

TB9M003FG

内部発振器を使用したモーター制御の精度改善事例

本資料について

- 対象と目的

本資料では、SmartMCD™ TB9M003FG の内部発振器の精度によるシステム制御への影響をアプリケーション SW（ソフトウェア）で調整する方法について、モーター制御を事例として紹介します。特にモーター回転数が重要な要件となるシステムを構築する際に、参考になれば幸いです。

また、本資料では弊社の提供するリファレンス SW^(注) をすでにご活用いただいていることを前提に説明を進めます。

- 想定した対象者

本資料は、TB9M003FG と組み合わせて当社が提供するリファレンス SW を活用し、上記のモーター制御システムを開発するユーザーを対象としています。

(注) 当社営業窓口までお問い合わせください

東芝デバイス&ストレージ株式会社

目次

本資料について	1
目次	2
1. 本資料の意図と狙い	5
2. 内部発振器の周波数誤差によるモーター制御への影響	5
2.1. 内部発振器の周波数誤差を発生させた状態でのモーター制御動作の確認	5
2.1.1. 内部発振器の周波数誤差 (±5%) 発生回路	5
2.1.2. 周波数が±5%変動した場合のモーター制御の評価	5
2.1.3. 評価 1-a (速度指令値に対するモーター回転数への影響) の結果	6
2.1.4. 評価 1-b (PWM 周期、VE 処理+VE 割り込み処理時間、デッドタイムへの影響) の結果	7
3. 内部発振器の周波数誤差を補正するモーター制御の事例	9
3.1. 内部発振器の周波数誤差を認識する方法 (SW1 の事例)	9
3.1.1. 内部発振器周波数の測定方法 (LIN 通信)	10
3.1.2. 誤差測定を実施する際の注意点など (LIN 通信/スルーレート)	11
3.1.3. LIN 通信の測定環境 (スルーレート) への対応案	12
3.1.4. パルスジェネレーターを使用した誤差測定の実験	13
3.1.5. パルスジェネレーターを使用した誤差測定の実験結果	14
3.1.6. LIN 通信時のデータ波形と実験結果の考察	15
3.1.7. SW1 のプログラム例 (送受信のための割り込みハンドラー設定および割り込みコールバックの設定は省略)	16
3.2. 内部発振器の周波数誤差に関する情報のデータ記録 (SW2 の事例)	17
3.2.1. SW2 のプログラム例	18
3.3. 内部発振器の周波数誤差に関する情報からリファレンス SW を補正する (SW3 の事例)	19
3.3.1. 発振器の周波数誤差補正前の状態	21
3.3.2. 発振器の周波数誤差補正後の状態	22
3.3.3. SW3 のプログラム例	23
4. 誤差補正 SW によるモーター制御の評価事例	24
4.1. 内部発振器の周波数誤差を補正するモーター制御 SW の動作確認	24
4.1.1. 周波数誤差発生回路を用いた誤差補正付きモーター制御の評価	24
4.1.2. 評価 3a の実験結果	25
4.1.3. 評価 3b の実験結果	27
4.1.4. 評価 3-b 実験結果まとめ	28
5. まとめ	30
記載内容の留意点	31
使用上のご注意およびお願い事項	31
使用上の注意事項	31
使用上の留意点	32

製品取り扱い上のお願い33

目次

図 2.1	周波数誤差 (±5%) 発生回路	5
図 2.2	評価 1 の実験概念	5
図 2.3	評価 1-a の実験結果 (1)	6
図 2.4	評価 1-a の実験結果 (2)	6
図 2.5	評価 1-b の実験結果 (1)	7
図 2.6	評価 1-b の実験結果 (2)	8
図 3.1	発振器の周波数誤差補正付きモーター制御 SW の概念	9
図 3.2	レスポンス受信と割り込み発行の関係	10
図 3.3	自動ボーレートモード用 23 ビット カウンターの動作説明	10
図 3.4	カウンター値 23bit	11
図 3.5	LIN 通信の測定環境 (概念)	12
図 3.6	LIN 通信信号 (スルーレート発生)	12
図 3.7	スルーレートへの対策案	13
図 3.8	評価 2 の実験概念	13
図 3.9	評価 2 の実験環境における LIN 通信データ波形	15
図 3.10	The timing chart of CPU, PMD, and MADC operations when using VE (HLD User Manual から抜粋)	20
図 3.11	内部発振器の周波数誤差による各タイミングへの影響	21
図 3.12	内部発振器の周波数誤差補正後の各タイミング	22
図 4.1	評価 3 の実験概念	24
図 4.2	評価 3-a の実験結果(1)	25
図 4.3	評価 3-a の実験結果(2)	26
図 4.4	評価 3-b の実験結果(1)	27
図 4.5	評価 3-b の実験結果(2)	28
図 4.6	PWM 周期と HW 実行処理時間の関係	29
図 4.7	MADC 単発コマンドトリガーモード 測定時間タイミング	29

表目次

表 2.1	周波数誤差±5%条件下での結果	8
表 3.1	評価 2 の実験結果 (コマンダーボーレート : 19.2kbps)	14
表 3.2	評価 2 の実験結果 (コマンダーボーレート : 4.8kbps)	14
表 4.1	評価 3-b の実験結果	28

1. 本資料の意図と狙い

本アプリケーションノートでは、TB9M003FG を採用してモーター制御システムを開発する際に、外部発振子を実装せず、内部発振器を用いて実現する方法をご紹介します。

内部発振器を用いてモーター制御を実現する際に課題となる発振周波数精度の改善方法を以下の観点から、参考事例を交えて説明します。

- ・ 発振周波数精度 ($\pm 5\%$) による誤差をユーザー製品の製造工程で測定する方法
- ・ 測定された結果を活用してモーター制御プログラムを補正する方法

本アプリケーションノートが、より良いシステム構築の一助となれば幸いです。

2. 内部発振器の周波数誤差によるモーター制御への影響

この章では、内部発振器の周波数精度 ($\pm 5\%$) がモーター制御に与える影響について実験結果をもとに理解します。

2.1. 内部発振器の周波数誤差を発生させた状態でのモーター制御動作の確認

2.1.1. 内部発振器の周波数誤差 ($\pm 5\%$) 発生回路

本実験では、内部発振器の周波数誤差を疑似的に発生させるため、図 2.1 のように外部クロックを選択し、外部からパルスジェネレーターの信号を入力します。

外部クロックとして 16MHz を入力し、CPUCLK、SYSCLK、VECLK の周波数が内部発振器選択時と同じになるようにクロック設定用レジスタの値 (CLKSCCR[2]:1) を設定します。

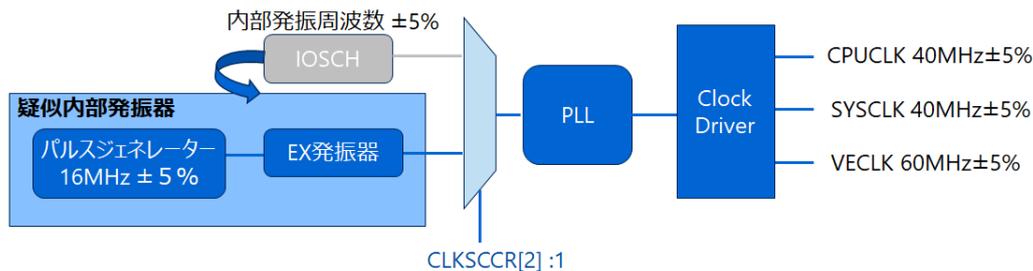


図 2.1 周波数誤差 ($\pm 5\%$) 発生回路

2.1.2. 周波数が $\pm 5\%$ 変動した場合のモーター制御の評価

図 2.2 は、評価 1 の概念図を示しています。

評価 1 では、モーター制御 SW としてリファレンス SW (motor_control_foc_ver1.0.0/LLD ver1.0.0) を使用し、内部発振器の周波数が $\pm 5\%$ で変動した場合に、どのような影響が生じるかを確認します。

- ・ 評価 1-a : リファレンス SW を使用し、速度指令値に対するモーター回転数への影響を確認します。
- ・ 評価 1-b : リファレンス SW を使用し、PWM 周期、VE (ベクトルエンジン) 処理+VE 割り込み処理時間、デッドタイムへの影響を確認します。

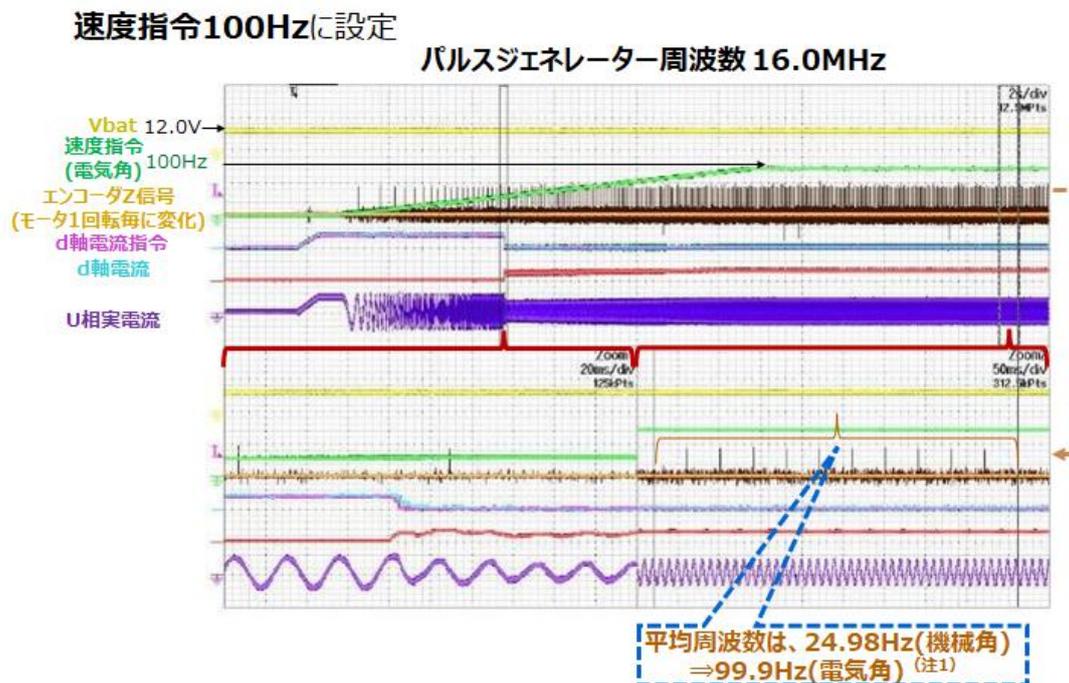
評価 1 (リファレンスソフトウェア)



図 2.2 評価 1 の実験概念

2.1.3. 評価 1-a (速度指令値に対するモーター回転数への影響) の結果

1. 標準条件：周波数に誤差がない場合



(注1)：今回、検証に使用したモーターは、極対数が4のモーターであることから、電気角=4×機械角である。

図 2.3 評価 1-a の実験結果 (1)

結果：

標準条件では、速度指令値 100Hz に対して、エンコーダー出力から計算されるモーター回転速度（電気角速度平均値）は、99.9Hz でありほぼ速度指令通りの値を示しました。

2. 誤差条件：周波数に誤差±5%がある場合

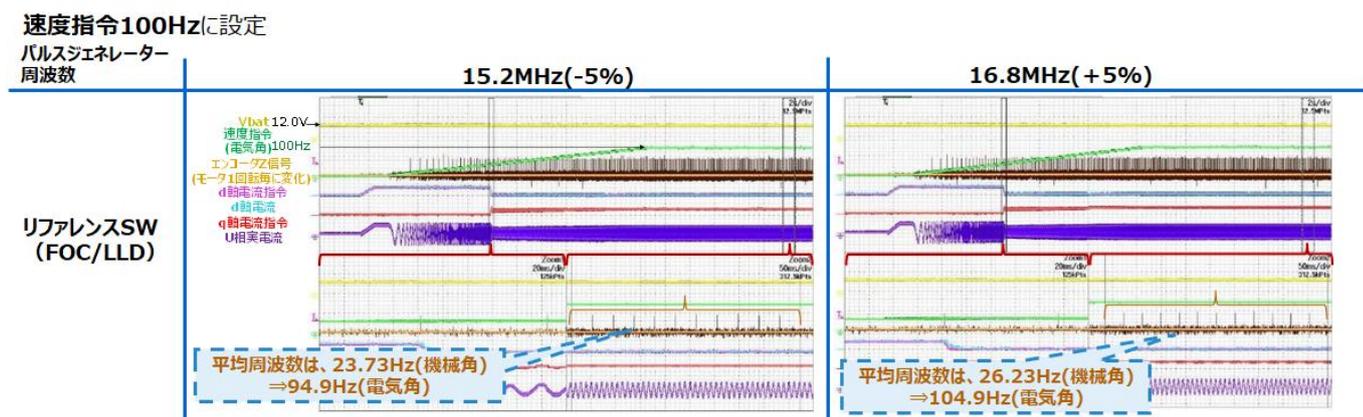


図 2.4 評価 1-a の実験結果 (2)

結果：

発振器の周波数誤差±5%を模擬した条件では、速度指令 100Hz に対してエンコーダー出力から計算されるモーター回転速度（電気角速度平均値）は、94.9Hz(-5%)、104.9Hz(+5%)となり、発振器の誤差に連動して±5%ずれる値を示しました。

2.1.4. 評価 1-b (PWM 周期、VE 処理+VE 割り込み処理時間、デッドタイムへの影響) の結果

1. 標準条件：周波数に誤差が無い場合

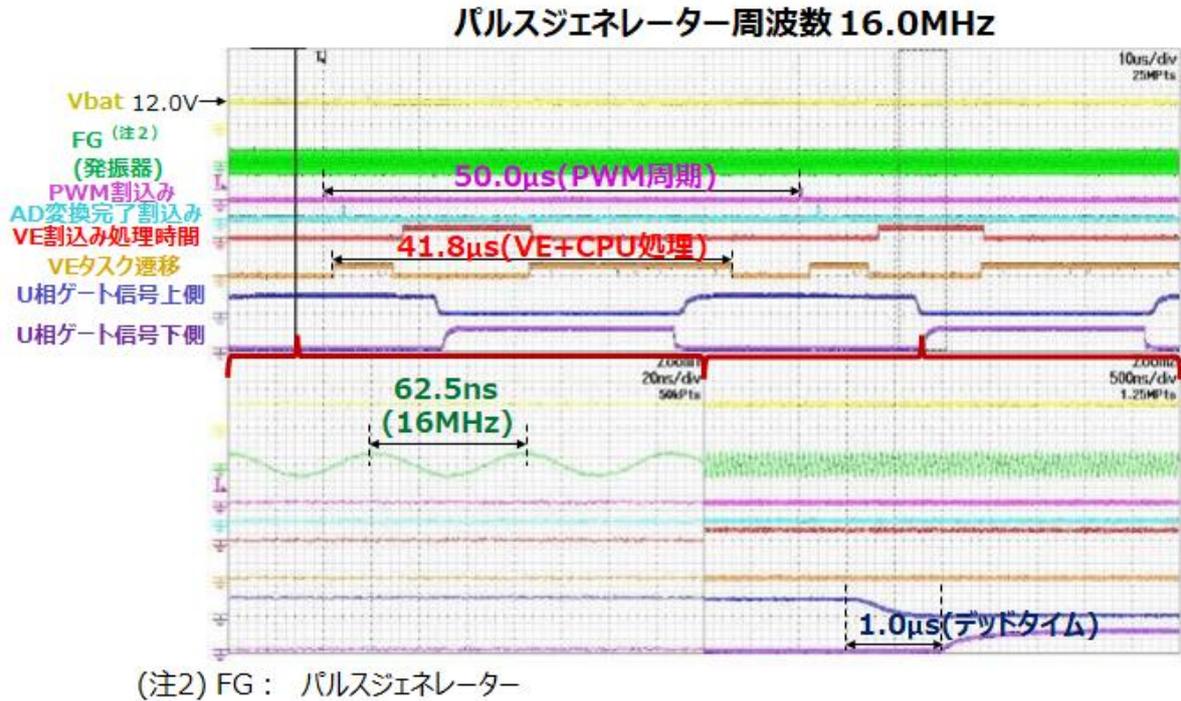


図 2.5 評価 1-b の実験結果 (1)

結果：

標準条件では、PWM 周期、制御処理時間、デッドタイムは以下の結果となります。

- ① PWM 周期：50.0µs
- ② VE 処理+VE 割り込み処理：41.8µs
- ③ デッドタイム：1.0µs

2. 誤差条件：周波数に誤差±5%がある場合

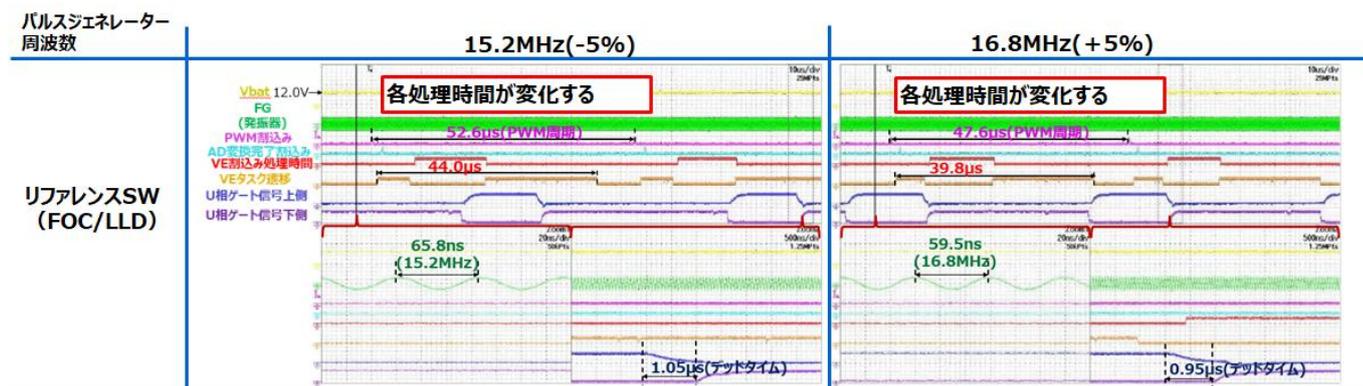


図 2.6 評価 1-b の実験結果 (2)

結果：

発振器の周波数誤差を±5%とした条件下では、誤差に連動して、表 2.1 に示すとおり PWM 周期、制御処理時間、デッドタイムは約±5%ずれを示しました。

表 2.1 周波数誤差±5%条件下での結果

発振器周波数	15.2MHz (-5%)	16MHz	16.8MHz (+5%)
PWM 周期	52.6µs (+5.2%)	50µs	47.6µs (-4.8%)
VE 処理+VE 割り込み処理時間	44µs (+5.3%)	41.8µs	39.8µs (-4.8%)
デッドタイム	1.05µs (+5%)	1.0µs	0.95µs (-5%)

3. 内部発振器の周波数誤差を補正するモーター制御の事例

この章では、内部発振器の周波数精度（±5%）による誤差があっても、モーターの回転速度を指令値通りに制御する方法の事例を紹介します。

図 3.1 は、内部発振器の周波数誤差を補正してモーター制御を行うための一般的な概念図です。

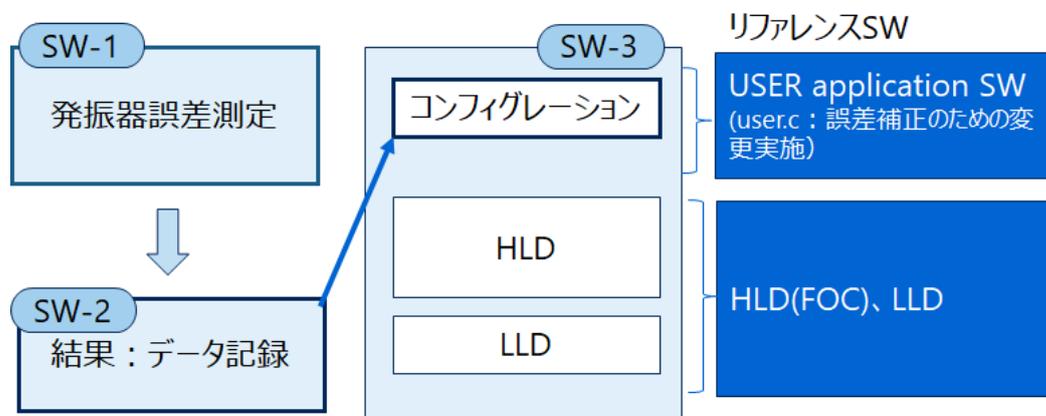


図 3.1 発振器の周波数誤差補正付きモーター制御 SW の概念

- ・ SW1：内部発振器の周波数誤差を認識するための SW
- ・ SW2：SW1 で認識した誤差情報をメモリーに格納する SW
- ・ SW3：SW2 で格納した誤差情報から誤差補正を実施し、モーター制御を行う SW（リファレンス SW を活用）

3.1. 内部発振器の周波数誤差を認識する方法（SW1 の事例）

この節では、内部発振器の周波数誤差を認識する方法を説明します。

内部発振器の周波数誤差を認識するためには、外部から「周波数が既知の信号」を入力し、デバイスの内部機能によって時間パラメーターとして測定し、期待値（既知の周波数）と比較して、どの程度ずれているかを計算する必要があります。

本製品が対象とするアプリケーションでは、モジュール間の情報伝達として使用する通信機能である LIN 通信、UART 通信、PWM 通信が、この「周波数が既知の信号」として挙げられます。

そこでこの節では、これらの通信機能の中から、LIN 通信を使用した事例を紹介します。

3.1.1. 内部発振器周波数の測定方法 (LIN 通信)

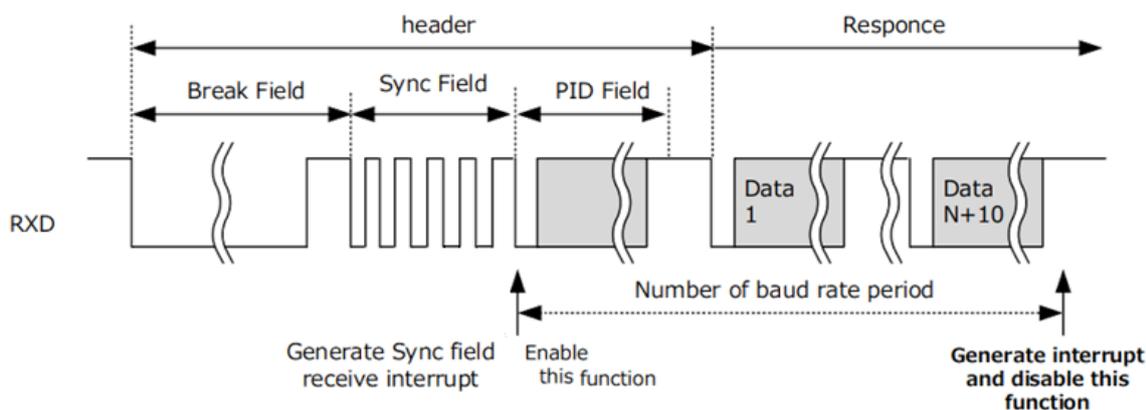


図 3.2 レスポンス受信と割り込み発行の関係
(TB9M003FG ユーザーマニュアル第 17 章より)

図 3.2 は、TB9M003FG ユーザーマニュアル (TB9M003FG_UM_J_Rev1.00) 第 17 章からの抜粋に補助線を加えたもので、LIN 通信の概要を示しています。LIN 通信を用いて内部発振器の周波数を測定するには、「LIN 通信の自動ボーレートモード」を用いて、同モードをサポートする「TB9M003FG の HW (ハードウェア) 機能」を利用します。

理論的には、Sync Field を含むコマンドからの 1 回の通信によって測定が可能です。ただし、コマンドのボーレートが安定していることが前提となります。

TB9M003FG には、「LIN 通信の自動ボーレートモード」用に図 3.4 に示すレジスタが用意されています。内部発振器の周波数誤差は、このレジスタ値を用いて計算できます。

自動ボーレートモードでは、Sync Field 受信時のコマンドボーレートを認識するために、Sync Field 受信ビットのパルス幅を 23 ビットカウンターで測定します。測定には内部 LINCLK^(注 3)を使用しています。

図 3.3 は、このカウンター動作の概要を示しています。

測定したカウント値はレジスタに格納されるため、この値から受信データ 8 ビット分の累積カウント値を取得できます。

(注 3) : LINCLK : LIN 制御回路用システムクロック

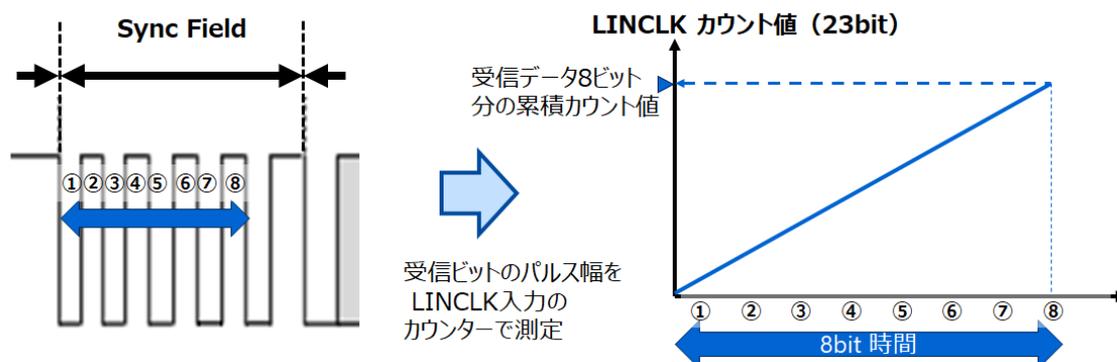


図 3.3 自動ボーレートモード用 23 ビット カウンターの動作説明



図 3.4 カウンター値 23bit

図 3.4 に示す 23 ビットのデータは、Sync Field 内の受信データ（8 ビット）に対する LINCLK のカウント数を表しています。したがって、事前に定義された期待値（23 ビットデータ）と測定値（23 ビットデータ）があれば、誤差を算出することができます。ただし、HW 構成上、カウント値の最下位ビットは丸められるため、有効なビット数は 22 ビットです。レジスターからはこの 22 ビットの値を読み出すことができます。また、このレジスター値には理論上、 $\pm 2 \times \text{LINCLK}$ 周期の誤差が含まれています。例えば LINCLK が 40MHz の場合、以下の測定誤差がカウント値に含まれます。

$$\pm 2 \times 25\text{ns} = \pm 50\text{ns} : \text{測定誤差}$$

3.1.2. 誤差測定を実施する際の注意点など（LIN 通信/スルーレート）

この節では、LIN 通信を応用して内部発振器の周波数を測定する際の注意点などをまとめています。

1. スルーレートの影響

LIN 通信では、通信物理層の環境条件に依存してスルーレートが変化します。このため、受信データのビット長をクロックでカウントする場合、このスルーレートの影響を受ける可能性があります。3.1.3 ではこの点に関する対応案について説明しています。

2. 初回通信時のボーレート設定

LIN 通信では、フレームタイムアウトエラーが規定されています。このエラーを回避するために、LIN 通信の自動ボーレートモードでは、初回通信時（ボーレートが未定状態）のボーレートを十分に低速に設定しておく必要があります。

フレームタイムアウトエラーは、設定されたボーレートを基準として、フレームタイム（34T^(注4)）の 1.4 倍以内にフレームヘッダーを受信しない場合に発生します。例えば、自動ボーレートモードで 10kbps を初期値として設定した場合、2kbps の通信を検出しようとするエラーが発生します。

（注 4）1T : 1 ビットの時間

3. コマンダー側のクロック精度と期待値の取得方法

この節で述べる周波数誤差を認識する測定で重要なのは、LIN バスシミュレーションツールなどにより生成されるコマンダー信号（外部信号）の周期精度と信号の安定性です。

また、同信号から期待値を得る手段としては、信号の受信側に X'tal（クリスタル）発振器を搭載した TB9M003FG を実装したモジュールを使用して、LIN 通信の測定環境下でデータを取得して活用する方法を推奨します。理由としては、この際に取得されるデータは、この環境下での外部信号に対するカウント値として高い精度が期待できるためです。

3.1.3. LIN 通信の測定環境（スルーレート）への対応案

この節では、LIN 通信が行われる際に環境に依存して発生するスルーレートに関する説明と、スルーレートによる周波数測定への影響を軽減する方法について説明します。

図 3.5 は、この節で説明している LIN 通信が行われる環境について概念的に示したものです。

LIN バスシミュレーションツールは安定した高精度のシステムクロック①を備えており、このクロックを基に高精度の LIN 通信用のリファレンス信号②を生成します。TB9M003FG ボードは、このリファレンス信号②を外部環境経由して LIN 通信信号③として受信します。さらに同ボードに実装された TB9M003FG は、この LIN 通信信号③をバッファリングした後に LIN 通信制御回路で信号④を受信します。

周波数測定では、リファレンス信号②の周期を維持した信号④を内部回路で受信する必要があります。

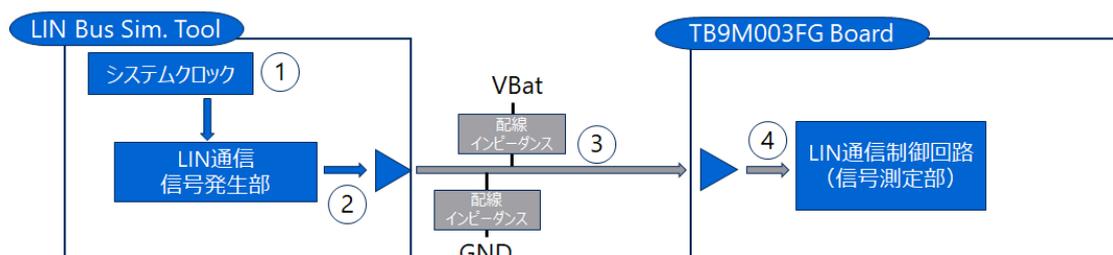


図 3.5 LIN 通信の測定環境（概念）

図 3.6 には、LIN 通信用のリファレンス信号②、およびその信号②が外部環境によって影響を受けた LIN 通信信号③、さらに信号③がデバイス内部回路でバッファリングされた信号④を概念的に示しています。リファレンス信号②は、 $\Delta T1$ を 1 ビット周期とするスルーレートのない安定した信号です。LIN 通信信号③は、リファレンス信号②が外部環境（配線インピーダンス）の影響を受けてスルーレート $\Delta T2$ が発生した信号となります。デバイス内部の LIN 通信制御回路では信号の立ち下りを使用するため、ここでは立ち下り側のスルーレートに着目して説明を行います。デバイス内部回路で受信する信号④はバッファリング後の信号であるため、スルーレートはなくなります。しかし、立ち下りタイミングは LIN 通信信号③のスルーレートにより最大 $\Delta T2$ 分の影響を受けます。

最初の立ち下り信号のスルーレート時間 $\Delta T2a$ は、信号④の周期を短くする方向に影響します。一方、次の立ち下り信号のスルーレート時間 $\Delta T2b$ は、信号④の周期を長くする方向に影響します。

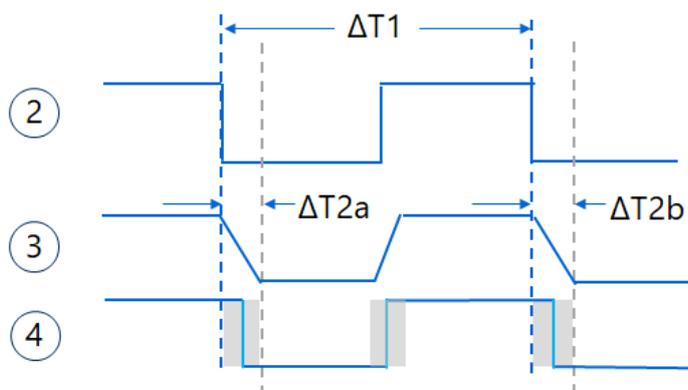


図 3.6 LIN 通信信号（スルーレート発生）

信号④の 1 ビット周期は、これら 2 つのスルーレートによる影響が合成されるため、互いに影響を打ち消し合うこととなります。例えば、両者の影響が等価である場合、相殺されて周期への影響は発生しません。しかし、ワーストケースを想定し、相殺のない状態（片側のスルーレートが 0 の状態）で検討を進めます。

以下に、 $\Delta T1$ および $\Delta T2$ を概念的な関数として示します。

- ・ $\Delta T1 = f$ (ボーレート, システムクロック精度)
- ・ $\Delta T2 = g$ (負荷, LIN 物理層 ドライブ能力)

$\Delta T1$ の関数には、 $\Delta T2$ の関数で示されるスルーレートを発生させる要素は含まれていません。また、 $\Delta T2$ の関数には $\Delta T1$ の関数で示される 1 ビット周期を決定する要素（ボーレート）は含まれていません。

したがって、 $\Delta T1$ を大きな値になるようにボーレートを設定しても $\Delta T2$ の値は変わりません。図 3.7 は、ボーレートを 1/3 に設定した場合の各信号を再度概念的に示したものです。このように、 $\Delta T1$ を大きな値に設定して測定すれば、測定環境に起因するスルーレートの影響を低減することが可能です。

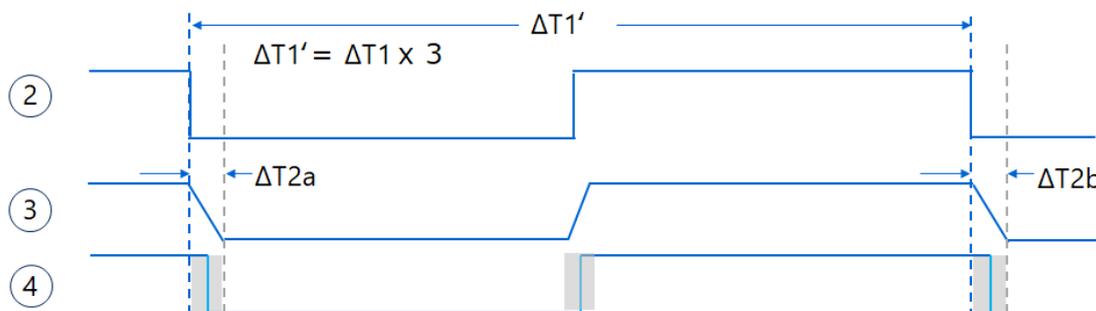


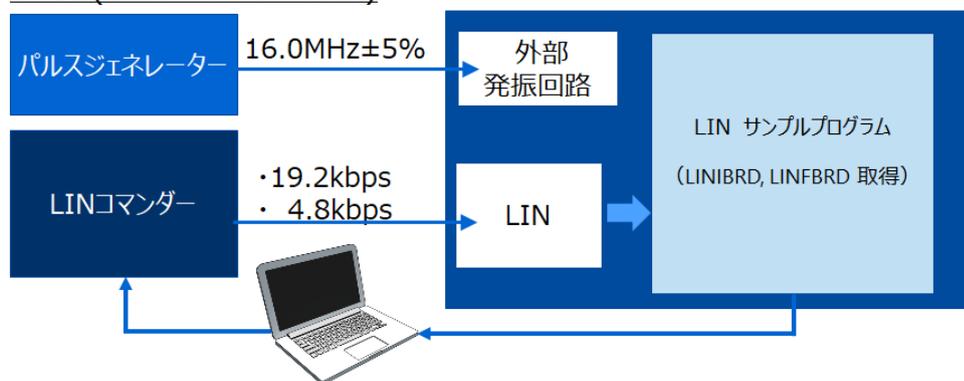
図 3.7 スルーレートへの対策案

3.1.4. パルスジェネレーターを使用した誤差測定の実験

評価 2 では、パルスジェネレーターを使用して、疑似的に発振器の周波数を $\pm 5\%$ 変化させた場合、LIN 通信を用いた誤差検出が正しく行われるかどうかを実験で確認します。

図 3.8 は、評価 2 の概念を示したものです。

評価2(LINサンプルプログラム)



評価の目的：
発振器の周波数誤差に対して
LIN通信による誤差取得の精度
はどの程度になるか確認する。

図 3.8 評価 2 の実験概念

3.1.5. パルスジェネレーターを使用した誤差測定の実験結果

表 3.1 評価 2 の実験結果 (コマンダーポレート : 19.2kbps)

1) パルスジェネレーター 対 reference 周期	カウント値 (10 進) (注 5)	LINIBRD (16 進)	LINFBRD (16 進)	2) 測定値/リファレンス 測定値の計算	測定誤差 1) - 2)
105.00% : 16.80MHz	17516	88	36	104.99%	0.01%
103.13% : 16.50MHz	17202	86	19	103.10%	0.02%
Reference: 16.00MHz	16684	82	16	100.00%	0.00%
96.88% : 15.50MHz	16122	7D	3D	96.63%	0.24%
95.00% : 15.20MHz	15848	7B	34	94.99%	0.01%

表 3.2 評価 2 の実験結果 (コマンダーポレート : 4.8kbps)

1) パルスジェネレーター 対 reference 周期	カウント値 (10 進) (注 5)	LINIBRD (16 進)	LINFBRD (16 進)	2) 測定値/リファレンス 測定値の計算	測定誤差 1) - 2)
105.00% : 16.80MHz	70068	223	1A	104.99%	0.01%
103.13% : 16.50MHz	68810	219	25	103.11%	0.02%
Reference:16.00MHz	66736	209	18	100.00%	0.00%
96.88% : 15.50MHz	64480	1F7	30	96.62%	0.26%
95.00% : 15.20MHz	63392	1EF	10	94.99%	0.01%

(注 5) : 23 ビット Data

3.1.6. LIN 通信時のデータ波形と実験結果の考察

通信波形を確認すると、 T_f が $2\mu\text{s}$ 程度あることが分かりました（図 3.9）。

19.2kbps で 8 ビット分のデータ長に要する時間に対する比率は、 $2\mu\text{s}/417\mu\text{s} = 0.0048$ ($\approx 0.5\%$) 同様に 4.8kbps では、 $2\mu\text{s}/16667\mu\text{s} = 0.001$ ($\approx 0.1\%$) となります

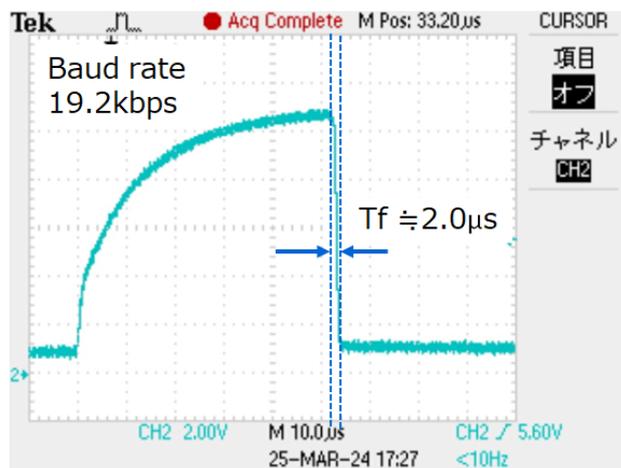


図 3.9 評価 2 の実験環境における LIN 通信データ波形

3.1.3 の検討では、これらの値が測定誤差となり得ることを示しました。しかし、3.1.5 の評価結果ではこの誤差が観測されていないように見えます。これは、誤差計算では ΔT_2 の 2 条件で大きな差がなかったためです。3.1.3 の ΔT_{2a} と ΔT_{2b} が等価であれば、両者が相殺されて誤差として検出されない可能性があります。

3.1.5 の評価結果では、期待値データとして 16MHz 入力時の測定カウント値を使用しました。この場合、ユーザー環境では、コマンドのクロック周期が安定していることが重要であり、精度は問われません（3.1.2 - 3.1.4 参照）。

ボーレートから計算した理論値を期待値として使用することも可能ですが、この場合、コマンドのクロックの周波数誤差が測定誤差として反映されてしまいます。すなわち、調整が不要な部品に対しても調整されてしまう可能性があります。

3.1.5 の評価結果から、この実験環境下における LIN 通信を使用した内部発振器の周波数誤差の測定では 0.3%未満の精度で検出可能であることが示されました。

また、パルスジェネレーターの出力が 15.5MHz のケースを除けば、0.03%未満という高い精度での検出結果が得られています。

3.1.7 では LIN 通信を用いた内部発振器の周波数誤差の測定方法についてプログラム例を交えて紹介します。

3.1.7. SW1 のプログラム例 (送受信のための割り込みハンドラー設定および割り込みコールバックの設定は省略)

```
uint32_t measure_lincount(void)
{
    lld_slin_config_t config = {
        40000000U,          /* clock_info */
        1000U,             /* baudrate */
        LLD_SLIN_BAUDRATE_MODE_AUTO, /* mode */
        LLD_SLIN_BREAK_WIDTH_10, /* break_width */
        LLD_SLIN_BIT_ERROR_AT_3_4TH, /* bit_error */
        LLD_SLIN_SLEW_RATE_1_5, /* slew_rate_mode */
        3U,                /* inter_byte_space */
        3U                  /* response_space */
    };
    lld_slin_config(&config);
    lld_slin_start(lld_true);

    /* Execute communication here to measure baudrate */
    wait_for_lin_communication();
    lincount = (SMCD_LINC->LINIBRD << 7) | (SMCD_LINC->LINFBRD << 1);

    lld_slin_stop();
    return lincount;
}
```

LINCLK=40MHz、自動ボーレートモード、初期ボーレートは最遅の1kbpsを選択（自動ボーレート算出前のヘッダ通信時のフレームタイムアウト期間を長めに確保するため）

LIN 通信実施後の LINIBRD, LINFBRD のレジスター値から LIN カウント値を算出

3.2. 内部発振器の周波数誤差に関する情報のデータ記録（SW2 の事例）

3.2 では、内部発振器の周波数の測定データとリファレンスデータをメモリーに格納する方法について説明します。

LIN 通信実施後に得られる内部発振器の周波数測定データをモーター制御に活用するためには、データをメモリーに格納する必要があります。格納先のメモリーは、どのようなシナリオで誤差補正を行うかによって適切に選定する必要があります。選定対象となるメモリーを以下に示します。

- ・ SRAM
- ・ Code Flash
- ・ 外部 EEPROM

このアプリケーションノートのシナリオは、以下の内容を想定しています。

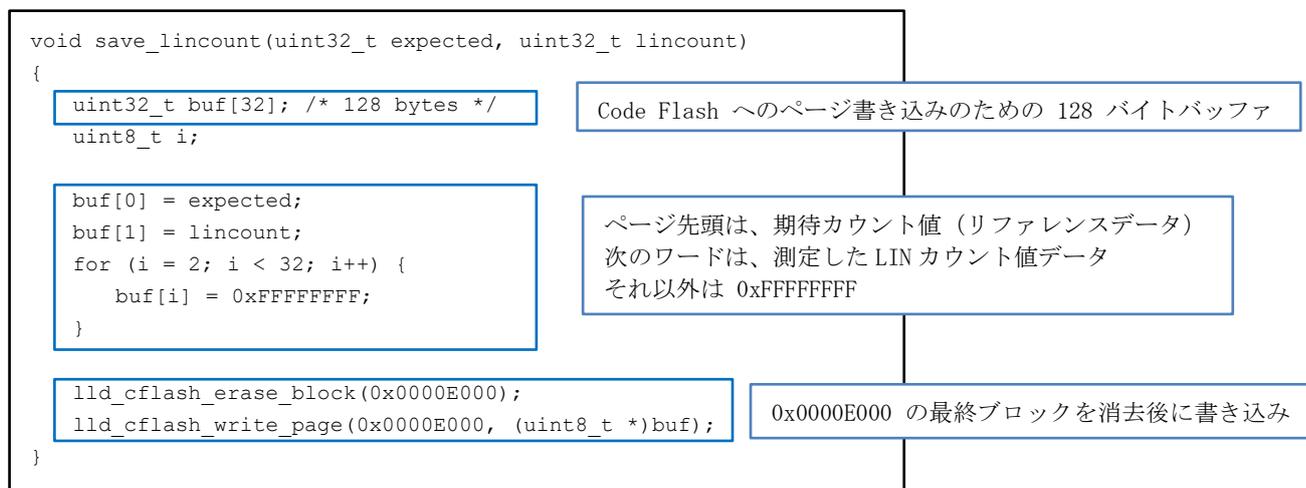
1. LIN 通信による内部発振器の周波数の測定およびリファレンスデータの取得は、ユーザー製品の製造工程で実施されます。
2. 内部発振器の周波数の測定データとリファレンスデータは、不揮発性メモリーに格納し、これ以降のデータ更新は行われません。
 - ・ 測定データ：出荷する制御基板（内部発振器を使用）で測定したカウント値の結果
 - ・ リファレンスデータ：X'tal 発振子を実装した制御基板により測定されたカウント値の結果
3. 格納された2つのデータは、市場でモーター制御システムが動作する際に参照され、誤差補正に使用されます。

上記のシナリオを前提に、メモリーとしては Code Flash を選択しました。

3.2.1 では Code Flash へのデータ書き込み方法についてプログラム例を紹介します。

3.2.1. SW2 のプログラム例

Code Flash 64KB (0x00000000 - 0x0000FFFF) のうち、Erase 単位 (8KB) で最終ブロック (0x0000E000 から 8KB) はシステムで未使用領域であると仮定します。この前提で、下記の事例では最終ブロック先頭にデータを格納しています。



記録したデータの読み出しプログラム例

```

uint32_t expected = *(uint32_t *)0x0000E000;
uint32_t lincount = *(uint32_t *)0x0000E004;

```

記録後のデータは、左記のように読み出すことが可能

3.3. 内部発振器の周波数誤差に関する情報からリファレンス SW を補正する (SW3 の事例)

この節では、発振器の周波数に誤差が内在していても、モーター制御アルゴリズムを適切に維持するための方法について説明します。

リファレンス SW では、モーター制御アルゴリズムを正しく実行するために以下の 3 つの時間軸が重要となります。

1. MAINLOOP_USER_PERIOD
2. SPD_CTRL_PERIOD
3. PWM_PERIOD

発振器の周波数の誤差補正前の状態では、上記 3 つの時間軸が全て誤差分ずれて動作しています。内部からの視点では、全て正しく動作しているように見えますが、モーター制御のパラメータ調整時とは時間軸が異なる条件下で動作していることになるため、調整精度への影響があることには注意が必要です。

3. PWM_PERIOD に対する周波数誤差の影響は、モーターの回転速度の計算に直接現れます。なぜならば、モーター回転速度 ω の関数に含まれる要素としてこの周期時間が使用されているためです。

$$\omega = f(\text{PWM 周期}, \dots)$$

したがって、PWM 周期に関しては周波数誤差調整が必要になります。

また、1. MAINLOOP_USER_PERIOD、2. SPD_CTRL_PERIOD は、制御全体の処理周期を定義するものであり、ゲインコントロールなどの適切な寄与を維持するために周波数誤差調整が必要です。この時間軸は、DTIMER を使用しているため、この機能の誤差調整が必要となります。

図 3.10 は、リファレンス SW マニュアル：HLD User Manual “Timing” 章からの抜粋です。各関数と以下の時間軸の関係を示しています。詳細は同マニュアルを参照してください。

- 1) MAINLOOP_USER_PERIOD
- 2) SPD_CTRL_PERIOD
- 3) PWM_PERIOD

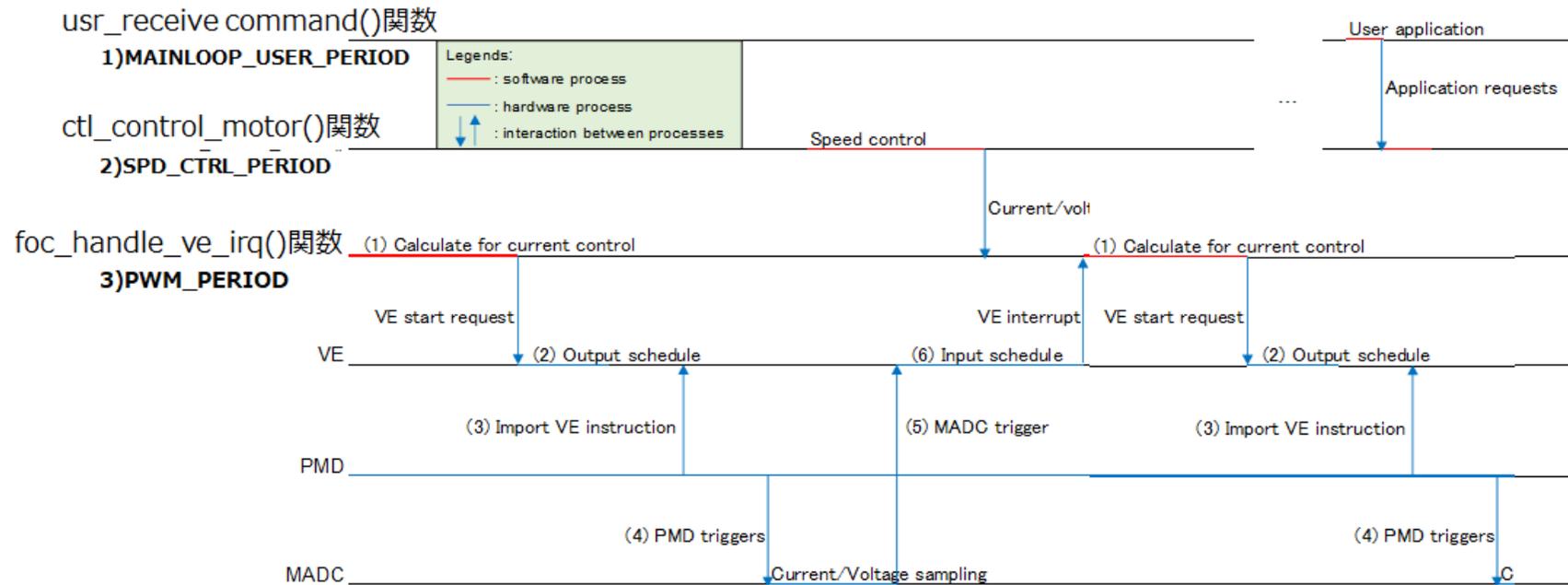


図 3.10 The timing chart of CPU, PMD, and MADC operations when using VE (HLD User Manual から抜粋)

3.3.1. 発振器の周波数誤差補正前の状態

各時間軸は発振器の周波数誤差に比例して一様に変動します。図 3.11 はこの状況をイメージして作成したものです。

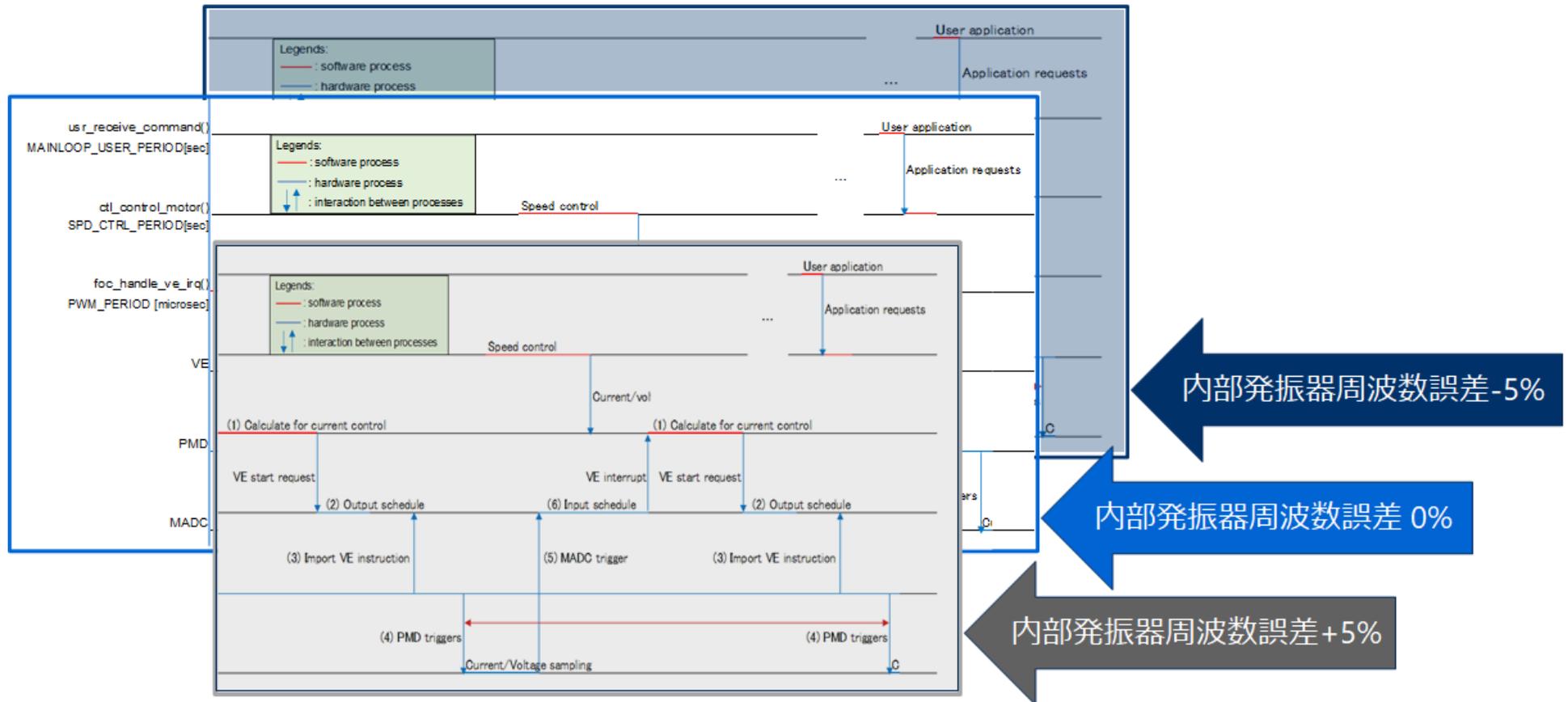


図 3.11 内部発振器の周波数誤差による各タイミングへの影響

3.3.2. 発振器の周波数誤差補正後の状態

図 3.12 は、発振器の周波数誤差を補正した場合、各時間軸がどのようなようになるかを示したものです。

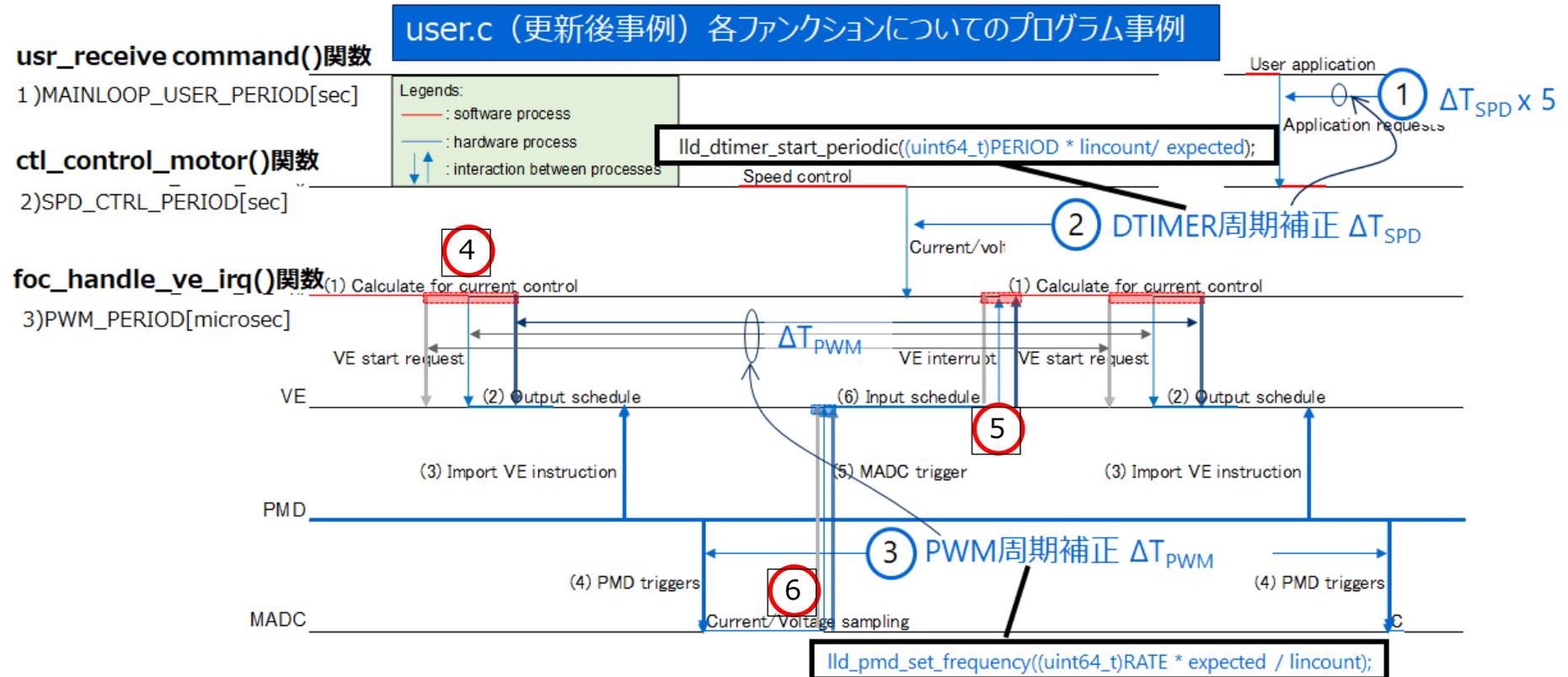


図 3.12 内部発振器の周波数誤差補正後の各タイミング

foc_handle_ve_irq()関数は、PWM_PERIOD (PMD 内で設定される PWM 周期) ごとに、VE 割り込みハンドラーとして呼び出されます。また、VE の入力タスクの起動、出力タスクからの PWM 出力設定など、重要な処理は PWM 信号を起点に動作します。したがって、周波数誤差の補正は PWM 信号に対して実施する必要があります。これによって、図 3.12 の③が示す ΔT_{PWM} が本来の周期になり、PMD を起点とする制御信号(VE へのトリガー信号、MADC へのトリガー信号)のタイミングも適正化されます。

その他の CPU 処理④や VE 処理時間⑤、ADC 変換時間⑥に依存する信号のタイミングは調整されませんが、その周期は本来の ΔT_{PWM} に補正されるため、制御全体への誤差の影響は大幅に軽減されます。また、PWM 周期はモーターの回転速度 ω の算出に使用されているため、モーターの回転速度も適切に制御されるようになります。

ctl_control_motor()関数は、SPD_CTRL_PERIOD (1ms) ごとの基本的な制御に対応しており、以下のような処理を実行しています。

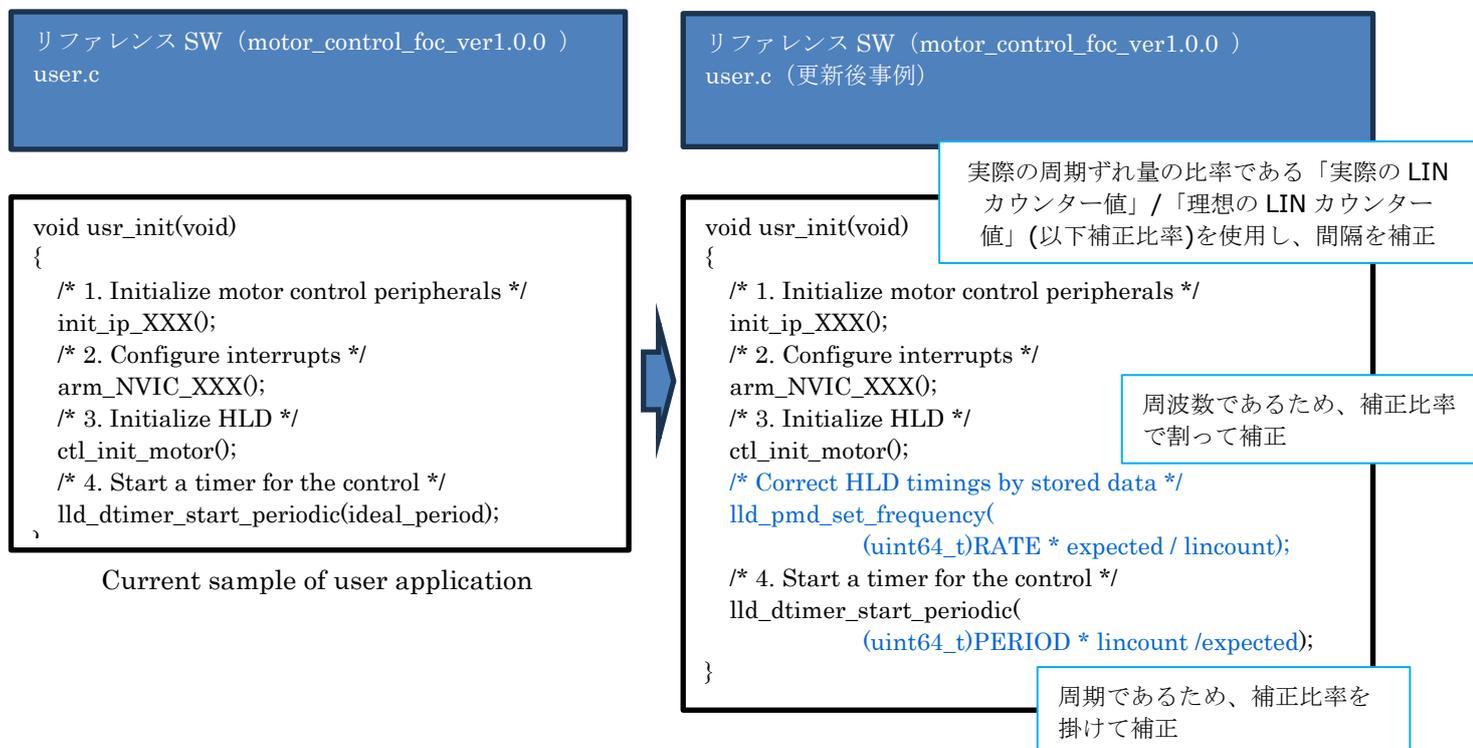
- ・速度制御、目標速度設定、弱め界磁制御、状態制御 (位置決め～定常、異常処理)

usr_receive_command()関数は、MAINLOOP_USR_PERIOD (SPD_CTRL_PERIOD x 5) ごとに実行され、ユーザーが実装した処理を実行します。リファレンス SW では、モーター制御の開始と停止のコマンド確認処理を実行しています。

SPD_CTRL_PERIOD は、DTIMER の設定値により定義されるため、これを補正することで図 3.12 の②が示す ΔT_{SPD} が本来の周期 (1ms) に補正されます。また、この結果として①の $\Delta T_{SPD} \times n$ ($n=5$) も本来の周期に補正されます。

3.3.3.では内部発振器の周波数誤差情報に基づいて、リファレンス SW を補正するプログラム例を紹介します。

3.3.3. SW3 のプログラム例



4. 誤差補正 SW によるモーター制御の評価事例

この章では、内部発振器の周波数誤差（±5%）を検出し、その誤差を SW で補正してモーター制御を行った場合に、制御動作がどのように変化するかを実験結果から確認します。

4.1. 内部発振器の周波数誤差を補正するモーター制御 SW の動作確認

この節では、内部発振器の周波数誤差を補正するモーター制御 SW が、第 2 章で確認した制御特性をどの程度改善するかについて、実験結果に基づいて説明します。併せて、実験方法についても解説します。

4.1.1. 周波数誤差発生回路を用いた誤差補正付きモーター制御の評価

評価 3 では、以下の SW1～SW3 を使用して、内部発振器の周波数が±5%変動した場合に、モーター制御動作にどのような影響が生じるかを確認します。本実験では、誤差補正付きモーター制御 SW（SW3）の動作確認に特化しており、SW1 および SW2 は、これまでの説明した方法（SW1：LIN 通信、SW2：Code Flash）とは異なる下記方法を実施しています。

1. SW1^(注6)：外部からリファレンス信号として、パルスジェネレーター（チャンネル 2）から 20kHz の矩形波をキャプチャー入力端子に入力し、キャプチャータイマー機能を使用して周期を測定。
2. SW2^(注6)：SW1 で測定した周期の期待値（20kHz）と、測定値を SRAM に保存。
3. SW3^(注6)：リファレンス SW（motor_control_foc_ver1.0.0/LLD ver1.0.0）の User Application SW（user.c）の一部を変更し、SW2 の保存データを用いて内部発振器の周波数誤差を補正するモーター制御を実施。

（注 6）： 図 3.1 を参照。

図 4.1 は、評価 3 の実験概念を示しています。

- ・ 評価 3a：周波数誤差補正付きリファレンス SW を使用し、速度指令値がモーターの回転数に与える影響を確認します。
- ・ 評価 3b：周波数誤差補正付きリファレンス SW を使用し、PWM 周期、VE 処理および VE 割り込み処理時間、デッドタイムへの影響を確認します。

評価 3（周波数誤差補正付きリファレンス SW）

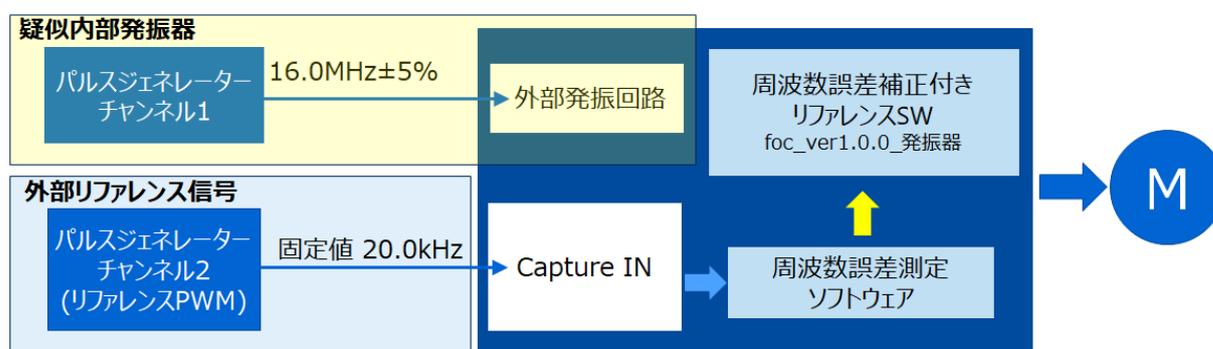


図 4.1 評価 3 の実験概念

目的：周波数誤差補正付きリファレンス SW を使用して、発振器の周波数の変動に対する動作（改善度）を確認します。

4.1.2. 評価 3a の実験結果

1. 標準条件：周波数に誤差が無い場合

速度指令100Hzに設定

パルスジェネレーター周波数 16.0MHz

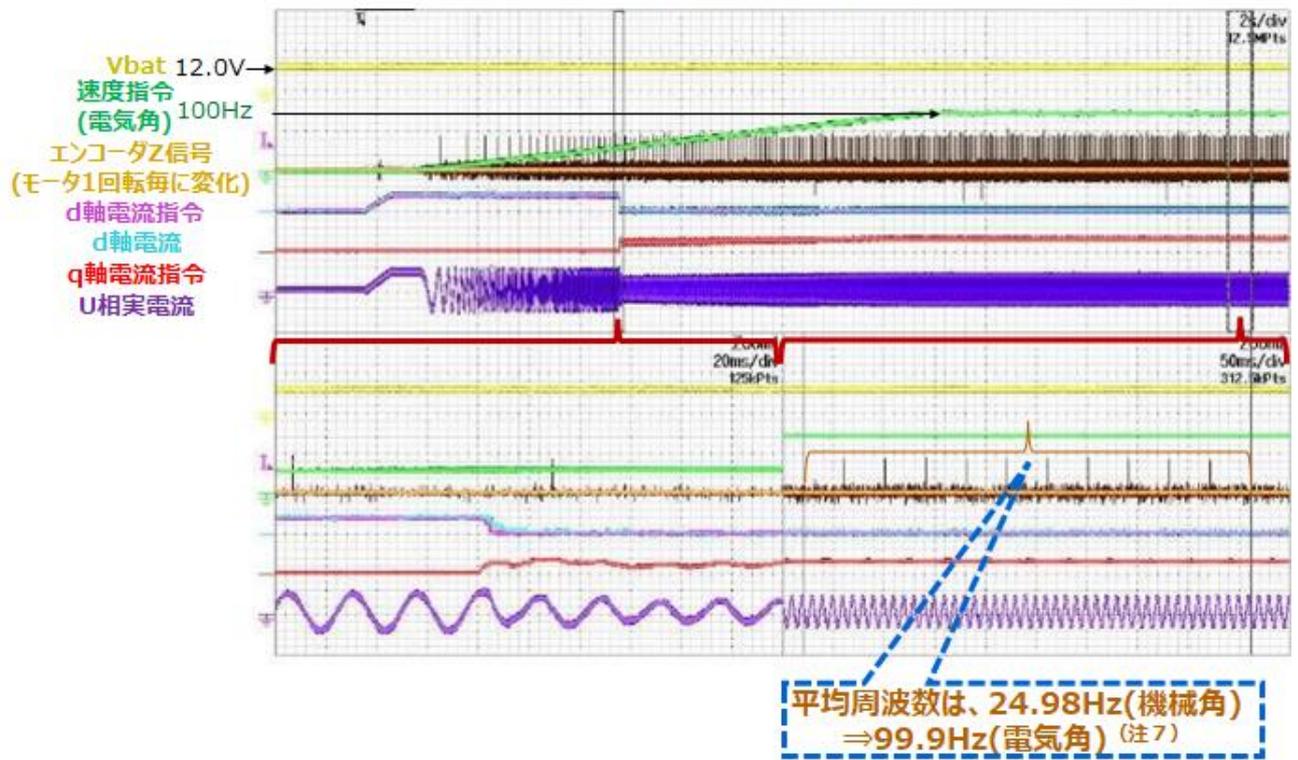


図 4.2 評価 3-a の実験結果(1)

(注7) 今回、検証に使用したモーターは、極対数が4のモーターであることから、電気角=4×機械角である。

結果：

標準条件（発振器の周波数に誤差がない場合）では、速度指令値が100Hzのとき、エンコーダ出力から算出されるモーター回転速度（電気角速度平均値）は、99.9Hzとなり、ほぼ指令通りの値を示しました。

2. 誤差条件：周波数に誤差±5%がある場合

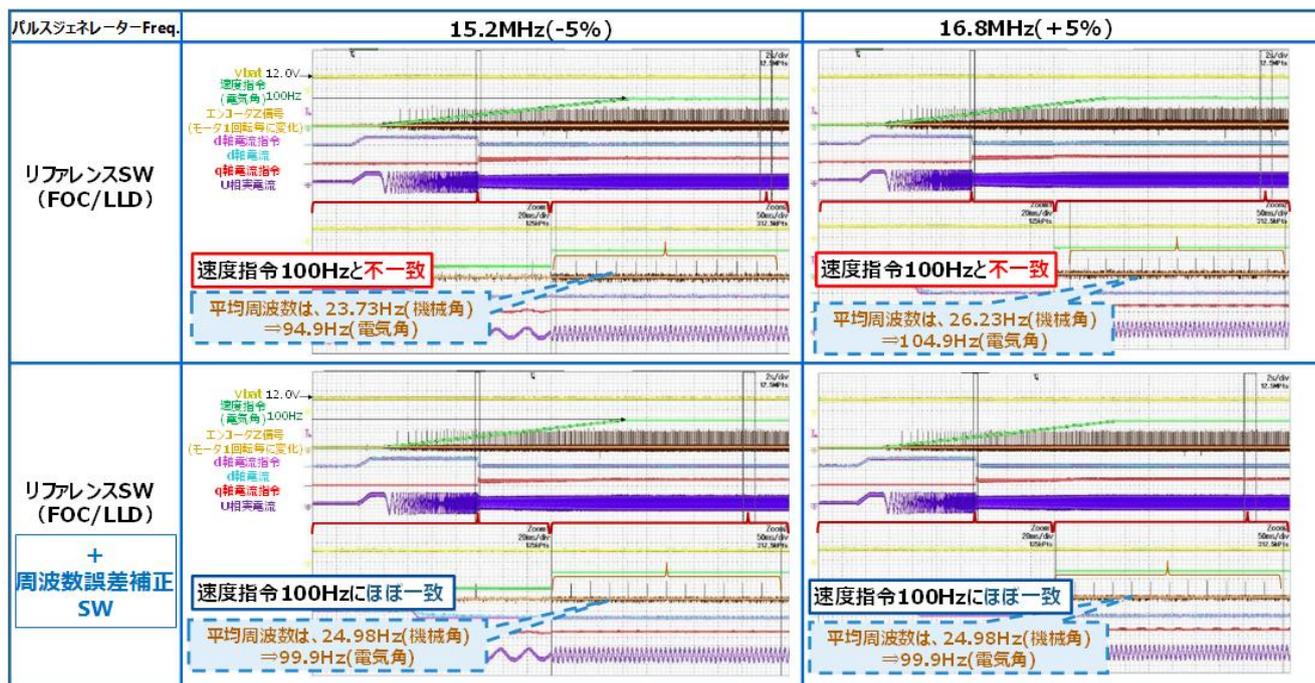


図 4.3 評価 3-a の実験結果(2)

結果：

発振器の周波数誤差±5%を模擬した条件下では、速度指令値が100Hzのとき、エンコーダー出力から算出されるモーター回転速度（電気角速度の平均値）は、99.9Hzとなり、標準条件とほぼ同じ値を示しました。評価 1a の結果である「発振器の周波数誤差に連動して±5%ずれる」という傾向と比較して、明らかに改善が見られました。

4.1.3. 評価 3b の実験結果

1. 標準条件：周波数に誤差が無い場合

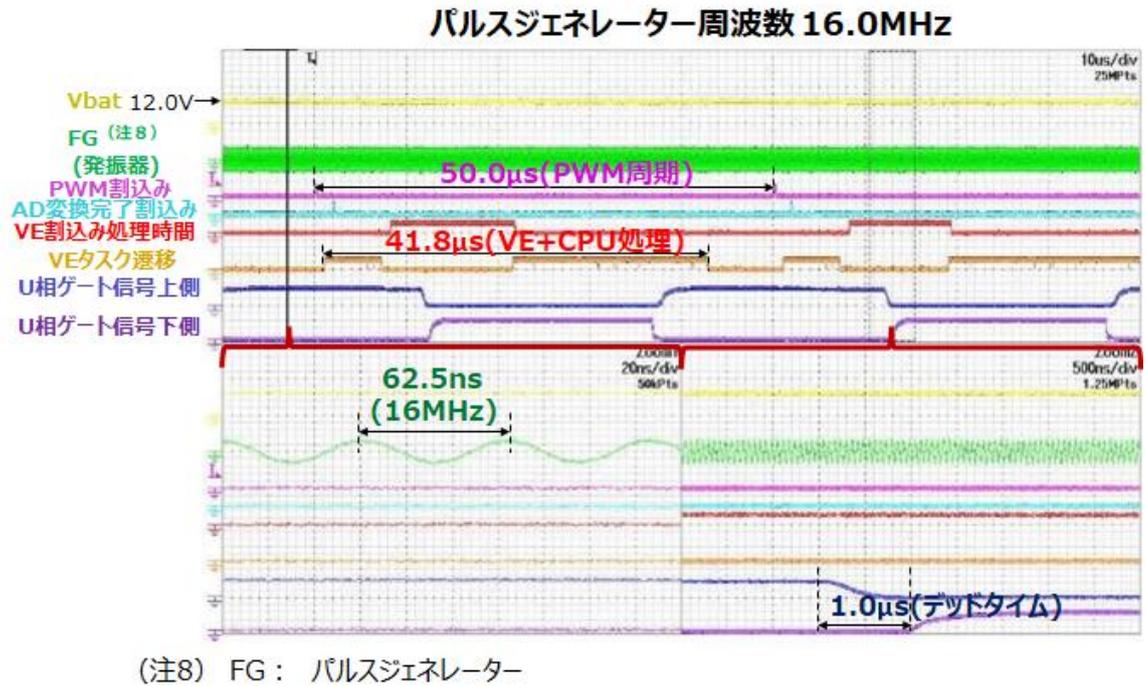


図 4.4 評価 3-b の実験結果(1)

結果：

標準条件（発振器の周波数に誤差がない場合）では、PWM 周期、制御処理時間、デッドタイムは以下の結果となりました。

- 1) PWM 周期：50.0µs
- 2) VE 処理+VE 割り込み処理：41.8µs
- 3) デッドタイム：1.0µs

2. 誤差条件：周波数に誤差±5%がある場合

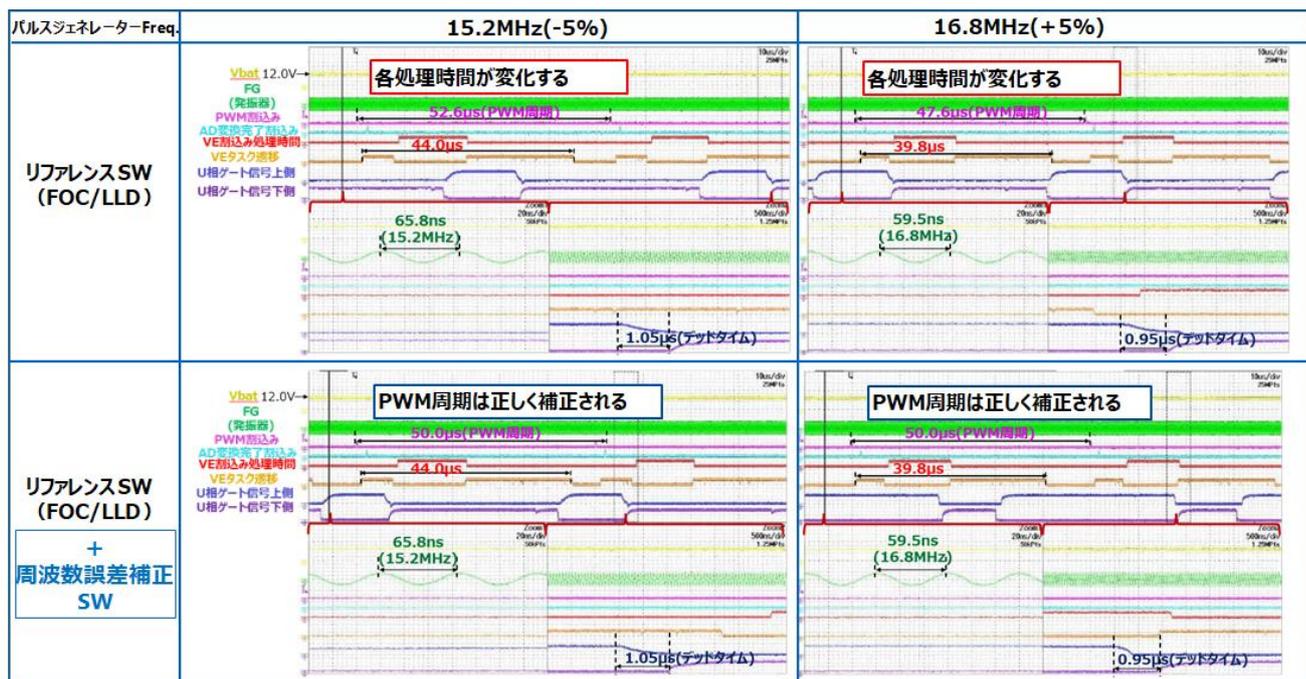


図 4.5 評価 3-b の実験結果(2)

結果：

発振器の周波数誤差±5%を模擬した条件下では、PWM 周期は誤差補正が可能です。CPU および VE の処理時間は補正できていません。また、デッドタイムは補正可能ですが、モーター制御中にダイナミックな変更ができないため、今回の調整対象から除外しました。また、補正可能な分解能は $4/VECLK$ (注9) 単位であり微調整はできません。このパラメーターをさらに調整する際には、これらの点に留意する必要があります。

(注 9) : $4/VECLK$: 66.7ns @60MHz

4.1.4. 評価 3-b 実験結果まとめ

表 4.1 評価 3-b の実験結果

使用した制御 SW	発振器周波数	15.2MHz (-5%)	16MHz	16.8MHz (+5%)
リファレンス SW	PWM 周期	52.6µs	50.0µs	47.6µs
	VE 処理+VE 割り込み処理時間	44µs	41.8µs	39.8µs
	デッドタイム	1.05µs	1.0µs	0.95µs
リファレンス SW + 周波数誤差補正 SW	PWM 周期	50.0µs	50.0µs	50.0µs
	VE 処理+VE 割り込み処理時間	44µs	41.8µs	39.8µs
	デッドタイム	1.05µs	1.0µs	0.95µs

● 評価 3-b 補足説明-1

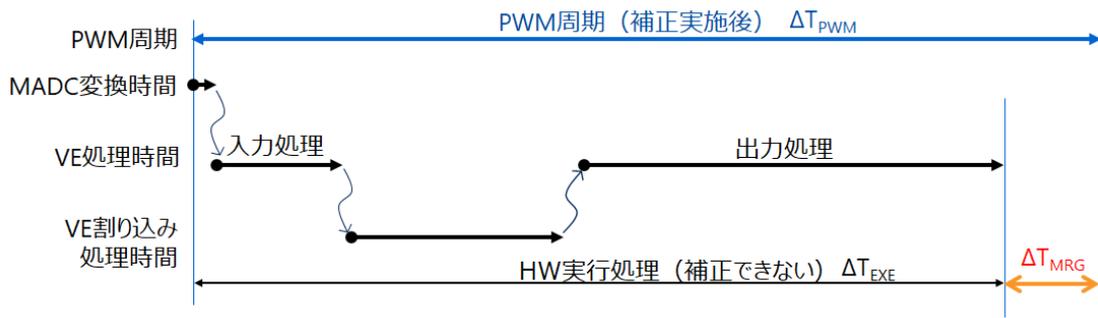


図 4.6 PWM 周期と HW 実行処理時間の関係

図 4.6 は、PWM 周期と HW 実行処理時間（MADC 変換、VE 処理、VE 割り込み処理）の関係を示します。今回の誤差補正では、発振器の周波数誤差があっても PWM 周期が一定時間になるように設定条件を調整しています。一方、HW 実行処理時間 ΔT_{EXE} は、HW に依存しており、補正できません。

以下は、上記の各時間の関係を示しています。

$$\Delta T_{PWM} = \Delta T_{EXE} + \Delta T_{MRG}$$

この時、制御が成立するために、 $\Delta T_{MRG} > 0$ が必須です。つまり、HW 実行時間は PWM 周期より小さい必要があります。

したがって、発振器の周波数誤差が-5%の際には、以下の関係が成立しているかどうかには留意する必要があります。

$$\Delta T_{PWM} > \Delta T_{EXE} \times 1.05 \quad (\text{各時間は、周波数誤差が 0\% 時の値と仮定})$$

● 評価 3-b 補足説明-2

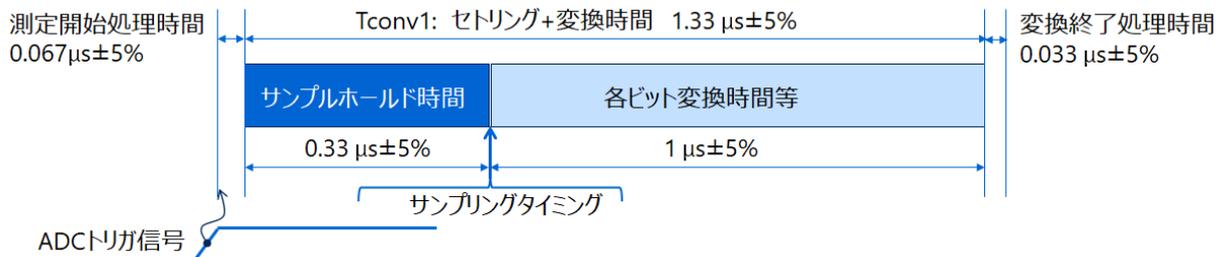


図 4.7 MADC 単発コマンドトリガーモード 測定時間タイミング

図 4.7 はユーザーマニュアル（TB9M003FG_UM_J_Rev1.00）第 22 章からの抜粋に補足説明を加えたものです。図中で、重要なのは、ADC トリガー信号からサンプルホールド信号の立ち下がりまでの時間、すなわちサンプリングタイミングがどのような影響を受けるかという点です。

サンプリングタイミング（測定開始処理時間+サンプルホールド時間）は、 $0.40\mu\text{s}\pm 5\%$ です。

$\pm 5\%$ の誤差は、計算すると $\pm 20\text{ns}$ 程度の変動幅となるため、実使用上は大きな影響はないと推察されます。

5. まとめ

本アプリケーションノートでは、TB9M003FG に搭載されている内部発振器の周波数精度（±5%）によりシステムに発生する誤差を SW で補正することで、適切なモーター制御を実現する方法を参考事例として紹介しました。

1. 内部発振器の周波数誤差を、LIN 通信用の HW により測定データとして取得する方法を例示しました。留意すべき点として、コマンダー信号発生モジュールの通信状態が安定していること、および通信波形のスルーレートからの影響を考慮したボーレートの選定をあげました。
2. 取得した周波数誤差の値やリファレンスデータを、Code Flash に書き込む方法を例示しました。今回の想定は、ユーザー製品の製造工程で周波数誤差データやリファレンスデータを測定し、その結果を Code Flash に記録するというものです。
3. 記録された周波数誤差データ、リファレンスデータを用いて、モーター制御プログラムにより誤差を補正して制御する方法を例示しました。
4. 実験について
 - 1) LIN による誤差計測：LIN 通信環境の違いによる影響を考慮すれば、十分に使用可能です。
 - 2) 周波数誤差（±5%）の影響：疑似内部発振の誤差発生回路を構築し、リファレンス SW により動作を確認しました。モーター回転数が、周波数誤差分の影響を受けることが確認されました。
 - 3) 誤差補正 SW ^(注 10) の効果：モーター回転数は適正化されます。留意点は、補正の効かないデッドタイム時間、CPU および VE 処理時間の考慮が必要であり、特に処理時間の合計は PWM 周期を超えないことが重要です。

(注 10) 誤差補正 SW：リファレンス SW に誤差補正部を追加した SW

*SmartMCD™は東芝デバイス&ストレージ株式会社の商標です。

*その他社名・商品名・サービス名などは、それぞれ各社が商標として使用している場合があります。

記載内容の留意点

1. ブロック図
ブロック図内の機能ブロック/回路/定数などは、機能を説明するため、一部省略・簡略化している場合があります。
2. 等価回路
等価回路は、回路を説明するため、一部省略・簡略化している場合があります。

使用上のご注意およびお願い事項

使用上の注意事項

- (1) 絶対最大定格は複数の定格の、どの1つの値も瞬時たりとも超えてはならない規格です。複数の定格のいずれに対しても超えることができません。絶対最大定格を超えると破壊、損傷および劣化の原因となり、破裂・燃焼による傷害を負うことがあります。
- (2) 過電流の発生や IC の故障の場合に大電流が流れ続けないように、適切な電源ヒューズを使用してください。IC は絶対最大定格を超えた使い方、誤った配線、および配線や負荷から誘起される異常パルスノイズなどが原因で破壊することがあり、この結果、IC に大電流が流れ続けることで、発煙・発火に至ることがあります。破壊における大電流の流出入を想定し、影響を最小限にするため、ヒューズの容量や溶断時間、挿入回路位置などの適切な設定が必要となります。

使用上の留意点

(1) 過電流検出回路

過電流検出回路はどのような場合でも IC を保護するわけではありません。動作後は、速やかに過電流状態を解除するようにお願いします。

絶対最大定格を超えた場合など、ご使用方法や状況により、過電流制限回路が正常に動作しなかったり、動作する前に IC が破壊したりすることがあります。また、動作後、長時間過電流が流れ続けた場合、ご使用方法や状況によっては、IC が発熱などにより破壊することがあります。

(2) 熱遮断回路

熱遮断回路（通常：サーマルシャットダウン回路）は、どのような場合でも IC を保護するわけではありません。動作後は、速やかに発熱状態を解除するようにお願いします。

絶対最大定格を超えて使用した場合など、ご使用法や状況により、熱遮断回路が正常に動作しなかったり、動作する前に IC が破壊したりすることがあります。

製品取り扱い上のお願い

株式会社東芝およびその子会社ならびに関係会社を以下「当社」といいます。

本資料に掲載されているハードウェア、ソフトウェアおよびシステムを以下「本製品」といいます。

- 本製品に関する情報等、本資料の掲載内容は、技術の進歩などにより予告なしに変更されることがあります。
- 文書による当社の事前の承諾なしに本資料の転載複製を禁じます。また、文書による当社の事前の承諾を得て本資料を転載複製する場合でも、記載内容に一切変更を加えたり、削除したりしないでください。
- 当社は品質、信頼性の向上に努めていますが、半導体・ストレージ製品は一般に誤作動または故障する場合があります。本製品をご使用頂く場合は、本製品の誤作動や故障により生命・身体・財産が侵害されることのないように、お客様の責任において、お客様のハードウェア・ソフトウェア・システムに必要な安全設計を行うことをお願いします。なお、設計および使用に際しては、本製品に関する最新の情報（本資料、仕様書、データシート、アプリケーションノート、半導体信頼性ハンドブックなど）および本製品が使用される機器の取扱説明書、操作説明書などをご確認の上、これに従ってください。また、上記資料などに記載の製品データ、図、表などに示す技術的な内容、プログラム、アルゴリズムその他応用回路例などの情報を使用する場合は、お客様の製品単独およびシステム全体で十分に評価し、お客様の責任において適用可否を判断してください。
- 本製品は、特別に高い品質・信頼性が要求され、またはその故障や誤作動が生命・身体に危害を及ぼす恐れ、膨大な財産損害を引き起こす恐れ、もしくは社会に深刻な影響を及ぼす恐れのある機器（以下“特定用途”という）に使用されることは意図されていませんし、保証もされていません。特定用途には原子力関連機器、航空・宇宙機器、医療機器（ヘルスケア除く）、車載・輸送機器、列車・船舶機器、交通信号機器、燃焼・爆発制御機器、各種安全関連機器、昇降機器、発電関連機器などが含まれますが、本資料に個別に記載する用途は除きます。特定用途に使用された場合には、当社は一切の責任を負いません。なお、詳細は当社営業窓口まで、または当社 Web サイトのお問い合わせフォームからお問い合わせください。
- 本製品を分解、解析、リバースエンジニアリング、改造、改変、翻案、複製等しないでください。
- 本製品を、国内外の法令、規則及び命令により、製造、使用、販売を禁止されている製品に使用することはできません。
- 本資料に掲載してある技術情報は、製品の代表的動作・応用を説明するためのもので、その使用に際して当社及び第三者の知的財産権その他の権利に対する保証または実施権の許諾を行うものではありません。
- 別途、書面による契約またはお客様と当社が合意した仕様書がない限り、当社は、本製品および技術情報に関して、明示的にも黙示的にも一切の保証（機能動作の保証、商品性の保証、特定目的への合致の保証、情報の正確性の保証、第三者の権利の非侵害保証を含むがこれに限らない。）をしておりません。
- 本製品、または本資料に掲載されている技術情報を、大量破壊兵器の開発等の目的、軍事利用の目的、あるいはその他軍事用途の目的で使用しないでください。また、輸出に際しては、「外国為替及び外国貿易法」、「米国輸出管理規則」等、適用ある輸出関連法令を遵守し、それらの定めるところにより必要な手続を行ってください。
- 本製品の RoHS 適合性など、詳細につきましては製品個別に必ず当社営業窓口までお問い合わせください。本製品のご使用に際しては、特定の物質の含有・使用を規制する RoHS 指令等、適用ある環境関連法令を十分調査の上、かかる法令に適合するようご使用ください。お客様がかかる法令を遵守しないことにより生じた損害に関して、当社は一切の責任を負いかねます。