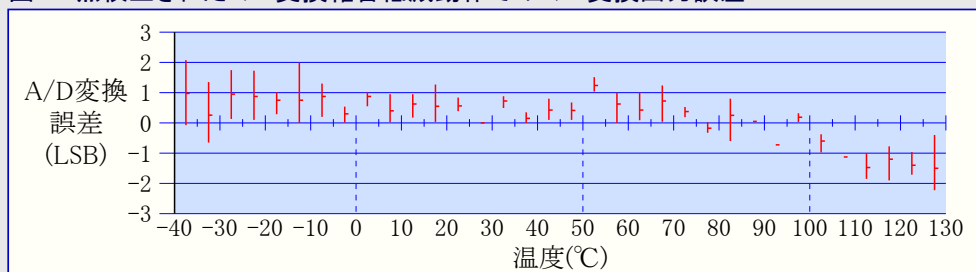


## 序説

この応用記述はAtmel<sup>®</sup> ATtiny25/45/85から温度測定の校正と補償の方法を記述します。これは内部温度感知器付きの他のAVR<sup>®</sup>マイクロ コントローラでも使えます。温度測定はA/D変換器のシングル エント チャンネルと対にされたチップ上の温度感知器に基づきます。この感知器は温度依存の電圧を生成するダイオードです。電圧はA/D変換器で測定されます。電圧は温度に直線関係を持ち、その結果は温度に対して概ね1LSB/°Cの相関を持ちます。

ダイオード電圧はより高い直線性ですが、工程変動のために温度感知器出力電圧は1つのチップと別のもの変わります。また、A/D変換器基準電圧として使われる内部基準電圧も温度と共に変化します。AVRの全温度範囲に渡る代表的な温度測定精度は、変位(オフセット)校正と補償後で±10°Cです。

図1. 2点校正されたA/D変換雑音低減動作でのA/D変換出力誤差



## 特徴

- 2点と1点の校正
- A/D変換出力値の補償

## 目次

---

序説	1
特徴	1
1. 校正	3
1.1. 2点校正	3
1.1.1. 校正段階	3
1.1.2. 補償	4
1.1.3. 校正範囲	4
1.2. 1点校正	4
2. 精度	4
2.1. 1点校正と補償	5
2.2. 2点校正と補償	5
3. 要約	7
4. 改訂履歴	7

# 1. 校正

温度測定からの結果は変位(オフセット)と利得の誤差を持ちます。内部温度基準は1つまたは2つの既知の温度での校正測定をして出力値を補正することによって、これらの誤差を修正できます。これは精密な、時には±2℃ほどの温度測定結果にできます。

## 1.1. 2点校正

可能な限り正確な温度測定をするために2点校正が必要とされます。最初の校正点( $ADC_{T1}$ )は最初の校正温度( $T_1$ )でのA/D変換器からの出力です。本応用記述はこの最初の校正温度として室温(25℃)を使います。2つ目の校正点( $ADC_{T2}$ )は第2校正温度( $T_2$ )での出力です。2つ目の温度は関心を持つ温度範囲より少し高く選ばれるべきです。A/D変換器からの出力は校正値( $ADC_{T1}$ と $ADC_{T2}$ )が℃に変換されなければならないような、LSBまたはKで与えられます。これはその値から273を減算することによって行われます。

### 1.1.1. 校正段階

$ADC_{T1}$ と $ADC_{T2}$ は直線を定義します。点( $h,k$ )と点( $p,q$ )を横切る直線は式1.によって表現されます。出力( $y$ )はA/D変換器からの温度出力で、一方入力( $x$ )が実際の温度です。

式1. 直線 
$$y - k = \frac{q - k}{p - h} (x - h)$$

A/D変換器からの理想出力は式2.で定義される直線です。

式2. 理想出力 
$$y = k$$

右図内の赤実線は便宜的なA/D変換器特性で、一方緑破線は温度測定からの理想結果を表します。2つの校正点によって定義された線は次式です。

式3. 校正点によって定義された線 
$$y - ADC_{T1} = \frac{ADC_{T2} - ADC_{T1}}{T_2 - T_1} (x - T_1)$$

変位(オフセット)誤差は座標原点と2つの校正点で定義された線がY軸と交差する点間の距離です。これは式3.に於ける $x=0$ 設定によって得られます。

式4. 変位誤差 
$$T_{offset} = \frac{ADC_{T2} - ADC_{T1}}{T_2 - T_1} (-T_1) + ADC_{T1}$$

変位誤差が取り去られた後でA/D変換器出力値に適用するための利得計数 $k$ を探ることが必要です。この計数を探すのに次式が使われます。

式5. 利得係数 
$$k = \frac{T_2}{ADC_{T2} - T_{offset}}$$

図1-1. A/D変換器と理想出力

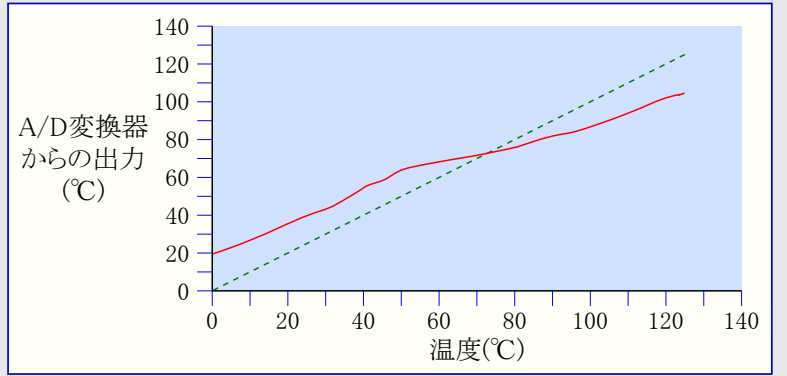


図1-2. 校正点で定義された線でのA/D変換器出力

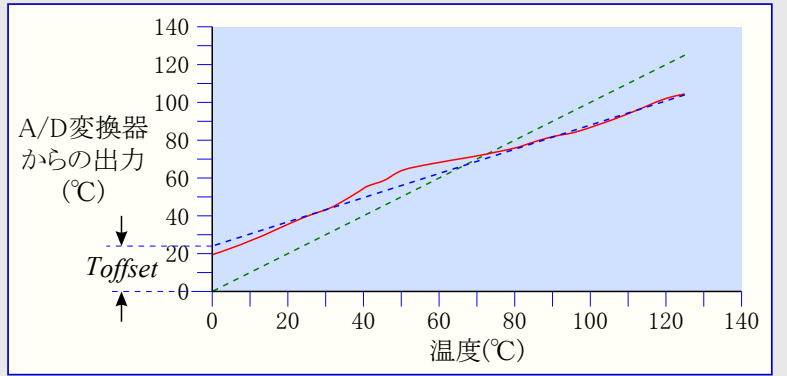
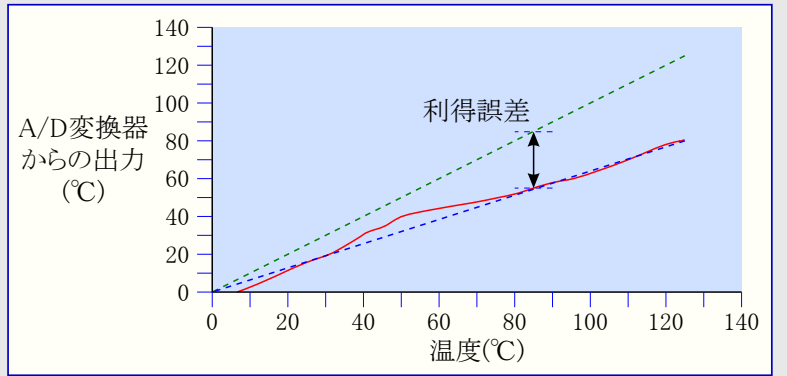


図1-3. 変位誤差消去でのA/D変換器出力



### 1.1.2. 補償

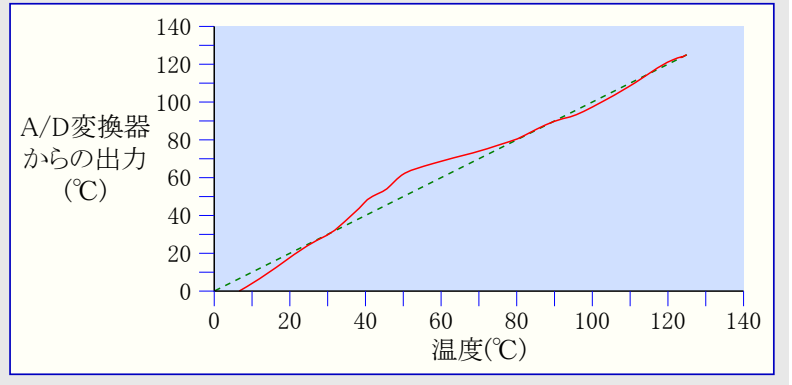
式5からの $k$ 値は $T1$ で $T2$ を、 $ADC_{T1}$ で $ADC_{T2}$ を置き換えた場合も変わりません。今や補償はA/D変換値から変位と利得の誤差を取り去ることによって行えます。これは出力値に次式を適用することによって果たされます。

#### 式6. 補償式

$$T = (T_{ADC} - T_{offset}) \times k$$

$T_{ADC}$ はA/D変換値から273を減算することで $^{\circ}\text{C}$ に変換されるA/D変換器からの出力です。

図1-4. 変位と利得の誤差消去でのA/D変換器出力



### 1.1.3. 校正範囲

より良い精度を達成するために校正範囲を狭くできます。別の言葉では、より良い精度を得るためにもっと校正点が必要とされます。直前の論議ではA/D変換器特性が校正点間で概ね直線であると仮定されていました。これは必ずしも心配事ではありません。特性はいくつかの温度の前後で度々概ね1つの直線です。校正点を賢明に選ぶことが補償段階後の精度を増す結果になり得ます。

### 1.2. 1点校正

唯一つの校正点を利用可能な場合、校正は2つの方法の(内の)1つで行えます。変位(オフセット)誤差は大雑把な補償を得るためにA/D変換器出力値から取り去れます。 $T1$ (室温)と $T2$ でのA/D変換値の両方がこの変位誤差を探すのに使えます。この種の校正/補償が測定に於いて、より大きな誤差に終わることに注意してください。例えば、A/D変換器出力が温度特性の下端で負の誤差を持ち、その誤差が $50^{\circ}\text{C}$ 付近の与えられた温度より上で正に戻ると仮定させてください。校正点が $25^{\circ}\text{C}$ で関心のある温度が $50^{\circ}\text{C}$ より上の場合、変位消去だけを使う補償は関心のある温度に対してより大きな測定誤差で終わるでしょう。

1点校正の2つ目の形式はA/D変換器からの出力が概ね直線で誤差が主に利得誤差であるとの仮定です。校正点は変位=0と仮定する時に利得係数を計算するのに使われます。この種の校正と補償は変位校正と同じ問題に苦しみます。

2点校正と比較して1点校正の利点は1つの校正精度温度だけが必要なことです。また、出力値に適用される式が複雑でないので、補償それ自体がより簡単です。

## 2. 精度

補償なしでの最大誤差は、理想値からの最大偏差が温度端で起こる所で、概ね $\pm 10^{\circ}\text{C}$ であり得ます。2点校正と補償が最良の結果を与えますが、関心のある温度が校正点近くである場合、未だ1点校正が満足する温度読み込みの結果になり得ます。測定から生じる後続するデータはAtmel ATtiny45で作成しました。

図2-1. 3.3V, 1MHz CPU周波数でのA/D変換器出力

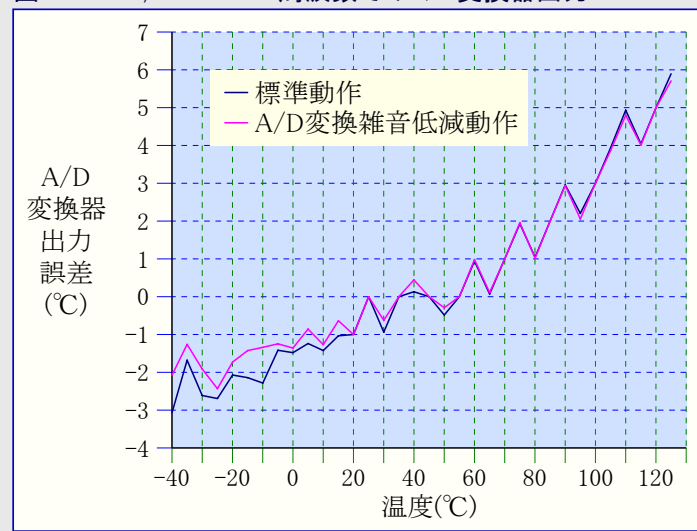


図2-2. 3.3V, 8MHz CPU周波数でのA/D変換器出力

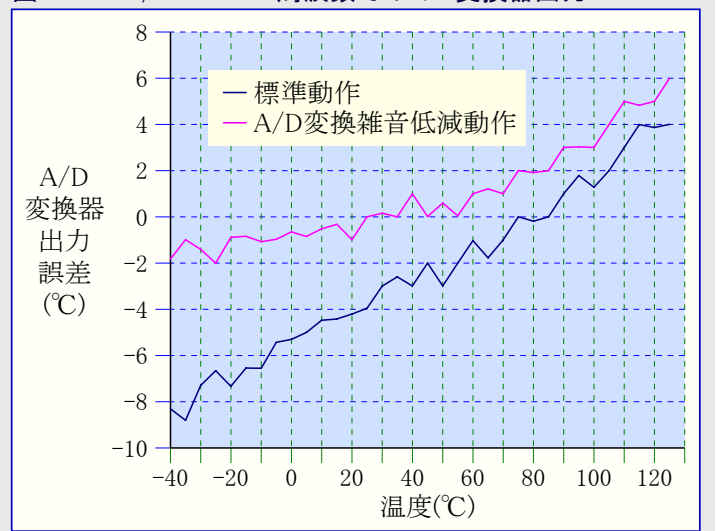
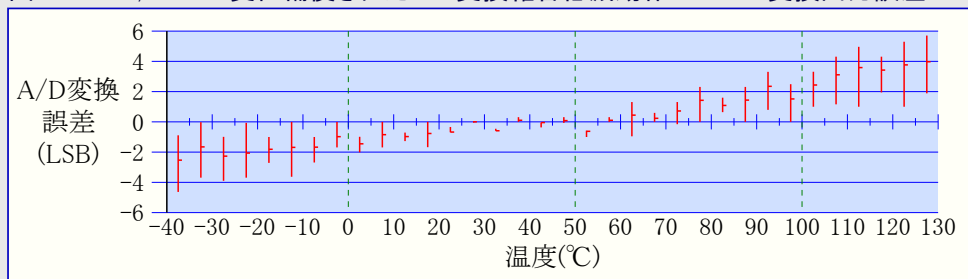


図2-1と図2-2は1MHzと8MHzのCPU周波数での任意デバイスのA/D変換誤差を示します。図表内の $5^{\circ}\text{C}$ 単位毎の位置は1000回の連続的な温度測定の平均を表します。両図表内では、紫線がA/D変換雑音低減動作で読むのを表し、一方黒線が標準動作で読むのを表します。ここで見られるように、A/D変換雑音低減動作に比べて、通常動作で測定が実行される場合に高いCPU周波数での測定誤差がより大きくなります。低いCPU周波数ではその差が小さくなります。

## 2.1. 1点校正と補償

1点校正が唯一の任意選択なら、関心のある温度が校正点から遠く( $>20^{\circ}\text{C}$ )にある時の補償は避けるべきです。殆どのデバイスには変位(オフセット)補償の使用から恩恵を受け、いくつかのデバイスについては十分ですらあるかもしれません。けれども、他のデバイスについては1点校正がより大きな誤差に終わり得ます。1点校正が使われる場合、 $\pm 1^{\circ}\text{C}$ 精度での温度感知器の動作窓は僅かに $20\sim 30^{\circ}\text{C}$ です。

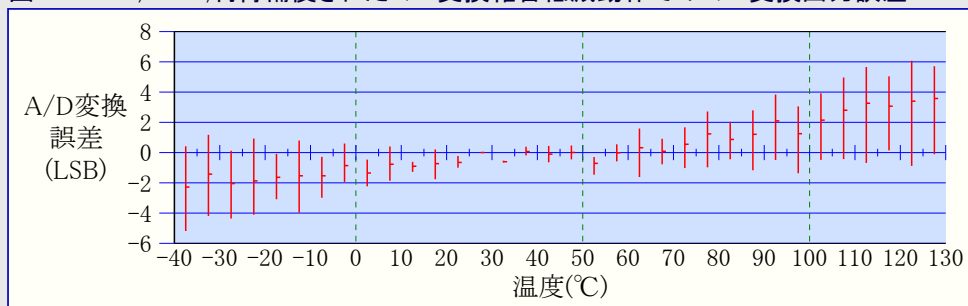
図2-3. 3.3V, 1MHzで変位補償されたA/D変換雑音低減動作でのA/D変換出力誤差



上の図2-3はA/D変換雑音低減動作で3つの別のデバイスで実行した測定結果を示します。この図では変位の簡単な校正と補償が適用されています。25 $^{\circ}\text{C}$ での温度感知器のA/D変換器読み込みが校正点として使われます。図は高低と平均のデータを示します。点が平均値を与え、一方個別の線の上端が最高値を与え、下端が最低値を与えます。図で示されるように、これらのデバイスではこの種の補償が広い温度範囲に渡って良い結果を与えました。 $\pm 1^{\circ}\text{C}$ が要求された場合に、この補償は $20^{\circ}\text{C}$ から $55^{\circ}\text{C}$ まで満足する結果を与えました。

同じ読み方で利得補償だけの適用は以下の結果を与えます。

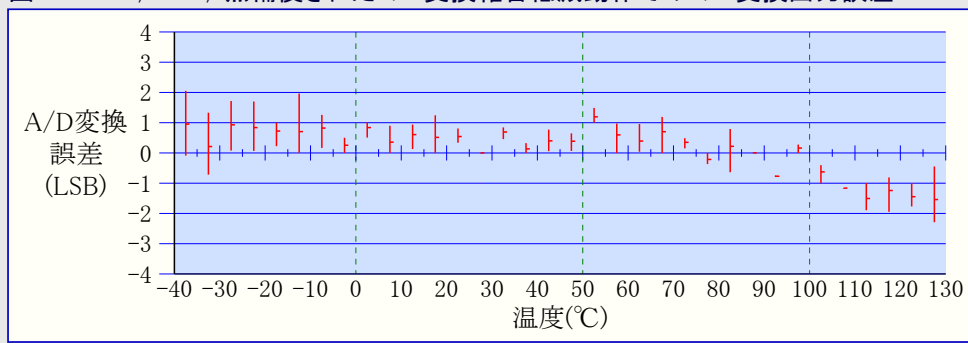
図2-4. 3.3V, 1MHz, 利得補償されたA/D変換雑音低減動作でのA/D変換出力誤差



1点校正/補償が使われる、または補償が適用されない場合に良い結果を得るため、変換を開始する前にA/D変換雑音低減動作への移行が必要です。A/D変換雑音低減動作は上手く働きますが、低いCPU周波数では標準動作に対する優位性はかなり小さくなります。けれども、8MHzではA/D変換雑音低減動作が必須です。

## 2.2. 2点校正と補償

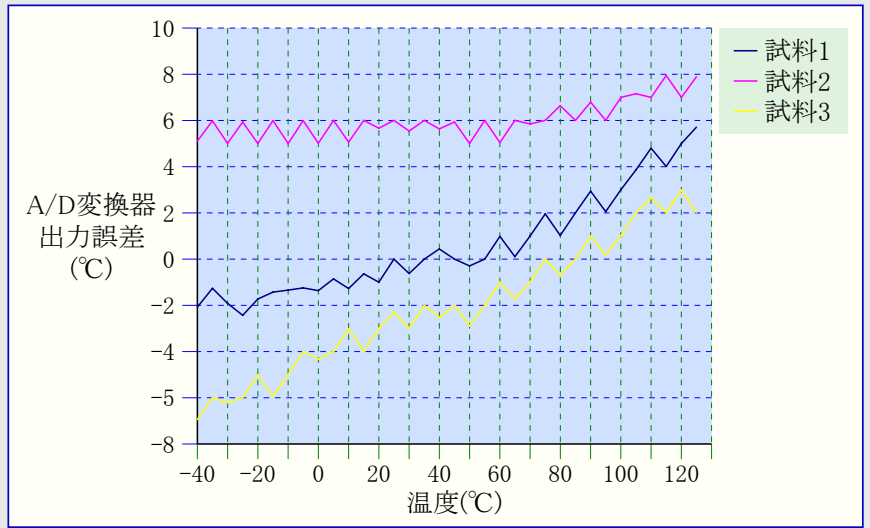
図2-5. 3.3V, 1MHz, 2点補償されたA/D変換雑音低減動作でのA/D変換出力誤差



上図は図2-3、図2-4と同じ結果を示しますが、2点校正と補償とです。最初の校正温度は $25^{\circ}\text{C}$ で2つ目は $85^{\circ}\text{C}$ です。 $\pm 1^{\circ}\text{C}$ 精度が必要とされる場合、結果となる温度は3つの例外例ありで $5^{\circ}\text{C}\sim 95^{\circ}\text{C}$ の満足する範囲です。温度端での誤差はもっと小さく、補償が温度範囲全体に渡って $\pm 3^{\circ}\text{C}$ 精度を与えます。

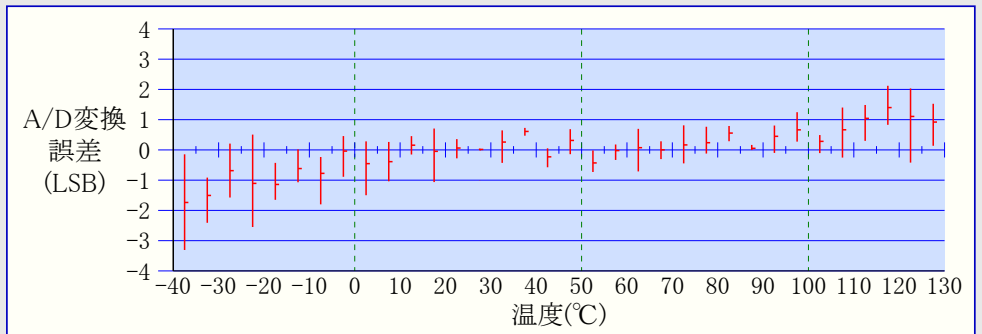
図2-6.で見えるように、これらのデバイスのA/D変換器特性曲線は概ね1つの直線です。

図2-6. 3.3V,1MHz,無保障,A/D変換雑音低減動作でのA/D変換器出力



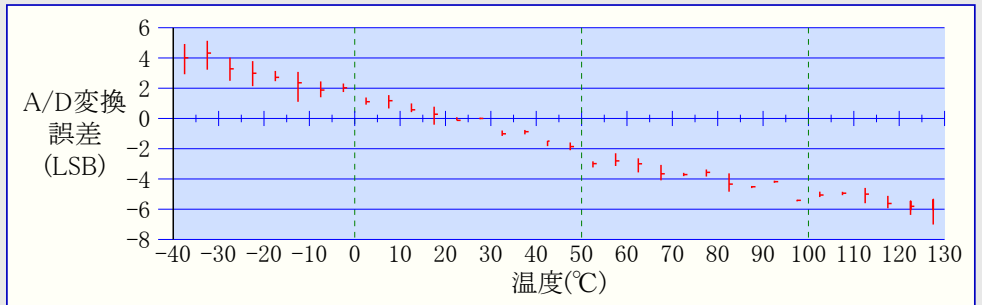
続いて起きる2点校正と補償が適用されるなら、高いCPU周波数で測定することが可能で、現実的に標準動作に於ける結果をもっと正確にします。右の図2-7.はこれを図解します。ここでの測定は8MHzのCPU周波数の標準動作で実行されます。3つの値が $\pm 1^\circ\text{C}$ よりも大きな誤差を持つ図2-5.での測定と比べて、 $\pm 1^\circ\text{C}$ 精度が必要とされる場合にこの近似手法が例外なく校正点( $25^\circ\text{C}$ と $85^\circ\text{C}$ )間の十分な読み方に帰着します。

図2-7. 3.3V,8MHz,2点補償された標準動作でのA/D変換出力誤差



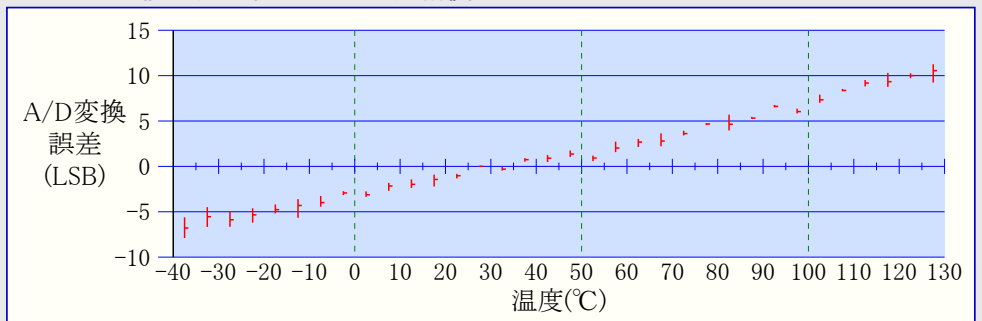
2つ目の校正点が正確でない場合、2点校正は現実的に一層悪い結果を生じさせるかもしれません。2つ目の校正点が $\pm 5^\circ\text{C}$ 精度としましょう。85°Cで $T_2$ が実際の値より $5^\circ\text{C}$ 高いなら、2点校正/補償は右の結果に終わるでしょう。

図2-8. 理想値より $5^\circ\text{C}$ 高い $T_2$ での2点補償



$T_2$ が目的温度の $85^\circ\text{C}$ よりも $5^\circ\text{C}$ 低い場合、保証結果はこの様になるでしょう。

図2-9. 理想値より $5^\circ\text{C}$ 低い $T_2$ での2点補償



上の図2-8.と図2-9.の2つの図は1つまたは両方の校正温度が正確でない場合に、2点校正と補償の意味がないことを示します。1つだけの正確な校正温度では1点校正と補償が最良の結果を与えます。

### 3. 要約

推奨されるCPU周波数は1MHz、または代わりの推奨される動作種別はA/D変換雑音低減動作です。これは温度読み込みからの良好な結果を保証します。2点校正/補償は正確な校正点を頼りにします。T2でのA/D変換値が±5°C内の精度だけなら、2点校正は正確でない結果を生じさせるだけでしょう。けれども、校正点が正確なとき、2点校正/補償は温度範囲全体に渡って良好な結果を与えるでしょう。

2つ目の校正点での正確な測定なしでは、1点校正が温度読み込みを補償する最善の方法です。基準として室温を使う変位(オフセット)消去は、Atmel ATtiny45に関して室温での1点校正に対する全ての代表的なデータで、-30°C~100°Cまで±5°C精度、0°C~85°C間で±3°C精度を与えます。利得誤差除去は同様な精度を与えます。

### 4. 改訂履歴

資料改訂	日付	注釈
8108A	2008年2月	初版資料公開
8108B	2016年8月	新しい割り付けへ変換

Atmel®, Atmelロゴとそれらの組み合わせ、Enabling Unlimited Possibilities®, AVR®とその他は米国及び他の国に於けるAtmel Corporationの登録商標または商標です。他の用語と製品名は一般的に他の商標です。

**お断り:** 本資料内の情報はAtmel製品と関連して提供されています。本資料またはAtmel製品の販売と関連して承諾される何れの知的所有権も禁反言あるいはその逆によって明示的または暗示的に承諾されるものではありません。Atmelのウェブサイトに表示する販売の条件とAtmelの定義での詳しい説明を除いて、商品性、特定目的に関する適合性、または適法性の暗黙保証に制限せず、Atmelはそれらを含むその製品に関連する暗示的、明示的または法令による如何なる保証も否認し、何ら責任がないと認識します。たとえAtmelがそのような損害賠償の可能性を進言されたとしても、本資料を使用できない、または使用以外で発生する(情報の損失、事業中断、または利益と損失に関する制限なしの損害賠償を含み)直接、間接、必然、偶然、特別、または付随して起こる如何なる損害賠償に対しても決してAtmelに責任がないでしょう。Atmelは本資料の内容の正確さまたは完全性に関して断言または保証を行わず、予告なしでいつでも製品内容と仕様の変更を行う権利を保留します。Atmelはここに含まれた情報を更新することに対してどんな公約も行いません。特に別の方法で提供されなければ、Atmel製品は車載応用に対して適当ではなく、使用されるべきではありません。Atmel製品は延命または生命維持を意図した応用での部品としての使用に対して意図、認定、または保証されません。

**安全重視、軍用、車載応用のお断り:** Atmel製品はAtmelが提供する特別に書かれた承諾を除き、そのような製品の機能不全が著しく人に危害を加えたり死に至らしめることがかなり予期されるどんな応用(“安全重視応用”)に対しても設計されず、またそれらとの接続にも使用されません。安全重視応用は限定なしで、生命維持装置とシステム、核施設と武器システムの操作の装置やシステムを含みます。Atmelによって軍用等級として特に明確に示される以外、Atmel製品は軍用や航空宇宙の応用や環境のために設計も意図もされていません。Atmelによって車載等級として特に明確に示される以外、Atmel製品は車載応用での使用のために設計も意図もされていません。

© HERO 2021.

本応用記述はAtmelのAVR122応用記述(Rev.8108B-08/2016)の翻訳日本語版です。日本語では不自然となる重複する形容表現は省略されている場合があります。日本語では難解となる表現は大幅に意識されている部分もあります。必要に応じて一部加筆されています。頁割の変更により、原本より頁数が少なくなっています。

必要と思われる部分には( )内に英語表記や略称などを残す形で表記しています。

青字の部分はリンクとなっています。一般的に赤字の0,1は論理0,1を表します。その他の赤字は重要な部分を表します。