

## STM8AF/AL/S および STM32 マイクロコントローラ向け オシレータ設計ガイド

### はじめに

Pierce-Gate トポロジに基づくオシレータ（以下「ピアース・オシレータ」）については、多くの設計者が知っていますが、そのすべてがその動作のしくみを本当に理解しているわけではなく、その設計に習熟している設計者はごくわずかです。実際のところ、設計者の多くは、オシレータが正常に機能しないことに気付くまでは（通常はこの時点でオシレータが組み込まれている製品はすでに生産中です）、注意を払うことさえありません。クリスタルが意図したとおりに機能しない場合、プロジェクトは、完全に失敗とまではいかなくても、遅延が発生します。

オシレータには、設計フェーズ中に、すなわち製造フェーズに移行するよりずっと前に、十分に注意を払う必要があります。設計者は、現場から製品が返品されるという最悪のシナリオは避けなければなりません。

このアプリケーション・ノートでは、ピアース・オシレータの基本について説明し、適切なオシレータ設計のためのガイドラインを提示します。また、さまざまな外部部品の決定方法について説明し、適切な PCB 設計のためのガイドラインを提示します。

本書の最後には、適切なクリスタルと外部部品を選択する簡単なガイドラインを提示し、アプリケーション開発を速やかに進められるように STM32 32 ビット ARM<sup>®</sup> Cortex<sup>®</sup> MCU および STM8AF/AL/S マイクロコントローラ向けの推奨クリスタル（HSE と LSE）をいくつかリストしています。対象とする製品のリストについては、表 1 を参照してください。

**表 1. 対象とする製品**

タイプ	製品カテゴリ
マイクロコントローラ	STM8S シリーズ
	STM8AF シリーズ、STM8AL シリーズ
	STM32 32 ビット ARM Cortex MCU

## 目次

<b>1</b>	<b>クォーツ・クリスタルの特性とモデル</b>	<b>6</b>
<b>2</b>	<b>オシレータの理論</b>	<b>8</b>
2.1	負性抵抗	8
2.2	相互コンダクタンス	9
2.3	負性抵抗オシレータの原理	9
<b>3</b>	<b>ピアース・オシレータ設計</b>	<b>11</b>
3.1	ピアース・オシレータの概要	11
3.2	RF フィードバック抵抗	12
3.3	$C_L$ 負荷容量	12
3.4	オシレータの相互コンダクタンス	13
3.5	励振レベル (DL) と外部抵抗 (RExt) の計算	14
3.5.1	励振レベル (DL) の計算	14
3.5.2	励振レベルの別の測定手法	15
3.5.3	外部抵抗 (RExt) の計算	16
3.6	起動時間	16
3.7	クリスタルの可変幅	17
3.8	安全係数	18
3.8.1	定義	18
3.8.2	測定方法	18
3.8.3	STM32 および STM8 オシレータの安全係数	19
<b>4</b>	<b>適切なクリスタルと外部部品を選択するためのガイドライン</b>	<b>20</b>
4.1	STM32 マイクロコントローラに組み込まれるロースピード・オシレータ	20
4.2	STM32 適合クリスタルを選択する詳細なステップ	23
<b>5</b>	<b>STM32 マイクロコントローラの推奨発振子</b>	<b>26</b>
5.1	STM32 に適合するハイスピード発振子	26
5.2	STM32 に適合するロースピード発振子	26

<b>6</b>	<b>STM8AF/AL/S マイクロコントローラの推奨発振子 .....</b>	<b>30</b>
6.1	推奨クリスタル・オシレータの部品番号 .....	30
6.2	推奨セラミック発振子の部品番号 .....	30
<b>7</b>	<b>オシレータの安定性を高めるためのヒント .....</b>	<b>31</b>
7.1	PCB 設計ガイドライン .....	31
7.2	PCB 設計例 .....	32
7.3	はんだ付けのガイドライン .....	36
<b>8</b>	<b>参照文献 .....</b>	<b>37</b>
<b>9</b>	<b>よくある質問 .....</b>	<b>38</b>
<b>10</b>	<b>結論 .....</b>	<b>39</b>
<b>11</b>	<b>改版履歴 .....</b>	<b>40</b>

## 表の一覧

表 1.	対象とする製品 .....	1
表 2.	等価回路のパラメータの例 .....	7
表 3.	周波数ごとのフィードバック抵抗標準値 .....	12
表 4.	STM32 および STM8 オシレータの安全係数 (Sf) .....	19
表 5.	STM32 マイクロコントローラに組み込まれている LSE オシレータ .....	22
表 6.	STM32 マイクロコントローラに組み込まれている HSE オシレータ .....	26
表 7.	STM32 マイクロコントローラに組み込まれている LSE オシレータの推奨水晶発振子 .....	27
表 8.	京セラ適合クリスタル（網羅的なリストではありません） .....	30
表 9.	日本電波工業適合クリスタル（網羅的なリストではありません） .....	30
表 10.	推奨条件（コンシューマ向け） .....	30
表 11.	推奨条件（CAN-BUS 向け） .....	30
表 12.	文書改版履歴 .....	40
表 13.	日本語版文書改版履歴 .....	41

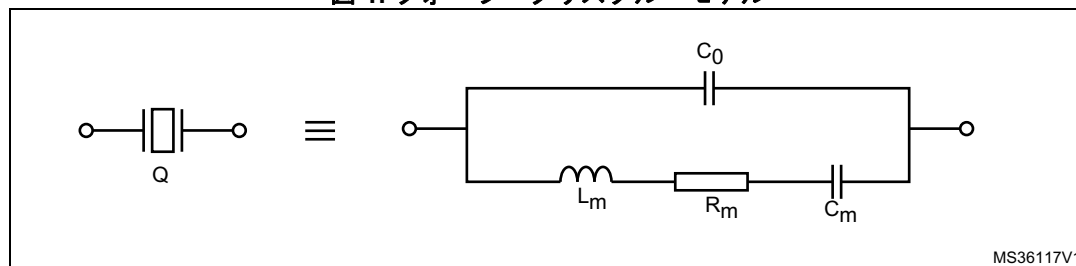
## 図の一覧

図 1.	クォーツ・クリスタル・モデル	6
図 2.	周波数ドメインのインピーダンス表記	6
図 3.	負のトランス抵抗領域（紫）を示す双極子の I-V 曲線	9
図 4.	水晶発振子ベースの標準的な発振ループのブロック図	10
図 5.	ピアース・オシレータ回路	11
図 6.	インバータ伝達関数	12
図 7.	電流プローブによる電流駆動測定	15
図 8.	負性抵抗の測定方法の説明	18
図 9.	ロースピード水晶発振子の分類	20
図 10.	オシレータ回路の推奨レイアウト	32
図 11.	GND プレーンを分離して、オシレータの周囲にガード・リングを配置した PCB	32
図 12.	GND プレーン	33
図 13.	オシレータ周辺の信号	33
図 14.	初期設計（PCB 設計ガイドラインを順守していない）	33
図 15.	最終設計（設計ガイドラインを順守している）	34
図 16.	GND プレーン	34
図 17.	最上位層ビュー	34
図 18.	PCB のガイドラインを順守していない	35
図 19.	PCB のガイドラインを順守	36

## 1 クォーツ・クリスタルの特性とモデル

クォーツ・クリスタルは、電気エネルギーを機械エネルギーに、またはその逆方向に変換する圧電素子です。この変換は、共振周波数で発生します。クォーツ・クリスタルは、[図 1](#) のようにモデル化できます。

図 1. クォーツ・クリスタル・モデル



- $C_0$  : 電極によって形成されるコンデンサによる並列容量を表します。
- $L_m$  : (直列インダクタンス) 振動しているクリスタルの質量を表します。
- $C_m$  : (直列容量) クリスタルの弾性を表します。
- $R_m$  : (直列抵抗) 回路損失を表します。

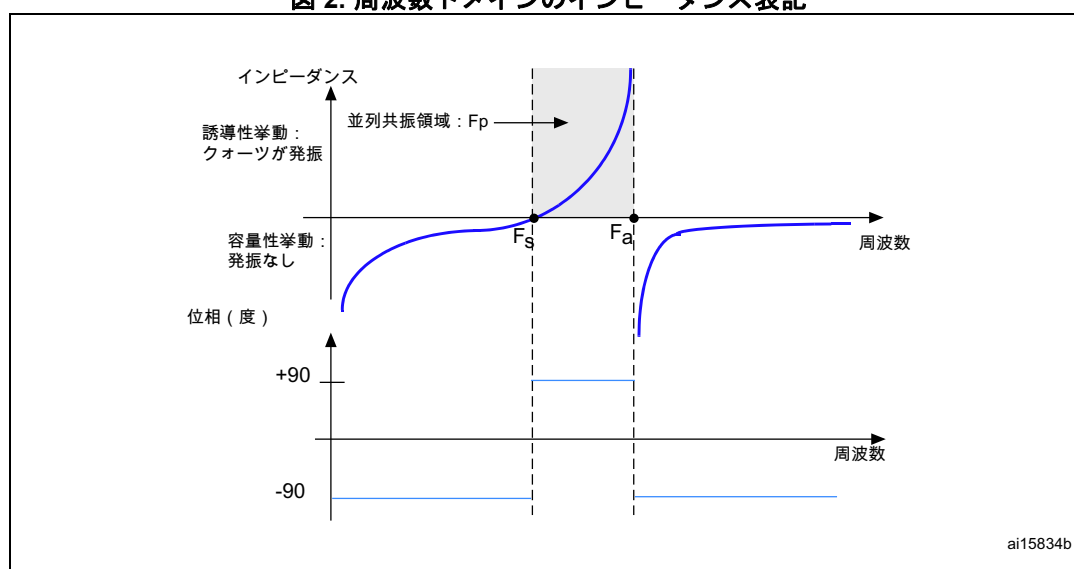
クリスタルのインピーダンスは、次の式で与えられます ( $R_m$ は無視できるものとしします)。

(1)

$$Z = \frac{j}{\omega} \times \frac{\omega^2 \times L_m \times C_m - 1}{(C_0 + C_m) - \omega^2 \times L_m \times C_m \times C_0}$$

[図 2](#) は、周波数ドメインのインピーダンスを表します。

図 2. 周波数ドメインのインピーダンス表記



$F_s$  はインピーダンス  $Z$  が 0 の場合の直列共振周波数です。その式は、式 (1) から次のように導くことができます。

(2)

$$F_s = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_m C_m}}$$

$F_a$  はインピーダンス  $Z$  が無限大の場合の反共振周波数です。これは、式 (1) を使用して次のように表されます。

(3)

$$F_a = F_s \sqrt{1 + \frac{C_m}{C_0}}$$

$F_s$  と  $F_a$  で区切られる領域は、通常は並列共振領域と呼ばれます (図 2 の影付きの領域)。この領域では、クリスタルは並列共振で動作し、ループに 180 度の位相を追加するインダクタンスとして機能します。その周波数  $F_p$  (または  $F_L$ : 負荷周波数) は次の式で表されます。

(4)

$$F_p = F_s \left( 1 + \frac{C_m}{2(C_0 + C_L)} \right)$$

式 (4) より、クリスタルの発振周波数は、負荷容量  $C_L$  を変更することによって調整できるように思われます。クリスタル・メーカーが、公称周波数でクリスタルを発振させるために必要な正確な  $C_L$  をデータシートに記載するのはこのためです。

表 2 に、公称周波数 8 MHz を得るための等価クリスタル回路部品の値の例を示します。

表 2. 等価回路のパラメータの例

等価部品	値
$R_m$	8 $\Omega$
$L_m$	14.7 mH
$C_m$	0.027 pF
$C_0$	5.57 pF

式 (2)、(3)、および (4) を使用して、このクリスタルの  $F_s$ 、 $F_a$ 、および  $F_p$  を決定できます。

- $F_s = 7988768$  Hz
- $F_a = 8008102$  Hz

負荷容量  $C_L$  が 10 pF の場合、クリスタルは  $F_p = 7995695$  Hz で発振します。

発振周波数を正確に 8 MHz にするには、 $C_L$  を 4.02 pF にする必要があります。

## 2 オシレータの理論

オシレータは、今日のデジタル IC の基幹部品の 1 つです。これらは、トポロジと動作原理に応じて、さまざまなサブファミリに分類できます。各オシレータ・サブファミリにはオシレータ動作のスタディに使用可能な数学モデルが対応しており、理論的にその性能を決定できます。

このセクションでは帰還型オシレータ (harmonic oscillators) のみを扱い (弛張型オシレータ (relaxation oscillators) はこのアプリケーション・ノートの対象外)、特にビアース・オシレータ・トポロジについて詳しく説明します (詳細は[セクション 3: ビアース・オシレータ設計](#)を参照)。このように範囲を制限しているのは、本書で説明する、外部の受動部品 (外部発振子、負荷コンデンサなど) を必要とするすべてのオシレータが、前述したタイプおよびトポロジのものであるためです。

帰還型オシレータ・ファミリは、次の 2 つの主要サブファミリに分類できます。

- 負性抵抗オシレータ
- 正帰還オシレータ

これらの 2 つのオシレータ・サブファミリは、出力波形に関しては似ています。どちらも目的の周波数で発振波形を出力します。この波形は、通常は目的の周波数の基本正弦波と、発振ループのいくつかの部品の非線形性による高調波 (基本周波数の倍数の周波数) の和から構成されます。

これらの 2 つのサブファミリは、動作原理に違いがあります。この違いによって、各サブファミリを記述および解析するための数学モデルも異なります。

正帰還オシレータは、通常は Barkhausen モデルを使用してモデル化されます。このモデルでは、目的の周波数で安定した発振を維持するために、オシレータが Barkhausen 基準を満たす必要があります。

負性抵抗オシレータは、Barkhausen モデルでも記述できますが、適切な手法ではありません。負性抵抗オシレータを解析するには、E. Vittoz 氏の論文 ([\[1\]](#)) で説明されている負性抵抗モデルを使用する手法が最も適切です。

STM32 のロースピード外部 (LSE) オシレータとハイスピード外部 (HSE) オシレータは、どちらも負性抵抗原理に従って設計されているので、このセクションではこのモデルを中心に説明します。

### 2.1 負性抵抗

理論的に言うと、負性抵抗は、熱を吸収する双極子であり、エネルギーを、印加電圧に比例する大きさに印加電圧と逆方向に流れる電流に変換します (電気抵抗の正反対のメカニズム)。現実の世界には、そのような双極子は存在しません。

「負性抵抗」という用語は、実際には「負のトランス抵抗」の誤った名称です。負のトランス抵抗は、与えられた電圧変動 ( $\Delta V$ ) と誘導される電流変動 ( $\Delta I$ ) の比で定義されます。常に正である抵抗と違って、トランス抵抗 (微分抵抗とも呼ばれます) は正負どちらの値にもなります。[図 3](#) に、負のトランス抵抗領域を示す、双極子の電流対電圧曲線を示します。V/I の比が常に正なのは明らかですが、これは  $\Delta V/\Delta I$  の比には当てはまりません。

I-V 曲線の紫で表されている部分は、負のトランス抵抗を示しています。

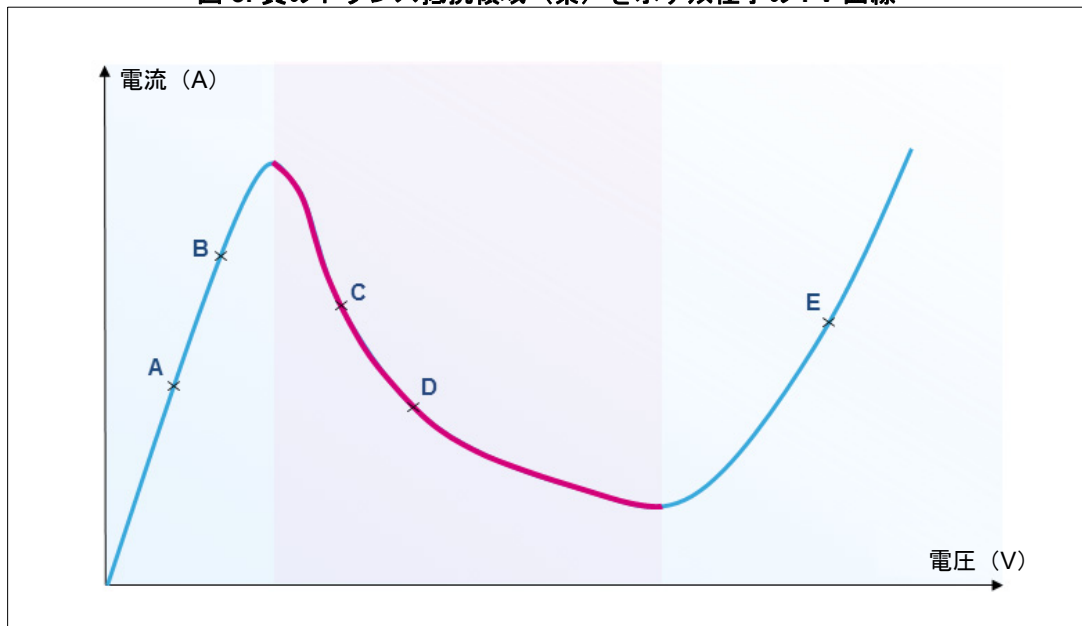
$$\frac{\Delta V}{\Delta I} = \frac{V(D) - V(C)}{I(D) - I(C)} < 0$$

青で表されている部分は、正のトランス抵抗を示しています。

$$\frac{\Delta V}{\Delta I} = \frac{V(B) - V(A)}{I(B) - I(A)} > 0$$



図 3. 負のトランス抵抗領域（紫）を示す双極子の I-V 曲線



## 2.2 相互コンダクタンス

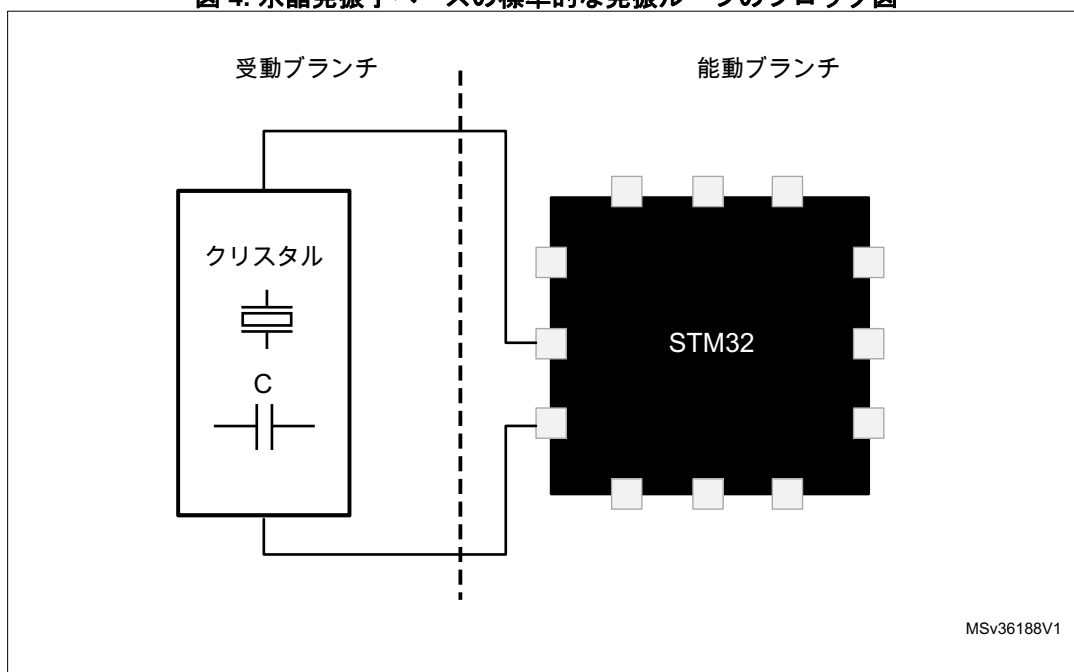
抵抗の逆数として定義されるコンダクタンスと同様に、相互コンダクタンスはトランス抵抗の逆数として定義されます。相互コンダクタンスは、 $\Delta V / \Delta I$  で表される微分コンダクタンスとしても定義できます。

## 2.3 負性抵抗オシレータの原理

発振ループは、2つのブランチで構成されます（図 4 を参照）。

- 発振ループの能動ブランチは、オシレータ自身で構成されます。このブランチは、起動時の発振開始と、安定発振フェーズに到達するまでのビルドアップに十分なエネルギーを供給します。安定した発振に到達すると、オシレータ・ブランチは、受動ブランチの損失を補償するのに十分なエネルギーを供給します。
- 受動ブランチの主な構成要素は、発振子、2つの負荷コンデンサ、およびすべての寄生容量です。

図 4. 水晶発振子ベースの標準的な発振ループのブロック図



小信号理論に従い、能動ブランチ（オシレータ部分）が正常にバイアスされている場合、オシレータのバイアス電圧付近で安定発振を維持するために、能動ブランチの相互コンダクタンスは受動ブランチのコンダクタンスと等しくする必要があります。

しかし、起動時は、発振ループの固有ノイズから発振をビルドアップする確率を最大化するために、オシレータの相互コンダクタンスは発振ループの受動部分のコンダクタンス（の倍数）より大きくなければなりません。発振ループの受動ブランチのコンダクタンスに比べてオシレータの相互コンダクタンスが大きすぎる場合、発振ループが飽和して起動が失敗する可能性があります。

オシレータが正常に起動して安定した発振を維持できるように、STM32 と STM8 の各マイクロコントローラには、発振ループの負性抵抗とクリスタルの最大等価直列抵抗（ESR）の比率が指定されています。比率は、HSE オシレータの場合は 5 より大きく、LSE オシレータの場合は 3 より大きくすることを推奨します。

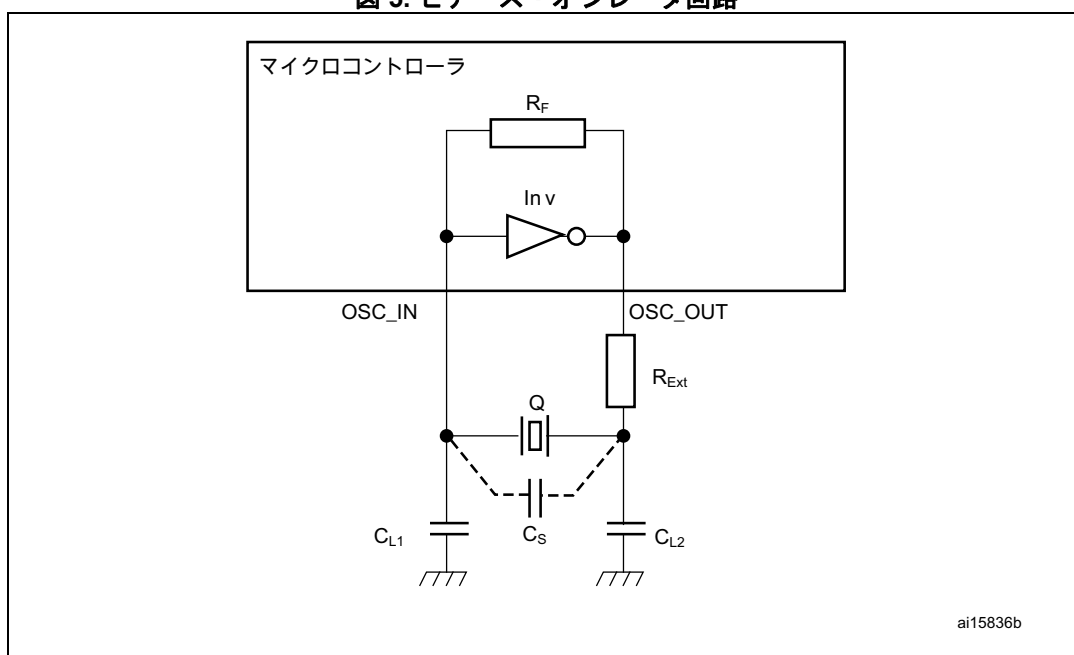
## 3 ピアース・オシレータ設計

このセクションでは、さまざまなパラメータと、ピアース・オシレータ設計に従うようにそれらの値を決定する方法について説明します。

### 3.1 ピアース・オシレータの概要

ピアース・オシレータは、コルピッツ・オシレータの変形であり、水晶発振子と一緒に広く使用されます。ピアース・オシレータ（図 5 を参照）は必要な外部部品が少ないので、最終的な設計コストが抑制されます。さらに、ピアース・オシレータは、水晶発振子、特にクォーツ水晶発振子と組み合わせたときの安定した発振周波数で知られています。

図 5. ピアース・オシレータ回路



- Inv : アンプとして機能する内部インバータ
- Q : クォーツ水晶発振子またはセラミック発振子
- $R_F$  : 内部フィードバック抵抗
- $R_{Ext}$  : インバータ出力電流を制限する外部抵抗
- $C_{L1}$  および  $C_{L2}$  : 2 つの外部負荷容量
- $C_S$  : 浮遊容量。マイクロコントローラのピン容量（OSC\_IN および OSC\_OUT）と PCB（寄生）容量の和。

3.2  $R_F$  フィードバック抵抗

ST マイクロエレクトロニクスほとんどのマイクロコントローラでは、 $R_F$  がオシレータ回路に組み込まれています。その役割は、インバータをアンプとして機能させることです。 $V_{in}$  と  $V_{out}$  の間にフィードバック抵抗を接続してアンプを  $V_{out} = V_{in}$  にバイアスし、強制的にアンプを線形領域（図 6 の影付きの領域）で動作させます。アンプはノイズ（クリスタルの熱ノイズなど）を直列から並列共振周波数 ( $F_a$ ,  $F_p$ ) の範囲を含むノイズを増幅します。

図 6. インバータ伝達関数

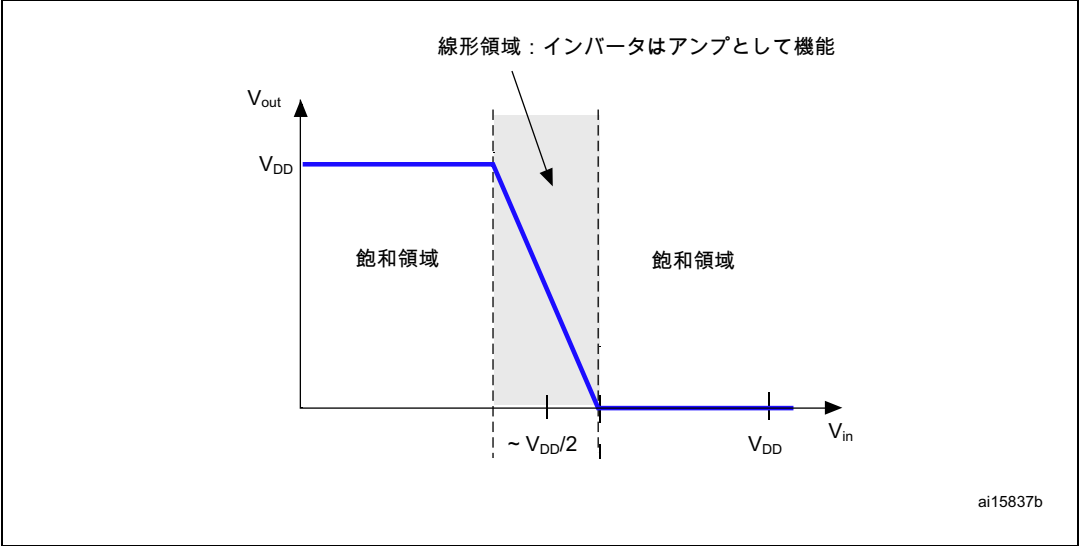


表 3 は  $R_F$  の標準値を示します。

表 3. 周波数ごとのフィードバック抵抗標準値

周波数	フィードバック抵抗範囲
32.768 kHz	10 ~ 25 MΩ
1 MHz	5 ~ 10 MΩ
10 MHz	1 ~ 5 MΩ
20 MHz	470 kΩ ~ 5 MΩ

3.3  $C_L$  負荷容量

負荷容量は、クリスタル・オシレータに接続されている回路の端子間静電容量です。この値は、外部コンデンサ  $C_{L1}$  と  $C_{L2}$  およびプリント基板や接続の浮遊容量 ( $C_s$ ) によって決まります。 $C_L$  値は、クリスタル・メーカーによって指定されます。周波数が正確になるように、オシレータ回路のクリスタルに対する負荷容量を、クリスタルが調整されている負荷容量と同じ値にする必要があります。周波数を安定させるには、主に負荷容量を一定にする必要があります。外部コンデンサ  $C_{L1}$  と  $C_{L2}$  を使用して、 $C_L$  の値がクリスタル・メーカーの指定値になるように調整します。

$C_L$  の式は、次の式で与えられます。

$$C_L = \frac{C_{L1} \times C_{L2}}{C_{L1} + C_{L2}} + C_s$$

たとえば、 $C_L = 15 \text{ pF}$ 、 $C_s = 5 \text{ pF}$  の場合、

$$C_L - C_s = \frac{C_{L1} \times C_{L2}}{C_{L1} + C_{L2}} = 10 \text{ pF}$$

したがって、 $C_{L1} = C_{L2} = 20 \text{ pF}$  です。

## 3.4 オシレータの相互コンダクタンス

理論的には、発振を開始して安定フェーズに到達させるには、オシレータが、発振ループの損失を補償する十分なゲインを提供し、発振をビルドアップするエネルギーを供給する必要があります。発振が安定すると、オシレータが提供する電力と発振ループで消費する電力が等しくなります。

事実上、受動部品の値の許容値とその環境パラメータ（温度など）への依存性により、オシレータのゲインと発振ループの限界ゲインの比は 1 を超えることはできません。なぜなら、1 を超えると、オシレータの起動時間が長くなりすぎ、場合によってはオシレータが起動に失敗する可能性があるためです。

このセクションでは、STM32 オシレータを指定された発振子と組み合わせて、発振子とオシレータの両方に指定されている条件下で発振が開始して維持されるようにできるかどうかのチェックに使用できる 2 つの手法について説明します。手法は、マイクロコントローラのデータシートでオシレータのパラメータがどのように指定されているかによります。

- 発振ループの最大限界ゲイン・パラメータ ( $G_{m\_crit\_max}$ ) が指定されている場合、発振ループ限界ゲイン ( $g_{mcrit}$ ) が指定されたパラメータより小さいことを確認します。
- オシレータの相互コンダクタンス・パラメータ ( $g_m$ ) が指定されている場合、ゲイン・マージン比 ( $gain_{margin}$ ) が 5 より大きいことを確認します。

これらのパラメータは、式  $gain_{margin} = g_m / g_{mcrit}$  によって決まります。ここで、

- $g_m$  は、データシートで指定されているオシレータの相互コンダクタンスです。製品に応じて、HSE オシレータの相互コンダクタンスは数十  $\text{mA/V}$  の範囲、LSE オシレータの相互コンダクタンスは数 ~ 数十  $\mu\text{A/V}$  の範囲です。
- $g_{mcrit}$  は、オシレータがこのパラメータが関係する発振ループの一部を構成している場合に、安定発振を維持するために必要なオシレータの最小相互コンダクタンスとして定義されます。 $g_{mcrit}$  は、発振ループの受動部品のパラメータから計算されます。

$C_{L1}$  が  $C_{L2}$  に等しく、クリスタルのパッド上の  $C_L$  がクリスタル・メーカーによって指定されている値と同じであると仮定した場合、 $g_{mcrit}$  は次のように表されます。

$$g_{mcrit} = 4 \times ESR \times (2\pi F)^2 \times (C_0 + C_L)^2$$

ここで、

- ESR は等価直列抵抗
- $C_0$  はクリスタルの並列容量
- $C_L$  はクリスタルの公称負荷容量
- F はクリスタルの公称発振周波数

たとえば、STM32F1 マイクロコントローラに組み込まれている、相互コンダクタンス値 ( $g_m$ ) が 25 mA/V の HSE オシレータの発振ループを設計するため、Fox 社のクォーツ・クリスタルで次の特性を持つものを選択します。

- 周波数 = 8 MHz
- $C_0 = 7$  pF
- $C_L = 10$  pF
- $ESR = 80 \Omega$

このクリスタルが発振するかどうかをチェックするために、 $g_{mcrit}$  を計算してみましょう。

$$g_{mcrit} = 4 \times 80 \times (2 \times \pi \times 8 \times 10^6)^2 \times (7 \times 10^{-12} + 10 \times 10^{-12})^2 = 0.23 \text{ mA/V}$$

ゲイン・マージンを計算すると、次のようになります。

$$\text{gain}_{margin} = \frac{g_m}{g_{mcrit}} = \frac{25}{0.23} = 107$$

ゲイン・マージンは、発振を開始するのに十分であり、「ゲイン・マージンは 5 より大きい」という条件は満たされています。オシレータは、データシートで指定されている標準の遅延時間が経過した後、安定発振に到達することが予想されます。

不十分なゲイン・マージン ( $\text{gain}_{margin} < 5$ ) が見つかった場合、最終アプリケーションを設計および試験するときに（実験室で達成される）何らかの条件で発振が開始する可能性はありますが、稼働状態で発振が開始するとは限りません。ゲイン・マージンが 5 以上のクリスタルを選択することを強く推奨します（ESR と  $C_L$  の一方または両方が比較的小さいクリスタルを選択してみてください）。

オシレータの相互コンダクタンス ( $g_m$ ) と発振ループの最大限界ゲイン ( $G_{m\_crit\_max}$ ) の変換は、式  $G_{m\_crit\_max} = g_m / 5$  で与えられます。

## 3.5 励振レベル (DL) と外部抵抗 ( $R_{Ext}$ ) の計算

励振レベル (DL) と外部抵抗 ( $R_{Ext}$ ) は密接に関連しているので、同じセクションで説明します。

### 3.5.1 励振レベル (DL) の計算

励振レベルは、クリスタル内で消費される電力です。これは制限する必要があります。制限しない場合、過剰な機械的振動によりクォーツ・クリスタルが故障する可能性があります。最大励振レベルは、クリスタル・メーカーによって通常 mW 単位で指定されます。この値を超えると、クリスタルが破損するか、またはデバイス寿命が短くなる可能性があります。

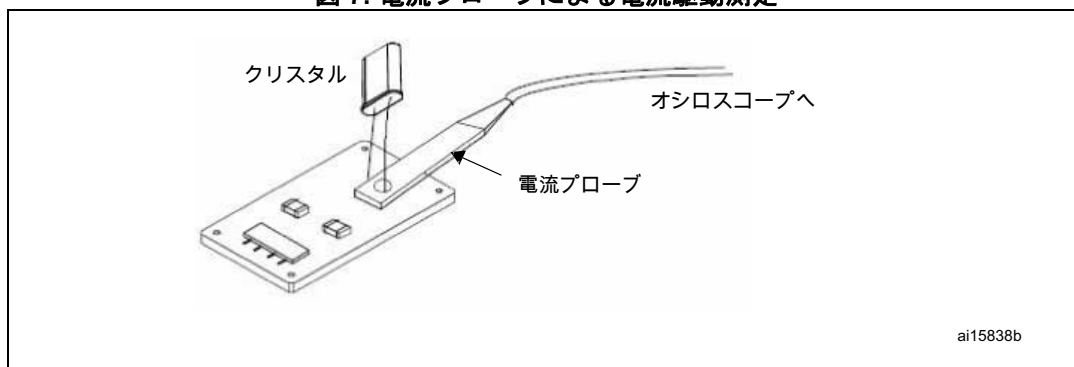
励振レベルは、次の式で与えられます。DL =  $ESR \times I_Q^2$  ここで、

- ESR は等価直列抵抗（クリスタル・メーカーによって指定）です。

$$ESR = R_m \times \left(1 + \frac{C_0}{C_L}\right)^2$$

- $I_Q$  はクリスタルを流れる電流の実効値です。この電流は、オシロスコープで正弦波として表示されます。電流値は、ピークピーク値 ( $I_{pp}$ ) として読み取ることができます。電流プローブを使用する場合（図 7 を参照）、オシロスコープの電圧スケールを 1 mA/1 mV に変換されるでしょう。

図 7. 電流プローブによる電流駆動測定



したがって、前述したように、ポテンショメータで電流を調整する場合、クリスタルを通過する電流は  $I_{Qmax}$  RMS を超えてはいけません（クリスタルを通過する電流が正弦波であると仮定）。

$I_{Qmax}$  RMS は次の式で与えられます。

$$I_{Qmax}RMS = \sqrt{\frac{DL_{max}}{ESR}} = \frac{I_{Qmax}PP}{2\sqrt{2}}$$

したがって、クリスタルを通過する電流（オシロスコープで読み取られるピークピーク値）は、次の式に等しい最大ピークピーク電流（ $I_{Qmax}PP$ ）を超えてはいけません。

$$I_{Qmax}PP = 2 \times \sqrt{\frac{2 \times DL_{max}}{ESR}}$$

これが、 $I_Q$  が  $I_{Qmax}PP$  を超える場合は外部抵抗  $R_{Ext}$ （[セクション 3.5.3](#) を参照）が必要になる理由です。その場合は  $R_{Ext}$  が必須になり、 $I_{Qmax}$  の式の ESR に加算されます。

## 3.5.2 励振レベルの別の測定手法

励振レベルは、 $DL = I_{QRMS}^2 \times ESR$  で計算できます。ここで、 $I_{QRMS}$  は RMS AC 電流です。

この電流は、低容量（1 pF 以下）のオシロスコープ・プローブを使用してアンプ入力における電圧振幅を測定することで計算できます。アンプ入力電流は  $C_{L1}$  を通過する電流に対して無視できるので、クリスタルを通過する電流は  $C_{L1}$  を通過する電流と等しいと仮定できます。したがって、この点における RMS 電圧は、 $I_{QRMS} = 2 \pi F \times V_{RMS} \times C_{tot}$  によって RMS 電流に関連付けられます。ここで、

- $F$  = クリスタル周波数
- $V_{RMS} = \frac{V_{pp}}{2\sqrt{2}}$ 、ここで  $V_{pp}$  は  $C_{L1}$  レベルで測定されるピークピーク電圧
- $C_{tot} = C_{L1} + (C_s / 2) + C_{probe}$ 、ここで
  - $C_{L1}$  はアンプ入力における外部負荷容量
  - $C_s$  は浮遊容量
  - $C_{probe}$  はプローブ容量

したがって、励振レベル DL は  $DL = \frac{ESR \times (\pi \times F \times C_{tot})^2 \times (V_{pp})^2}{2}$  で与えられます。

この DL 値は、クリスタル・メーカーによって指定されている励振レベルを超えてはいけません。

## 3.5.3 外部抵抗 ( $R_{Ext}$ ) の計算

この抵抗の役割は、クリスタルの励振レベルを制限することです。 $C_{L2}$  と組み合わせでローパス・フィルタを形成し、オシレータが、高調波ではなく、基本周波数で開始するようにします（オシレータが基本周波数の奇数次高調波で振動しないようにします）。クリスタルで消費される電力がクリスタル・メーカーによって指定されている値より大きい場合、クリスタルのオーバードライブを避けるために外部抵抗  $R_{Ext}$  が必須になります。選択されているクォーツで消費される電力がクリスタル・メーカーによって指定されている励振レベルより小さい場合、 $R_{Ext}$  の挿入は不要であり、その値は  $0\ \Omega$  になります。

$R_{Ext}$  の初期推定値は、 $R_{Ext}$  と  $C_{L2}$  で形成される分圧回路を考慮することによって得られます。そのため、 $R_{Ext}$  の値は  $C_{L2}$  のリアクタンスに等しくなります。

したがって、 $R_{Ext} = 1 / (2 \pi F C_{L2})$  であり、発振周波数 8 MHz、 $C_{L2} = 15\text{ pF}$  の場合は  $R_{Ext} = 1326\ \Omega$  となります。

$R_{Ext}$  を最適化するには、まず前述したように  $C_{L1}$  と  $C_{L2}$  を選択してから  $R_{Ext}$  の位置にポテンショメータを接続する方法を推奨します。ポテンショメータは、最初は  $C_{L2}$  の容量性リアクタンスにほぼ等しくなるようにセットする必要があります。その後で、許容できる出力とクリスタル励振レベルが得られるまで、必要に応じて調整する必要があります。

**注意：**  $R_{Ext}$  を計算した後でゲイン・マージン（[セクション 3.4](#) を参照）を再計算して、 $R_{Ext}$  の追加が発振条件に何も影響を及ぼしていないことを確認することを推奨します。すなわち、 $R_{Ext}$  の値を  $g_{mcrit}$  の式の ESR に追加する必要がありますが、 $g_m \gg g_{mcrit}$  は依然として真である必要があります。

$$g_m \gg g_{mcrit} = 4 \times (ESR + R_{Ext}) \times (2 \pi F)^2 \times (C_0 + C_{L1})^2$$

**注：**  $R_{Ext}$  が小さすぎる場合、クリスタルで消費する電力がかなり減少します。一方で  $R_{Ext}$  が大きすぎる場合は、発振が起こりません。

## 3.6 起動時間

起動時間は、発振が開始してからビルドアップして安定発振フェーズに到達するまでに必要な時間です。起動時間は、さまざまな要因の中で特に使用する発振子の Q ファクタに依存します。オシレータを、高 Q ファクタを特徴とするクォーツ水晶発振子と組み合わせている場合、セラミック発振子を使用する場合よりも起動時間は長くなります（セラミック発振子はクォーツ水晶発振子に比べて Q ファクタが低いことで知られています）。起動時間は、外部部品  $C_{L1}$  と  $C_{L2}$ 、およびクリスタル周波数にも依存します。クリスタルの公称周波数が高いほど、起動時間は短くなります。また、起動の問題は、通常は（前述したように）ゲイン・マージンの大きさが正しく示されていないことによるものです。これは、 $C_{L1}$  と  $C_{L2}$  が小さすぎるか大きすぎる場合、または ESR が大きすぎることによって発生します。

たとえば、公称周波数が数 MHz の水晶発振子と組み合わせたオシレータは、通常は数 ms の遅延の後に起動します。

32.768 kHz のクリスタルの起動時間は 1 ~ 5 秒の範囲です。



## 3.7 クリスタルの可変幅

クリスタルの可変幅は、クリスタル感度とも呼ばれ、発振周波数シフトにおいて、クリスタルで生じる負荷容量の小さな変化の影響を示します。このパラメータは、通常、ロースピード・オシレータを扱う場合に重要性が増します。なぜなら、それらは時間管理機能（リアルタイム・クロック機能など）の時間測定に使用されるからです。

最終アプリケーションがまだ設計段階にある場合は、このパラメータのロースピード・オシレータ（およびその結果としてこのオシレータで時間測定しているすべての時間管理機能）の精度に対する影響は明らかではありません。これは、設計者が、目的の発振周波数が得られるまで負荷コンデンサを微調整するためです。生産段階に入ると、設計は凍結され、負荷コンデンサを含むすべての受動部品の値が明確に定義されます。負荷容量の変化は、発振周波数のシフトを直接引き起こします。

クリスタルで生じる静電容量負荷（ $C_L$ ）の変化は、不適切な動作環境によるものであり、最終設計が正しく動作しない場合にのみ発生すると思われるかもしれません。実際には、これは正しくありません。なぜなら、負荷容量の変化はかなり頻繁に発生し、設計者が考慮する必要があるからです。オシレータで生じる静電容量負荷（ $C_L$ ）の主な要因を次に示します。

- 負荷コンデンサ  $C_{L1}$  と  $C_{L2}$  の静電容量
- PCB パスの浮遊容量
- オシレータのピンの寄生容量

上記の静電容量の変化は、発振周波数のシフトを直接引き起こします。設計が生産段階に入ると、上記の容量値の多くは正確に制御できなくなります。可変幅が狭いクリスタルを選択すると、生産品での発振周波数の精度の不確実性を制限します。

一般的に言って、クリスタルの負荷容量（ $C_L$ ）が増えるほど、その可変幅は狭くなります。たとえば、可変幅が 45 PPM/pF のクリスタルを考えてみましょう。発振周波数を微調整するため、このクリスタルには、容量が共に 7 pF の 2 つの C0G セラミック・コンデンサ（許容値は公称値の  $\pm 5\%$ ） $C_{L1}$  と  $C_{L2}$  による負荷がかけられます。

クリスタルから見て、2 つの負荷コンデンサは直列に取り付けられています。これは、 $C_L$  への寄与が  $(C_{L1} = C_{L2}) / 2$  であることを意味します。 $C_{L1}$  と  $C_{L2}$  は等しいので、 $C_L$  への寄与の許容値は同じままで、 $\pm 5\%$  となります。ここで、（負荷コンデンサの許容値によってのみもたらされる周波数シフトの大きさを評価するために） $C_L$  への残りすべての寄与因子が設計段階の公称値に維持されていると考えた場合、クリスタルに生じる負荷容量（ $C_L$ ）は 0.175 pF だけ増加または減少します。これにより、次の発振シフトが誘導されます。

$$0.175 \text{ pF} \times 45 \text{ PPM/pF} = (\text{RTC などの時間管理機能の場合、約 } 0.7 \text{ 秒 / 日})$$

上記の例は、可変幅が狭くなると、負荷容量の小さな偏差が周波数シフトに与える影響が小さくなることを示しています。クリスタルの可変幅は、最終アプリケーションの PPM バジェットを定義する際に重要なファクタになります。

$$\text{Pullability}_{(\text{PPM/pF})} = \frac{C_m \times 10^6}{2 \times (C_0 + C_L)^2}$$

ここで、

- $C_m$  はクリスタルの直列容量
- $C_0$  はクリスタルの並列容量
- $C_L$  はクリスタルの公称負荷容量

この後のセクションでは、発振周波数を校正する方法および最終的な精度の不確かさ (PPM) バジェットを見積もる方法について、さらに詳しく説明します。

## 3.8 安全係数

### 3.8.1 定義

発振子（水晶発振子など）は、経時的な影響を受けることが知られています。これは、発振子パラメータが、時間の経過と共に、仕様で定義されている初期値から逸脱するものです。影響を受けるパラメータの1つとして発振子の ESR があります。ESR の値は、湿度や温度などの環境条件に依存します。オシレータの相互コンダクタンスは、マイクロコントローラの電源電圧と、温度に依存します。

安全係数パラメータを使用すると、動作条件下および使用寿命中のオシレータの安全動作を決定できます。これは、動作条件下で故障しないオシレータの能力を測定します。

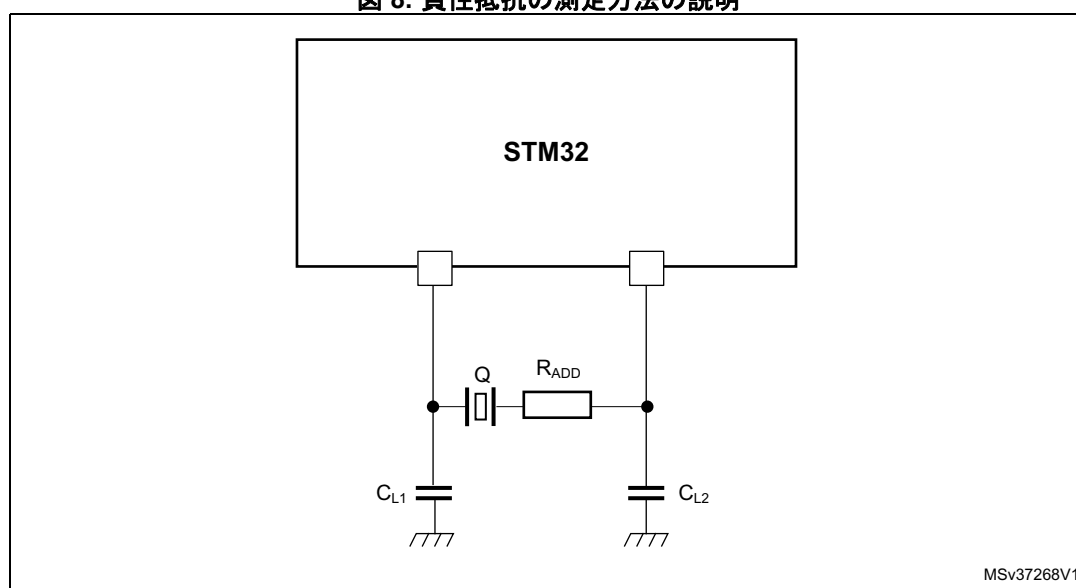
安全係数は、オシレータの負性抵抗と発振子の ESR の比として定義されます。

$$S_f = \frac{\text{Oscillator negative resistance}}{\text{Crystal ESR}} = \frac{R_{\text{ADD}} + \text{Crystal ESR}}{\text{Crystal ESR}}$$

### 3.8.2 測定方法

オシレータの負性抵抗を測定するには、図 8 に示すように、発振子と直列に抵抗を追加します。

図 8. 負性抵抗の測定方法の説明



MSv37268V1

オシレータの負性抵抗は、オシレータが起動に成功しない最小の直列抵抗  $R_{\text{ADD}}$  の値です。

実際には、この値をセットするには、直列抵抗の値を少しずつ増やしながら何度も実験を繰り返します。オシレータが正常に起動できなくなった時点で、実験を終了します。オシレータの負性抵抗は、追加した直列抵抗の値と等しい値です。

3.8.3 STM32 および STM8 オシレータの安全係数

表 4 に、STM32 および STM8 マイクロコントローラに組み込まれているオシレータの安全係数を示します。LSE オシレータでは、安全係数が 3 以上の場合に発振は安全だとみなされます。HSE オシレータでは、安全係数が 5 以上の場合に発振は安全だとみなされます。

表 4. STM32 および STM8 オシレータの安全係数 ( $S_f$ )<sup>(1)</sup>

安全係数 ( $S_f$ )	保証レベル	
	HSE	LSE
$S_f \geq 5$	安全	非常に安全
$3 \leq S_f < 5$	安全ではない	安全
$S_f < 3$		安全ではない

1. 安全な発振と非常に安全な発振は緑で、安全ではない発振は黄色で示されています。

## 4 適切なクリスタルと外部部品を選択するためのガイドライン

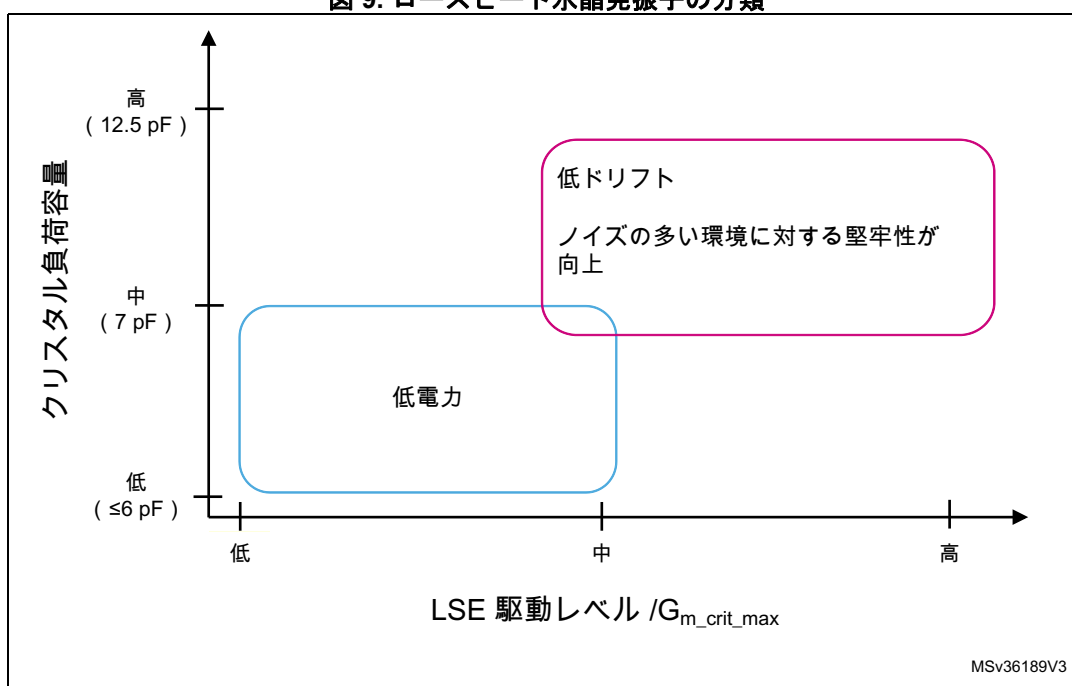
### 4.1 STM32 マイクロコントローラに組み込まれるロースピード・オシレータ

ロースピード発振子市場では、広範囲にわたる水晶発振子が提供されています。特定の設計に最も適した水晶発振子の選択は、多くのパラメータに依存します。考慮する必要がある最も重要なパラメータのリストを次に示します（示しているのは技術的ファクタのみ）。

- クリスタルのサイズまたはフットプリント
- クリスタルの負荷容量 ( $C_L$ )
- 発振周波数オフセット (PPM)
- 起動時間

重要な設計基準に応じて、上記のパラメータ間のトレードオフを見つける必要があります。図 9 は、市販されている発振子は、上記ファクタとトレードオフに応じて、2 つのカテゴリに分類できることを示しています。

図 9. ロースピード水晶発振子の分類



比較的負荷容量が大きい（12.5 pF など）発振子は、オシレータが発振子公称周波数で発振ループを駆動するためにより多くの電力が必要です。低消費電力（コイン電池で供給される電力で非常に長い期間にわたって自律的に動作する必要がある RTC 用途など）を目標とする設計は、その結果として比較的小さい負荷容量の発振子を使用する可能性が高くなります。一方で、負荷容量の大きい発振子は、負荷容量の小さい発振子に比べて、可変幅がずっと狭くなります。その結果、消費電力に関して厳しい制約のない設計では、負荷容量の大きいクリスタルを使用して、可変幅を狭くする傾向があります。

水晶発振子が大量に使用される主な分野の 1 つが、携帯機器やウェアラブル機器（スマートフォン、Bluetooth® キットなど）の消費者市場です。この市場区分では、クリスタルのサイズが重要になります。ただし、フットプリントの小さいクリスタルは必ずクリスタルの ESR が大きいことは、広く知られています。この種の設計では、目標の設計に消費電力に関して厳しい制約がある場合（通常のシナリオ）、選択は難しくなる可能性があります。この場合はできる限り負荷容量の小さいクリスタルを選択して、可変幅が広くなるとしても消費電力を最適化します。また、ESR が大きいクリスタルは、起動時間が多少長くなります。クリスタルのサイズに制約がない場合は、できる限り ESR が小さいクリスタルを選択することを推奨します。

ノイズの多い環境（産業用途ではほとんどいつも当てはまりますが）では、消費電力に制約がない場合は、負荷容量の大きいクリスタルを選択することを推奨します。そのようなクリスタルは、オシレータから高駆動電流を供給する必要がある一方で、ノイズと外部の摂動に対して高い堅牢性があります。もう 1 つの利点として、設計の可変幅が最小化されます。

使用するマイクロコントローラにより、下記の発振子ファミリはすべてまたはその一部のみが設計に適合できます。STM32 マイクロコントローラには、次の 2 つのタイプのロースピード・オシレータ（LSE）が組み込まれています。

- 一定ゲインのロースピード・オシレータ

このタイプの LSE オシレータは一定ゲインを特徴としているので、上述の一部のクリスタル・グループにのみ適合します。たとえば、STM32F2 および STM32L1 マイクロコントローラに組み込まれている LSE オシレータは、消費電力に関して厳しい制約がある設計を対象としています。したがって、選択するクリスタルは、負荷容量が小さく、ESR が中程度である必要があります。STM32F1 マイクロコントローラに組み込まれている LSE オシレータは、ESR が中程度、負荷容量が中程度の水晶発振子を対象としています。

- 設定可能ゲインのロースピード・オシレータ

このファミリに属する LSE オシレータには、非常に多くのクリスタルと適合性があるという利点があります。この種の LSE オシレータが組み込まれている STM32 マイクロコントローラによって制約が生じることはほとんどありません。適合する水晶発振子が大量に存在するので、適合する発振子を選択するときに、設計制約（消費電力、フットプリントなど）だけにフォーカスできます。これらの LSE オシレータは、次の 2 つのカテゴリに分類されます。

- ゲインを動的に（動作中に）変更可能な LSE オシレータ

このタイプの LSE オシレータのゲインは、オシレータを起動する前またはオシレータが有効になった後のどちらでも変更できます。

- ゲインを静的に変更可能な LSE オシレータ

ゲインを変更できるのは、LSE オシレータがオフのときだけです。オシレータの相互コンダクタンスを増減させる必要がある場合、あらかじめ LSE をオフにする必要があります。

表 5 に、STM32 マイクロコントローラに組み込まれているロースピード・オシレータ（LSE）のリストを示します。

**注意：** 静的にまたは動作中にゲインを変更する場合、最終的な精度の不確かさ（PPM）バジェットを見積もるために、発振周波数の較正を再調整する必要があります。

**注意：** STM32F0 と STM32F3 の各 MCU の場合、発振ループが飽和して起動が失敗するのを避けるために、高駆動モード ( $g_m = 25 \mu A/V$ ) は  $12.5 \text{ pF}$  のクリスタルを使用するときだけ使用してください。低  $C_L$  クリスタル ( $C_L = 6 \text{ pF}$  など) を使用する場合、発振周波数ジッタとデューティサイクルにひずみが生じる可能性があります。

表 5. STM32 マイクロコントローラに組み込まれている LSE オシレータ<sup>(1)</sup>

励振 レベル	F0 シリーズ / F3 シリーズ				F1 シリーズ T シリーズ	F2 シリーズ	F4_g1 <sup>(2)</sup>	F4_g2 <sup>(3)</sup>		L0 シリーズ / L4 シリーズ				L1 シリーズ	F7 シリーズ / H7 シリーズ				単位
	低	中低	中高	高	NA	NA	NA	低	高	低	中低	中高	高	NA	低	中低	中高	高	
g <sub>m</sub> (min)	5	8	15	25	5	2.8	2.8	2.8	7.5	2.5	3.75	8.5	13.5	3	2.4	3.75	8.5	13.5	μA/V
G <sub>m_crit_max</sub>	1	1.6	3	5	1	0.56	0.56	0.56	1.5	0.5	0.75	1.7	2.7	0.6	0.48	0.75	1.7	2.7	

- 色コード :  
 黄 : 動作中に (動的に) 相互コンダクタンスを変更可能な LSE オシレータ  
 緑 : 相互コンダクタンスを変更できない LSE オシレータ  
 灰色 : 静的に相互コンダクタンスを変更可能な LSE オシレータ
- F4\_g1 : STM32F4 シリーズ (LSE ジェネレーション 1) このカテゴリは、相互コンダクタンスを変更できない LSE オシレータを搭載している STM32F401/405/ 407/427/429xx の各 MCU に対応します。
- F4\_g2 : STM32F4 シリーズ (LSE ジェネレーション 2) このカテゴリは、静的に相互コンダクタンスを変更可能な LSE オシレータを搭載している STM32F411/446/469/479xx に対応します。

## 4.2 STM32 適合クリスタルを選択する詳細なステップ

このセクションでは、適切なクリスタル / 外部部品を選択する推奨手順について説明します。手順全体は、3 つの主要ステップに分けられます。

### ステップ 1 : 発振子の選択されている STM32 マイクロコントローラとの適合性のチェック

選択されているクリスタルと STM32 マイクロコントローラとの適合性をチェックするには、[セクション 3.4 : オシレータの相互コンダクタンス](#)で説明されている 2 つの手順のどちらを実行する必要があるのかをまず決定します。これは、製品データシートに記載されているオシレータの仕様に基づいて決定する必要があります。

- オシレータの相互コンダクタンス・パラメータが指定されている場合は、1 番目の手順を適用する必要があります。クリスタルと選択されている STM32 マイクロコントローラとの適合性を確保するには、ゲイン・マージン比が 5 (x5) より大きいことを確認します。
- 代わりに  $G_{m\_crit\_max}$  が指定されている場合は、発振ループの  $g_{mcrit}$  が、指定されている  $G_{m\_crit\_max}$  値より小さいことを確認します。

### ステップ 2 : 負荷コンデンサ $C_{L1}$ および $C_{L2}$ の容量値の決定

負荷コンデンサ  $C_{L1}$  および  $C_{L2}$  の適切な容量値を決定するには、[セクション 3.3 :  \$C\_L\$  負荷容量](#)で指定されている式を適用します。得られた値は、使用すべき正確な容量の近似値です。2 番目のフェーズでは、負荷コンデンサの値を微調整するために、適切な容量値が見つかるまで実験的反复を実行する必要があります。

実験フェーズ中は、エタロン・クリスタルを使用します。エタロン・クリスタルは、クリスタルの公称負荷容量 ( $C_L$ ) の負荷がかかったときの PPM ドリフトがよく知られた特徴のあるクリスタルです。クリスタル・メーカーは、この種のクリスタルを要求に応じて提供できます。エタロン・クリスタルを選択した後は、クリスタルに公称負荷容量の負荷がかかったときの発振周波数 ( $F_{etalon}$ ) を計算します。この周波数は、次の式で与えられます。

$$F_{etalon} = F_{nominal} \times \left( PPM_{etalon} / 10^6 \right)$$

ここで、

- $F_{etalon}$  は、クリスタルに公称負荷容量の負荷がかかったときのエタロン・クリスタルの発振周波数です。
- $F_{nominal}$  は、クリスタルのデータシートで指定されている公称発振周波数です。
- $PPM_{etalon}$  は、クリスタル・メーカーが特性を示したエタロン・クリスタルの発振周波数ドリフトです。



$F_{\text{etalon}}$  を計算するには、次のシーケンスを使用します。

- 1 番目の実験的反復は、計算で求めた  $C_{L1}$  と  $C_{L2}$  の容量値で実行する必要があります。
  - 発振周波数が  $F_{\text{etalon}}$  に等しい場合、 $C_{L1}$  と  $C_{L2}$  は適切な容量です。したがって、サブステップの 2 と 3 はスキップできます。
  - 発振周波数が  $F_{\text{etalon}}$  より遅い場合、サブステップ 2 を実行します。
  - それ以外の場合、サブステップ 3 を実行します。
2. この実験的反復では、 $C_{L1}$  と  $C_{L2}$  の容量値を減らして発振周波数を再測定し、それを  $F_{\text{etalon}}$  と比較します。
  - 発振周波数が  $F_{\text{etalon}}$  より遅い場合、サブステップ 2 を実行します。
  - それ以外の場合、サブステップ 3 を実行します。
  - 発振周波数が  $F_{\text{etalon}}$  にほとんど等しい場合、今回の  $C_{L1}$  と  $C_{L2}$  の容量値を使用する必要があります。
3. この実験的反復では、 $C_{L1}$  と  $C_{L2}$  の容量値を増やして発振周波数を再測定し、それを  $F_{\text{etalon}}$  と比較します。
  - 発振周波数が  $F_{\text{etalon}}$  より遅い場合、サブステップ 2 を実行します。
  - それ以外の場合、サブステップ 3 を実行します。
  - 発振周波数が  $F_{\text{etalon}}$  にほとんど等しい場合、今回の  $C_{L1}$  と  $C_{L2}$  の容量値を使用する必要があります。

### ステップ 3：発振ループの安全係数のチェック

動作条件下でオシレータが安全に発振するよう、安全係数は[セクション 3.8：安全係数](#)の説明に従って評価する必要があります。

注：多くのクリスタル・メーカーは、要求に応じて、マイクロコントローラ / クリスタルの組み合わせの適合性をチェックできます。組み合わせが有効と判断された場合、これらのメーカーは、 $C_{L1}$  と  $C_{L2}$  の推奨値およびオシレータの負性抵抗測定値を含むレポートを提出できます。この場合は、ステップ 2 と 3 をスキップできます。

### ステップ 4：励振レベルと外部抵抗の計算

励振レベル (DL) ([セクション 3.5：励振レベル \(DL\) と外部抵抗 \(RExt\) の計算](#)を参照) を計算して、 $DL_{\text{crystal}}$  と比較します。

- $DL < DL_{\text{crystal}}$  の場合は、外部抵抗は不要です (これが適切なクリスタルになります)。
- $DL > DL_{\text{crystal}}$  の場合は、 $DL < DL_{\text{crystal}}$  になるように、ユーザが  $R_{\text{Ext}}$  を計算する必要があります。この場合、 $R_{\text{Ext}}$  を考慮してゲイン・マージンを再計算する必要があります。ゲイン・マージンが 5 より大きい場合、これが適切なクリスタルとなります。それ以外の場合、このクリスタルは機能しないので、別のクリスタルを選択する必要があります。ステップ 1 に戻って、新しいクリスタルについて手順を実行します。

### ステップ 5 (オプション)：PPM の精度バジレットの計算

最後に、次の式を使用して、アプリケーションの PPM の精度バジレットを見積もります。

$$\text{PPM}_{\text{Budget}} = \text{PPM}_{\text{crystal}} + \text{Deviation}(C_L) \times \text{Pullability}_{\text{crystal}}$$

ここで、

- $\text{PPM}_{\text{Budget}}$  は、発振周波数の精度の見積値です。
- $\text{PPM}_{\text{crystal}}$  は、データシートで指定されているクリスタルの PPM の精度です。



Deviation( $C_L$ ) は、pF 単位で表されます。これは、負荷コンデンサの許容値による負荷容量 ( $C_L$ ) の偏差および PCB 製造工程偏差による浮遊容量 ( $C_S$ ) の変化を示します。

可変幅は、PPM/pF ([セクション 3.7 : クリスタルの可変幅](#)を参照) で表されます。

注： 上記で計算される PPM バジェットには温度変化は考慮されていません。温度変化を考慮した場合、PPM バジェットが大きくなる可能性があります。

## 5 STM32 マイクロコントローラの推奨発振子

### 5.1 STM32 に適合するハイスピード発振子

すべての STM32 マイクロコントローラに組み込まれているハイスピード・オシレータ（HSE）は、市販されているほとんどすべての発振子と適合性があります。これらの発振子は、次のような広範囲にわたるメーカーから提供されています。

- ABRACON
- エプソン（<http://www5.epsondevice.com>）
- 京セラ
- MICROCRYSTAL
- 村田製作所（村田製作所の部品番号選択ツールが <http://ds.murata.com> に用意されています）
- 日本電波工業（<http://www.ndk.com>）
- リバーエレテック（[http://www.river-ele.co.jp/index\\_en](http://www.river-ele.co.jp/index_en)）

適合する発振子は、さまざまな周波数やテクノロジーを持ちます。セラミック発振子とクォーツ水晶発振子はすべて、STM32 MCU に組み込まれている HSE オシレータと適合性があります。表 6 に、サポートされている周波数範囲を示します。

表 6. STM32 マイクロコントローラに組み込まれている HSE オシレータ

シリーズ	STM32F0 STM32F3	STM32F1 STM32T	STM32F2	STM32F4	STM32F7	STM32L0	STM32L1	STM32L4 STM32H7	単位
周波数範囲	4 ~ 32	4 ~ 16	4 ~ 25	4 ~ 26	4 ~ 26	1 ~ 25	1 ~ 24	4 ~ 48	MHz
$I_m$ (min)	10	25	5	5	5	3,5	3,5	7,5	mA/V
$G_{m\_crit\_max}$	2	5	1	1	1	0,7	0,7	1.5	

### 5.2 STM32 に適合するロースピード発振子

表 7 に、STM32 マイクロコントローラ・ファミリの全部またはサブセットのどちらかと適合する一連のロースピード・クォーツ水晶発振子のリストを示します。ここには、各部品番号の発振子と適合性のある STM32 マイクロコントローラが示されています。さまざまなフットプリントの一連の STM32 適合発振子が示されているので、最終アプリケーションに形状の制約がある場合でも速やかにクリスタルを選択できます。

注： STM32 適合発振子のリストは網羅的ではありません。ST マイクロエレクトロニクスがチェックした適合性のある発振子の部品番号のみのリストです。

表 7. STM32 マイクロコントローラに組み込まれている LSE オシレータの推奨水晶発振子

パッケージ	メーカー	クォーツ参照 / 部品番号	最大 ESR (kΩ)	周波数 (Hz)	C <sub>0</sub> (pF)	C <sub>L</sub> (pF)	G <sub>m_crit_max</sub> (μA/V)	STM32 シリーズの適合性 <sup>(1)(2)</sup>
1.6 x 1.0 mm	リバーエレテック	TFX04	90	32768	1	5	0.5494	F0、F1、F2、F3、F4、F7、L0、L1、L4
	エプソン	FC1610AN	90	32768	1.2	5	0.5866	F0、F1、F3、F4_g2、F7、L0、L1、L4
	日本電波工業	NX1610SA EXS00A-MU00658	90	32768	1.5 <sup>(3)</sup>	6	0.8584	F0、F1、F3、F4_g2、F7、H7、L0、L4
	京セラ	ST1610SB32768C0	90	32768	1.5	7	1.1026	F0、F3、F4_g2、F7、L0、L4
	リバーエレテック	TFX04	90	32768	1	9	1.5260	F0、F3、F7、L0、L4
	ECS	ECS-.327-9-16-TR	90	32768	1.3	9	1.6190	F0、F3、F7、H7、L0、L4
	セイコーインスツル	SC-16S	90	32768	1.5 <sup>(3)</sup>	12.5	2.9910	F0、F3
2.0 x 1.25 mm	エプソン	FC-12M	90	32768	1	5	0.5494	F0、F1、F2、F3、F4、F7、L0、L1、L4
2.0 x 1.2 mm	MicroCrystal	CM8V-T1A	75	32768	1.1	4	0.3308	F0、F1、F2、F3、F4、F7、L0、L1、L4
	ABRACON	ABS06-107- 32.768kHz-T	80	32768	1.7	4	0.4407	F0、F1、F2、F3、F4、F7、L0、L1、L4
	ECS	ECS-.327-CDX-1082	80	32768	1.5	4	0.4103	F0、F1、F2、F3、F4、F7、H7、L0、L1、L4
	ABRACON	ABS06W-32.768kHz	110 <sup>(4)</sup>	32768	2	3	0.4663	F0、F1、F2、F3、F4、F7、H7、L0、L1、L4
	京セラ	ST2012SB32768A0	80	32768	1.3	5	0.5384	F0、F1、F2、F3、F4、F7、L0、L1、L4
	リバーエレテック	TFX03/TFX03L	90	32768	1	5	0.5494	F0、F1、F2、F3、F4、F7、L0、L1、L4
	MicroCrystal	CM8V-T1A	75	32768	1.1	9	1.2972	F0、F3、F4_g2、F7、L0、L4
	京セラ	ST3215SB32768E0	80	32768	1.3	9	1.4391	F0、F3、F4_g2、F7、L0、L4
	日本電波工業	NX2012SA - EXS00A- MU00524	80	32768	1.3	7	0.9345	F0、F1、F3、F4_g2、F7、L0、L4
	日本電波工業	NX2012SA - EXS00A- MU00528	80	32768	1.3	12.5	2.5833	F0、F3、F7、L0、L4
	セイコーインスツル	SC-20S	70	32768	1.5 <sup>(3)</sup>	12.5	2.3263	F0、F3、F7、H7、L0、L4



表 7. STM32 マイクロコントローラに組み込まれている LSE オシレータの推奨水晶発振子 (続き)

パッケージ	メーカー	クォーツ参照 / 部品番号	最大 ESR (kΩ)	周波数 (Hz)	C <sub>0</sub> (pF)	C <sub>L</sub> (pF)	G <sub>m_crit_max</sub> (μA/V)	STM32 シリーズの適合性 <sup>(1)(2)</sup>
3.2 x 1.5 mm	ABRACON	ABS07-120-32.768KHz-T	60	32768	1,2	6	0,5274	F0、F1、F2、F3、F4、F7、L0、L4、L1
	ABRACON	ABS07W-32.768kHz	60	32768	1.3	3	0.1881	F0、F1、F2、F3、F4、F7、H7、L0、L1、L4
	ECS	ECS-.327-6-34RR	40	32768	1.6	6	0.3917	F0、F1、F2、F3、F4、F7、H7、L0、L1、L4
	エプソン	FC135R	50	32768	1,1	6	0,4274	F0、F1、F2、F3、F4、F7、L0、L1、L4
	エプソン	FC135	70	32768	1	6	0,5816	F0、F1、F2、F3、F4、F7、L0、L1、L4
	京セラ	ST3215SB32768A0	70	32768	0,9	5	0,4132	F0、F1、F2、F3、F4、F7、L0、L1、L4
	京セラ	ST3215SB32768E0	70	32768	0,9	9	1,1633	F0、F3、F4_g2、F7、L0、L4
	MicroCrystal	CM7V-T1A	50	32768	1,2	7	0,5701	F0、F1、F2、F3、F4、F7、L0、L1、L4
	日本電波工業	NX3215SA - EXS00A-MU00525	50	32768	1	6	0,4154	F0、F1、F2、F3、F4、F7、L0、L1、L4
	日本電波工業	NX3215SA - EXS00A-MU00523	50	32768	1	7	0,5426	F0、F1、F2、F3、F4、F7、L0、L1、L4
	日本電波工業	NX3215SA - EXS00A-MU00526	70	32768	1	12,5	2,1631	F0、F3、F7、L0、L1、L4
	シチズン時計	CM315D	50	32768	1,2 <sup>(3)</sup>	4	0.2292	F0、F1、F2、F3、F4、F7、H7、L0、L1、L4
	シチズン時計	CM315DL、CM315E、CM315G	50	32768	1,2 <sup>(3)</sup>	6	0.4395	F0、F1、F2、F3、F4、F7、H7、L0、L1、L4
	リバーエレテック	TFX02	70	32768	1	7	0,7596	F0、F1、F3、F4_g2、F7、L0、L4
	セイコーインスツル	SC-32S	70	32768	1,3 <sup>(3)</sup>	12,5	2.2604	F0、F3、F7、H7、L0、L4
7.9 x 3.7 mm	シチズン時計	CM200C	50	32768	1,35 <sup>(3)</sup>	6	0.4580	F0、F1、F2、F3、F4、F7、H7、L0、L1、L4
8.0 x 3.8 mm	エプソン	MC306	50	32768	0,9	6	0,4036	F0、F1、F2、F3、F4、F7、L0、L1、L4
	ECS	ECS-.327-6-17X-TR	50	32768	1.35	6	0.4580	F0、F1、F2、F3、F4、F7、H7、L0、L1、L4
	エプソン	MC306	50	32768	0,9	12,5	1,5223	F0、F3、F7、L0、L4
	ABRACON	ABS26	50	32768	1,35	12,5	1,6263	F0、F3、F7、L0、L4

1. F4\_g1 : STM32F4 シリーズ (LSE ジェネレーション 1) は、相互コンダクタンスを変更できない LSE オシレータを搭載している STM32F401/405/ 407/427/429xx の各 MCU に対応します。
2. F4\_g2 : STM32F4 シリーズ (LSE ジェネレーション 2) は、静的に相互コンダクタンスを変更可能な LSE オシレータを搭載している STM32F411/446/469/479xx の各 MCU に対応します。
3. 指定されていないため、最悪値を示しています。
4. 40 ~ 105 °C の温度範囲で指定されている値。



## 6 STM8AF/AL/S マイクロコントローラの推奨発振子

### 6.1 推奨クリスタル・オシレータの部品番号

表 8. 京セラ適合クリスタル（網羅的なリストではありません）

部品番号	周波数	ESR	C <sub>L</sub>	励振レベル (DL)
CX5032GA08000H0QSWZZ	8 MHz	最大 300 Ω	12 pF	最大 500 μW
CX5032GA16000H0QSWZZ	16 MHz	最大 100 Ω	12 pF	最大 300 μW
CX8045GA08000H0QSWZZ	8 MHz	最大 200 Ω	12 pF	最大 500 μW
CX8045GA16000H0QSWZZ	16 MHz	最大 50 Ω	12 pF	最大 300 μW

表 9. 日本電波工業適合クリスタル（網羅的なリストではありません）

部品番号	周波数	ESR	C <sub>L</sub>	励振レベル (DL)
NX3225GD EXS00A-CG04874	8 MHz	最大 500 Ω	8 pF	最大 200 μW

### 6.2 推奨セラミック発振子の部品番号

表 10 と表 11 は、村田製作所から STM8A マイクロコントローラ向けに提供および認定されている推奨 CERALOCK® セラミック発振子のリファレンスを示します。

表 10. 推奨条件（コンシューマ向け）

部品番号	周波数	C <sub>L</sub>
CSTCR4M00G55B-R0	4 MHz	C <sub>L1</sub> = C <sub>L2</sub> = 39 pF
CSTCE8M00G55A-R0	8 MHz	C <sub>L1</sub> = C <sub>L2</sub> = 33 pF
CSTCE16M0V53-R0	16 MHz	C <sub>L1</sub> = C <sub>L2</sub> = 15 pF

表 11. 推奨条件（CAN-BUS 向け）

部品番号	周波数	C <sub>L</sub>
CSTCR4M00G15C**-R0	4 MHz	C <sub>L1</sub> = C <sub>L2</sub> = 39 pF
CSTCR8M00G15C**-R0	8 MHz	C <sub>L1</sub> = C <sub>L2</sub> = 33 pF
CSTCE16M0V13C**-R0	16 MHz	C <sub>L1</sub> = C <sub>L2</sub> = 15 pF

## 7 オシレータの安定性を高めるためのヒント

### 7.1 PCB 設計ガイドライン

32 kHz クリスタル・オシレータは、超低電力オシレータ（相互コンダクタンスが数  $\mu\text{A/V}$ ）です。オシレータの相互コンダクタンスが小さいと、出力ダイナミクスに影響を及ぼします。相互コンダクタンスの値が小さいほど、生じる発振電流が小さいためです。その結果、オシレータ出力のピークピーク電圧が低くなります（数十～数百 mV）。

オシレータの理想的な動作を実現するために信号対ノイズ比（SNR）を許容できる制限値未満に維持することは、ノイズに対する感度を下げするためにオシレータの PCB 設計により厳しい制約を課することを意味します。

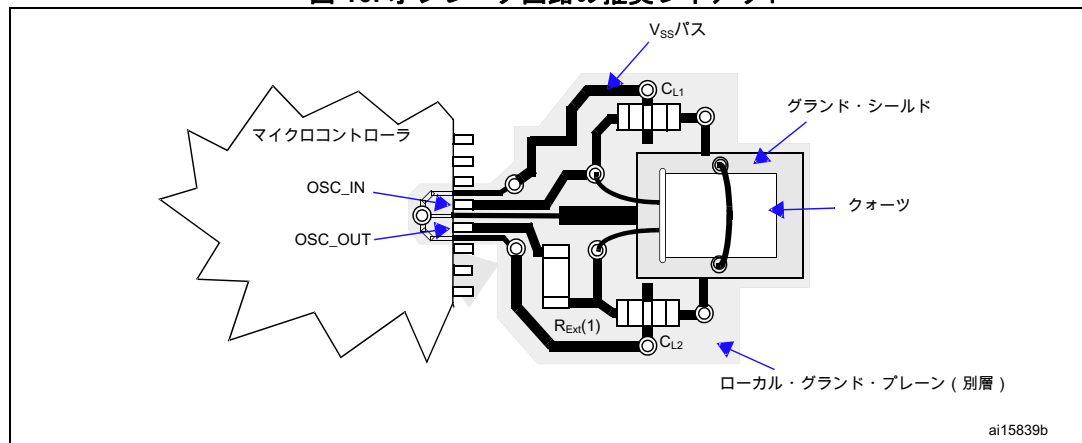
したがって、PCB を設計するときは、できる限り SNR を小さくするように十分に注意する必要があります。オシレータの PCB を設計するときに注意すべきことのリストを次に示します（これがすべてではありません）。

- 浮遊容量および浮遊インダクタンスの値が大きくなると、制御不能な発振につながる可能性があります（たとえば、オシレータが高調波の周波数で共振する可能性があります）ため、これは避ける必要があります。浮遊容量を減らすと、起動時間も短縮されて、発振周波数の安定性が高くなります。
- 高周波数ノイズ基板全体への伝播を減らすには、ノイズの少ないクリスタル発振を実現するために安定した電源を備える必要があります。これは、適切なサイズのデカップリングコンデンサを使用して、マイクロコントローラに電力を供給する必要があることを意味します。
- クリスタルはできる限りマイクロコントローラの近くに実装し、配線を短くして誘導的および容量的な影響を抑える必要があります。これらの接続の周囲のグラウンドに接続されたガード・リングは、発振の安定性に影響を及ぼす可能性がある不要なノイズを取り込むのを避けるために不可欠です。

長い配線 / パスは特定の周波数スペクトルのアンテナとして動作し、EMI 認定試験で発振問題が生じる可能性があります。図 10 : および図 13 : オシレータ周辺の信号を参照してください。

- 高周波数信号を伝達するパスは、オシレータのパスおよび部品から離して配線する必要があります。図 10 : を参照してください。
- オシレータの PCB は、アプリケーションの PCB のグラウンド・プレーンとは区別された、下層にある専用のグラウンド・プレーンを使用する必要があります。オシレータのグラウンド・プレーンは、最も近いマイクロコントローラのグラウンドに接続する必要があります。これによって、オシレータの部品とアプリケーションの他の部品の間の干渉（パス間のクロストークなど）を防ぎます。金属パッケージ内のクリスタルを使用する場合は、それをオシレータのグラウンドに接続してはいけません。図 10 : オシレータ回路の推奨レイアウト、図 11 : 、および図 12 : GND プレーンを参照してください。
- リーク電流によって、起動時間が長くなったり、オシレータが起動に失敗する可能性さえあります。マイクロコントローラを厳しい環境（高水分 / 混合比）で動作させる場合、外部コーティングを推奨します。

図 10. オシレータ回路の推奨レイアウト

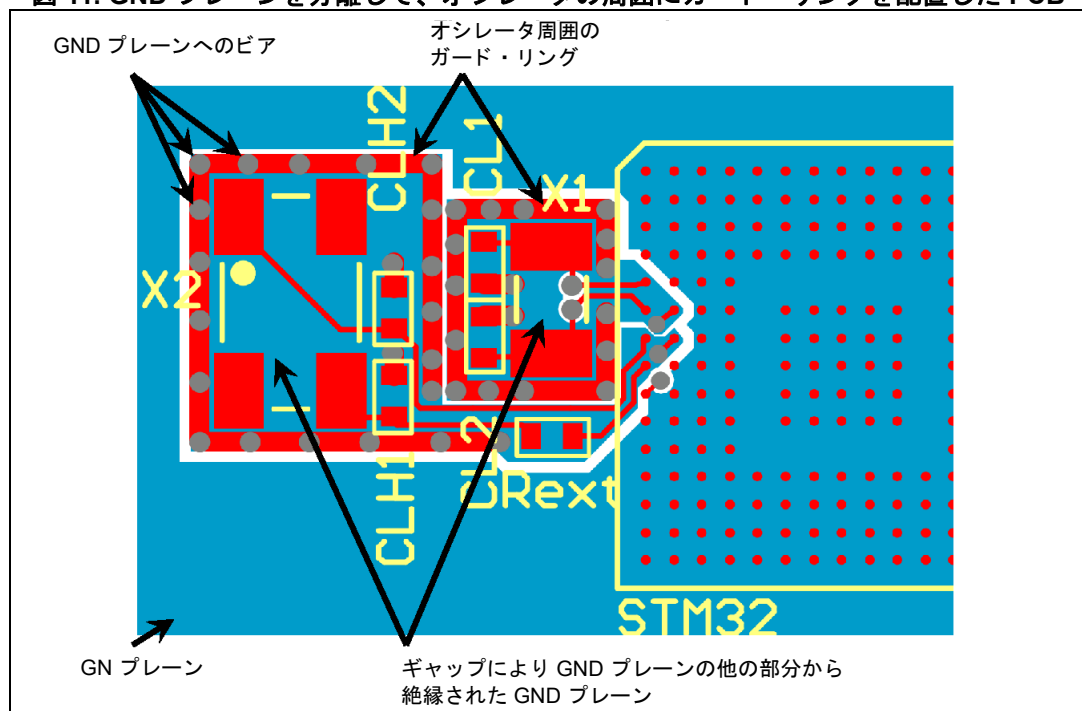


**警告：** 起動の問題につながる可能性がある極端な量の水分、ほこり、湿気、および温度から保護するために、図 10 に示す PCB 領域、特に LSE クォーツ、CL1、CL2、および OSC\_IN パッドと OSC\_OUT パッドへのパスにコンフォーマル・コーティングを施すことを強く推奨します。

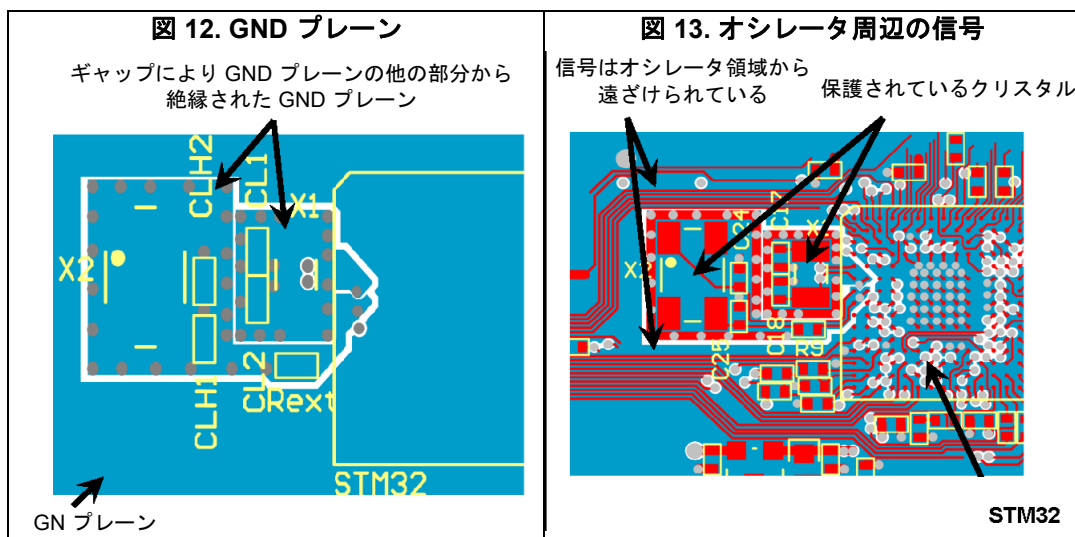
## 7.2 PCB 設計例

### 例 1

図 11. GND プレーンを分離して、オシレータの周囲にガード・リングを配置した PCB





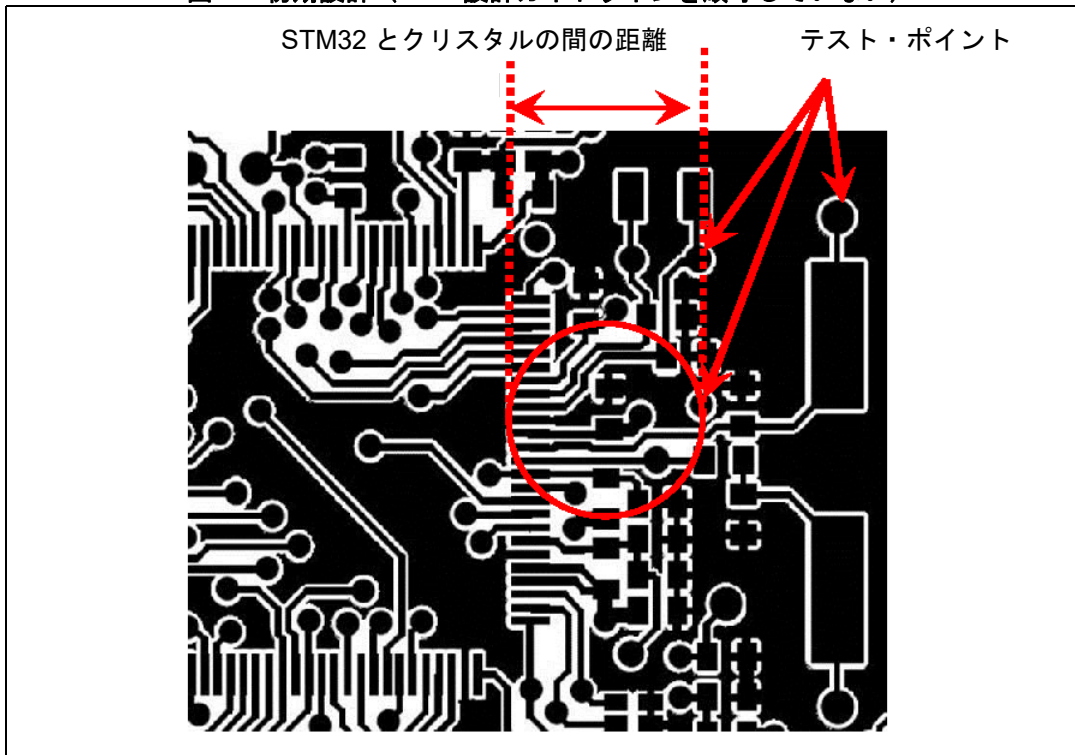


## 例 2

図 14 は、次の理由によりセクション 7.1 のガイドラインを順守していない PCB の例です。

- オシレータ部品の周囲にグラウンド・プレーンがない
- パスが長すぎる
- オシレータの容量間に対称性がない
- パス間のクロストーク / カップリングが大きい
- テスト・ポイントが多すぎる

図 14. 初期設計 (PCB 設計ガイドラインを順守していない)



この PCB 設計を、次のガイドラインに従って改善しました（図 15 を参照）。

- オシレータの周囲に、GND プレーンに接続されているガード・リングを配置する
- オシレータの容量間に対称性を持たせる
- テスト・ポイントの数を減らす
- パス間のカップリングを解消

図 15. 最終設計（設計ガイドラインを順守している）

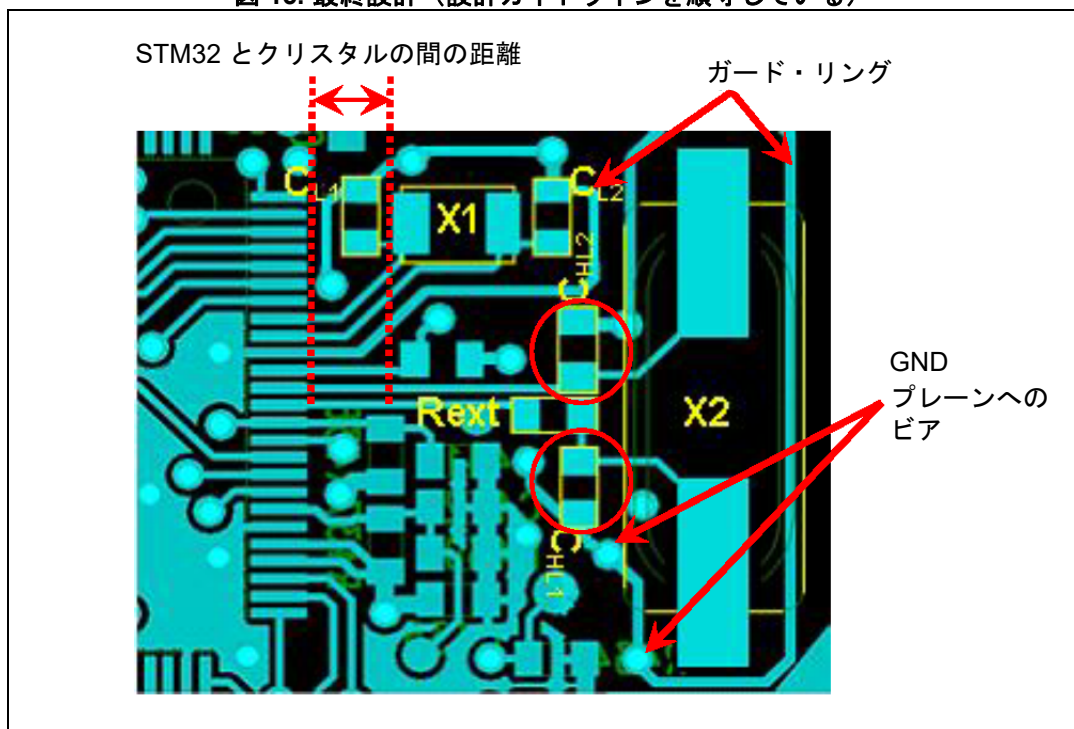


図 16. GND プレーン

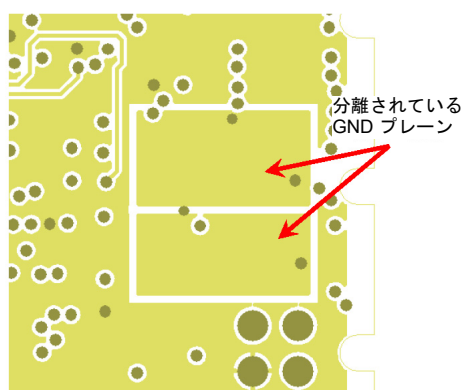
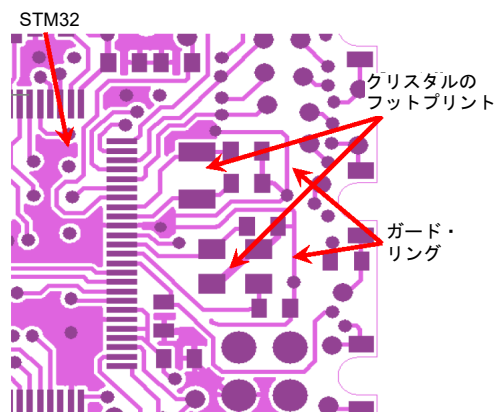


図 17. 最上位層ビュー

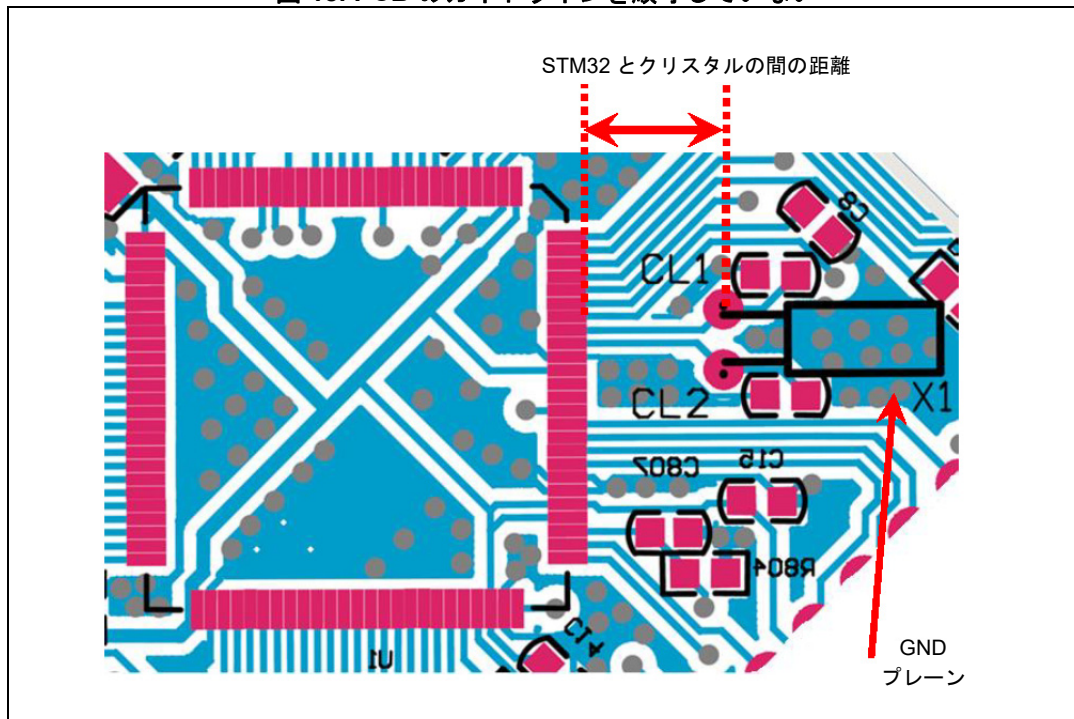


## 例 3

図 18 は、[セクション 7.1](#) のガイドラインを順守していない PCB のもう 1 つの例です (おそらく EMC 試験には合格しません)。

- オシレータの部品の周囲にガード・リングがない
- パスが長い

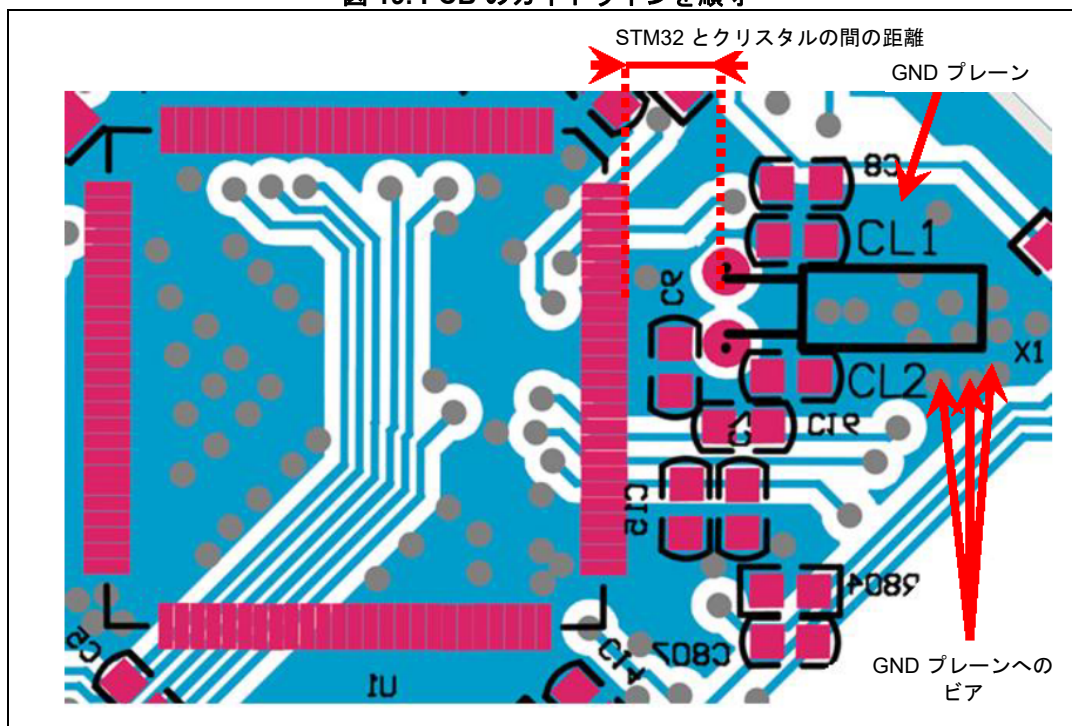
図 18. PCB のガイドラインを順守していない



このレイアウトを、次のガイドラインに沿って改善しました（図 19 を参照）。おそらく EMC 試験に合格します。

- オシレータ部品の周囲にグランド・プレーン
- STM32 を短いパスでオシレータに接続
- オシレータの容量間に対称性を持たせる

図 19. PCB のガイドラインを順守



## 7.3 はんだ付けのガイドライン

一般に、はんだ付けは、特に低周波数クリスタルの場合、繊細なプロセスです。そのようなプロセスがクリスタルのパラメータに及ぼす影響を軽減するために、ユーザは次のことを考慮する必要があります。

- 最大定格を超える温度にさらされると、クリスタルは損傷し、その ESR 値が影響を受ける可能性があります。クリスタルのデータシートで正しいリフロー温度曲線を参照してください（提供されていない場合はメーカーに問い合わせてください）。
- 最大性能を得るために、組立終了後に基板上的のフラックス残渣を取り除いて PCB を洗浄することを推奨します（超低電力アプリケーションで「洗浄不要」製品を使用する場合でも）。

## 8 参照文献

- [1]  
E. Vittoz High-Performance Crystal Oscillator Circuits: Theory and Application IEEE Journal of solid State Circuits、Vol 23、No 3、1988 年 6 月、774 ~ 783 ページ

## 9 よくある質問

### 質問

クリスタルが特定の STM32 MCU と適合するかどうかは、どうすれば知ることができますか。

### 回答

[セクション 4：適切なクリスタルと外部部品を選択するためのガイドライン](#)を参照してください。

### 質問

STM32 MCU との適合性はありますが[表 7：STM32 マイクロコントローラに組み込まれている LSE オシレータの推奨水晶発振子](#)には記載されていない 32.768 kHz のクリスタルを使用することはできますか。

### 回答

はい、使用できます。[表 7](#) は網羅的なリストではなく、参考のために一部のクリスタル・メーカー、フットプリント・サイズ、およびクリスタル負荷容量を選んで示したものです。

### 質問

較正しないで正確なクロックを得るために、周波数 32.768 kHz、超低ドリフト、高精度であることが必須のアプリケーションでは、どのようなクリスタル負荷容量 ( $C_L$ ) を選択する必要がありますか。

### 回答

まず、クリスタルが選択した STM32 LSE に適合することを確認する必要があります。その上で、低可変幅、すなわち  $C_L \geq 6$  pF のクリスタルを使用することを強く推奨します。

- 7 pF は、低ドリフトおよび中程度の消費電力のバランスが取れた適切な値です。
- 9 pF および 12.5 pF は、ノイズの多い環境で使用できますが、消費電力に影響を与えます。



## 10 結論

最も重要なパラメータはオシレータのゲイン・マージンであり、これによってオシレータが起動するかどうかが決まります。設計フェーズの開始時にこのパラメータを計算して、アプリケーションに適したクリスタルを選択する必要があります。2 番目に重要なパラメータは外部負荷コンデンサの値であり、クリスタルの  $C_L$  の仕様（メーカーによって指定）に従って選択する必要があります。これによってクリスタルの周波数精度が決まります。3 番目に重要なパラメータは励振レベルの制限に使用する外部抵抗の値です。ただし、32 kHz オシレータ部品で外部抵抗を使用することは推奨しません。

関与する変数の数が多く、予想外の挙動を避けるため、ユーザは実験フェーズで、動作時に使用する特性とまったく同じ特性を持つ部品を選択し、同じオシレータ・レイアウトおよび同じ環境で動作させる必要があります。

最近では、MEMS オシレータが市場で急成長しています。これは、消費電力が削減され、サイズが小さく（外部負荷コンデンサなどの追加受動部品は不要）、コストに競争力があるので、発振子ベースのオシレータの代替品として優れています。この種のオシレータは、STM32F1 および STM32L1 シリーズを除くすべての STM32 マイクロコントローラに適合します。MEMS オシレータを STM32 に組み込まれているオシレータと組み合わせた場合、後者のオシレータはバイパス・モードで設定する必要があります。

## 11 改版履歴

表 12. 文書改版履歴

日付	版	変更内容
2009 年 1 月 20 日	1	初版発行
2009 年 11 月 10 日	2	<p>セクション 3.5.2 : 励振レベルの別の測定手法で DL の式を修正。</p> <p>Section 6: Some recommended crystals for STM32 microcontrollers のすべての表にパッケージ列を追加。</p> <p>セクション 5.1 : STM32 に適合するハイスピード発振子とセクション 5.2 : STM32 に適合するロースピード発振子の推奨部品番号を更新。</p> <p>セクション 5.2 : STM32 に適合するロースピード発振子を追加。</p>
2010 年 4 月 27 日	3	Section 7: Some recommended crystals for STM8A/S microcontrollers を追加。
2010 年 11 月 25 日	4	<p>セクション 5.2 : STM32 に適合するロースピード発振子を更新 : Table 7: Recommendable condition (for consumer) と Table 8: Recommendable condition (for CAN bus) を削除。Table 8: Recommendable conditions (for consumer); を追加。村田製作所の発振子のリンクを更新。</p> <p>セクション 5.2 : STM32 に適合するロースピード発振子を更新 : Table 13: EPSON TOYOCOM, Table 14: JFVNY®, および Table 15: KDS を削除。Table 6: Recommendable crystals NEW LANDSCAPE TABLE を追加。</p> <p>図 10 の後に警告 : を追加。</p>
2011 年 3 月 30 日	5	<p>セクション 5.2 : STM32 に適合するロースピード発振子 : 「STM32」を「STM8」で更新。</p> <p>表 10 : 推奨条件 (コンシューマ向け) : セラミック発振子の部品番号「CSTSE16M0G55A-R0」を「CSTCE16M0V53-R0」で置換。</p>
2012 年 7 月 17 日	6	ドキュメント全体を STM 32 デバイスに制限。
2014 年 9 月 19 日	7	<p>ドキュメント全体を通じて STM32F1 を STM32 に変更。</p> <p>表 1 : 対象とする製品に STM8AL シリーズを追加。</p> <p>セクション 5.2 : STM32 に適合するロースピード発振子の STM8 を STM32 に置換して、ハイパーリンクを更新。</p> <p>セクション 7 : オシレータの安定性を高めるためのヒントを追加。</p> <p>セクション Some PCB hints を削除。</p>
2014 年 12 月 19 日	8	<p>セクション 2 : オシレータの理論を更新。</p> <p>セクション 3 : ピアース・オシレータ設計を更新。セクション名「Gain margin of the oscillator」をセクション 3.4 : オシレータの相互コンダクタンスに変更し、内容を更新。セクション 3.6 : 起動時間を更新。セクション 3.7 : クリスタルの可変幅を更新。</p> <p>セクション 4 : 適切なクリスタルと外部部品を選択するためのガイドラインを更新。</p> <p>セクション 5 : STM32 マイクロコントローラの推奨発振子を更新。</p> <p>セクション 8 : 参考文献を追加。</p> <p>セクション 10 : 結論を更新。</p>



表 12. 文書改版履歴（続き）

日付	版	変更内容
2015 年 2 月 19 日	9	<p>セクション 2.3 : 負性抵抗オシレータの原理を更新して、STM8 および STM32 マイクロコントローラの負性抵抗とクリスタルの ESR の比を指定。</p> <p>セクション 3.8 : 安全係数を追加。</p> <p>セクション 4.2 : STM32 適合クリスタルを選択する詳細なステップに「発振ループの安全係数のチェック」のステップを追加。ステップ 2 の注をステップ 3 に移動して更新。</p> <p>名前を表 7 : STM32 マイクロコントローラに組み込まれている LSE オシレータの推奨水晶発振子に変更。</p>
2015 年 8 月 17 日	10	<p>図 9 : ロースピード水晶発振子の分類を更新。</p> <p>セクション 4.1 : STM32 マイクロコントローラに組み込まれるロースピード・オシレータに注意 / 注を追加。</p> <p>表 5 : STM32 マイクロコントローラに組み込まれている LSE オシレータに STM32F7、STM32F446xx、STM32F469/479xx、および STM32L4 の各マイクロコントローラを追加。</p> <p>表 6 : STM32 マイクロコントローラに組み込まれている HSE オシレータに STM32F411xx、STM32F446xx、STM32F469/479xx、および STM32L4xx の各マイクロコントローラを追加。</p> <p>表 7 : STM32 マイクロコントローラに組み込まれている LSE オシレータの推奨水晶発振子を更新。</p> <p>セクション 9 : よくある質問を追加。</p>
2017 年 5 月 31 日	11	<p>ドキュメント・タイトル、はじめに、セクション 9 : よくある質問、セクション 10 : 結論、セクション 6 : STM8AF/AL/S マイクロコントローラの推奨発振子、およびドキュメント全体のテキストのリビジョンを更新。</p> <p>表 5:STM32 マイクロコントローラに組み込まれている LSE オシレータ、表 6: STM32 マイクロコントローラに組み込まれている HSE オシレータ、および表 7 : STM32 マイクロコントローラに組み込まれている LSE オシレータの推奨水晶発振子を更新。</p> <p>表 8 : 京セラ適合クリスタル（網羅的なリストではありません）の見出しを更新し、表 9 : 日本電波工業適合クリスタル（網羅的なリストではありません）を追加。</p> <p>図 9 : ロースピード水晶発振子の分類を更新。</p>

表 13. 日本語版文書改版履歴

日付	版	変更内容
2018 年 6 月	1	日本語版 初版発行

**重要なお知らせ（よくお読み下さい）**

STMicroelectronics NV およびその子会社（以下、ST）は、ST製品及び本書の内容をいつでも予告なく変更、修正、改善、改定及び改良する権利を留保します。購入される方は、発注前にST製品に関する最新の関連情報を必ず入手してください。ST製品は、注文請書発行時点で有効なSTの販売条件に従って販売されます。

ST製品の選択並びに使用については購入される方が全ての責任を負うものとします。購入される方の製品上の操作や設計に関してSTは一切の責任を負いません。

明示又は黙示を問わず、STは本書においていかなる知的財産権の実施権も許諾致しません。

本書で説明されている情報とは異なる条件でST製品が再販された場合、その製品についてSTが与えたいかなる保証も無効となります。

STおよびSTロゴはSTMicroelectronicsの商標です。その他の製品またはサービスの名称は、それぞれの所有者に帰属します。

本書の情報は本書の以前のバージョンで提供された全ての情報に優先し、これに代わるものです。

この資料は、STMicroelectronics NV並びにその子会社(以下ST)が英文で記述した資料（以下、「正規英語版資料」）を、皆様のご理解の一助として頂くためにSTマイクロエレクトロニクス㈱が英文から和文へ翻訳して作成したものです。この資料は現行の正規英語版資料の近時の更新に対応していない場合があります。この資料は、あくまでも正規英語版資料をご理解頂くための補助的参考資料のみにご利用下さい。この資料で説明される製品のご検討及びご採用にあたりましては、必ず最新の正規英語版資料を事前にご確認下さい。ST及びSTマイクロエレクトロニクス㈱は、現行の正規英語版資料の更新により製品に関する最新の情報を提供しているにも関わらず、当該英語版資料に対応した更新がなされていないこの資料の情報に基づいて発生した問題や障害などにつきましては如何なる責任も負いません。

© 2018 STMicroelectronics - All rights reserved