

回路の説明

pH 測定的基础

pH 値は、水溶液中の水素イオンと水酸化物イオンの相対量を示す値です。モル濃度の場合、25°Cの水には $1 \times 10^{-7} \text{ mol/L}$ の水素イオンと、同量の水酸化物イオンが含まれています。中性の溶液とは、水素イオン濃度と水酸化物イオン濃度がまったく同じ溶液です。pHは水素イオン濃度を表すもう1つの方法で、以下のように定義できます。

$$\text{pH} = -\log(H^+)$$

したがって、水素イオン濃度が $1.0 \times 10^{-2} \text{ mol/L}$ の場合、pHは2.00です。

pH 電極は多くの産業で使われている電気化学センサーですが、水および廃水処理産業では特に重要です。pH プローブはガラス製の測定電極と基準電極で構成されており、バッテリーと似た動作をします。溶液中にこのプローブを置くと、溶液中の水素の挙動に応じて測定電極に電圧が発生します。その電圧を基準電極の電位と比較します。溶液の酸性が強くと（低 pH）なると基準電極に対するガラス電極の正電位が高くなり（+mV）、塩基性が強く（高 pH）なると基準電極に対するガラス電極の負電位が高くなります（-mV）。これら2つの電極の差が測定電位です。代表的な pH プローブは、理論的には 25°C で 59.154 mV/pH の単位電圧を生成します。これは、次のようにネルンストの式で表すことができます。

$$E = a - \frac{2.303R(T + 273.1)}{nF} \times (\text{pH} - \text{pH}_{\text{ISO}})$$

ここで、

E = 動作状態が未知の水素電極の電圧

$a = \pm 30 \text{ mV}$ 、ゼロ点誤差範囲

T = 周囲温度 (°C)

$n = 1$ (25°C)、原子価 (イオンの電荷数)

$F = 96485 \text{ C/mol}$ 、ファラデー定数

$R = 8.314 \text{ J/(K mol)}$ 、アボガドロ数

pH = 未知の溶液中の水素イオン濃度

$\text{pH}_{\text{ISO}} = 7$ 、基準水素イオン濃度

この式は、生成される電圧が溶液の酸性度と塩基性度によって決まること、水素イオンの活動に応じ一定の規則で変化することを示しています。溶液の温度が変化すると、水素イオンの活動も変化します。溶液を加熱すると水素イオンの活動が活発化し、その結果2つの電極間の電位差は増大します。さらに、溶液の温度が低下すると水素イオンの活動が不活発になり、電位差は減少します。理論的には、pH7の緩衝液中に置かれた電極に電圧は生じません。

pH 理論に関する優れた参考文献としては、「pH Theory and Practice」(pHの理論と実践、Radiometer Analytical SAS, Villeurbanne Cedex, France)があります。

回路の詳細

この設計は、温度補償機能を持つ pH センサー用の完全な実装となります。回路には3つの重要な処理段があります。図1に示す pH プローブ・バッファ、ADC、デジタル電源アイソレータです。

AD8603 は、超低消費電力(最大 50 μA)、低ノイズ (22 nV/ $\sqrt{\text{Hz}}$) の高精度 CMOS オペアンプで、AD7793 の1つのチャンネルの入力バッファとして構成されています。AD8603 の代表的な入力バイアス電流は 200 fA で、高い内部抵抗を持つ pH プローブ用に優れたソリューションとなります。

pH 検出および温度補償システムは、24 ビット・シグマ・デルタ ($\Sigma\Delta$) ADC の AD7793 がベースとなっています。このデバイスは3つの差動アナログ入力を持ち、1 から 128 までの範囲でゲインを設定できる低ノイズのプログラマブル・ゲイン・アンプ (PGA) を内蔵しています。AD7793 の消費電力は最大でもわずか 500 μA であるため、あらゆる低消費電力アプリケーションに最適です。また、低ノイズ、低ドリフトの内部バンドギャップ・リファレンスがあり、外部差動リファレンスも使用できます。出力データレートはソフトウェアによりプログラム可能で、4.17 Hz~470 Hz の範囲で調整できます。

DC/DC コンバータを内蔵した ADuM5401 4チャンネル・デジタル・アイソレータは、マイクロコントローラと AD7793 のデジタル・ライン間におけるデジタル信号と電源のアイソレーションを提供します。DC/DC コンバータのロジック信号と電源帰還経路のアイソレーションには、iCoupler チップスケール・トランス技術が使われています。

pH センサー・インターフェース用バッファ

代表的な pH プローブの電極はガラス製で $1 \text{ M}\Omega \sim 1 \text{ G}\Omega$ の極めて高い抵抗値を示し、図2に示すように pH 電圧源の直列抵抗として機能します。

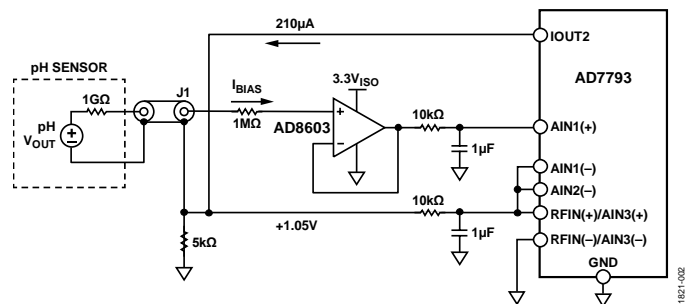


図2. pH センサーと ADC へのバッファ・インターフェース (簡略図: 接続、RTD、デカップリングはすべて省略)

この直列抵抗を流れるバッファ・アンプのバイアス電流が、システムのオフセット誤差を発生させます。この高いソース抵抗から回路を分離するために、アプリケーションには高入力インピーダンスで超低バイアス電流のバッファ・アンプが必要です。図2に示すように、このアプリケーションでは AD8603 をバッファ・アンプとして使用します。AD8603 の入力電流は小さいため、電極抵抗を流れるバイアス電流から生じる電圧誤差を最小に抑えることができます。

代表的な入力電流が 200 fA の場合、25°C で 1 G Ω の直列抵抗を持つ pH プローブのオフセット誤差は 0.2 mV (0.0037 pH) で、1 pA の最大入力バイアス電流時でも誤差はわずか 1 mV になります。

バッファ・アンプ出力用の 10 k Ω /1 μ F のローパス・ノイズ・フィルタのカットオフ周波数は $f = 1/2\pi RC$ であり、値は 16 Hz になります。

ガード、シールド、高絶縁抵抗スタンドオフ、その他同様の標準的なピコアンペア法を使用して、AD8603 バッファの高インピーダンス入力のリークを最小限に抑える必要があります。

ADC チャンネル 1 の設定 : pH センサー

この段では、pH 電極によって生成される小電圧を測定します。代表的な pH プローブの仕様を表 1 に示します。ネルンストの式に基づき、プローブからの電圧範囲は、 ± 414 mV (± 59.14 mV/pH, 25°C) から ± 490 mV (± 70 mV/pH, 80°C) です。

表 1. 代表的な pH プローブの仕様

Measurement Range	pH 0 to pH 14
pH at zero voltage	pH 7.00 ± 0.25
Accuracy	pH 0.05 in the range from 20°C to 25°C
Resolution	pH 0.01 0.1 mV
Operating Temperature	Maximum 80°C
Reaction time	≤ 1 sec for 95% of final value

ADC は、pH プローブの出力電圧を読み取る際に外部 1.05 V リファレンスを使用し、ゲイン 1 に設定されています。フルスケール入力範囲は $\pm V_{REF}/G = \pm 1.05$ V で、pH プローブからの最大信号は 80°C で ± 490 mV です。

センサーの出力はバイポーラであり、AD7793 は単電源で動作するため、pH プローブによって生成される信号は、ADC が対応できるコモンモード範囲に収まるようにグラウンドより高い値にバイアスする必要があります。図 2 に示すように、5 k Ω 、0.1% の抵抗に 210 μ A の IOUT2 電流を注入してバイアス電圧を生成します。これによって 1.05 V のコモンモード・バイアス電圧が生じ、これが ADC のリファレンス電圧にもなります。

ADC チャンネル 2 の設定 : RTD

ADC の 2 番目のチャンネルは、AD7793 の電流出力ピン IOUT2 によって駆動される RTD の両端に発生する電圧を監視します。210 μ A の励起電流が、直列ペアの RTD と高精度抵抗 (5 k Ω 、0.1%) を駆動します (図 1 を参照)。

純粋な白金の温度係数は 0.003926 $\Omega/\Omega/^\circ\text{C}$ です。DIN 規格 43760-1980 と IEC 751-1983 による産業用 RTD の標準的係数は 0.00385 $\Omega/\Omega/^\circ\text{C}$ です。RTD の精度は、通常、0°C のときの値で示されます。DIN 43760 規格には表 2 に示すように 2 つのクラスがあり、ASTM E-1137 には表 3 に示すように 2 つのグレードがあります。

表 2. DIN-43760 の標準 RTD 精度

Class	Tolerance
DIN 43760 Class A	$\pm 0.06\%$ @ 0°C
DIN 43760 Class B	$\pm 0.12\%$ @ 0°C

表 3. ASTM E-1137 の標準 RTD 精度

Grade	Tolerance
ASTM E-1137 Grade A	$\pm 0.05\%$ @ 0°C
ASTM E-1137 Grade B	$\pm 0.10\%$ @ 0°C

RTD 抵抗の値は次式で求めることができます。

$$RTD \text{ Resistance} = RTD_0 (1 + T \alpha)$$

ここで、

RTD 抵抗 = T における抵抗値

$RTD_0 = 0^\circ\text{C}$ における抵抗値

T = 周囲温度

$\alpha = 0.00385 \Omega/\Omega/^\circ\text{C}$ 、DIN 規格 43760-1980 と IEC 751-1983 に定める温度係数

RTD 抵抗は 0°C (1000 Ω) から 100°C (1385 Ω) まで変化し、210 μ A の励起電流で 210 mV から 290 mV までの範囲の電圧信号を生成します。

高精度 5 k Ω 抵抗は、外部リファレンスとして使われる 1.05 V の電圧を生成します。ゲイン 1 の場合のアナログ入力範囲は ± 1.05 V ($\pm V_{REF}/G$) です。このアーキテクチャは比例構成です。励起電流の値が変化してもシステムの精度は変わりません。

RTD は 100 Ω の Pt 製が一般的ですが、別の抵抗値 (200 Ω 、500 Ω 、1000 Ω など) や材質 (ニッケル、銅、ニッケル鉄合金) を指定することもできます。このアプリケーションでは、1 k Ω の DIN 43760 クラス A の RTD を使用して pH センサーの温度補償を行います。1000 Ω の RTD の方が、100 Ω の RTD より配線抵抗誤差の影響を受けにくくなります。

接続には、図 3 に示すように 2 線接続を用います。RTD のリードに一定の電流を流して、RTD 自体の電圧を測定します。測定デバイスは、高インピーダンス低入力電流の AD7793 です。この方法における誤差源は、リード抵抗、AD7793 によって生成される定電流源の安定性、そして入力アンプの入力インピーダンスおよび/またはバイアス電流と、それに伴うドリフトです。

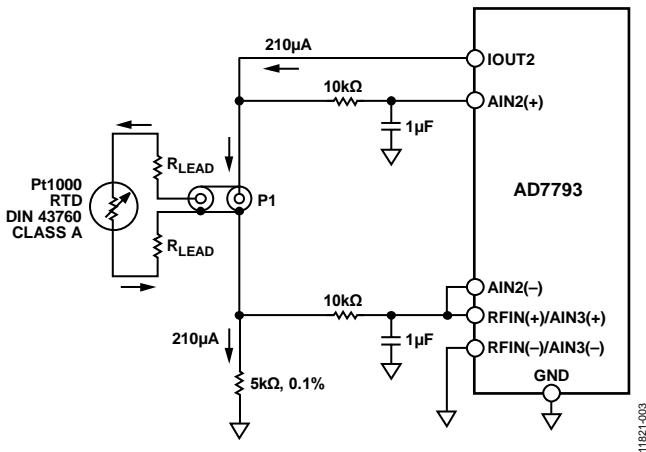


図 3. Pt RTD の 2 線接続
(簡略図：接続とデカップリングはすべて省略)

配線抵抗誤差を抑制するもうひとつの方法は 3 線 RTD 構成で、その詳細は回路ノート CN-0287 に示されています。

出力コーディング

入力電圧に対する出力コードは、どのチャンネルでも次のとおりになります。

$$Code = 2^{N-1} \left(\frac{AIN \times GAIN}{V_{REF}} + 1 \right)$$

ここで、

AIN はアナログ入力電圧

GAIN は計装アンプのゲイン

N = 24

EVAL-SDP-CB1Z システム評価ボードと PC が AD7793 からのデータ出力を処理します。

デジタル信号と電源のアイソレーション

ADuM5401 は、ADC デジタル信号の絶縁を行うほか、絶縁された 3.3 V の安定化電源を回路に供給します。ADuM5401 (V_{DD1}) への入力は、3.0 V から 3.6 V の範囲とする必要があります。

EMI/RFI の問題を最小限に抑えるために、ADuM5401 のレイアウトは慎重に行ってください。詳細については、アプリケーション・ノート AN-1109 「iCoupler デバイスでの放射制御に対する推奨事項」を参照してください。

システム・キャリブレーション

RTD の抵抗値を正確に測定するには、IOUT2 電流の±5%の変動を考慮に入れる必要があります。AD7793 の AIN3(+)入力を使用して、5 kΩ、0.1%の精密抵抗の電圧降下を測定します。この電圧を 5 kΩ で割ることによって、正確な IOUT2 電流を求めます。さらに、RTD 電圧を正確な IOUT2 電流で割り、RTD の抵抗を求めます。

EVAL-CN0326-PMDZ 評価用ソフトウェアの pH メーターのキャリブレーションには、図 4 に示す 2 点キャリブレーション法を使用します。

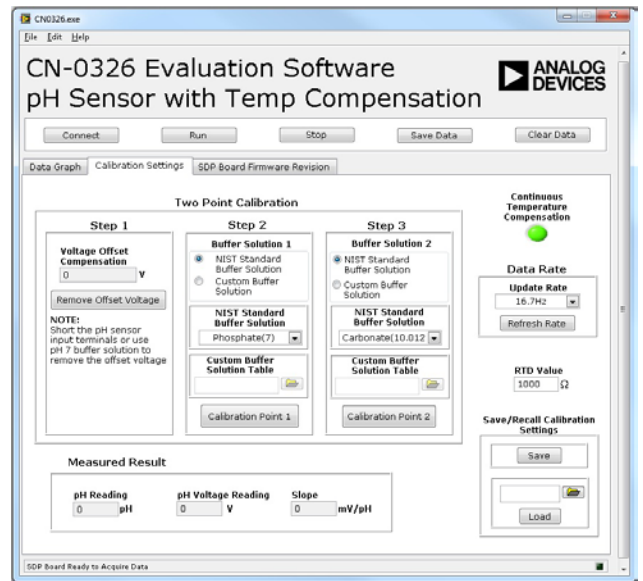


図 4. 評価用ソフトウェアのキャリブレーション設定画面

キャリブレーションには少なくとも 2 種類の緩衝液を使用する必要があります。pH プロブとシステムによって生じるオフセットを除去するには、pH 値 7 の中性 pH 緩衝液を使用します。中性緩衝液によって、キャリブレーションの最初の点を設定します。もうひとつの緩衝液の pH は、測定対象液の pH に応じて決めます。塩基性溶液の測定には pH 10 の緩衝液を、酸性溶液の測定には pH 4 の緩衝液を使用できます。さらに高精度に測定する場合は、3 点キャリブレーションを行うことができます。これには図 4 に示すように、ステップ 2 とステップ 3 で 2 組の異なる緩衝液のセットを使用します。この場合も、pH 7 の溶液によってオフセットを除去します。

ソフトウェアには、NIST が推奨する緩衝液のリストが含まれています。リストに示されたそれぞれの緩衝液には 0°C から 95°C の固有の温度係数があり、これについては前述の「pH Theory and Practice」(Radiometer Analytical 社)に記載されています。ソフトウェアはこの表を使用し、pH プロブからの mV 入力を RTD センサーの温度測定値に対応する正しい pH 値に関連づけます。また、表のギャップは直線補間によって埋めます。連続温度補償のためのオプションは、図 4 に示す緑のボタンをクリックすることによって有効または無効にすることができます。

緩衝液は pH センサーのキャリブレーション用に市販されています。キャリブレーションには、NIST の証明があるその他の pH リファレンスを使用することもできます。緩衝液にはさまざまな種類があるため、図 4 に示すように希望の NIST 認定 pH リファレンスを使用してキャリブレーションを行うことができますように、ソフトウェアにはオプションが用意されています。このソフトウェアには他の RTD 抵抗値を使用できるオプションもありますが、デフォルトでは 1000 Ω に設定されています。

システム・ノイズの注意点

出力データレートが 16.7 Hz でゲインが 1 の場合、AD7793 の RMS ノイズは $1.96 \mu\text{V}$ です (ノイズは AD7793 のデータシートに記載されている入力に基づき)。ピーク to ピーク・ノイズは次のとおりです。

$$6.6 \times \text{RMS Noise} = 6.6 \times 1.96 \mu\text{V} = 12.936 \mu\text{V}$$

pH メーターの感度が 59 mV/pH の場合、その pH メーターで下を示すノイズフリー分解能で pH レベルを測定できます。

$$12.936 \mu\text{V} / (59 \text{ mV/pH}) = 0.000219 \text{ pH}$$

これに含まれるノイズ寄与分は AD7793 によるものだけです。実際にこのシステムから得られる結果を次に示します。

テストのデータと結果

すべてのデータの収集には、CN0326 評価用 LabVIEW ソフトウェアを使用しました。また、横河 GS200 高精度電圧ソースを使用して pH センサーの入力をシミュレートしました。

-420 mV から +420 mV までの高精度電圧を 1 mV 単位でスイープすることにより、ユーザー定義キャリブレーション・オプションに従って EVAL-CN0326-PMDZ でデータを取得することができました。

入力 pH プロブの BNC コネクタを短絡して 1000 個のサンプルを集めることによって、実際のシステムの AD8603 バッファおよび AD7793 のピーク to ピーク・ノイズを決定しました。図 5 のヒストグラムに示すように、コードの分布幅は約 500 コードです。これは $31.3 \mu\text{V}$ のピーク to ピーク・ノイズに相当し、その等価 pH 値分布はピーク to ピークで 0.00053 pH です。

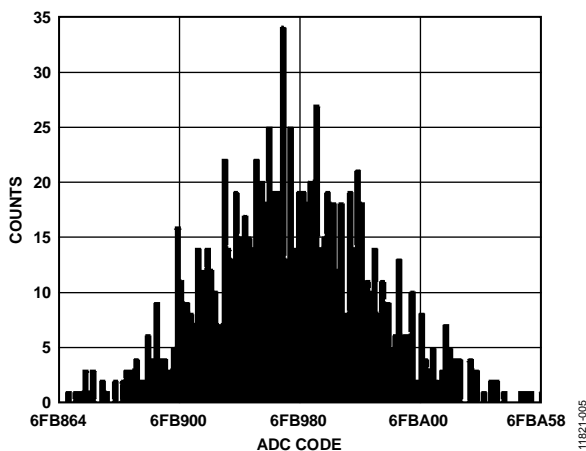


図 5. 入力ピン短絡時の AD7793 の出力コード分布幅を示すヒストグラム

高インピーダンスのガラス電極のインピーダンスの違いをシミュレートするために、3 つの異なる抵抗を ADC 入力に直列に接続してシステムのテストを実施しました。システムは 60 mV/pH にキャリブレーションされています。図 6 によれば、直線性誤差は、ガラス電極インピーダンスのシミュレート値が増加するに従って増加します。図 6 は、pH プロブのインピーダンスが 200 M Ω の場合、シミュレートした pH 出力範囲全体にわたって直線性誤差が 0.5% 未満であることも示しています。

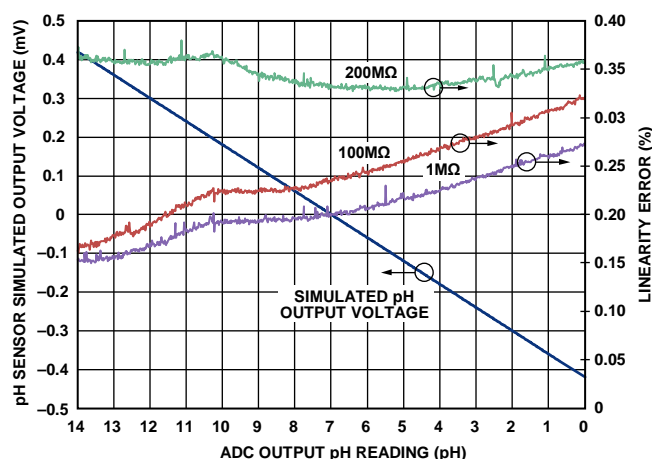


図 6. pH センサー出力電圧のシミュレート値 (および対応する直線性誤差プロット) と ADC 出力 pH 値 (プローブ抵抗 1 M Ω 、100 M Ω 、200 M Ω のときの値)

テスト・データは図 7 に示すボードを使用して収集しました。このシステムに関する文書は、すべて CN-0326 設計支援パッケージに含まれています。



図 7. EVAL-CN0326-PMDZ ボード

バリエーション回路

その他の適切な ADC として、AD7792 と AD7785 が使用できます。どちらのデバイスも AD7793 と同じ機能セットを提供します。ただし、AD7792 は 16 ビット ADC で、AD7785 は 20 ビット ADC です。

AD8607 バッファ・アンプは 8 ピン MSOP パッケージを採用しています。これはデュアル・マイクロパワー・レール to レール入出力アンプで、AD8603 と同じファミリーです。

これとは別の ADuM5401 ファミリーには、ADuM5402/ADuM5403/ADuM5404 などのさまざまなチャンネル構成があり、やはり 4 つの独立したアイソレーション・チャンネルを提供します。

回路評価とテスト

この回路は、EVAL-CN0326-PMDZ 回路ボード、EVAL-SDP-CB1Z システム・デモンストレーション・プラットフォーム (SDP) 評価用ボード、および SDP-PMD-IB1Z (EVAL-SDP-CB1Z 用の PMOD インターポーザ・ボード) を使用しています。SDP ボードと SDP-PMD-IB1Z ボードには 120 ピン・コネクタがあり、設定と回路性能の評価を短時間で行うことができます。SDP-PMD-IB1Z と SDP を使用して EVAL-CN0326-PMDZ ボードの評価を行うには、標準の 100 mil 間隔、25 mil \times 25 mil のライトアングル・ピンヘッダ・コネクタによって EVAL-CN0326-PMDZ を SDP-PMD-IB1Z に接続します。

必要な装置

以下の装置が必要です。

- USBポート付きの Windows® XP および Windows® Vista (32ビット)、または Windows® 7 (32ビット) 搭載 PC
- EVAL-CN0326-PMDZ 回路評価用ボード
- EVAL-SDP-CB1Z 回路評価用ボード
- SDP-PMD-IB1Z SDP インターポーザ・ボード
- CN0326 評価用ソフトウェア
- 電源：6V AC アダプタまたは同等品
- 横河 2000 高精度 DC 電源または同等品

測定の準備

CN-0326 評価用ソフトウェアのディスクを PC の CD ドライブに挿入し、評価ソフトウェアをロードします。マイコンピュータから評価用ソフトウェア CD があるドライブへ移動し、Readme ファイルを開いてください。Readme ファイルの指示に従って評価用ソフトウェアをインストールし、使用します。

セットアップ

CN0326 評価キットには、CD に書き込まれた自動インストール・ソフトウェアが含まれています。このソフトウェアは、Windows® XP (SP2) および Vista (32ビット版と64ビット版) 上で実行できます。セットアップが自動的に開始されない場合は、CD から直接 **setup.exe** ファイルを実行してください。

PC に接続したときに評価システムが正しく認識されるように、評価用ソフトウェアをインストールしてから評価用ボードと SDP ボードを PC の USB ポートに接続してください。

1. CD のインストールが完了したら、「電源設定」の説明に従って SDP-PMD-IB1Z 評価用ボードの電源を入れます。SDP ボードを SDP-PMD-IB1Z 評価用ボードに接続し（どちらかのコネクタ A を使用）、さらに付属のケーブルを使って評価に使用する PC の USB ポートに接続します。
2. EVAL-CN0326-PMDZ のオスの 12 ピン・ライトアングル・ピン・ヘッダを、SDP-PMD-IB1Z のメスの 12 ピン・ライトアングル・ヘッダに接続します。
3. 図 9 に示すプログラムを実行する前に、BNC 端子の pH ブローブと RTD センサーを EVAL-CN0326-PMDZ の端子ジャックに接続します。
4. すべての周辺装置と電源の接続が完了して電源を入れたら、図 9 に示す GUI 上で **Connect** (接続) をクリックします。PC が評価システムを正常に検出すれば、図 9 に示すソフトウェアを使用して EVAL-CN0326-PMDZ 回路ボードの評価を行うことができます。

機能ブロック図

テスト・セットアップの機能ブロック図を図 8 に示します。テスト・セットアップは図に示すように接続してください。図 9 はソフトウェアのメイン画面のスクリーンショットです。

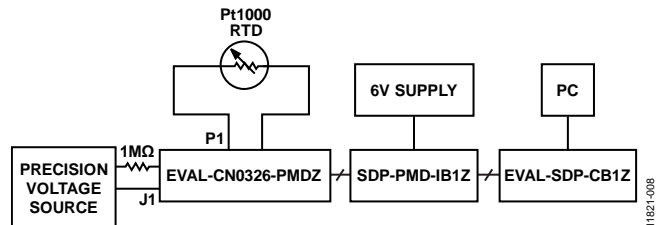


図 8. pH センサーのテスト用セットアップのブロック図

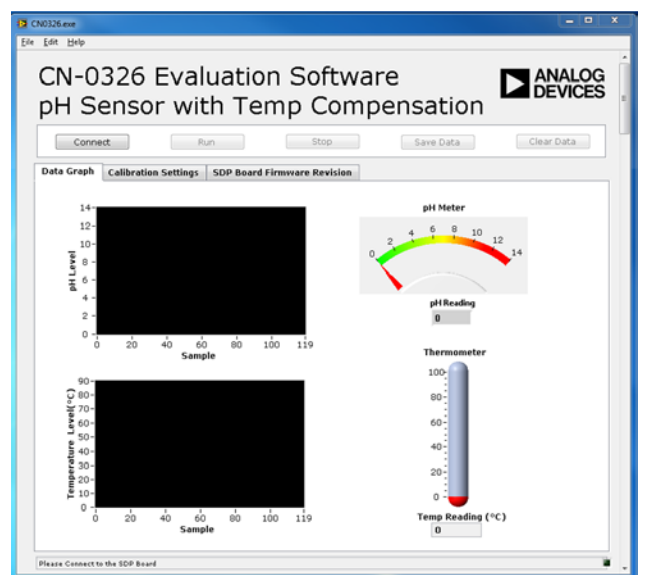


図 9. 評価用ソフトウェアのメイン画面

電源の設定

SDP-PMD-IB1Z には 6V DC 電源を供給しなければなりません。また、EVAL-CN0326-PMDZ に電源を供給するために、ジャンパ JP1 を 3.3 V に設定する必要があります。

テスト

センサー出力のシミュレーションには Agilent E3631A と横河 GS200 高精度電源、またはそれぞれの同等品を使用します。横河の負端子は pH センサー用 ADC の負端子に接続します。正端子は抵抗と直列にし、図 8 に示すように ADC の正端子に接続します。横河の電源は ± 420 mV の電圧を生成し、この電圧で pH センサー出力をシミュレートします。次に、直列抵抗を変化させ、図 8 に示す pH プロブのガラス電極のインピーダンスをシミュレートします。

CN-0326 評価用ソフトウェアを使用し、図 8 に示すセットアップにより EVAL-CN0326-PMDZ 回路ボードのデータを取得します。

ソフトウェア使用についての詳細は、「CN-0326 ソフトウェア・ユーザーガイド」に記載されています。

さらに詳しい資料

CN-0326 Design Support Package :
www.analog.com/CN0326-DesignSupport

MT-004 Tutorial : The Good, the Bad, and the Ugly Aspects of ADC Input Noise—Is No Noise Good Noise? Analog Devices.

MT-022 Tutorial : ADC Architectures III: Sigma-Delta ADC Basics, Analog Devices.

MT-023 Tutorial : ADC Architectures IV: Sigma-Delta ADC Advanced Concepts and Applications, Analog Devices.

MT-031 Tutorial : データ・コンバータのグラウンディングと、「AGND」および「DGND」に関する疑問の解消

MT-035 Tutorial : Op Amp Inputs, Outputs, Single-Supply, and Rail-to-Rail Issues. Analog Devices.

MT-037 Tutorial : Op Amp Input Offset Voltage.

MT-038 Tutorial : Op Amp Input Bias Current

MT-040 Tutorial : Op Amp Input Impedance

MT-095 Tutorial : EMI, RFI, and Shielding Concepts

MT-101 Tutorial : Decoupling Techniques, Analog Devices

Kester, Walt. 1999. High Impedance Sensors. Section 5. Analog Devices.

Kester, Walt. 1999. Temperature Sensors. Section 7. Analog Devices.

Chen, Baoxing. 2006. *iCoupler*® Products with isoPower® Technology: Signal and Power Transfer Across Isolation Barrier Using Microtransformers. Analog Devices.

Wayne, Scott. 2005. “*iCoupler*® Digital Isolators Protect RS-232, RS-485, and CAN Buses in Industrial, Instrumentation, and Computer Applications.” *Analog Dialogue*, Volume 39. Analog Devices (October).

[Application Note AN-1109 : *iCoupler* デバイスでの放射制御に対する推奨事項](#)

pH Theory and Practice, Radiometer Analytical, SAS, Villeurbanne Cedex, France.

データシートと評価用ボード

[AD7793 データシート](#)

[AD7793 評価用ボード](#)

[ADUM5401 データシート](#)

[ADuM5401 評価用ボード](#)

[AD8603 データシート](#)

改訂履歴

9/13—Revision 0: 初版

「Circuits from the Lab/実用回路集」はアナログ・デバイセズ社製品専用で作られており、アナログ・デバイセズ社またはそのライセンスの供与者の知的所有物です。お客さまは製品設計で「Circuits from the Lab/実用回路集」を使用することはできますが、その回路例を利用もしくは適用したことにより、特許権またはその他の知的所有権のもとの暗示的許可、またはその他の方法でのライセンスを許諾するものではありません。アナログ・デバイセズ社の提供する情報は正確でかつ信頼できるものであることを期しています。しかし、「Circuits from the Lab/実用回路集」は現状のまま、かつ商品性、非侵害性、特定目的との適合性の暗示的保証を含むがこれに限定されないいかなる種類の明示的、暗示的、法的な保証なしで供給されるものであり、アナログ・デバイセズ社はその利用に関して、あるいは利用によって生じる第三者の特許権もしくはその他の権利の侵害に関して一切の責任を負いません。アナログ・デバイセズ社はいつでも予告なく「Circuits from the Lab/実用回路集」を変更する権利を留保しますが、それを行う義務はありません。商標および登録商標は各社の所有に属します。

©2015 Analog Devices, Inc. All rights reserved. 商標および登録商標は各社の所有に属します。