

ADC12 オーバーサンプリングによる高分解能の実現

Harman Grewal (日本テキサス・インスツルメンツ (株) 菅原 仁一訳)

MSP430

まえがき

このアプリケーション・レポートでは、オーバーサンプリング手法により、A/Dコンバータ(ADC)が提供するビット数よりも高い分解能を実現する方法を説明します。ここでは、MSP430 ADC12 を用いて 12bit より高い分解能を取得する技術を紹介いたします。また、このサンプルコードで使用した基板のガーバー・ファイルも提供しています。

(各資料は、英文アプリケーション・レポート *Oversampling the ADC12 for Higher Resolution SLAA323* をご覧下さい。)

<http://focus.ti.com/mcu/docs/mcusupporttechdocsc.tsp?sectionId=96&tabId=1502&abstractName=slaa323>

目次

1. はじめに.....	2
2. A-D コンバータの分解能.....	2
2.1.Signal-to-Noise Ratio (SN比) SNR.....	2
2.2.ADC 分解能の改善.....	2
3. アプリケーションのデモ.....	4
3.1.回路の解説.....	4
3.2.ソフトウェア制御.....	4
3.2.1.100- μ V モード.....	4
3.2.2.温度モード.....	4
3.2.3.16-bit 電圧測定モード.....	4
3.2.4.オフ・モード(LPM4).....	4
3.2.5.温度校正モード.....	4
3.2.6.基準電圧校正モード.....	4
4. ソフトウェアの解説.....	5
4.1.Main().....	5
4.2.Voltage2().....	5
4.3.Temperature().....	5
4.4.Voltage().....	5
4.5.Check_cal().....	5
4.6.Temp_cal().....	5
4.7.Ref_cal().....	5
5. 結果.....	6
6. 結論.....	7
7. 参考文献.....	7

この資料は、Texas Instruments Incorporated (TI) が英文で記述した資料を、皆様のご理解の一助として頂くために日本テキサス・インスツルメンツ (日本TI) が英文から和文へ翻訳して作成したものです。
資料によっては正規英語版資料の更新に対応していないものがあります。日本TIによる和文資料は、あくまでもTI正規英語版をご理解頂くための補助的参考資料としてご使用下さい。
製品のご検討およびご採用にあたりましては必ず正規英語版の最新資料をご確認下さい。
TIおよび日本TIは、正規英語版にて更新の情報を提供しているにもかかわらず、更新以前の情報に基づいて発生した問題や障害等につきましては如何なる責任も負いません。

SLAA323 翻訳版

最新の英語版資料

<http://www-s.ti.com/sc/techlit/slaa323.pdf>

1. はじめに

MCUに内蔵されるADCの分解能は、コストと性能のバランスで決定されます。より高い分解能のADCは、コストが上がります。しかしながら、MCUではソフトウェアによりADCの性能をさらに高めることが可能であり、低価格な内蔵ADCを使用して性能を向上することができます。性能の拡張は、ソフトウェアによる校正、直線化、オーバーサンプリング、デジタル・フィルタなどにより実現できます。ここでは、オーバーサンプリングによるADC12の高分解能を実現する方法を紹介します。この例では、MSP430に搭載されているADC12の200Kbps+の変換速度を使用しています。

2. A-Dコンバータの分解能

ADCでの最小ステップは、1LSBとなり、ADCの仕様のひとつになります。これはAD変換の分解能を意味しており、これによりアナログ入力に応じた最大カウント数が定義されます。多くのアプリケーションにおいて、大きな入力レンジ内の僅かな変動を測定することを要求されます。例えば、0-2500mVのレンジ内で、40μV以下の変化の検出を要求されるかも知れません。この場合、少なくとも16bit以上の分解能が必要です。16bit測定でのLSBは、式(1)で示される電圧となります。

$$\text{フル・スケール電圧} \div (2^{16} - 1) = (2.5\text{V} - 0\text{V}) \div 65535 = 38 \mu\text{V} \quad (1)$$

2.1. Signal-to-Noise Ratio (SN 比) SNR

標準化、量子化の後、再生した波形のSN比は、アナログ入力RMS(Root mean square)フル・スケール値との比(dB)で表され、RMS量子化エラーとなります。実効分解能の向上は、変換SN比の改善とも言えます。ADC測定でのSN比の理論的限界は、アナログからデジタルへの変換がもたらす量子化エラーによる量子化ノイズが基準となります。ADCフル・スケール入力(PP)での理想的なサイン波形のSN比は、式(2)で示されます。

$$\text{SNR (dB)} = (6.02 \times N) + 1.76 \quad (2)$$

Nは、デジタル変換ビット数

入力信号のダイナミック・レンジは、AD変換のフル・レンジに合致する必要があります。そうで無い場合、SN比は、式(2)で計算した結果よりも低くなります。例えば、理想的な12bit ADCのSN比は、74dBとなります。式(2)を利用して、逆に実現したい分解能を求めることもできます。

量子化ノイズ、温度ノイズ、基準ノイズ、クロックのジッターなどがあるため、有効分解能(ENOB)は、Nよりも小さくなります。ENOBは、実際の入力のサンプリングと収集されたデータのFFT処理により定義されます。SN+ひずみ率(SINAD)は、基準周波数に対する他の全ての高調波RMSの大きさの和との比となります。ENOBは、式(2)のSNRをSINAD(SN+ひずみ率)に置き換えることによりNをENOBとして計算できます。SINADとSNRは、前述のダイナミックFFTテストにより取得できます。

2.2. ADC 分解能の改善

オーバーサンプリングは、ADC分解能改善の一般的な手法です。入力は、要求される最小ナイキスト・サンプリング・係数よりも高い係数でサンプリングされます。 f_s : サンプリング周波数。

例えば、オーバーサンプリングなしでのN-bit ADCでは、100Hzの入力は200Hz($2 \times 100\text{Hz}$)でサンプリングすることにより、ADC固有のENOBによるデジタル出力を得ることが可能です。オーバーサンプリング係数 $k = 16$ のとき、同じ100Hz入力は、3,200Hz($k \times 2 \times 100\text{Hz}$)でサンプリングされます。オーバーサンプリングにより取得されたデータは、量子化ノイズを軽減するためデジタル・フィルタによるローパスと間引きが行われ、結果SNRが改善されます。改善されたSNRは高いENOB性能となり、式(3)で示されるように、改善されたSNR、N、オーバーサンプリング係数kの関係となります。

$$\text{SNR(dB)} = (6.02 \times N) + 1.76 + 10 \times \log_{10}(k) \quad (3)$$

$k = f_s / (2 \times f_{\text{max}})$, f_s はサンプリング周波数、 $2 \times f_{\text{max}}$ はナイキスト周波数

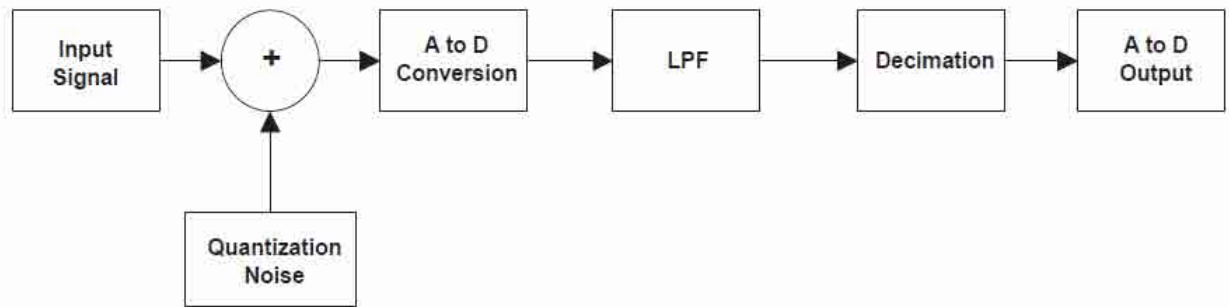


図 1 : オーバーサンプリング手法での信号の流れ

図 1 は、オーバーサンプリング手法での信号の流れを示しています。量子化ノイズはサンプリングの間、入力信号に加えられるホワイト・ノイズとしてモデル化されます。ホワイト・ノイズを利用したオーバーサンプリングは、オーバーサンプリング・係数を倍にする毎に、約3dBまたは 1/2 bit の分解能が改善されます。16bit の分解能を実現するためには、12bit ADC でのオーバーサンプリング係数を256とする必要があります。

表 1 は、オーバーサンプリング係数、SNR、実現可能な分解能改善ビット数を示しています。

表 1 : オーバーサンプリング係数、SNR、改善されるビット数の関係

OVERSAMPLING FACTOR, K	SNR IMPROVEMENT, DB	EXTRA BITS OF RESOLUTION
2	3	0.5
4	6	1
8	9	1.5
16	12	2
32	16	2.5
64	18	3
128	21	3.5
256	24	4
512	27	4.5
1024	30	5
2048	33	5.5
4096	36	6

3. アプリケーションのデモ

3.1. 回路の解説

このデモ・ボードでは、LCD機能が搭載されたMSP430FG439と3Vのリチウム・バッテリーを使用しています。基板のガーバー・ファイルと回路図は、このアプリケーション・レポート(英文)に付随するZIPファイルに入っています。抵抗R1、R2、キャパシタC1、C2、C6、C7はRCフィルタを構成しており、AVcc/DVccへのMCU電源部からのノイズを軽減します。アナログの性能を向上するため、このようなフィルタが推奨されます。キャパシタC4、C11は、基準電圧用の蓄電キャパシタで、変換時の電流を提供するために必要です。[2] 回路図をご参照下さい。

3.2. ソフトウェア制御

ボードは4つの動作モードと一つの校正モードからなり、下記に説明します。各モードにおいて、250ms間隔でLCD上にオーバーサンプリングと平均化された値が表示されます。ADC12は連続して変換を行い、サンプルは250ms以内にFIRによる256タップ平均移動フィルタを使用して平均化されます。

3.2.1. 100- μ V モード

パワー・オン時の初期状態となります。電圧は、100- μ Vの分解能で表示されます。どのモードからでも、スイッチ1(SW1)を押すことにより、このモードになります。入力電圧は、ボードに搭載されたポテンシオ・メーターまたは、外部電圧ソースにより可変され、それに応じて表示値が変化します。

3.2.2. 温度モード

スイッチ2(SW2)を押すことにより、このモードになります。温度は、0.01°Cの分解能で表示されます。

注：これは、オン・チップ温度センサーの精度ではありません。このモードは、オーバーサンプリングによる分解能改善のデモにのみ使用されます。

3.2.3. 16-bit 電圧測定モード

スイッチ3(SW3)を押すことにより、このモードになります。電圧は16-bit分解能で表示されます。観測される入力電圧は、ポテンシオ・メーターまたは、外部電圧ソースにより可変します。

3.2.4. オフ・モード(LPM4)

100- μ Vモードで、SW1を押すとこのモードになります。もう一度SW1を押すと100- μ Vモードに戻ります。SW2やSW3を押しても影響はありません。このモードでは、LCDや全てのクロックが停止して、デバイスはLPM4モードになります。

3.2.5. 温度校正モード

1. SW2を押しながら、パワー・オンします。
2. LCDが電圧を表示した時に、SW2を押すことにより、温度校正を行います。
3. LEDが点滅して、温度校正モードであることを知らせます。初期温度値(LCDに表示される)が79°Fを超えている場合、LEDが点灯します。(点滅に代わって)
4. SW1、SW2を押すことにより、温度センサーのオフセットが校正され、そのエリアでの温度を読み取ることができます。
5. はじめに、SW1またはSW2を押すことにより、3桁目を調整します。
6. SW1、SW2を同時に1秒間押すことにより、2桁目を調整します。
7. SW1、SW2を同時に1秒間押すことにより、1°F ずつ調整します。
8. SW1、SW2を同時に1秒間押すことにより、Step5に戻ります。
9. その後、SW3を1秒間押すと、校正データがフラッシュに書き込まれ、デバイスは前述の3つの各モードで動作します。

3.2.6. 基準電圧校正モード

1. SW2を押しながら、パワー・オンします。
2. LCDが点灯したら、SW2を離します。
3. SW3を押すと、デバイスは、基準電圧校正モードになります。
4. LEDは点滅してそれを知らせます。
5. LCD上に表示される基準電圧値を見ながら、ポテンシオ・メーターを調整します。
6. 再度、SW1、SW2は、LCDに表示される値を読んで、外部高精度電圧計で測定しながら基準電圧校正に使用されます。基準電圧(Vref)はヘッダーJ3、10番ピンで測定可能です。
7. SW4を再度押すことにより、校正データがフラッシュに書き込まれ、デバイスは前述の3つの各モードで動作します。

4. ソフトウェアの解説

リセット後のコードの実行では、low_level_init と init_sys ルーチンが実行されウォッチ・ドッグが停止され、ポート、LCD、ベーシック・タイマーが初期化されます。ADC12は、リピート・シングル・チャンネル・モードにセットされ、Timer_Bが サンプルング・タイマーとして使用され、サンプルは390us毎に変換されます。

4.1. Main()

メイン・ループは、250ms毎にコールされ、各モード（100- μ Vモード、温度モード、または16-bit電圧測定モード）を3.2で説明したようにスイッチ入力に応じて選択決定します。250ms のインターバルは、LCDの更新にも使用され表示を見易くします。

4.2. Voltage2()

この関数は、100- μ Vモードとオフ・モードを切り替えます。また、ADC12のマルチ・サンプルと内部基準電圧2.5Vを使ったチャンネル0の変換の設定を行います。

4.3. Temperature()

この関数は、オン・チップ温度センサーを利用した温度測定と、それをLCDに表示するために使用されます。また、ADC12のマルチ・サンプルと内部基準電圧1.5Vを使ったチャンネル10の変換の設定を行います。

4.4. Voltage()

この関数は、16-bit 電圧測定モードに使用されます。また、ADC12のマルチ・サンプルと内部基準電圧2.5Vを使ったチャンネル0の変換の設定を行います。

4.5. Check_cal()

この関数は、インフォメーション・フラッシュ上に校正データがあるか空かを確認します。もし消去されている場合は、適切な校正値が置かれます。

4.6. Temp_cal()

この関数は、オフセットの増減により温度校正を行い、校正値をフラッシュに保存します。

4.7. Ref_cal()

この関数は、"refcal"値の増減により基準電圧の校正を行い、校正値をフラッシュに保存します。

5. 結果

下記は、1LSBステップで増加させたDC入力チャートです。1-LSBステップは、正確な16-bit DACにより生成されています。理想的な16-bit変換器とオーバーサンプリング測定された12-bit変換器の値が比較されています。アナログ入力は、1LSBステップで増加します。図2のデータは、全体の電圧レンジが216となっています。図3では、ある一部を拡大しています。エクセルのデータもZIPファイル内に入っています。(英文アプリケーション・レポート SLAA323 をご参照下さい。)

<http://focus.ti.com/mcu/docs/mcusupporttechdocsc.tsp?sectionId=96&tabId=1502&abstractName=slaa323>

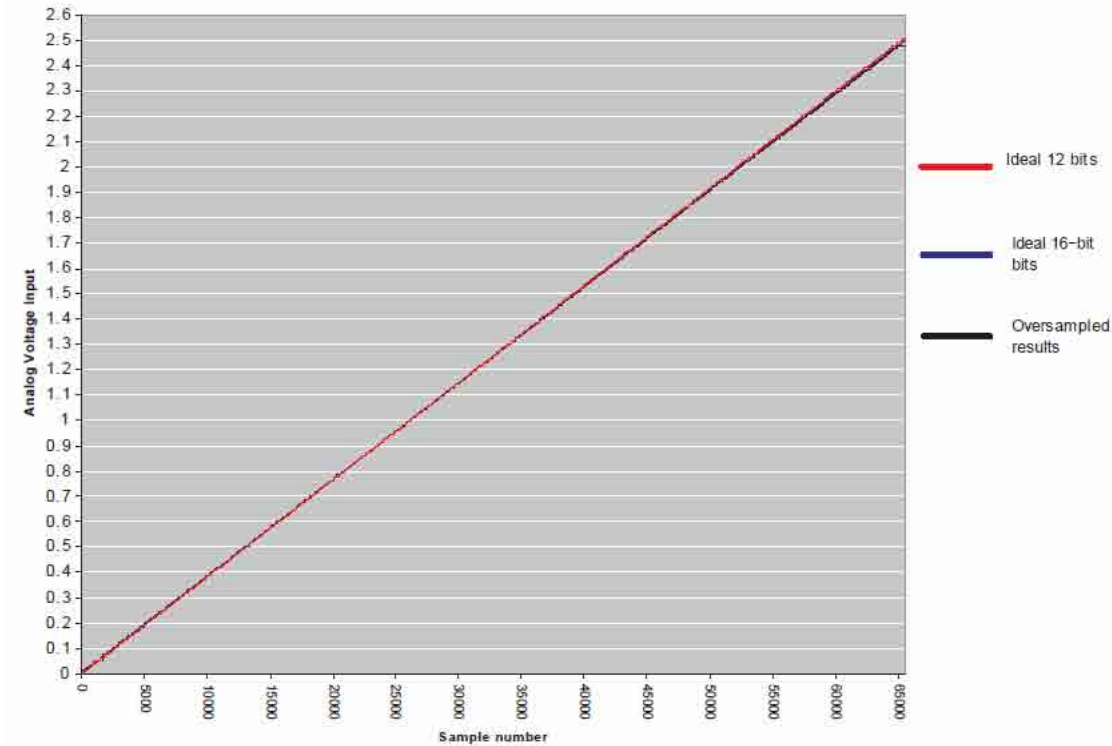


図2：オーバーサンプリングと理想的なデータとの比較(範囲全体)

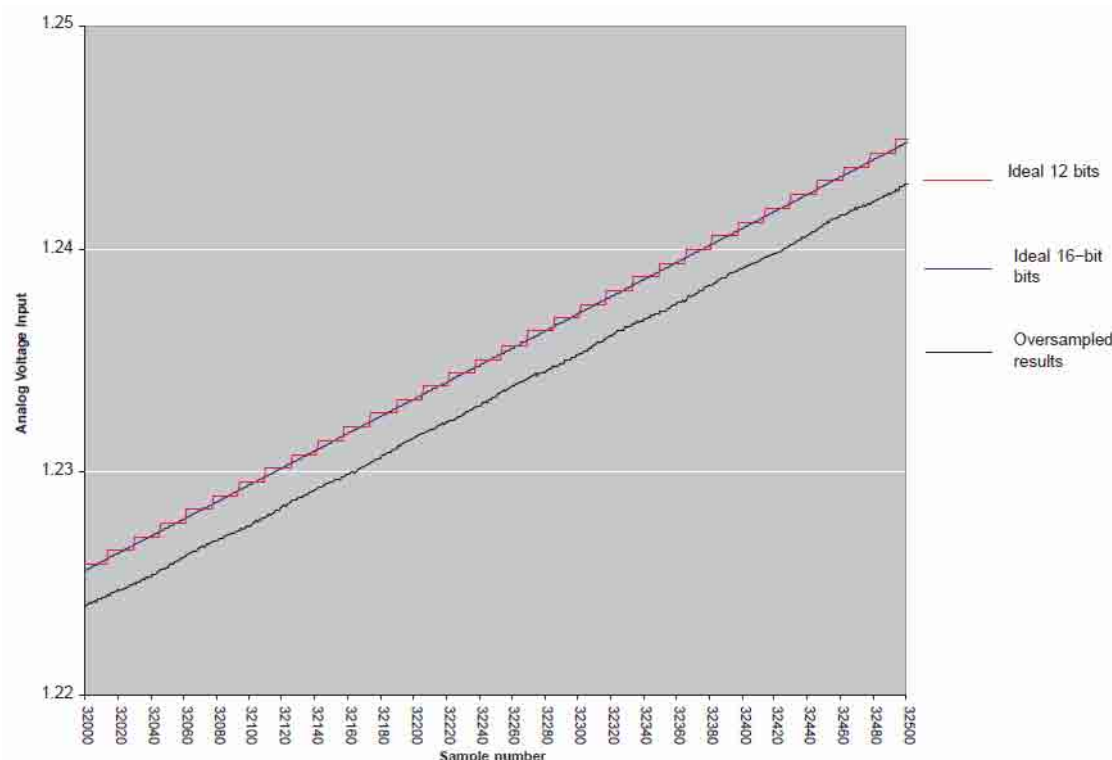


図3：オーバーサンプリングと理想的なデータとの比較(一部を拡大)

6. 結論

このアプリケーション・レポートでは、ADC12とオーバーサンプリング手法を用いて、高い分解能を実現することを説明しました。オーバーサンプリングはアナログのアンチ・エイリアス・フィルタ制約条件の低下時でも、デジタルでのフィルタリングと間引きを実施することにより、より高い実効分解能を実現する一つの手法です。例えば、サインカーブのような時間と共に変化する入力信号でも、ディザを入力に加えることで、分解能が向上します。このアプローチは、オーバーサンプリング技法7に記載されています。[1] この解決法は、MSP430FG439と内部オペアンプ、タイマー、DAC12[2] を使用して実現できると思われれます。[2]

最適なレイアウトと適切な電源部のデカップリングにより、高分解能システムの性能をさらに向上することができます。デカップリング・フィルタはできる限り電源部の近くに配置して下さい。

オーバーサンプリングは、ADCの量子化ノイズに依存します。従いまして、デバイス毎に差があるかも知れません。結果から考察すると、オーバーサンプリング手法はADC12でも12-bit以上の実現に有効です。

7. 参考文献

1. *Oversampling Techniques using the TMS320C24x Family (SPRA461)*

2. *MSP430x4xx Family User's Guide (SLAU056)*

3. *Oversampling the ADC12 for Higher Resolution (SLAA323) (英文)*

<http://focus.ti.com/mcu/docs/mcusupporttechdocsc.tsp?sectionId=96&tabId=1502&abstractName=slaa323>

ご注意

日本テキサス・インスツルメンツ株式会社（以下TIJといいます）及びTexas Instruments Incorporated（TIJの親会社、以下TIJないしTexas Instruments Incorporatedを総称してTIといいます）は、その製品及びサービスを任意に修正し、改善、改良、その他の変更をし、もしくは製品の製造中止またはサービスの提供を中止する権利を留保します。従いまして、お客様は、発注される前に、関連する最新の情報を取得して頂き、その情報が現在有効かつ完全なものであるかどうかご確認下さい。全ての製品は、お客様とTIJとの間に取引契約が締結されている場合は、当該契約条件に基づき、また当該取引契約が締結されていない場合は、ご注文の受諾の際に提示されるTIJの標準販売契約約款に従って販売されます。

TIは、そのハードウェア製品が、TIの標準保証条件に従い販売時の仕様に対応した性能を有していること、またはお客様とTIJとの間で合意された保証条件に従い合意された仕様に対応した性能を有していることを保証します。検査およびその他の品質管理技法は、TIが当該保証を支援するのに必要とみなす範囲で行なわれております。各デバイスの全てのパラメーターに関する固有の検査は、政府がそれ等の実行を義務づけている場合を除き、必ずしも行なわれておりません。

TIは、製品のアプリケーションに関する支援もしくはお客様の製品の設計について責任を負うことはありません。TI製部品を使用しているお客様の製品及びそのアプリケーションについての責任はお客様にあります。TI製部品を使用したお客様の製品及びアプリケーションについて想定される危険を最小のものとするため、適切な設計上および操作上の安全対策は、必ずお客様にてお取り下さい。

TIは、TIの製品もしくはサービスが使用されている組み合せ、機械装置、もしくは方法に関連しているTIの特許権、著作権、回路配置利用権、その他のTIの知的財産権に基づいて何らかのライセンスを許諾するということは明示的にも黙示的にも保証も表明もしておりません。TIが第三者の製品もしくはサービスについて情報を提供することは、TIが当該製品もしくはサービスを使用することについてライセンスを与えるとか、保証もしくは是認するということの意味しません。そのような情報を使用するには第三者の特許その他の知的財産権に基づき当該第三者からライセンスを得なければならない場合もあり、またTIの特許その他の知的財産権に基づきTIからライセンスを得て頂かなければならない場合もあります。

TIのデータブックもしくはデータシートの中にある情報を複製することは、その情報に一切の変更を加えること無く、かつその情報と結び付けられた全ての保証、条件、制限及び通知と共に複製がなされる限りにおいて許されるものとします。当該情報に変更を加えて複製することは不正で誤認を生じさせる行為です。TIは、そのような変更された情報や複製については何の義務も責任も負いません。

TIの製品もしくはサービスについてTIにより示された数値、特性、条件その他のパラメーターと異なる、あるいは、それを超えてなされた説明で当該TI製品もしくはサービスを再販売することは、当該TI製品もしくはサービスに対する全ての明示的保証、及び何らかの黙示的保証を無効にし、かつ不正で誤認を生じさせる行為です。TIは、そのような説明については何の義務も責任もありません。

TIは、TIの製品が、安全でないことが致命的となる用途ないしアプリケーション（例えば、生命維持装置のように、TI製品に不良があった場合に、その不良により相当な確率で死傷等の重篤な事故が発生するようなもの）に使用されることを認めておりません。但し、お客様とTIの双方の権限有る役員が書面でそのような使用について明確に合意した場合は除きます。たとえTIがアプリケーションに関連した情報やサポートを提供したとしても、お客様は、そのようなアプリケーションの安全面及び規制面から見た諸問題を解決するために必要とされる専門的知識及び技術を持ち、かつ、お客様の製品について、またTI製品をそのような安全でないことが致命的となる用途に使用することについて、お客様が全ての法的責任、規制を遵守する責任、及び安全に関する要求事項を満足させる責任を負っていることを認め、かつそのことに同意します。さらに、もし万一、TIの製品がそのような安全でないことが致命的となる用途に使用されたことによって損害が発生し、TIないしその代表者がその損害を賠償した場合は、お客様がTIないしその代表者にその全額の補償をするものとします。

TI製品は、軍事的用途もしくは宇宙航空アプリケーションないし軍事的環境、航空宇宙環境にて使用されるようには設計もされていませんし、使用されることを意図されておられません。但し、当該TI製品が、軍需対応グレード品、若しくは「強化プラスチック」製品としてTIが特別に指定した製品である場合は除きます。TIが軍需対応グレード品として指定した製品のみが軍需品の仕様書に合致いたします。お客様は、TIが軍需対応グレード品として指定していない製品を、軍事的用途もしくは軍事的環境下で使用することは、もっぱらお客様の危険負担においてなされるということ、及び、お客様がもっぱら責任をもって、そのような使用に関して必要とされる全ての法的要求事項及び規制上の要求事項を満足させなければならないことを認め、かつ同意します。

TI製品は、自動車用アプリケーションないし自動車の環境において使用されるようには設計されていませんし、また使用されることを意図されておられません。但し、TIがISO/TS 16949の要求事項を満たしていると特別に指定したTI製品は除きます。お客様は、お客様が当該TI指定品以外のTI製品を自動車用アプリケーションに使用しても、TIは当該要求事項を満たしていなかったことについて、いかなる責任も負わないことを認め、かつ同意します。

Copyright © 2007, Texas Instruments Incorporated
日本語版 日本テキサス・インスツルメンツ株式会社

弊社半導体製品の取り扱い・保管について

半導体製品は、取り扱い、保管・輸送環境、基板実装条件によっては、お客様での実装前後に破壊/劣化、または故障を起こすことがあります。

弊社半導体製品のお取り扱い、ご使用にあたっては下記の点を遵守して下さい。

1. 静電気

- 素手で半導体製品単体を触らないこと。どうしても触る必要がある場合は、リストストラップ等で人体からアースをとり、導電性手袋等をして取り扱うこと。
- 弊社出荷梱包単位（外装から取り出された内装及び個装）又は製品単品で取り扱いを行う場合は、接地された導電性のテーブル上で（導電性マットにアースをとったもの等）、アースをした作業者が行うこと。また、コンテナ等も、導電性のものを使うこと。
- マウンタやはんだ付け設備等、半導体の実装に関わる全ての装置類は、静電気の帯電を防止する措置を施すこと。
- 前記のリストストラップ・導電性手袋・テーブル表面及び実装装置類の接地等の静電気帯電防止措置は、常に管理されその機能が確認されていること。

2. 温・湿度環境

- 温度：0～40℃、相対湿度：40～85%で保管・輸送及び取り扱いを行うこと。（但し、結露しないこと。）

- 直射日光が当たる状態で保管・輸送しないこと。
3. 防湿梱包
 - 防湿梱包品は、開封後は個別推奨保管環境及び期間に従い基板実装すること。
 4. 機械的衝撃
 - 梱包品（外装、内装、個装）及び製品単品を落下させたり、衝撃を与えないこと。
 5. 熱衝撃
 - はんだ付け時は、最低限260℃以上の高温状態に、10秒以上さらさないこと。（個別推奨条件がある時はそれに従うこと。）
 6. 汚染
 - はんだ付け性を損なう、又はアルミ線腐食の原因となるような汚染物質（硫黄、塩素等ハロゲン）のある環境で保管・輸送しないこと。
 - はんだ付け後は十分にフラックスの洗浄を行うこと。（不純物含有率が一定以下に保証された無洗浄タイプのフラックスは除く。）

以上