

MEMS 発振器と水晶発振器の性能比較 (耐衝撃と耐振動について)

目次

1	はじめに	2
2	テスト条件	3
2.1	正弦波振動	4
2.2	ランダム振動	5
2.3	衝撃	7
3	実験結果	9
3.1	正弦波振動	9
3.2	ランダム振動	10
3.3	衝撃	11
4	まとめ	14
5	参考資料	14

1 はじめに

すべての電子製品は生活の中で衝撃や振動を受けます。その範囲は、ポケットやバックで持ち運ぶモバイル消費製品から産業機器や航空宇宙用途等で発生する強い振動レベルまで様々です。建築物の中にある製品さえ、近くのファンや他の機器の影響で振動が発生する可能性があります。そのため、どのような衝撃と振動の下で電子部品が使用されるかをテスト検証することが重要なのです。

様々な使用環境における加速度の代表的なレベルを表 1 に示します。

Table 1. Vibration in various field applications [1]

Environment	Acceleration Typical -g level
Buildings, quiescent	0.02 rms
Tractor-trailer (3 to 80 Hz)	0.2 peak
Armored personnel carrier	0.5 to 3 rms
Ship – calm seas	0.02 to 0.1 peak
Railroad	0.1 to 1 peak
Ship – rough seas	0.8 peak
Propeller aircraft	0.3 to 5 rms
Helicopter	0.1 to 7 rms
Jet aircraft	0.02 to 2 rms
Missile – boost phase	15 peak

衝撃や振動は部品本体やパッケージへの物理的な損傷だけでなく、PCB アセンブリの半田接合に不良を引き起こす可能性があります。そして電子部品自身の性能を低下させてしまいます。発振器は振動などの外部要因から性能の影響を受けやすいものです。例えば、振動子そのものの損傷、位相ノイズの増加、ジッタの増加、スパイクノイズの発生があります。

水晶ベースの発振器で水晶振動子はカンチレバー構造（片持ち）で支持されており、振動による損傷に非常に敏感です。SiTime の MEMS 共振器は、基本的に二つの理由より振動に強くなっています。

1 つは、水晶振動子よりもはるかに小さい質量で、振動によって誘発された加速度から振動子に印加される力も軽減されるためです。2 つ目に、SiTime の MEMS 発振器のデザインは非常に硬い構造（固体モードで面内振動する設計、本質的に耐振動性を備える形状設計、振動下での周波数シフトを最小にする発振回路設計）で出来ているためです。

2 テスト条件

外部要因によって方向、持続時間および強度が変化する可能性があるため、衝撃や振動感度等の様々な試験条件で、振動子の電氣的応答を測定することが重要です。

そこで、SiTime は、表 2 のとおり市販されている製品（SiTime を含む MEMS 発振器、および水晶発振器）を使用し、「正弦波振動」、「ランダム振動」「パルス衝撃」の 3 つの異なる振動や衝撃の中で発振器自身の応答精度を評価しました。その中には、高動作周波数で低ジッタを有することが知られている SAW 水晶振動子も含まれています。

Table 2. Oscillator devices under test; Single-ended parts (shaded blue) operate at 26 MHz and differential parts (shaded green) operate at 156.25 MHz

Label	Manufacturer	Part number	Technology	Output
SiTime	SiTime	SiT8208AC-22-33E-26.000000	MEMS	LVC MOS
Quartz 1	TXC	7Q-26.000MBG-T	TCXO	Clipped sine
Quartz 2	Kyocera	KT3225R26000ZAW28TMA	TCXO	Clipped sine
Quartz 3	NDK	NT3225SA-26.000000MHZ-G8	TCXO	Clipped sine
SiTime	SiTime	SiT9120AC-1D2-33E156.250000	MEMS	LVPECL
Quartz 4	Epson	EG-2102CA156.2500M-PHPAL3	SAW	LVPECL
Quartz 5	TXC	BB-156.250MBE-T	3rd overtone	LVPECL
Quartz 6	Conner Winfield	P123-156.25M	3rd overtone	LVPECL
Quartz 7	AVX Kyocera	KC7050T156.250P30E00	SAW	LVPECL
Quartz 8	SiLab	590AB-BDG	3rd overtone + PLL	LVPECL
MEMS 2	Discera	ASFLMPLP-156.25MHZ-LR-T	MEMS	LVPECL

2.1 正弦波振動

初めに、15 ヘルツから 2 kHz の範囲での正弦波振動で応答性を測定しました。正弦波振動の周期性で周波数変調を発生し、周波数雑音による位相変調（一般に、“スプリアス” (spurious) と呼ばれる）を誘発させます。振動に対する発振器の感度を特性評価することで、dBc の振動によって誘発される位相ノイズのスプリアスは、十億分率 (ppb) で表し、正弦波振動のピーク加速度で正規化することにより ppb/g の単位で表現できます。振動テストは、図 1、図 2 に示すようなコントローラ、パワーアンプとシェーカーで構成され、ピーク加速度は、各正弦波振動の周波数（15、30、60、100、300、600、1000 および 2000 Hz）それぞれで 4-g になります。

また、振動周波数それぞれのスイープ時間は約 15~20 分です。各周波数ポイントでの滞留時間は約 1 分です。発振器の応答は異方性で、すなわち振動の方向に依存します。従って、試験は、図 1 に示すパッケージと向きでデバイスの 1 ピンマークを基準として、x、y、z 方向で振動を繰り返します。そして、各発振器のワーストケースの方向のデータをプロットします。

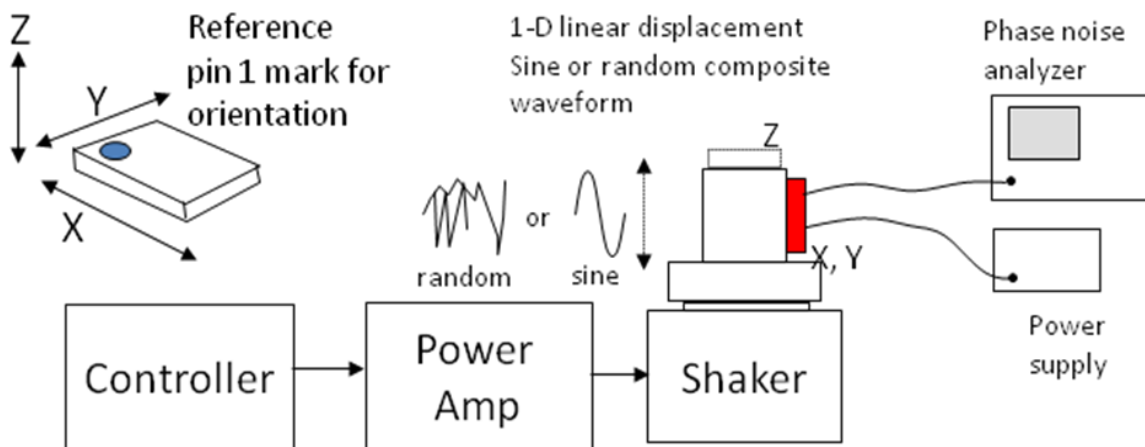


Figure 1. Sinusoidal and random vibration test setup

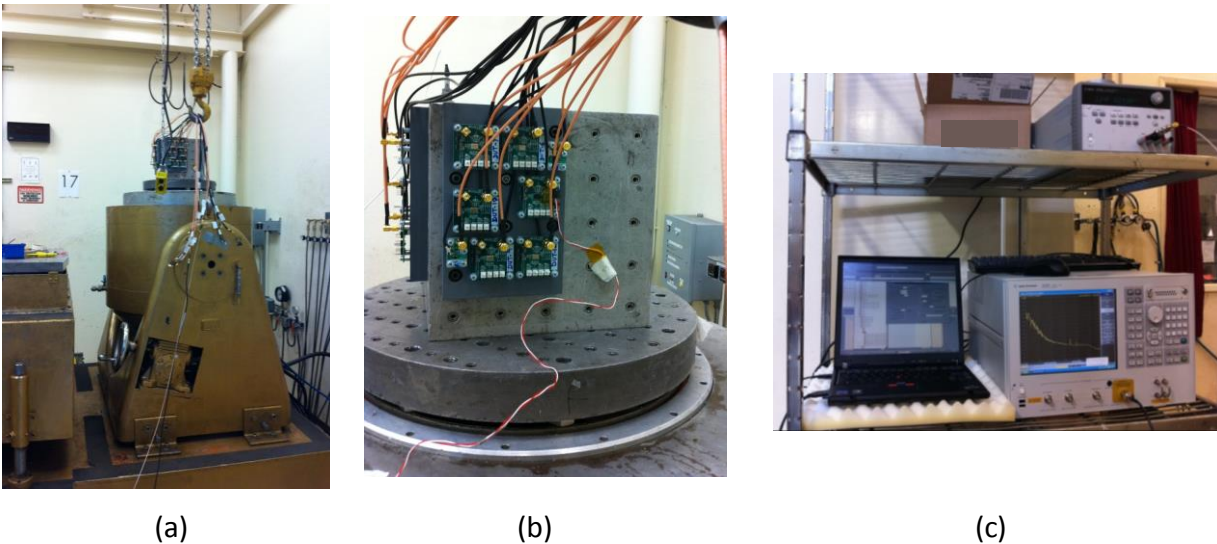


Figure 2. Photos of vibration testing equipment:
(a) shaker, (b) device mounting block, (c) phase noise analyzer

2.2 ランダム振動

発振器は、使用中にランダムな振動を受ける可能性があります。それは数 Hz から数 kHz までの範囲です。これらの振動は、広帯域位相ノイズを増大させます。いくつかの規格で、試験された電子機器の種類や予想される動作環境に応じて、ランダムな振動変化によるテスト条件が規定されています^[1]。そこで私たちは、電子部品に最も適している MILSTD-883H (メソッド 2026) ^[2]に従って試験を実施しました。この規格は、振動プロファイルを指定し、様々な強度レベル (図 3 参照) が指定可能です。その中でも条件 B は、7.5-Grms の実効値の複合パワーレベルで、高い振動ストレスを受けやすいモバイル環境に適しています。

図 1 の試験システムのコントローラは、振動プロファイルに定義された電力密度レベルに基づき、指定された周波数範囲内のランダム振動を合成するためにデジタル信号処理を使用します。

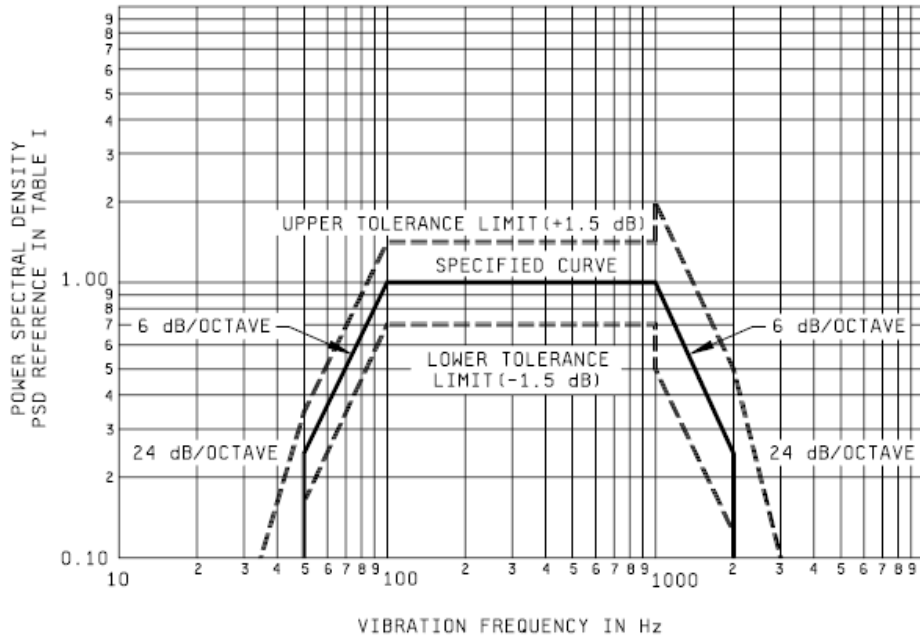


FIGURE 2026-1. Test condition I, random vibration test-curve envelope (see table I).

TABLE I. Values for test condition I. 1/

Characteristics		
Test condition letter	Power spectral density	Overall rms G
A	.02	5.2
B	.04	7.3
C	.06	9.0
D	.1	11.6
E	.2	16.4
F	.3	20.0
G	.4	23.1
H	.6	28.4
J	1.0	36.6
K	1.5	44.8

1/ For duration of test, see 4.

Figure 3. MIL-STD-883H specifications for random vibration testing [2]

ランダム振動は、振動周波数に対応するオフセット周波数において位相ノイズの増加を引き起こします。私たちは、この位相ジッタの増加を算出するために、発振器毎の 15Hz から 10 kHz の周波数帯の位相ノイズをランダム振動の有り無しの 2 つの条件で測定し、2 つの値の間の二乗平均平方根の差を算出しました。

2.3 衝撃

第 3 の試験では、衝撃の影響に応じて動作中の過渡的な周波数偏差を MIL-STD-883H (メソッド 2002) [2] の仕様に従い、測定しました。我々は、500-g の加速度をもつ半波で 1ms の正弦波衝撃パルスを 1ms 半加えた際の、過渡的な周波数応答を測定しました。MIL-STD-883H[2]の標準は、非動作モードでの機械的衝撃の下で水晶発振器の存続テストとして広く採用されています。SiTime の MEMS 発振器は 10,000-g から 50,000-g の機械的衝撃の認定試験をクリアしていますが、市販の水晶発振器のほとんどは 100-g から 1500-g にすぎません。

衝撃試験の環境を図 4、図 5 に示します。それは、振動試験のためのアプローチに似ています。我々は、発振器に対して x、y、z 方向に衝撃を与え、ワーストケースでの測定をしました。10 秒間 100 μ 秒毎に連続して周波数を測定し、衝撃前、衝撃中、衝撃後それぞれにおいて周波数応答に関するデータを取得しました。

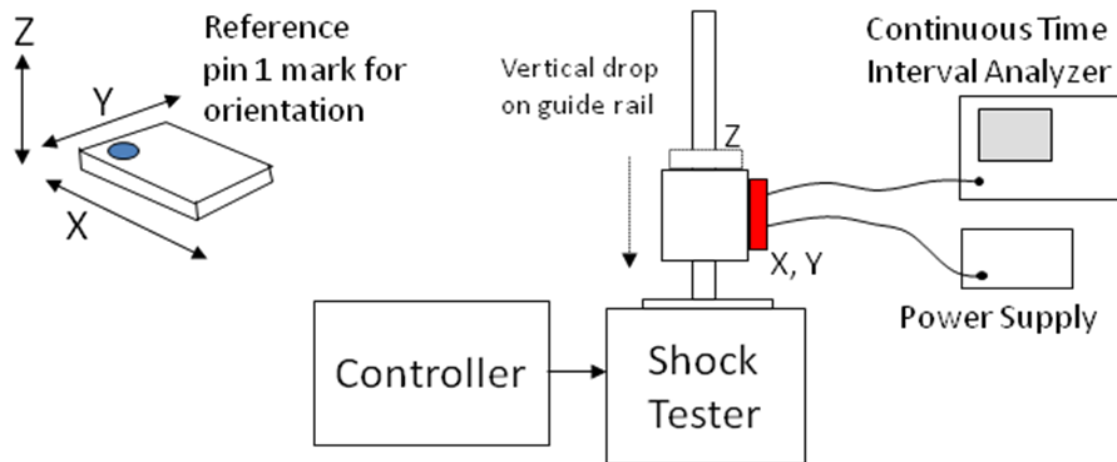


Figure 4. Mechanical shock test setup



(a)



(b)

Figure 5. Photos of shock testing equipment: (a) shock tester and (b) mounting block

3 実験結果

3.1 正弦波振動

水晶発振器、SAW フィルタ、および MEMS ベースの差動発振器の正弦波振動に対する振動感度の評価結果を図 6 に示します。他の部品に比べ、SiTime の MEMS 発振器は 10 から 100 倍優れていることが分かります。MEMS 2 は他の MEMS ベース発振器で、発振子の設計が異なり面外発振モードで動作するものですが、水晶発振器や SAW 素子と同等の振動耐性です。

また、図 7 のデータが示すように、シングルエンドの発振器は、正弦波振動に対する感度は低いことが分かりますが、水晶発振器と MEMS の性能差はそれほど劇的ではありません。しかしながら、SiTime のデバイスは水晶ベースの発振器より精度が良いことが分かります。

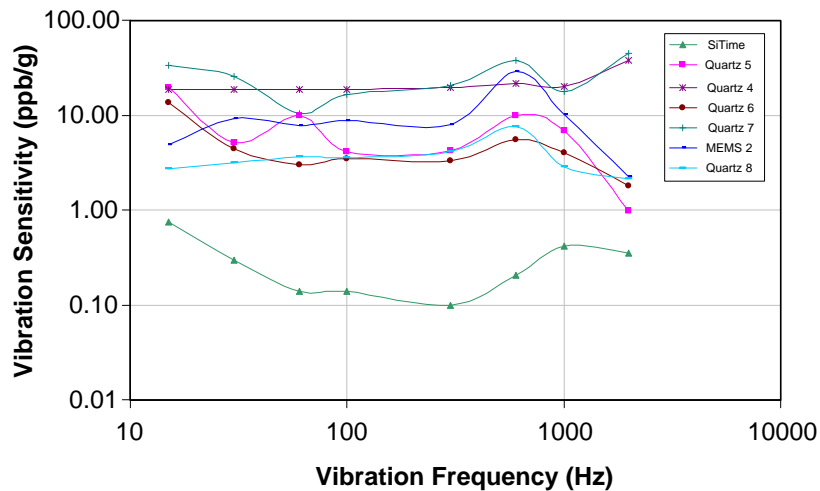


Figure 6. Differential oscillator sensitivity to sinusoidal vibration

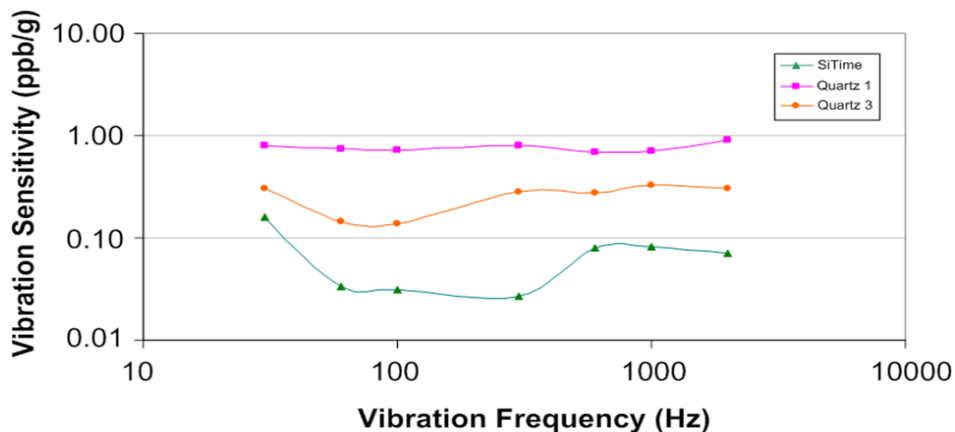


Figure 7. Single-ended oscillator sensitivity to sinusoidal vibration

3.2 ランダム振動

図 8 の青色（無振動）及び赤（振動あり）の曲線との間の差から、ランダム振動が、キャリア周波数から低いオフセットでの位相ノイズを誘導しているのが分かります。SAW デバイスに比べ、SiTime の MEMS 発振器は振動なしの条件にて“close-in”位相ノイズ量が多いですが、ランダム振動を加えても位相ノイズがあまり増加していません。対照的に、SAW デバイスは、ランダム振動を加えることで位相ノイズが劇的に増加しています。この結果は、位相ノイズに敏感なシステムに有害となります。そして、実環境で使用した結果とデータシートの仕様が異なる可能性を示唆しています。

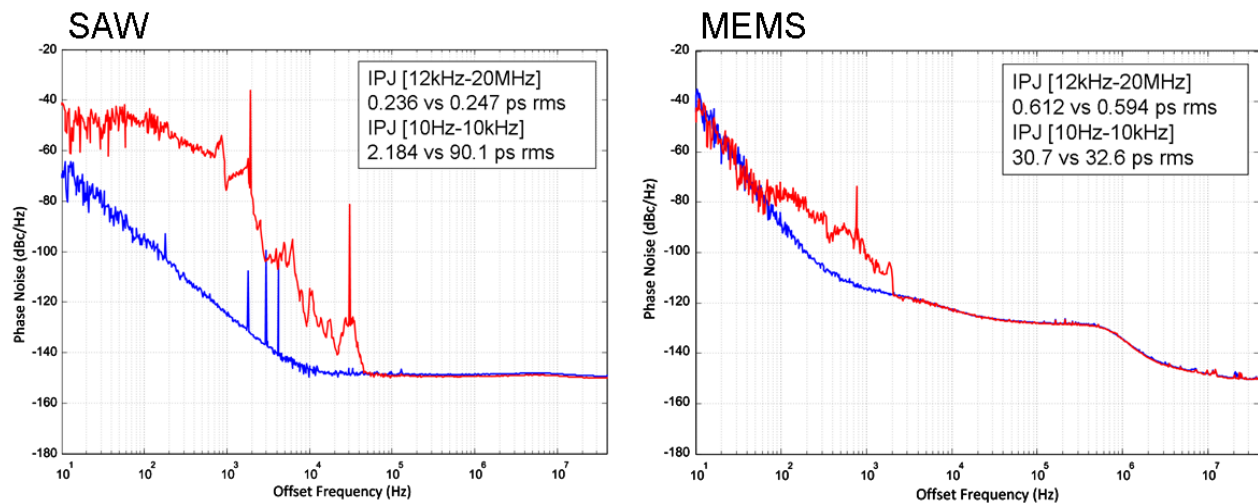


Figure 8. Phase noise under random vibration for SAW and SiTime MEMS oscillators

次に、8つの差動発振器についてジッタ誘発量の算出結果を図9に示します。

実験環境で試験した場合、発振器の多くは低位相ノイズを発生しますが、ランダム振動によって誘導される追加のジッタが目すべき成分です。ほとんどの発振器はジッタ成分で約20psから100ps以上の著しい増加を示します。しかし、SiTimeのMEMS発振器はランダム振動に対して耐性があり、他と比較して位相ノイズが少ないことが分かります。

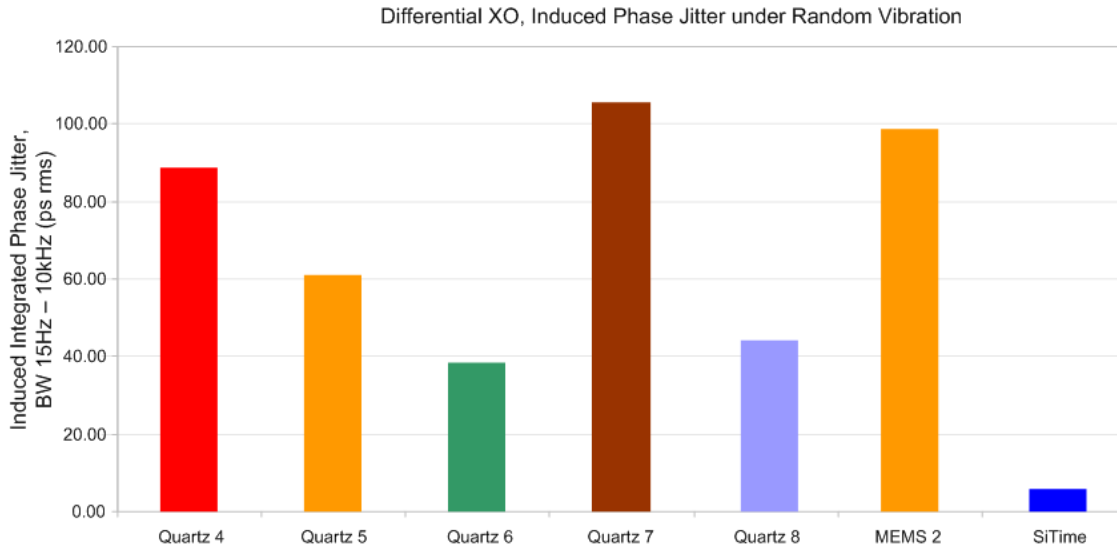


Figure 9. Induced phase jitter in differential oscillators

3.3 衝撃

差動発振器のテスト結果を図10に示します。これは、衝撃テストに対して最大過渡周波数偏差を比較した結果です。SAWデバイス（水晶発振器4と水晶発振器7）は、特に衝撃に敏感で10ppm以上の過渡周波数スパイクを示しています。また、他の水晶デバイスについても、2~7ppmの過渡周波数偏差を示しています。唯一の例外として、SiTimeの発振器だけが1ppm未満という結果でした。

シングルエンドのLVCMOS発振器の耐衝撃に対する結果を図11に示します。この図からSiTimeのMEMS発振器の耐衝撃性が確認できると思います。試験した全ての8個の差動発振器について、実験で記録されたタイムチャート毎の周波数安定性を図12に示します。この結果から、SiTimeの発振器は、x方向、yまたはz方向のどの方向から加わる衝撃パルスにおいても耐衝撃性に効果があるということが分かります。

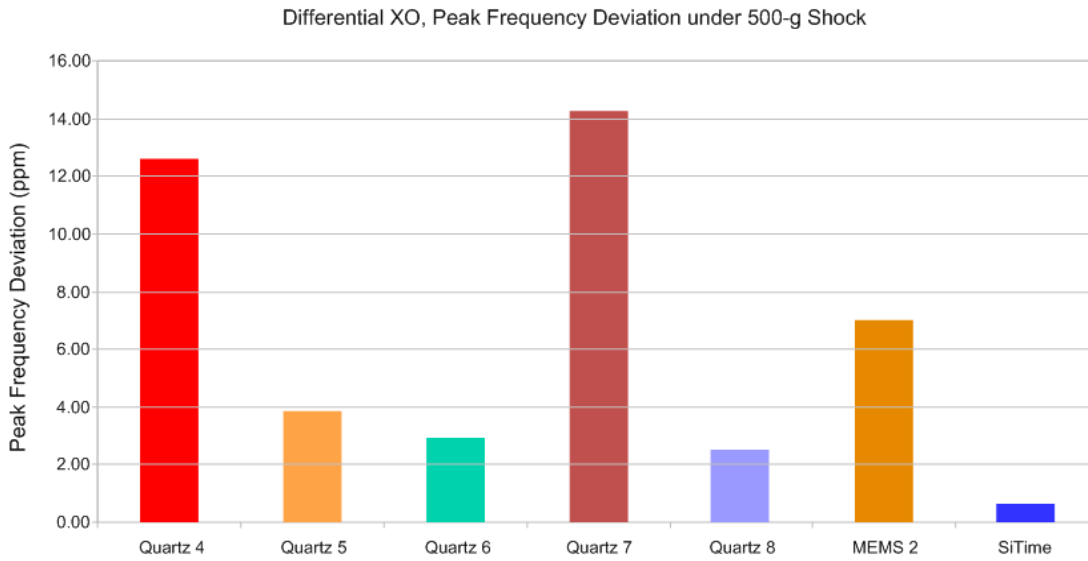


Figure 10. Shock test results for differential oscillators

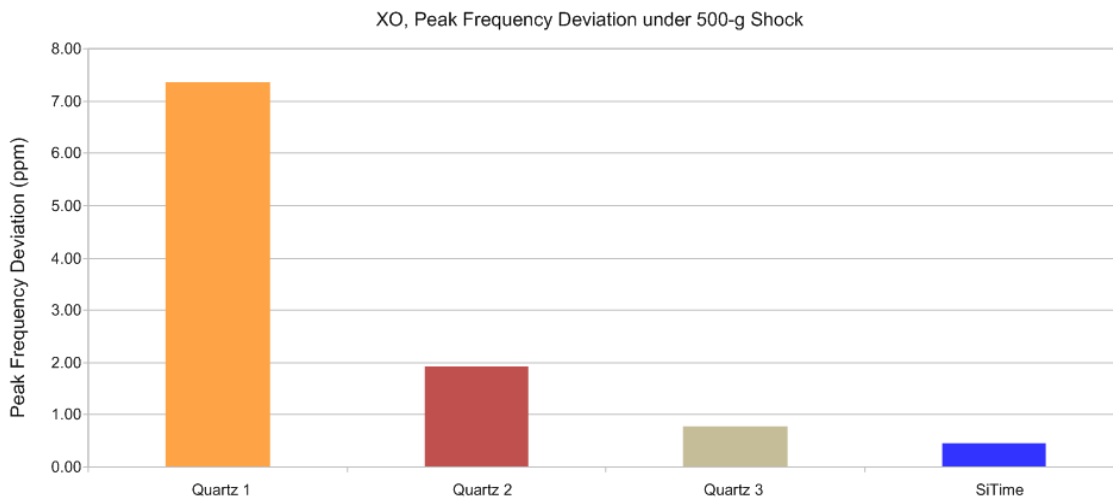


Figure 11. Shock test results for single-ended oscillators

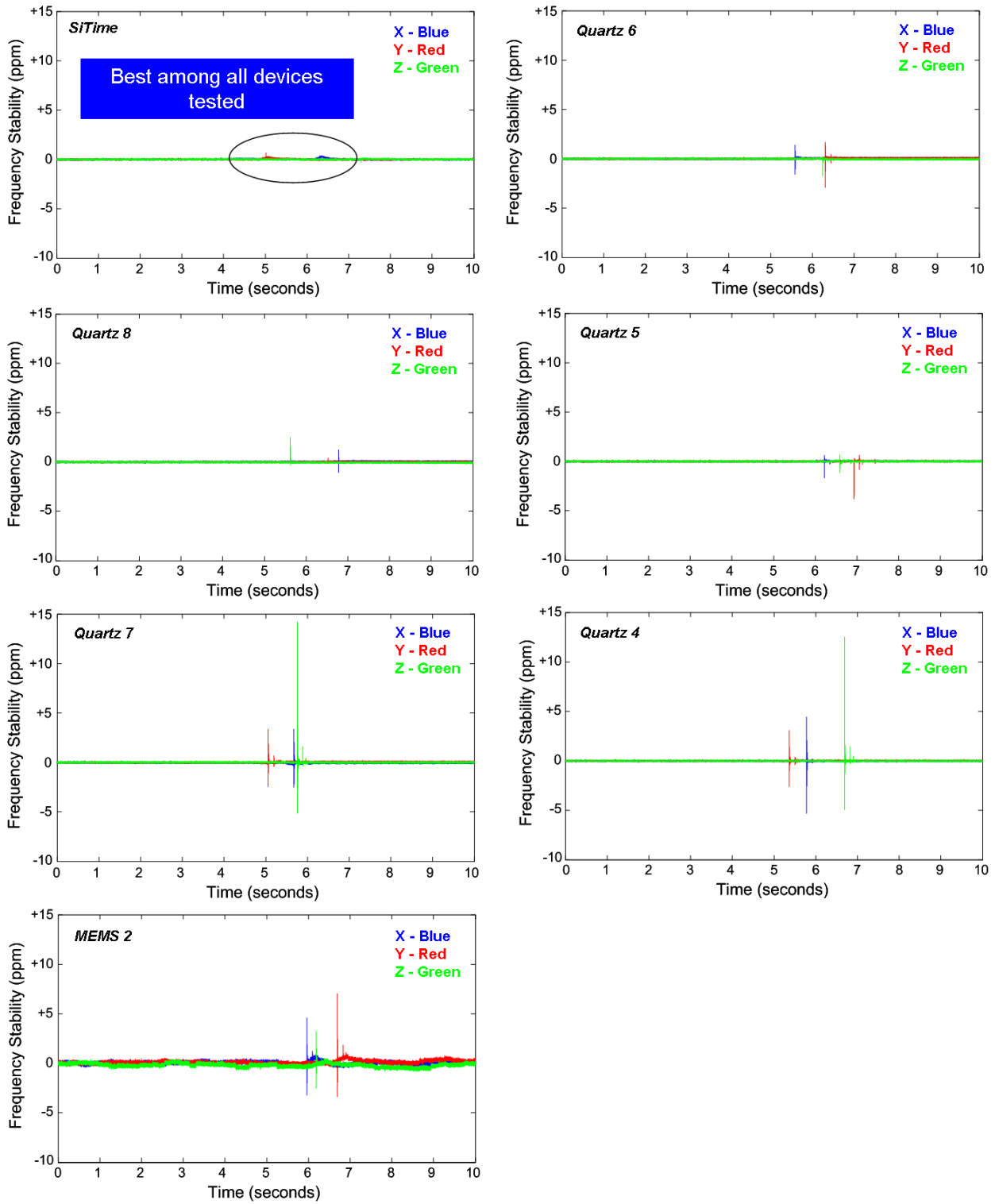


Figure 12. Frequency stability during shock testing of differential oscillators

4 まとめ

実験室の環境で良好に機能する電子部品は、衝撃や振動が存在する実使用環境で同じ性能を発揮できない場合があります。衝撃や振動試験での位相ノイズとジッタ測定に関する実験データから分かるように、実験の中で SiTime の MEMS 発振器だけが衝撃と振動に対して十分な耐久性を示しており、SiTime の MEMS 発振器は衝撃および振動に非常に高い品質と環境信頼性の評価を達成しています。MEMS デバイスの技術的な進化に加え、SiTime の MEMS 振動子の独自の設計と高精度発振器のためのアナログ回路が、衝撃や振動に対しての耐性を実現しているのです。

5 参考資料

- [1] J. R. Vig, "Chapter 4: Oscillator Stability" in *Quartz Crystal Resonators and Oscillators For Frequency Control and Timing Applications - A Tutorial*, Tech. Rep. SLCET-TR-88-1 Rev. 8.5.2.2, AD-M001251, March 2004.
- [2] *Department of Defense Test Method Standard: Microcircuits*, MIL-STD-883H, U.S. Defense Logistics Agency, 2010.
- [3] *Environmental Conditions and Test Procedures for Airborne Equipment*, DO-160G, RCTA, Inc. 2010.
- [4] *NEBS Requirements: Physical Protection*, GR-63. Telcordia, 2012.
- [5] *Payload Vibroacoustic Test Criteria*, NASA-STD-7001, Rev. A, NASA, 2011.

SiTime Corporation
990 Almanor Avenue
Sunnyvale, CA 94085 USA
Phone: 408-328-4400
<http://www.sitime.com>

© SiTime Corporation, 2008-2014. The information contained herein is subject to change at any time without notice. SiTime assumes no responsibility or liability for any loss, damage or defect of a Product which is caused in whole or in part by (i) use of any circuitry other than circuitry embodied in a SiTime product, (ii) misuse or abuse including static discharge, neglect or accident, (iii) unauthorized modification or repairs which have been soldered or altered during assembly and are not capable of being tested by SiTime under its normal test conditions, or (iv) improper installation, storage, handling, warehousing or transportation, or (v) being subjected to unusual physical, thermal, or electrical stress.

Disclaimer: SiTime makes no warranty of any kind, express or implied, with regard to this material, and specifically disclaims any and all express or implied warranties, either in fact or by operation of law, statutory or otherwise, including the implied warranties of merchantability and fitness for use or a particular purpose, and any implied warranty arising from course of dealing or usage of trade, as well as any common-law duties relating to accuracy or lack of negligence, with respect to this material, any SiTime product and any product documentation. Products sold by SiTime are not suitable or intended to be used in a life support application or component, to operate nuclear facilities, or in other mission critical applications where human life may be involved or at stake.