

LDC1000の温度補償

Evgeny Fomin

概要

LDC1000は、ダイナミック・レンジにおける内部精度が0.1%の高精度インダクタンス/デジタル・コンバータです。ただし、測定精度に大きな影響を与え、システムの性能を左右する要素が存在します。そうした要素の1つが温度変化です。

本書では、温度変化が誘導型近接センサに与える物理的な影響と、そのような影響を軽減する方法について説明します。

目次

1. はじめに	1
2. システム・パラメータに対する温度変化の影響	1
2.1 R_p の変化	2
2.2 インダクタンスの変化	2
3. 軽減策	4
3.1 温度補正を行った R_p の測定	4
3.2 マルチコイル設計	4
4. リファレンス	5

1 はじめに

LDC1000はセンサ(LC発振器)の特性を正確に測定して、導電性ターゲットの存在を検出します。コイルの特性は個々のアプリケーションに合わせる必要があり、コイルに変化が生じると、測定の感度や精度が影響を受けます。一部のアプリケーションでは、システムの動作温度の変化がもたらす影響について考慮する必要があります。

2 システム・パラメータに対する温度変化の影響

誘導型近接センサでは、センサ・コイルのインダクタンス L と共振インピーダンス R_p の変化に基づいて測定を行います。いずれのパラメータも、コイルの設計、材質、動作条件によって決まる温度の影響を受けやすくなっています。 R_p に対する温度の影響は主に、コイルおよびターゲットの材質の温度係数によるものです。 L に対する温度の影響は、コイル構造体の温度係数の膨張の結果生じるものです。通常は、こちらの影響のほうがはるかに小規模です。したがって、 L に基づく測定のほうが温度変化の影響を受けにくくなっています。

2.1 R_p の変化

LC共振回路の並列抵抗 R_p は、LDC1000によって測定されるパラメータの1つです。 R_p は次式で求められます。

$$R_p = L / (R_s * C) \quad (1)$$

ここで

- L はインダクタンスです。
- R_s はLCタンクの等価直列抵抗です。
- C はLCタンクのコンデンサ容量です。

ここでの支配的要素は、コイルおよびターゲットにおける抵抗の変化です。銅の抵抗温度係数は $0.39\%/^{\circ}\text{C}$ ($3900\text{ppm}/^{\circ}\text{C}$)です。その他の多くの金属でも値は同様です。

R_p の値は、以下で説明するようにインダクタンスによっても変化します。これは、 R_p が L に比例しているからです。

2.2 インダクタンスの変化

鉄合金やフェライトなどの磁性材料が存在しない場合、インダクタンスは電流のフロー形状のみに依存します。この電流には、コイル自体の電流のほか、周囲の導体で発生するすべての渦電流も含まれます。以下では、温度変化が空心コイルのインダクタンスに与える影響について検討してみます。

温度変化に伴うコイルの熱膨張や熱収縮によって、コイルの形状は変化します。銅巻線コイルの場合、熱膨張係数(CTE)は次式のようにになります。

$$\alpha = 17 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}[1] \quad (17\text{ppm}/^{\circ}\text{C}) \quad (2)$$

L は通常、コイルの面積を長さで割ったものに比例しますが、 L における全体的な変化も $17\text{ppm}/^{\circ}\text{C}$ になります。

PCBコイルの場合、考慮すべきケースとして単層コイル設計と多層コイル設計の2つがあります。

単層コイルのインダクタンスは直径に比例するので[2]、 L における変化は基板のCTEに比例します。PCBの大半では基板にFR4が使用されており、FR4のCTEは約 $15\text{ppm}/^{\circ}\text{C}$ です。

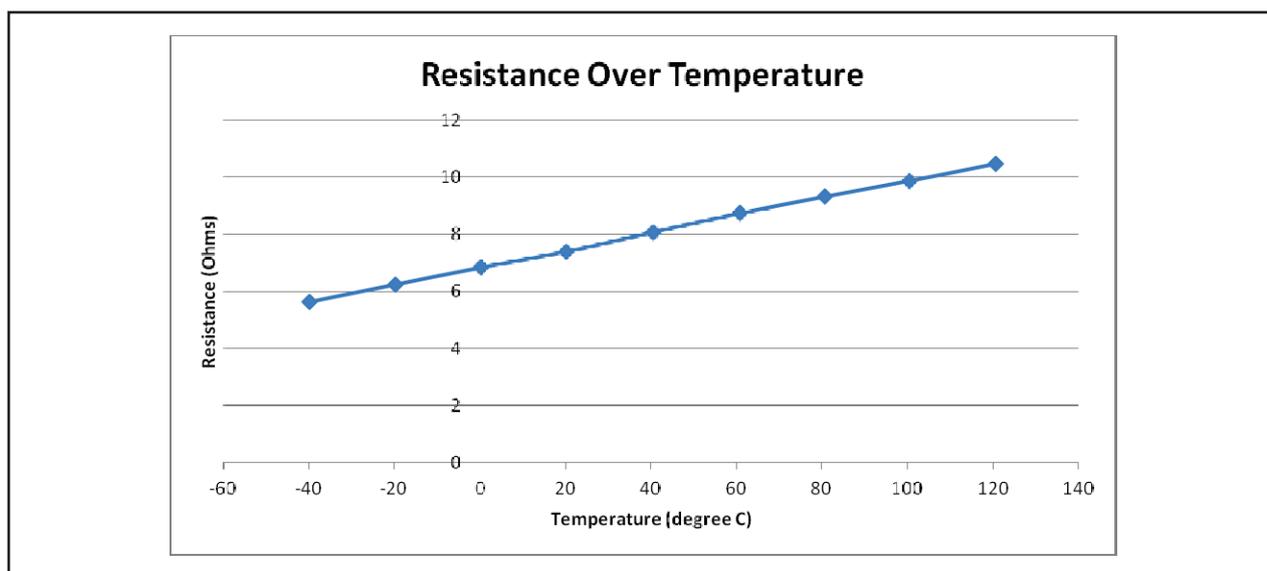


図 1. 代表的なPCBコイルにおける抵抗と温度の関係

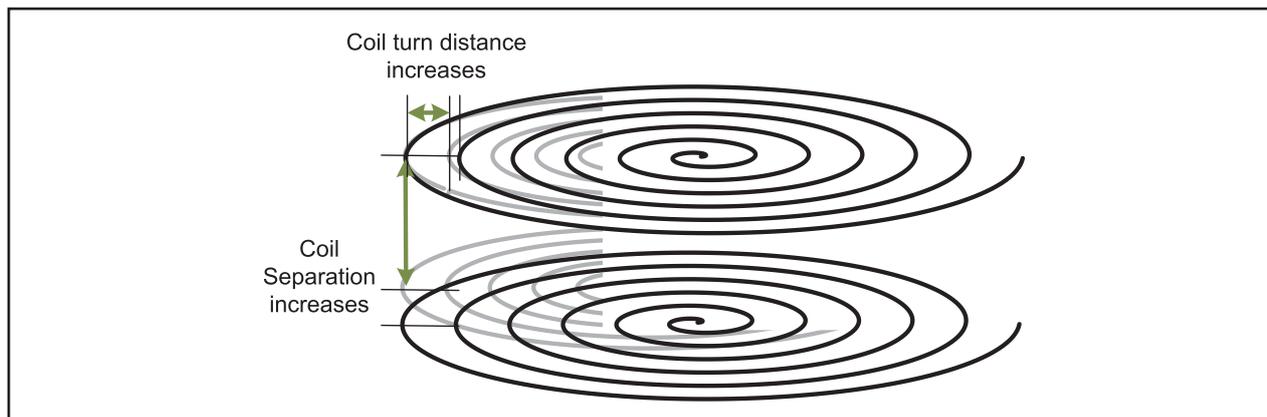


図 2. 温度変化に伴う多層コイル形状の変化

多層コイルの場合、層間の結合係数の変化のため、温度変化とインダクタンスの変化との関係は複雑です。PCB幅が変わると、層間の結合の変化につながるため、実際のインダクタンスの変化は15ppm/°C未満になります。また、特殊なコイル設計では、直径の拡大によるインダクタンスの増加が、厚さの拡大によるインダクタンスの減少によって補償されます。図2の場合、多層コイル設計におけるコイル間の距離の変化が、コイルの巻き間の距離の変化によって補償されます。

考慮すべきもう1つの影響として、巻線内の電流分布の変化によるインダクタンスの変化(近接効果)が挙げられます。温度変化によってワイヤの抵抗が変化し、さらにそれが導電性の表皮の厚さに変化をもたらします。ただし、この影響はPCBの膨張/収縮の影響よりもはるかに小さく、どちらかと言えば学術的関心の対象です。

ターゲットがコイルの近く(コイル径の50%未満の距離)にある場合、相互インダクタンスに対する温度の影響を評価する必要があります。

温度変化によって抵抗が変化すると、その結果としてターゲットの渦電流分布も変化します。渦電流分布におけるこの変化は、相互インダクタンスに影響を与えます。影響の程度は、ターゲットとの距離や周波数に大きく依存します。ターゲットをコイルのすぐ近くに置くと、数十ppm程度の影響があり、ターゲットとの距離をコイル径の20%よりも広げると、ppmが1桁まで急速に低下します。

多くの場合、より重大な考慮事項として挙げられるのが機械の構成です。温度が変化すると、機械システムの膨張/収縮によってターゲットとコイルとの距離も変化することがあります。特にターゲットがコイルのすぐ近くにある場合、このような変化は相互インダクタンスに直接の影響を

与えます。実際の影響は、コイル/ターゲット間の距離、形状、ターゲットの組成など多くの要素に依存します。

例えば、現在検討中のシステムの1つでは、Lの相対的变化($\Delta L/L$)と、コイル/ターゲット間の距離の相対的变化($\Delta X/X$)を4で割ったものが等しいことが判明しました。Xが小さいと、Xでの相対的变化が大きくなるので、機械システムを設計する際は注意が必要です。

LDC1000では、センサ(LCタンク)の発振周波数を測ることによって間接的にインダクタンスを測定します。インダクタンスは、LCタンクの既知のコンデンサ容量を使って求められます。

$$F = 1 / (2\pi\sqrt{LC}) \quad (3)$$

よって、

$$L = 1 / (2\pi F)^2 / C \quad (4)$$

重要な点として、コンデンサ容量も温度変化の影響を受けることに注意してください。この影響を最小限に抑える上で、温度係数が30ppm/°CのC0Gコンデンサを推奨します。磁気コアを持つインダクタではほとんどの場合、温度に対するインダクタンスの変化は、コアの透磁率の変化に左右されます。この変化を求めるための正確な計算式はコア材やコイル形状に依存しているため、本書の範囲外となります。

全温度範囲にわたってシステムの性能要件が満たされる場合をはじめ、実用的に問題のない限り、インダクタンスに基づく測定を推奨します。この測定方法の場合、温度補償を行わなくても、温度変化による誤差を0.1%未満に抑えられます。

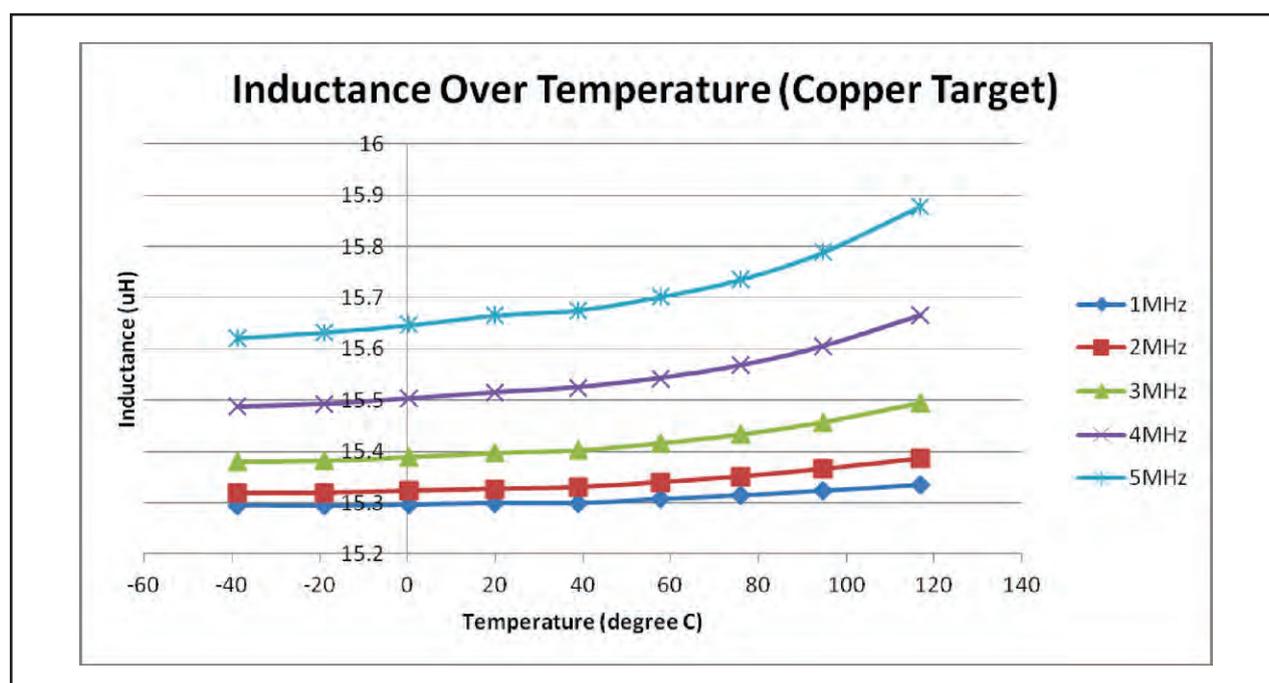


図3. コイルにおける周波数別のインダクタンスと温度の関係

3 軽減策

3.1 温度補正を行った R_P の測定

システムの動作時温度が判明しており、コイルとターゲットが同じ材質（または抵抗の温度係数が同様の材質）で作られていれば、 R_P の測定は容易に補正できます。ただし、コイルとターゲットの温度が同じであることも前提となります。

最初のシステム較正（LDC1000の出力と距離/位置/角度との較正）は、管理された既知の温度（例：25℃）で記録する必要があります。LDC1000では $1/R_P$ を測定し、デジタル値として報告します。実際の R_P の値は、データシートに記載された式に従って計算できます。

較正データを再計算し、 R_P をパラメータの関数として反映させます。

システムの動作中、LDC1000から得られたデータは、同じ式に従って実際の $R_{P_{meas}}$ （オーム単位）に変換されてから、以下のように温度が補正されます。

$$R_P = R_{P_{meas}} / (1 + \alpha(T - T_{cal})) \quad (5)$$

ここで

- R_P は、補正された R_P の値です。
- $R_{P_{meas}}$ は、測定された R_P の値です。
- α は抵抗の温度係数です。
- T_{cal} はシステム較正の温度です。
- T は動作温度です。

補正された R_P の値を使用して、較正データからパラメータ値を求めます。

この補償方式を用いると、温度変化による誤差を0.1%未満に抑えられます。

ヒント：第2のLDC1000センサを高精度温度センサとして利用できます。このセンサはメイン・センサと同じ環境に置く必要がありますが、出力は可変パラメータ（ターゲットの距離/位置/角度）の影響を受けないようにしてください。2次システムの出力は、温度との較正を行ってから、システム動作時の温度測定に使用できます。

コイルとターゲットの温度係数が大きく異なる場合、磁気コアを持つコイルの使用が必要な場合、または温度の依存関係にその他の非線形ソースが存在する場合、 R_P と温度の関係は線形でなくなります。このような場合に温度変化の補正を行うには、ルックアップ・テーブル方式を使用します。

設計時に全温度範囲にわたってシステム性能を評価し（ワントタイム較正）、さまざまな温度における R_P とパラメータ（距離、位置、角度など）の関係を記録します。

システムの動作時には、 R_P とパラメータの関係を示す適切な曲線を現在の温度に基づいて選択し、これを使って R_P に対するパラメータを測定します。

較正データに存在しない温度値に対して較正データを補間することにより、測定精度をさらに高められます。

3.2 マルチコイル設計

温度変化を容易に補償できるもう1つの方法として、システム設計へのセンサの追加が挙げられます。コイルとターゲットは、材質および温度が同じである必要があります。

システムの等価直列抵抗 R_S は、以下に示すように温度の関数です。

$$R_S(T) = R_{S0} [1 + \alpha(T - T_0)] \quad (6)$$

ここで

- R_{S0} は、温度 T_0 におけるシステムの抵抗です。
- T は温度です。
- α は抵抗の温度係数です。

パラメータ（ターゲットの距離/位置/角度）の測定において各センサの出力が異なるように、システムを設計する必要があります。例えば、ターゲットの位置を測定する場合は、センサをターゲットの両側に配置してください。また、「スライダ」設計の場合は、それぞれのスライドが反対側を向くようにしてください。

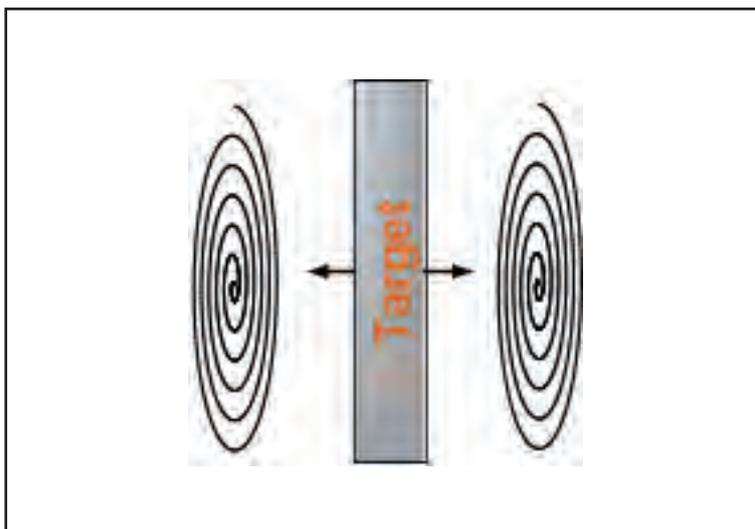


図 4. 2つのコイルで導電性ターゲットの位置を検出

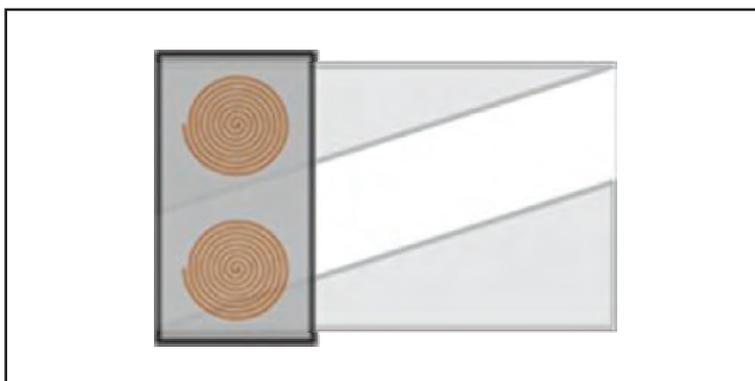


図 5. 2つのコイルでスライダの位置(三角形状)を検出

測定された R_P 値の比率が温度に依存しないことは、容易に確認できます。

$$\begin{aligned} R_{P1} / R_{P2} &\sim R_{S2}(T) / R_{S1}(T) \\ &= R_{S02} [1 + \alpha(T - T_0)] / R_{S01} [1 + \alpha(T - T_0)] \\ &= R_{S02} / R_{S01} \end{aligned} \quad (7)$$

ここで

・ R_{S01} と R_{S02} の値は温度に依存していません。

この補償方式を用いると、温度変化による誤差を0.1%未満に抑えられます。

4 リファレンス

1. http://www.engineeringtoolbox.com/linear-expansion-coefficients-d_95.
2. A new calculation for designing multilayer planar spiral inductors (EDN37)

ご注意

Texas Instruments Incorporated 及びその関連会社 (以下総称して TI といいます) は、最新の JESD46 に従いその半導体製品及びサービスを修正し、改善、改良、その他の変更をし、又は最新の JESD48 に従い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。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をご確認下さい。全ての半導体製品は、ご注文の受諾の際に提示される TI の標準販売契約約款に従って販売されます。

TI は、その製品が、半導体製品に関する TI の標準販売契約約款に記載された保証条件に従い、販売時の仕様に対応した性能を有していることを保証します。検査及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、適用される法令によってそれ等の実行が義務づけられている場合を除き、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又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関連する危険を最小のものとするため、適切な設計上及び操作上の安全対策は、お客様にてお取り下さい。

TI は、TI の製品又はサービスが使用されている組み合わせ、機械装置、又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 が当該製品又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、保証又は是認するということを含みません。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、又は 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・ブック又はデータ・シートの中にある情報の重要な部分の複製は、その情報に一切の変更を加えること無く、且つその情報と関連する全ての保証、条件、制限及び通知と共になされる限りにおいてのみ許されるものとします。TI は、変更が加えられて文書化されたものについては一切責任を負いません。第三者の情報については、追加的な制約に服する可能性があります。

TI の製品又はサービスについて TI が提示したパラメーターと異なる、又は、それを超えてなされた説明で当該 TI 製品又はサービスを再販売することは、関連する TI 製品又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、且つ不公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負いません。

TI からのアプリケーションに関する情報提供又は支援の一切に拘わらず、お客様は、ご自身の製品及びご自身のアプリケーションにおける TI 製品の使用に関する法的責任、規制、及び安全に関する要求事項の全てにつき、これをご自身で遵守する責任があることを認め、且つそのことに同意します。お客様は、想定される不具合がもたらす危険な結果に対する安全対策を立案し実行し、不具合及びその帰結を監視し、害を及ぼす可能性のある不具合の可能性を低減し、及び、適切な治療措置を講じるために必要な専門的知識の一切を自ら有することを表明し、保証します。お客様は、TI 製品を安全でないことが致命的となるアプリケーションに使用したことから生じる損害の一切につき、TI 及びその代表者にその全額の補償をするものとします。

TI 製品につき、安全に関連するアプリケーションを促進するために特に宣伝される場合があります。そのような製品については、TI が目的とするところは、適用される機能上の安全標準及び要求事項を満たしたお客様の最終製品につき、お客様が設計及び製造ができるようお手伝いすることにあります。それにも拘わらず、当該 TI 製品については、前のパラグラフ記載の条件の適用を受けるものとします。

FDA クラス III (又は同様に安全でないことが致命的となるような医療機器) への TI 製品の使用は、TI とお客様双方の権限ある役員の間で、そのような使用を行う際について規定した特殊な契約書を締結した場合を除き、一切認められていません。

TI が軍需対応グレード品又は「強化プラスチック」製品として特に指定した製品のみが軍事用又は宇宙航空用アプリケーション、若しくは、軍事的環境又は航空宇宙環境にて使用されるように設計され、かつ使用されることを意図しています。お客様は、TI がそのように指定していない製品を軍事用又は航空宇宙用に使う場合は全てご自身の危険負担において行うこと、及び、そのような使用に関して必要とされるすべての法的要求事項及び規制上の要求事項につきご自身のみの責任により満足させることを認め、且つ同意します。

TI には、主に自動車用に使われることを目的として、ISO/TS 16949 の要求事項を満たしているとして特別に指定した製品があります。当該指定を受けていない製品については、自動車用に使われるようには設計されてもいませんし、使用されることを意図しておりません。従いまして、前記指定品以外の TI 製品が当該要求事項を満たしていなかったことについては、TI はいかなる責任も負いません。

Copyright © 2014, 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) 又は製品単体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) 及び製品単体を落下させたり、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、又はアルミ配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