

テスト済み回路設計集“Circuits from the Lab™”は共通の設計課題を対象とし、迅速で容易なシステム統合のために製作されました。さらに詳しい情報又は支援は <http://www.analog.com/jp/CN0319> をご覧ください。

使用したリファレンス・デバイス

ADuCM360	高精度アナログ・マイクロコントローラ、デュアルΣ-ΔADC、ARM Cortex M3
ADuCM361	高精度アナログ・マイクロコントローラ、シングルΣ-ΔADCとARM-CORTEXM3内蔵
ADP1720	リニア・レギュレータ、50mA、高電圧、マイクロパワー
OP193	オペアンプ、シングル、高精度、マイクロパワー
ADR3412	1.2V電圧リファレンス、高精度、マイクロパワー

ARM Cortex-M3 を使用したループ駆動の 14 ビット、4-20mA、熱電対温度計測システム

評価および設計サポート環境

回路評価ボード

[CN-0319 評価用ボード \(EVAL-CN0319-EB1Z\)](#)

設計と統合ファイル

[回路図、レイアウト・ファイル、部品表](#)

回路の機能と利点

図1に示す回路は、ループ駆動の熱電対温度計測システム全体を示します。このシステムは高精度アナログ・マイクロコントローラの PWM 機能を使って 4 mA ~ 20 mA の出力電流を制御します。

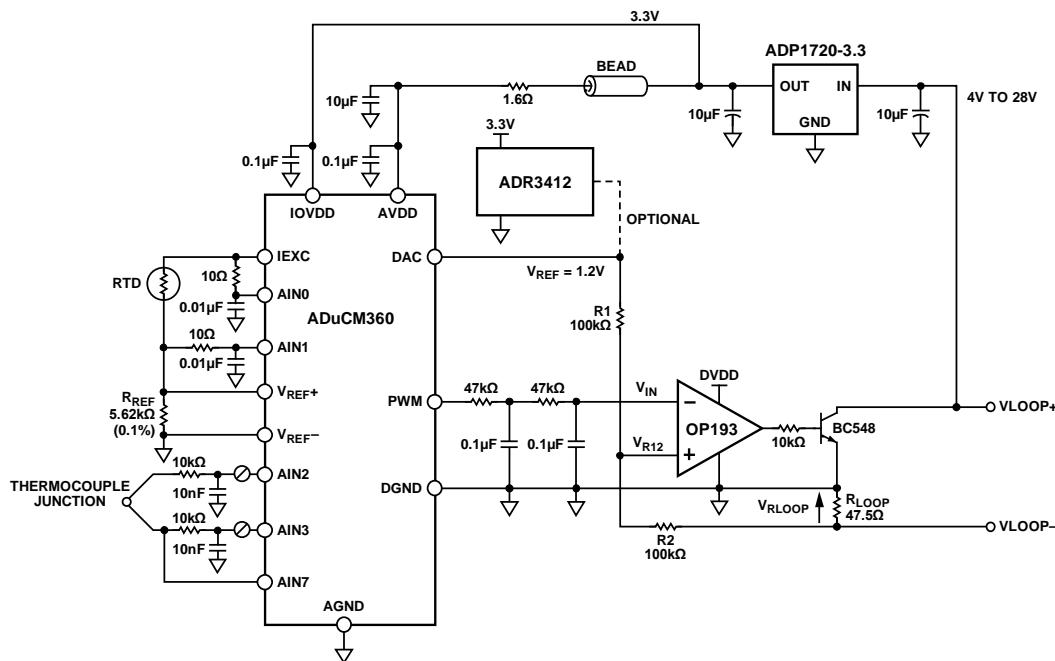


図1. 4 mA ~ 20 mA のループをベースにした温度モニタ回路を制御する [ADuCM360](#)
(簡略回路図: 全接続の一部とデカッピングは省略されています)

アナログ・デバイセズ社は、提供する情報が正確で信頼できるものであることを期していますが、その情報の利用に関して、あるいは利用によって生じる第三者の特許やその他の権利の侵害に関して一切の責任を負いません。また、アナログ・デバイセズ社の特許または特許の権利の使用を明示的または暗示的に許諾するものではありません。仕様は、予告なく変更される場合があります。本紙記載の商標および登録商標は、各社の所有に属します。※日本語資料は REVISION が古い場合があります。最新の内容については、英語版をご参照ください。

この回路は、デュアル 24 ビット Σ-Δ ADC、ARM Cortex™-M3 プロセッサ・コア、および最大 28V のループ電圧に対して 4mA～20mA のループを制御する PWM/DAC 機能を含む、回路機能の大部分を ADuCM360 高精度アナログ・マイクロコントローラに組み込んでいるので、温度モニタリングに対して低コストのソリューションを提供します。

ADuCM360 には、T 型の熱電対と 100Ω の白金測温抵抗体 (RTD) が接続されています。この RTD は冷接点補償に使用します。低消費電力の Cortex-M3 コアにより、ADC の測定値が温度値に変換されます。T 型熱電対が対応する温度範囲は -200°C～+350°C で、この温度範囲が 4mA～20mA の出力電流に変換されます。

この回路は回路ノート CN-0300 の回路に似ていますが、4 mA～20 mA ループを駆動する PWM が高分解能であるという点が優れています。PWM ベースの出力の分解能は 14 ビットです。温度センサと ADC のインターフェース、ならびに RTD 測定のリニアライゼーション技術の詳細については、回路ノート CN-0300 および AN-0970 アプリケーション・ノートを参照してください。

回路の説明

この回路は ADP1720 リニア・レギュレータを介して給電されます。このレギュレータは、ADuCM360、OP193 オペアンプ、およびオプションの ADR3412 リファレンス用のループの正電源を 3.3V に安定化します。

温度モニタ

回路のこの部分は CN-0300 で説明した温度モニタ回路と類似しています。ADuCM360 の以下の機能を利用しています。

- 熱電対と RTD 用に、ソフトウェアでゲインを 32 に設定した PGA を備えた 24 ビット Σ-Δ ADC。ADC1 で熱電対の電圧と RTD の電圧のサンプリングを連続的に切り替えます。
- プログラム可能な励起電流源が RTD に制御電流を流します。この 2 個の電流源は 0μA～2mA の範囲で設定可能です。この例では、RTD の自己発熱によって生じる誤差を最小限に抑えるために 200μA の設定値が使用されています。
- ADuCM360 の ADC 用に 1.2V の内部リファレンスを備えています。熱電対電圧を測定する際、高精度なことから内部電圧リファレンスを使用します。
- ADuCM360 の ADC 用外部電圧リファレンス。RTD 抵抗の測定時には、外付けリファレンス抵抗 (R_{REF}) が外部の VREF+ピンと VREF-ピンの間に接続されたレシオメトリック構成を使用しています。この回路のリファレンス・ソースが高インピーダンスであることから、リファレンス内蔵の入力バッファがイネーブルされます。このリファレンス内蔵のバッファがあるため、入力リークの影響を最小限に抑えるための外付けバッファは不要です。

- バイアス電圧源(VBIAS)。VBIAS 機能を使って熱電対の同相電圧を AVDD_REG/2 (900mV) に設定します。これにより、この場合も熱電対の同相電圧を設定するための外部抵抗が不要になります。
- ARM Cortex-M3 コア。126 kB のフラッシュメモリと 8kB の SRAM を内蔵した強力な 32 ビット ARM コアで、ADC を設定、制御して熱電対および RTD の入力からの ADC 変換値を最終の温度値に変換するのに使われるユーザー・コードを実行します。4mA～20 mA のループを駆動する PWM 出力も制御します。追加のデバッグのため、UART/USB インターフェースを介した通信も制御します。

通信

- 16 ビット PWM 出力は OP193 によって外部でバッファされ、外部 NPN トランジスタ BC548 を制御します。このトランジスタの V_{BE} 電圧を制御することにより、47.5 Ω の負荷抵抗を流れる電流を所定の値に設定することができます。これにより、4 mA～20 mA の出力(-200°C～+350°C の範囲)で ±0.5°C を上回る精度が得られます(「テスト結果」参照)。
- OP193 に 1.2V リファレンスを供給するには内部 DAC を使用します。全温度範囲にわたって高精度を得るには、代わりに 1.2V の高精度リファレンス ADR3412 を使うこともできます。この外部リファレンスは内部 DAC と同程度の電力を消費します(約 50 μA)。「消費電流測定テスト」を参照してください。

4 mA～20 mA のループは ADuCM360 に内蔵された 16 ビット PWM(パルス幅変調器)によって制御されます。この PWM のデューティサイクルはソフトウェアで設定され、47.5Ω R_{LOOP} 抵抗両端の電圧を制御し、次いでループ電流を設定します。 R_{LOOP} の上端を ADuCM360 のグランドに接続するように注意してください。 R_{LOOP} の下端はループのグランドに接続します。これにより、ADuCM360、ADP1720、ADR3412 および OP193 による電流に、フィルタを通した PWM 出力によって設定される電流を加えた電流が R_{LOOP} に流れます。

R_1 と R_2 の接続点の電圧は次のように表されます。

$$V_{R12} = (V_{RLOOP} + V_{REF}) \times R2 / (R1 + R2) - V_{RLOOP}$$

ループが安定すると次のようになります。

$$V_{IN} = V_{R12}$$

$R_1 = R_2$ なので、以下のようにになります。

$$V_{IN} = (V_{RLOOP} + V_{REF}) / 2 - V_{RLOOP} = V_{REF}/2 - V_{RLOOP}/2$$

$$V_{RLOOP} = V_{REF} - 2V_{IN}$$

$V_{IN} = 0$ のときフルスケール電流が流れ、その時点で $V_{RLOOP} = V_{REF}$ となります。したがって、フルスケール電流は V_{REF}/R_{LOOP} 、つまり約 24 mA です。 $V_{IN} = V_{REF}/2$ の場合、電流は流れません。

OP193 アンプの V_{IN} はインピーダンスが高いので、フィルタを通した PWM 出力に負荷をかけません。このアンプの出力は約 0.7V しか変化しません。

0mA～4mA と 20mA～24mA の両端の範囲での性能は重要ではないので、オペアンプは電源レール付近での優れた性能を必要とされません。

R1 と R2 の絶対値は重要ではありません。ただし、R1 と R2 が整合していることは重要で注意を要します。

ADC1 は温度計測に使われる所以、この回路ノートは 1 個の ADC しか持っていない ADuCM361 に直接適用できます。

EVAL-CN0319-EB1Z ボードは、ADuCM360 の ADC0 の入力チャネルを使って、 V_{R12} と表示されたポイントの電圧を測定するためのオプションを備えています。この ADC の測定値は、4mA～20mA の電流設定値を調整するための PWM 制御ソフトウェア用のフィードバックとして使用することができます。

プログラミング、デバッグ、テスト

- ホスト PC との通信インターフェースとして UART を使用します。これは内蔵フラッシュメモリをプログラムするのに使用します。また、デバッグ・ポートとしても使用され、フィルタを通した PWM 出力の温度計測キャリブレーション用に使用されます。

- デバイスをフラッシュ・ブート・モードに強制するため、2 個の外部スイッチを使用しています。SD をロー・レベルに保持したまま RESET ボタンをトグルすることにより、ADuCM360 は通常のユーザー・モードではなくブート・モードになります。ブート・モードでは、UART インターフェースを介して内部フラッシュメモリをプログラムし直すことができます。

コードの説明

回路をテストするのに使用するソース・コードへのリンクについては、CN-0319 設計支援パッケージ

(<http://www.analog.com/CN0319-DesignSupport>) を参照してください。

ソース・コードには、コード例付きで提供されている関数ライブラリが使われています。

プロジェクトで使用されるソース・ファイルのリストを Keil μVision4 で表示した画面を図 2 に示します。

The screenshot shows the Keil μVision4 IDE interface. The left pane displays the project structure under 'Project' with various demo examples like I2C_Master, I2C_Slave, PowerDown, PWM, RTD_Demo, SPI, SPIDMA_Master, SPIDMA_Slave, Timers, and UARTDma_demo. A specific folder 'CN0319' is expanded, showing 'Target 1' which contains 'Startup code', 'Application', and three source files: 'FlashEraseWrite.c', 'TempCalc.c', and 'Thermocouple_to_PWM.c'. The right pane is the code editor for 'Thermocouple_to_PWM.c', showing C code for initializing peripherals, setting up PWM, and enabling interrupt requests. The status bar at the bottom indicates the build output: 'Program Size: Code=14624 RO-data=692 RW-data=116 ZI-data=1764 From ELF: creating hex file... "\Obj\CN0319.ahx" - 0 Error(s), 0 Warning(s)'.

```

100 unsigned long ulSelectPage;           // Used to store address of what
101 unsigned int uiArraySize = 0;          // size of array to be written to fl
102
103 int main (void)
104 {
105     WdtCfg(T3CON_PRE_DIV1,T3CON_IRQ_EN,T3CON_PD_DIS); // Disable Watchdog timer
106     //Disable clock to unused peripherals
107     CLKDis(CLKDIS_DISSP1CLK|CLKDIS_DISSP1CLK|CLKDIS_DISS2CLK|CLKDIS_DISS3CLK|CLKDIS_DISS4CLK);
108     CLKcfg(CLK_CDS,CLK_MF,CLKSYSDIV_DIV2EN,CLK_UCLKCG);
109     CLKsel(CLK_CD7,CLK_CD7,CLK_CD7,CLK_CD0);           // Select CDO for UART Sync
110
111     DioCfg(pADI_GPIO,0x4000);                          // Setup P1.7 as PWMTRIP, I
112     PwmInit(ULCKL_2,PWMCON0_PWMEN_EN,PWMCON0_SYNC_EN,PWMCON1_TRIPEN_EN); //
113
114     ADC1INIT();                                         // Setup ADC1
115     IEXCINIT();                                         // Setup Excitation current source
116     DACINIT();                                          // Setup DAC out at 1.2v for exten...
117
118     uiTime2 = PwmTime(PWM4_5,0x3FFF,0x3FFF,PWMval);    // 240MHz freq.
119     ucADCInput = THERMOCOUPLE;                           // Ind:
120
121     NVIC_EnableIRQ(PWM1_TRIP IRQn);                    // Enable PWM Trip IRQ
122     NVIC_EnableIRQ(PWM1_PAIR2 IRQn);                   // Enable pair 2 IRQ
123     NVIC_EnableIRQ(FLASH IRQn);                        // Enable Flash interrupt
124
125 }

```

図 2. Keil μVision4 で表示したソース・ファイル

温度モニタ

ADC1は熱電対とRTDの温度計測に使用します。コードのこの部分は、回路ノートCN-0300と同一内容です。詳細については、この回路ノートを参照してください。

通信セクション

フィルタされたPWM出力は、最低温度で4mA、最高温度で20mAを保証するために調整する必要があります。キャリブレーション・ルーチンが用意されており、#define CalibratePWMパラメータを使って簡単に追加、削除を行えます。

PWMを補正するには、インターフェース・ボード(USB-SWD/UART)をJ1とPCのUSBポートに接続する必要があります。ハイパーテーミナルのようなCOMポート・ビューを用いて、キャリブレーション・メニューを見ながらキャリブレーション・ルーチンを1ステップずつ進ませることができます。

PWMをキャリブレーションする場合、VLOOP+出力とVLOOP-出力を高精度電流計に接続します。PWMキャリブレーション・ルーチンの最初の部分でDACを調整して4mA出力に設定し、PWMキャリブレーション・ルーチンの2番目の部分でPWMを調整して20mA出力に設定します。4mAと20mAの出力の設定に使われたPWMコードはフラッシュメモリに保存されます。

UARTは、19200のボーレート、8データ・ビット、パリティなし、フロー制御なしに設定されます。この回路をPCに直接接続すると、図3に示すように、ハイパーテーミナルやCoolTermなどの通信ポート表示アプリケーションを使って、プログラムによってUARTに送られる結果を表示することができます。

キャリブレーション・ルーチンによって要求される文字を入力するには、表示端末に必要な文字をタイプします。その結果、その文字がADuCM360のUARTポートによって受信されます。

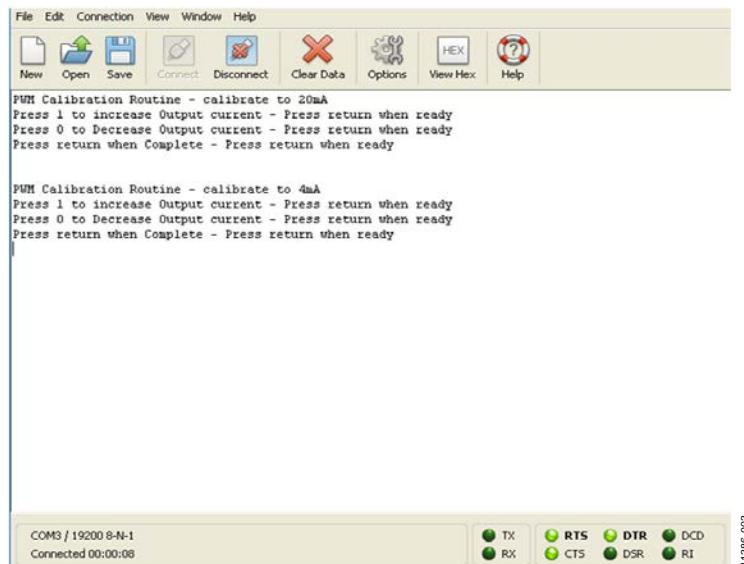


図3. PWMをキャリブレーション時のハイパーテーミナルの出力画面

キャリブレーションが終わると、さらに節電するためにデモコードによってUARTクロックが遮断されます。

キャリブレーション係数がフラッシュメモリに保存されるので、VLOOPレベルが変わらない限り、ボードの電源を入れたびにキャリブレーションを行う必要はありません。

コードのフローチャートを図4に示します。

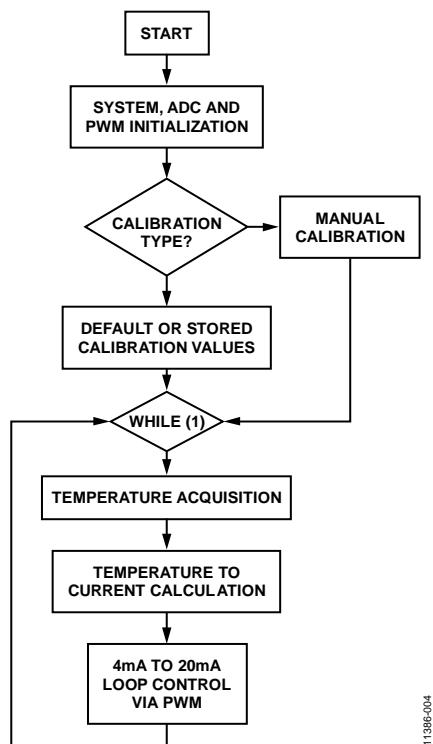


図4. コードのフローチャート

バリエーション回路

この回路にはHART通信および外部リファレンス用の実装面積が含まれています。

回路評価とテスト

温度検出のセクションはCN-0300に記載されているので、この回路ノートでは取り上げません。ここでは温度/電流出力の性能に焦点を絞ります。

PWM差動非直線性(DNL)

フィルタを通したPWM出力のDNLが最初に測定されています。図5のDNLのグラフは、重要な4mA～20mAの範囲の標準的な性能が0.3LSB以下であることを示しています。これらのテストは、PWM出力に2次フィルタを使って行われています。図1に示すように、2本の47kΩ抵抗と2個の100nFコンデンサが使用されています。

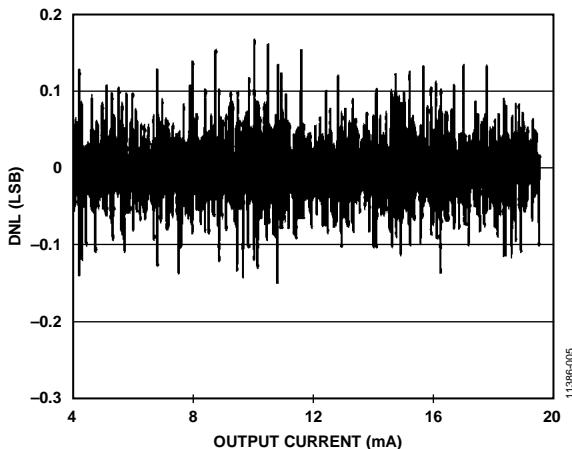


図5. 回路の標準的なDNL性能

温度-電流変換出力

この回路の通信部分のテストには、図6に示すセットアップが使用されています。

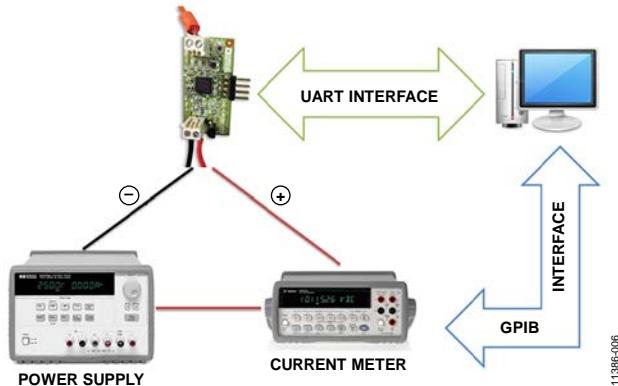


図6. 測定セットアップ

PCが、UARTを介して温度の値をADuCM360へ送り、それに従ってADuCM360はPWMの出力を調整します。ループの電流が測定されて記録されます。

1°Cの温度上昇は次の値に対応します。

$$(20 \text{ mA} - 4 \text{ mA})/550 = 0.029029 \text{ mA}$$

表1. 温度と予想電流

温度 (°C)	予想電流 (mA)
-200°C	4 mA
-199°C	4 mA + 0.029029 mA
...	
+349°C	20 mA - 0.029029 mA
+350°C	20 mA

CN-0300 (DACで制御)とCN-0319 (PWMで制御)で測定した電流ループの測定誤差を図7に示します。

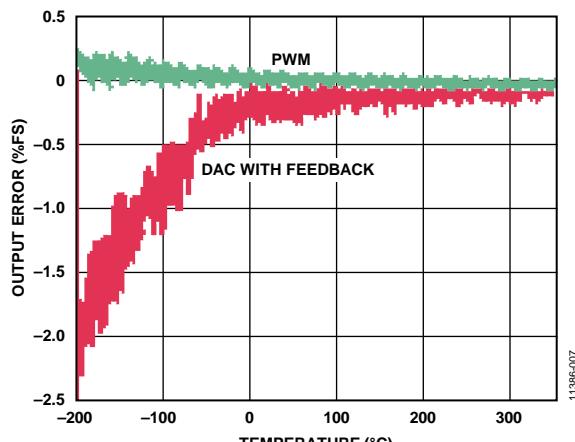


図 7. DAC 制御(CN-0300)と PWM 制御(CN-0319)の
温度測定値 対 電流ループの誤差

これらの結果から、キャリブレーション後には、帰還なしの PWM 制御ループの精度の方が、帰還ありの DAC 制御ループの場合よりも良好なことが分かります。

精度を上げるために、帰還ループを追加することができます。これには、ループをモニタすることが可能な補助 ADC を備えた ADuCM360 を使う必要があります。これにより、消費電流が増加し(ADC0 オン)、ループの応答時間が遅くなります。

電流ループの更新速度は CPU と ADC の設定に依存します。このコード例では、CPU の速度は 1MHz、ADC の周波数は 5Hz に設定されています。ADC は RTD と熱電対のいくつかのサンプルを変換してから、その結果を平均します。サンプルの数はパラメータ SAMPLENO によって設定されます。コード例ではデフォルトで 8 に設定されています。これにより、電流ループ更新速度は 740ms になります。

ループの応答時間を速くするため、SAMPLENO の値を小さくすることができます。

消費電流測定テスト

通常動作中、回路全体で標準 2 mA の電流を消費します。リセット状態に保たれている場合、回路全体の消費電流は 550 μA 未満です。

低消費電力動作を可能にするため、システム・クロックが 8MHz の低消費電力システムをイネーブルする内部レジスタ CLKSYS DIV を設定することにより、ADuCM360/ADuCM361 コアの動作速度を下げることができます。また、CLKCON0 レジスタを設定することにより、16MHz のコア周波数を 2~128 範囲の 2 の倍数で割ることができます。このコード例では、8 のクロック分周値が使用され、コア速度が 1MHz になっています。

主 ADC はゲイン 32 でイネーブルされます。また、PWM と DAC もループの通信のためにイネーブルされます。

消費電流を最小限に抑えるため、使用しない全ての周辺機能がディスエーブルされます。

回路全体の I_{DD} 消費電流の内訳を表 2 に示します。

表 2. 温度モニタ回路の部品の標準 I_{DD} 値

部品	25°Cでの I_{DD} の値
ADuCM360/ADuCM361 ADC1 On, Gain = 32, FADC = 5 Hz CPU speed = 1 MHz PWM On, 240 Hz External reference generated by DAC. Excitation current value to this figure. Typical value is 200 μA. All other peripherals off.	1.80 mA
ADP1720, 3.3 V Output Linear Regulator OP193, Low Power Op Amp Remaining Circuitry Total Current Less Excitation Current	~100 μA 15 μA 50 μA 2.0 mA

ADuCM360 の消費電流値の詳細については、[AN-1111 アプリケーション・ノート](#)を参照してください。

さらに詳しい資料

[CN-0319 Design Support Package:](#)

<http://www.analog.com/CN0319-DesignSupport>

Kester, Walt. 1999. Sensor Signal Conditioning. Analog Devices. Chapter 7, "Temperature Sensors."

Kester, Walt. 1999. Sensor Signal Conditioning. Analog Devices. Chapter 8, "ADCs for Signal Conditioning."

AN-1111 Application Note : Options for Minimizing Power Consumption When Using the ADuCM360/ADuCM361, Analog Devices.

AN-0970 Application Note : RTD Interfacing and Linearization Using an ADuC706x Microcontroller. 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-101 Tutorial : Decoupling Techniques, Analog Devices.

User Guide UG-457 : ADuCM360 Development Systems Getting Started

データシートと評価用ボード

[ADuCM360 データシート](#)

[ADuCM361 データシート](#)

[ADP1720 データシート](#)

[OP193 データシート](#)

[ADR3412 データシート](#)

改訂履歴

3/14—Rev. B to Rev. C

Change to Communication Section 4

12/13—Rev. A to Rev. B

Changes to Code Description Section..... 3

8/13—Rev. 0 to Rev. A

Changes to Title..... 1

5/13—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に作られており、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。お客様は製品設計で「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での暗示的許可、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。