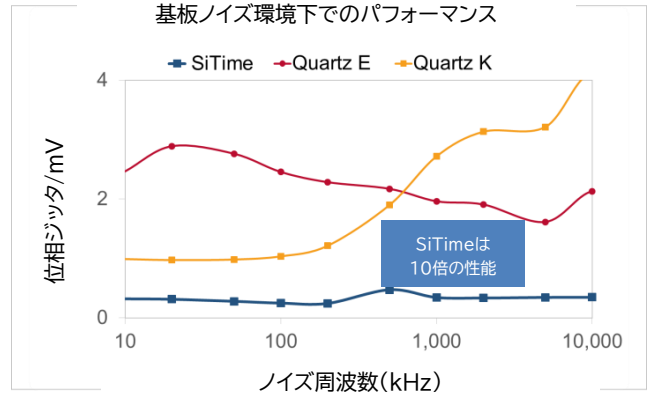


図 7: 発振器の基板ノイズに対する感度

### ダイナミックなパフォーマンスを実現するための精密構造

自動車のシステムは衝撃、振動、電源ノイズに加え、急激な温度変化や気流など他にもタイミング信号を乱す環境条件が存在します。現在の自動車にはインフォテイメントからバックアップカメラまであらゆる用途にタイミングデバイスが使用され、自動運転システムでは、さらに厳しいタイミングの仕様が求められます。例えば高精度GNSS受信機やV2X通信システムなどは環境条件に影響されない極めて正確で高い安定性のタイミングが求められるアプリケーションです。

最新世代のMEMSタイミングソリューションはElite Platform™ をベースに構築されており、幅広い動作条件下でも高い安定性を維持できるように設計されています。当該プラットフォームではDualMEMS™アーキテクチャとTurboCompensation™温度検知技術[7] を駆使し、厳しい環境下に置かれても優れた周波数安定性を実現しています。SiTimeのSiT5186/87 およびSiT5386/87 TCXOs (温度補償発振器) は、±0.1 ppmという高精度の安定性を提供し、急激な温度変化、気流、衝撃、振動、電源ノイズなど様々な環境下でもこの安定性を維持する事が可能です。

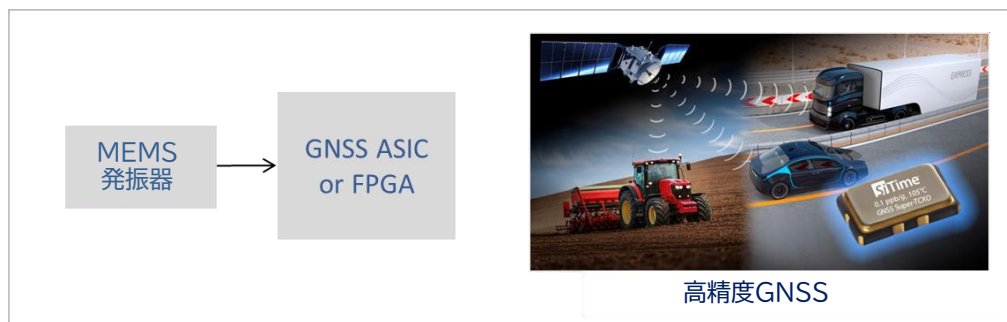


図 8: Elite Platform TCXOは、車が置かれる過酷な環境下で最高の性能を維持するように設計されており、精密さを必要とするタイミングアプリケーションに最適

## MEMS 発振器

SiTimeの車載用MEMS発振器の一覧[8]

デバイスの種類	製品	周波数	温度範囲 (°C)	安定性 (ppm)	出力形式	電磁干渉低減機能	パッケージサイズ(mm)
QFN 発振器	SiT8924 <sup>[1]</sup>	1 ~ 110					QFN <sup>[3]</sup> : 2.0 x 1.6, 2.5 x 2.0,
	SiT8925 <sup>[1]</sup>	115.2 ~ 137	-40 ~ 85, -40 ~ 105,	±20, ±25, ±30, ±50	LVC MOS	8つの出力 ドライブ強 化のオプション	3.2 x 2.5, 5.0 x 3.2 7.0 x 5.0
SOT23 発振器	SiT2024 <sup>[1]</sup>	1 ~ 110	-40 ~ 125, -55 ~ 125				
	SiT2025 <sup>[1]</sup>	115.2 ~ 137					SOT23-5: 2.9 x 2.8
差動発振器	SiT9386 <sup>[1,Error! Reference source not found.]</sup>	1 ~ 220	-20 ~ 70, -40 ~ 85,	±25, ±50	LVPECL, LVDS,	-	QFN: 3.2 x 2.5,
	SiT9387 <sup>[1,Error! Reference source not found.]</sup>	220 ~ 725	-40 ~ 95		HCSL		7.0 x 5.0
電磁干渉低減発振器	SiT9025	1 ~ 150	-40 ~ 85, -40 ~ 105, -40 ~ 125, -55 ~ 125	±20, ±25, ±50	LVC MOS	最大 ±2.0%、 最小 -4.0% 48種のサブ レッドオブ ション	QFN: 2.0 x 1.6, 2.5 x 2.0, 3.2 x 2.5
TCXO/ VCTCXO	SiT5186	1 ~ 60	-40 ~ 85,	±0.5, ±1,			
	SiT5187	60 ~ 220	-40 ~ 105	±2.5	LVC MOS, クリップド	-	セラミック
	SiT5386	1 ~ 60			サイン波		QFN:5.0 x 3.2
	SiT5387	60 ~ 220	-40 ~ 85, -40 ~ 105	±0.1, ±0.2, ±.25			

1.  $\pm 10$  ppmの安定性オプションまたは  $2.95^\circ\text{C}$  &  $105^\circ\text{C}$  の製品についてはSiTimeにお問合せください。

SiTime のタイミング製品はプログラム可能なアーキテクチャを採用しているので、超短納期が可能、設計者は動作範囲内の任意の周波数を小数点以下6桁の精度を保ちながら機能を選択することが可能です。どんな製品構成、注文量であっても3~5週間でお届けする事が可能です。サンプルは1週間以内にお届けします。また、設計者はTime Machine II™ Programmerを使用し、自身のラボ内でサンプルをプログラミングする事が可能です。

全てのSiTimeの部品に鉛不使用、RoHSおよびREACHに準拠しております。SiTimeは製品が仕様に適合し、欠陥がないことを保証する全ての発振器にライフタイム保証を提供しています。

## まとめ

車載用電子システムの普及に伴い、信頼性の高い車載用基準のタイミング部品の需要が高まっています。現在の最高品質のタイミングソリューションはMEMSタイミング技術に基づいています。MEMSタイミングは水晶よりも本質的に頑丈な構造です。シリコンMEMSタイミング部品は、IC業界で開発された厳密な管理と規格に基づいて製造されています。これらのプロセスと規格は、SiTime独自のMEMSおよびアナログIC技術と組み合わせられ、非常に高品質の製品を提供しています。またこれらのタイミングデバイスはシリコンをベースとしているため、AEC-Q200に比べてより高い認定要件であるAEC-Q100に準拠しています。

	SiTime MEMS XO/TCXO	水晶XO
車両用規格	AEC-Q100	AEC-Q200
製品補償	任意の周波数、電圧、安定性を小型パッケージで提供	小型パッケージ、及び-55°C～125°Cの厳しい安定性には限られたオプションのみ
広温度範囲の周波数安定性	±0.1 PPM (-40 ~ 105°C) ±20 PPM (-55 ~ 125°C)	±50 PPM -40 ~ 125°C
電磁干渉制御のための立ち上がり/立下り時間	0.25 ~ 40 ns	利用不可
振動感度	0.1 ppb/g	0.5 ppb/g
品質水準	<0.5 DPPM	50 ~ 150 DPPM
長期信頼性 (MTBF)	>10億時間	<5,000万時間

MEMSタイミングソリューションは、任意の周波数、広温度範囲、周波数の安定性、優れたパッケージオプション、プログラム可能な電磁干渉低減機能、高品質、高信頼性、および短納期を提供できます。最も重要なことは、SiTimeのMEMS発振器は、過酷な自動車環境に存在する振動、電磁ノイズ、急激な気流、および温度過度現象に耐えることができ、信頼性が高く仕様の動作を発揮できる能力を持っているという事です。この信頼性とSiTime製品の柔軟性は、これからの多彩な機能に溢れる自動車にとって理想的な選択肢となるはずです。



## 参考資料

[1] SiTime の信頼性算定アプリケーションノート:

<https://www.sitime.com/sites/default/files/gated/AN10025-SiTime-Reliability-Calculations.pdf>

[2] データソース: 指定起業の信頼性に関する文書。SiTimeの。SiTime の耐久性と信頼性のアプリケーションノート: [https://www.sitime.com/sites/default/files/gated/AN10045-SiTime-Resilience-Reliability-MEMS-Oscillators\\_0.pdf](https://www.sitime.com/sites/default/files/gated/AN10045-SiTime-Resilience-Reliability-MEMS-Oscillators_0.pdf)

[3] シリコンの極限強度は5,000~9,000MPa、チタンは246~620MPa。

[4] SiTime のMEMS First™ およびEpiSeal™ Processes アプリケーションノート:

<https://www.sitime.com/sites/default/files/gated/AN20001-MEMS-First-and-EpiSeal-Processes.pdf>

[5] Time Machine II™ Programmer: <https://www.sitime.com/time-machine-oscillator-programmer>

[6] SiTime の衝撃と振動の比較技術論文: <https://www.sitime.com/sites/default/files/gated/AN10032-Shock-Vibration-Comparison-MEMS-and-Quartz-Oscillators.pdf>

[7] SiTime のDualMEMS および TurboCompensation の温度検知技術論文:

<https://www.sitime.com/sites/default/files/gated/TechPaper-DualMEMS-Temp-Sensing-2018.pdf>

[8] SiTimeの自動車用ソリューション: <https://www.sitime.com/solutions/automotive>