

## Application Note

PCB の銅箔パターンを電流センスの  
シャント抵抗として使用する方法

Paul Stanfel, Mitch Morse

Current and Position Sensing

## 概要

電流センス抵抗は、負荷に流れる電流を正確かつ高精度に測定するために使用されます。この測定を適切に行うには、抵抗 (シャント抵抗とも呼ばれます) を負荷と直列に配置する必要があります。ただし、非常に大きな電流の場合、シャント抵抗を使用して電流を測定する事にはいくつかの欠点があります。消費電力は電流の 2 乗に比例して変化するため、大きな電流を引き込む負荷と直列に接続されたシャント抵抗は、電力を負荷に到達させるよりも電力を消費するため、効率性が急速に失われる場合があります。したがって、電力に対処するためにより耐久性の高い抵抗が必要になります。このアプリケーション ノートでは、より従来型の表面実装テクノロジー (SMT) シャント抵抗の代わりに、プリント基板 (PCB) の銅箔パターンの一部をシャント抵抗として使用することの利点と欠点について詳しく説明します。実際には、SMT 抵抗よりもはるかに安価ですが、銅箔パターンは温度変動の影響を大きく受けやすいため、正確な電流測定を行うにはこの点を考慮する必要があります。また、PCB の製造許容誤差においても、SMT 抵抗の許容誤差に見られるような厳密な製品管理や資料が得られない場合があります。

## 目次

1 概要.....	3
2 実験手順.....	4
3 結果.....	8
3.1 室温.....	8
3.2 温度チャンバー テスト.....	14
4 ハードウェア リビジョン B.....	16
5 まとめ.....	20
6 参考資料.....	20
7 改訂履歴.....	21

## 図の一覧

図 2-1. リビジョン A の 1 番目の基板.....	4
図 2-2. リビジョン A の 2 番目の基板.....	5
図 3-1. 8 つのパターン構成で期待される INA190 出力と実際の INA190 出力の関係.....	8
図 3-2. 100mil (2.5mm) 下端タップ オフ パターンの断面図.....	10
図 3-3. PCB 銅箔パターン厚さの最小値は規定しているが最大値は規定していない IPC 規格.....	11
図 3-4. 6 つのパターン構成の抵抗と電流のグラフ.....	12
図 3-5. 3 つのパターン構成の温度と電流のグラフ.....	13
図 3-6. 4 つの温度にわたる 100mil (2.5mm) 下端タップ オフ抵抗と電流のグラフ.....	14
図 3-7. 3 つのパターン構成の最大抵抗値と温度との関係.....	14
図 4-1. リビジョン B の基板.....	16

## 表の一覧

表 3-1. 室温での平均誤差率.....	9
表 3-2. SEM 分析によって決定されるパターン厚.....	10
表 3-3. 室温、調整済みの平均誤差率.....	11
表 3-4. 温度制御下での平均誤差率.....	15
表 4-1. 薄型 100mil (2.5mm) パターンの誤差率.....	17
表 4-2. PCB 厚さエラーを考慮した校正手順.....	17

表 4-3. 100mil の校正結果.....	18
表 4-4. 200mil パターンに対する 100mil の校正結果.....	18
表 4-5. 100mil 拡張グランド プレーンの校正結果.....	19
表 4-6. 8mil (0.2mm) の校正結果.....	19
表 4-7. INA181 の校正結果.....	19
表 4-8. 平均誤差率: 基板 1 の 8mil (0.2mm) パターン.....	20

## 商標

すべての商標は、それぞれの所有者に帰属します。

## 1 概要

電流センス抵抗は、最新の電源システムに不可欠な部品であり、電流の流れを高精度で監視できます。従来、この用途には単体のシャント抵抗を使用し、負荷と直列になるよう計算して配置されてきました。ただし、大電流の測定を必要とするアプリケーションの場合、従来型のシャント抵抗には制約があります。消費電力は電流の 2 乗に比例して増大するため、高電流域ではシャント抵抗は効率性が低下する場合があります。負荷へ供給されるべき電力の多くが熱として消費されるため、耐久性の高い大型の抵抗が必要となります。

このアプリケーションレポートでは、電流検出に関する新しいアプローチについて詳細に説明します。具体的には、プリント基板 (PCB) の銅箔パターンの一部をシャント抵抗として利用する方法を解説します。この手法は、部品点数の低減、寄生インダクタンスの低減、熱管理の改善などの利点が期待されます。ただし、パターンの厚さの管理、抵抗温度係数の考慮、電流に起因する抵抗の変動の最小化などの課題もあります。初期の結果では、パターンの厚さの管理と安定性に関連する制約が示されました。その後のハードウェアのリビジョン (特にリビジョン B) により、これらの問題が軽減し、このアプローチが実用的になりました。このレポートでは、PCB パターン電流検出の利点と欠点の概要を説明し、設計上の検討事項を紹介するほか、初期のハードウェア実装と改訂後のハードウェア実装の両方から実験的な知見を提示します。

## 2 実験手順

銅トレースをシャント抵抗として使用する場合の妥当性と有効性を検証するため、さまざまなパターン幅、長さ、および形状を用いて試験を行いました。図 2-1 と 図 2-2 に実験における設定を示します。これら 2 つの基板をまとめてリビジョン A と呼びます。

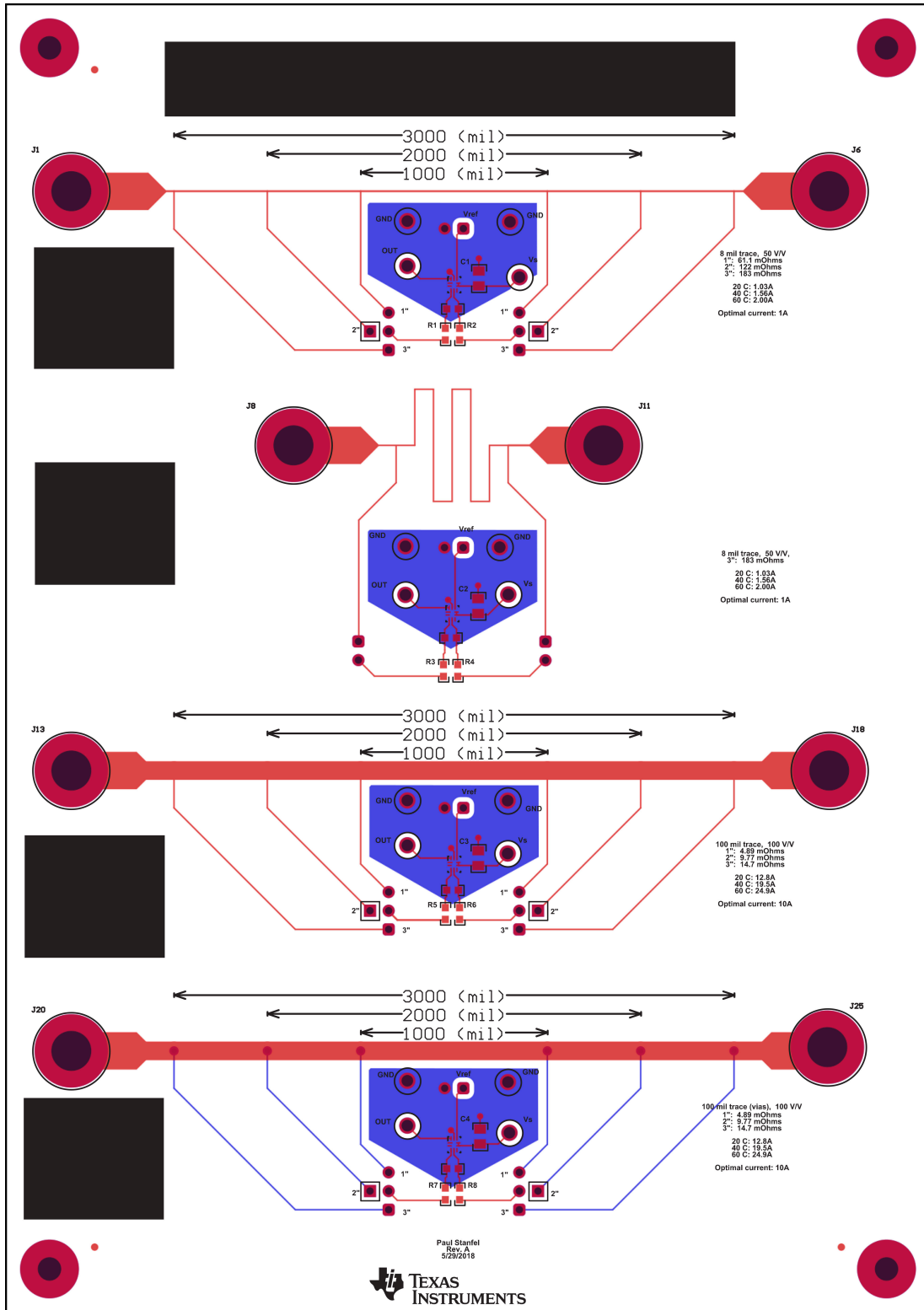


図 2-1. リビジョン A の 1 番目の基板

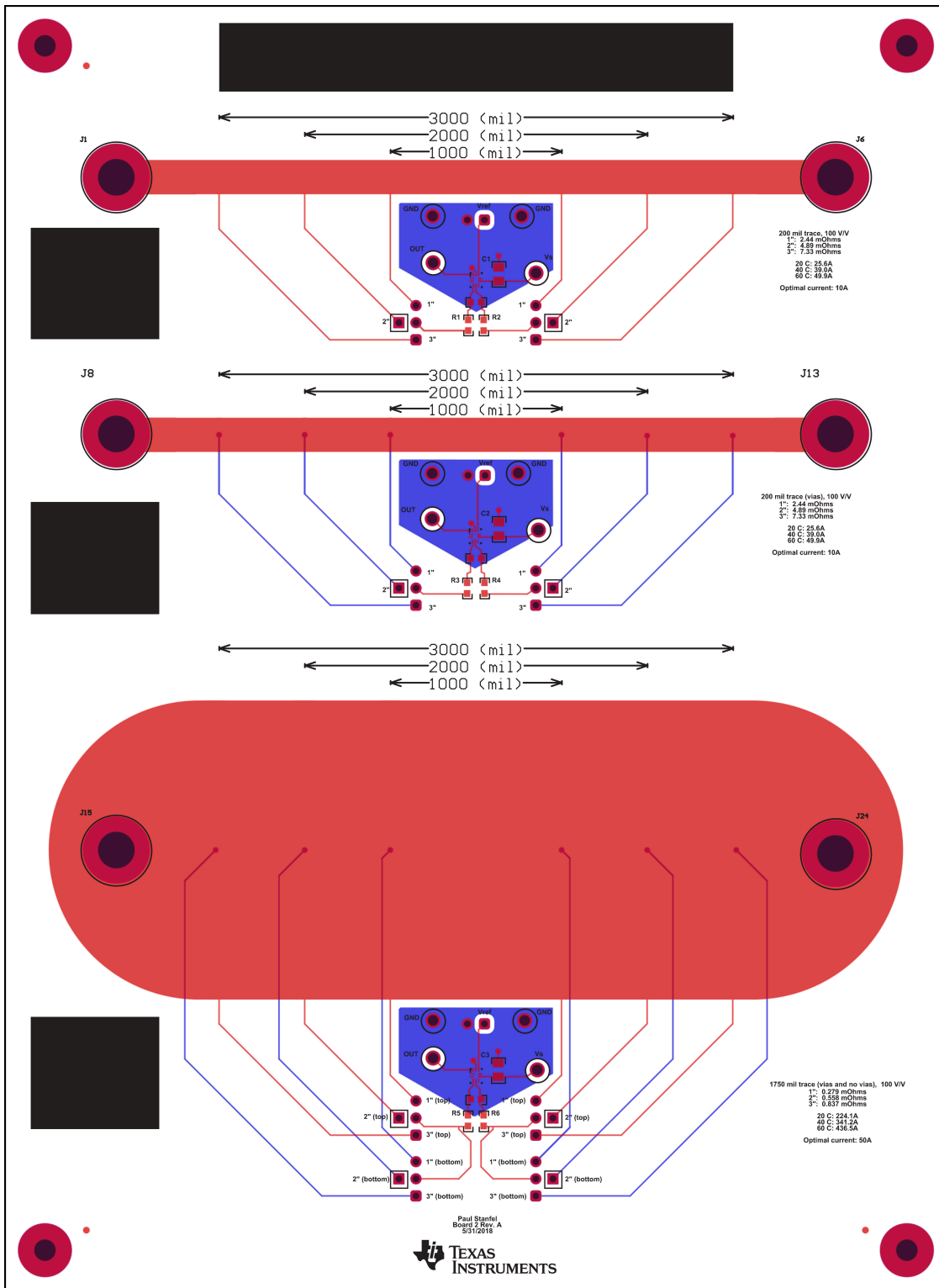


図 2-2. リビジョン A の 2 番目の基板

合計 4 種類のパターンをテストしました: 8mil (0.2cm)、100mil (2.5mm)、200mil (5mm)、および 1750mil (4.4cm)。これらのパターンは、電流を流した状態で 1 インチ (2.54cm)、2 インチ (5cm)、3 インチ (7.62cm) の長さでテストを行いました。さらに、各パターンはパターンの下端 (赤色レイヤのパターンの下端) と、中央からビアを経由して別のレイヤ (青色レイヤ) に接続しました。本書の「タップ オフ ポイント」とは、差動アンプを使用して電圧を測定する銅箔パターン上の位置を指しています。温度と寸法がわかれば、2 点間の抵抗を計算できます。センスラインの位置が電圧測定に及ぼす影響を

調べるため、パターン下端と中央でタップ オフ ポイントを選択しています。導体内の電流は抵抗と反比例するため、中央で測定した電圧の値は、理論的には別の位置での測定結果と異なる値になります。下端へ到達する電流はより多くの銅箔を経由するため、中央に比べて抵抗が大きくなります。複数のタップポイントを使って異なる長さを測定することで、パターンの線形性を確認できます。トレース抵抗が線形で変化するならば、3 インチ (7.62cm) のタップ オフ ポイントは 1 インチ (2.54cm) の 3 倍の抵抗値を示します。図 2-1 にも見られるとおり、正方形のジオメトリ (上から 2 つ目のパターン) が存在します。これは 8mil (0.2mm) パターンであり、電流経路の変更が全体の抵抗測定に与える影響を調べることを目的としています。

銅箔パターンのシャントタップ オフ ポイントは、銅箔パターンのセンスラインを経由して INA190 計測アンプに接続します。INA190 シリーズのデバイスは電圧出力の電流シャント モニタ (電流センス アンプとも呼ばれます) で、過電流からの保護、システム最適化を行うための高精度の電流測定、または閉ループ帰還回路に一般的に使用されます。このシリーズのデバイスは、電源電圧にかかわらず  $-0.1V \sim +40V$  の同相電圧でシャントでの電圧降下を感知できます。5 つの固定ゲインを利用可能: (25V/V、50V/V、100V/V、200V/V、500V/V) を提供しています。INA190 を選択した理由は、入力バイアス電流が小さく、電圧測定精度の向上を期待できるためです。各パターンについて、既知の複数の電流条件下で、パターン下端および中央からそれぞれ 1 インチ (2.54cm)、2 インチ (5cm)、3 インチ (7.62cm) における INA190 の出力を記録し、電流値とアンプのゲイン値を用いて抵抗値へ換算しました。各パターンを通してプルされた最大電流レベルは、メーカーの現在の幅計算ツールを使用して算出しました。4 つの独立した電流 (1A、5A、10A、50A) を使用して、温度上昇を  $20^{\circ}C$  以内に抑えるための最小パターン幅を算出しました。これらの幅の値は切り上げ、安全に所定の電流を扱えるパターン幅を割り出しました。また、その電流を各パターンの最大試験電流として定義しました。8mil (0.2mm) のパターンは 1A、100mil (2.5mm) のパターンは 5A、200mil (5mm) のパターンは 10A、1750mil (4.4cm) のパターンは 50A です。電源電圧が約 5V と仮定して、最大電流が抵抗を流れるときに銅箔パターンの抵抗が飽和しないように INA190 のゲイン設定を選択しました。100mil (2.5mm)、200mil (5mm)、1750mil (4.4cm) のパターンでは、すべてゲイン 100V/V の INA190 A3 を使用し、8mil (0.2mm) のパターンではゲイン 50V/V の INA190 A2 を使用しています。

INA190 の出力から抵抗を算出することで、電流増加に伴う銅箔パターン抵抗の変化が明らかになります。さらに、これらのテストは温度制御された環境下で、4 種類の周囲温度条件 ( $0^{\circ}C$ 、 $25^{\circ}C$ 、 $55^{\circ}C$ 、 $85^{\circ}C$ ) において繰り返し実施されました。 $25^{\circ}C$  という設定は通常室温とされますが、今回のテストにおける  $25^{\circ}C$  は制御環境下の温度条件であり、室温は温度制御外での測定を指します。4 種類の温度レベルでテストを行うと、温度に応じて抵抗値がどのように変化するかを理解できます。これらのテストでは、3 インチ (7.62cm) のテストポイントのみを使用しましたが、ここでも中央接続と下端接続の両方をテストしました。

電流ステップは、トレースと直列に接続した電子負荷を調整し、目的の電流レベルをプルすることで測定しました。正確な結果を得るために、マルチメータを使用して高精度抵抗の両端の電圧をトレースと電子負荷の両方と直列に測定し、パターン内に流れている電流の量を正確に算出しました。各パターンは最初に電子負荷で規定された 0A でテストしましたが、抵抗とマルチメータの組み合わせによる測定では、実際のパターン電流値は、小さな正負の範囲で変動してました。同相電圧は約 5V に設定されています。

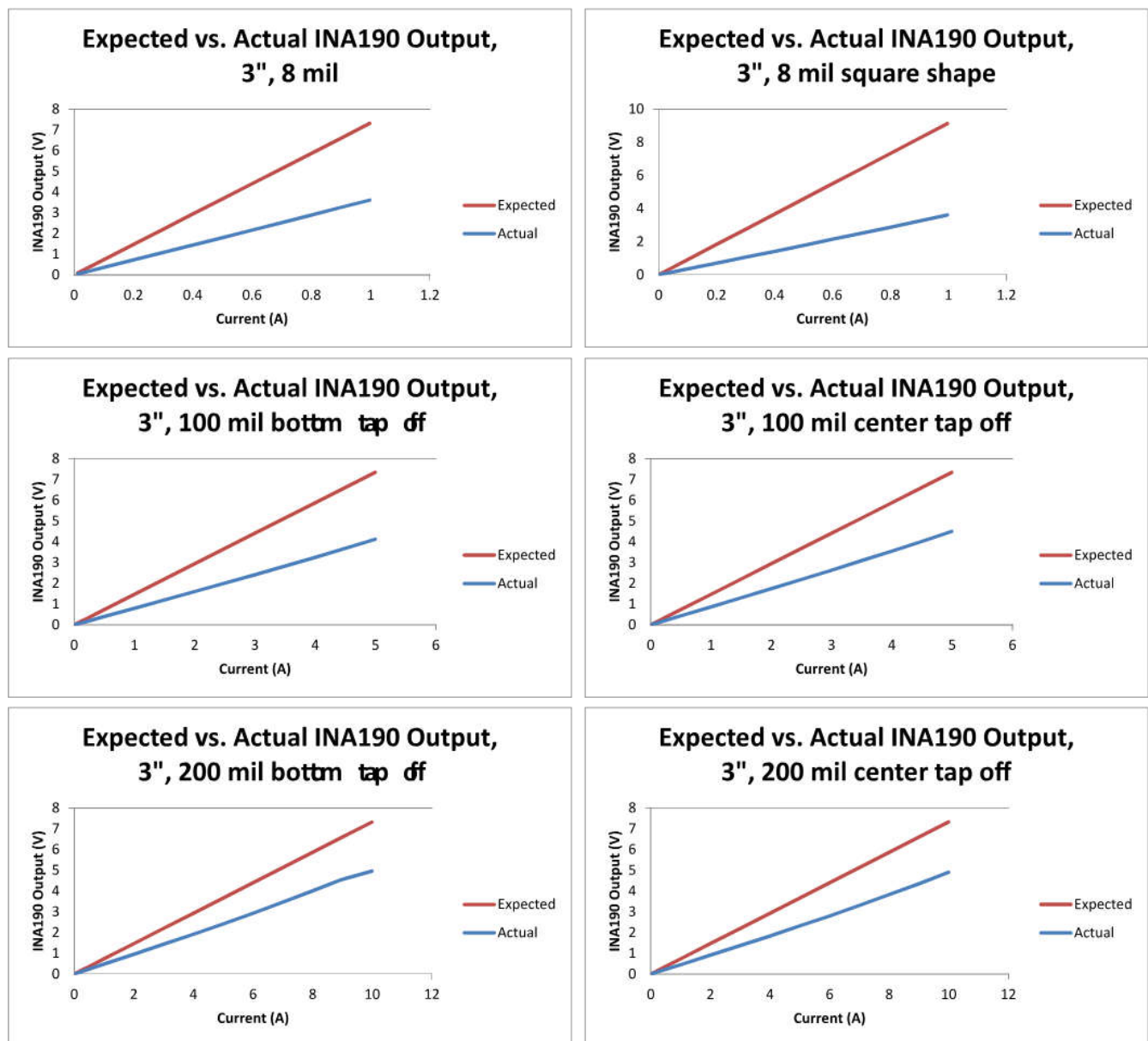
図 2-1 および 図 2-2 には示されていませんが、熱伝導性テープを使用してそれぞれのパターン中央に TMP235 温度センサを固定しました。TMP23x デバイスは、温度に比例した出力電圧を持つ、高精度 CMOS 集積回路リニア アナログ温度センサのファミリーです。このセンサは、パターンとの接触面積を増加させ、周囲環境からの絶縁を強化するため、熱抵抗性テープで覆われています。温度がパターンの抵抗と性能にどのような影響を及ぼすかを評価するため、このセンサを用いてパターンの温度データを取得します。0A 電流ステップで取得した温度データは基準温度として、パターン温度と周囲温度の差異を生じさせる要因 (特に制御環境における温度差) の補正に使用しました。

結果は、データ収集中の環境温度制御に応じて分類されています。データの取得プロセスは比較的シンプルです。室温での測定では、各パターンについて 0A から最大電流までをおおよそ対数スケールに従って段階的に増加させる手順を用いました。電流ステップを進めるごとに、1 インチ (2.54cm)、2 インチ (5cm)、3 インチ (7.62cm) の各位置で INA190 の出力を記録しました。次に、TMP235EVM 評価ソフトウェアを使用して、温度が上昇するまで、TMP235 センサからの温度出力を監視しました。この時点で、2Hz のサンプリング レートで 50 個の温度サンプルを記録し、平均化してパターンの温度を算出しました。テスト中、最終タップの測定後から温度の記録までの間に有意な温度上昇が発生した可能性があります。すなわち、温度が安定するまでの間に INA190 の出力が変動した可能性が考えられます。そこで、手順を一部修正して温度制御環境のテストを実施しました。テストは温度チャンバー内で行われるため、開始前に TMP235 を使用してパターンが環境温度と一致していることを確認しました。次に、電流ステップを減少させ、再度 0A から最大値までスイープしました。ただし、この場合、INA190 の出力と TMP235 の出力の両方が安定するまで、値を記録しませんでした。セクション 3 で、2 つのテスト構成による結果の詳細を示します。

### 3 結果

#### 3.1 室温

各ステップで精密な電流測定を行うと、電流パターン抵抗カリキュレータを使用して、各パターンの INA190 出力を計算することができます。このカリキュレータでは、与えられた幅と長さの各パターンに対する理論上実用的な抵抗値を求めることができます。0A の電流ステップで得られた温度データを周囲温度と解釈し、この理論上実用的な抵抗値に織り込んでいます。パターンは 1 オンス (28g) の銅箔厚と仮定します。この期待値からの偏差を分析することで、銅箔をシャント抵抗として使用することの実現可能性についての洞察が得られます。図 3-1 に、室温 (制御されていない温度環境) での 3 インチ (7.6cm) 測定について、すべての測定したパターンにおけるこれらの不一致のプロットを示します。1 インチ (2.5cm) と 2 インチ (5.1cm) の位置でもプロットはほぼ一致していたため、ここでは省略されています。表 3-1 に、各パターンの平均誤差を示します。これらの誤差には、0A の誤差率の値は含まれません。これは、この電流レベルは非常に小さく、一部のパターンで、INA190 のオフセット誤差も一因となって、20,000% 近くの誤差率が示されたためです。表 3-1 の基板 1 と基板 2 は、各リビジョンがそれぞれ同じレイアウトの 3 つの基板で構成されているため、同じリビジョンの異なるイテレーションを指しています。



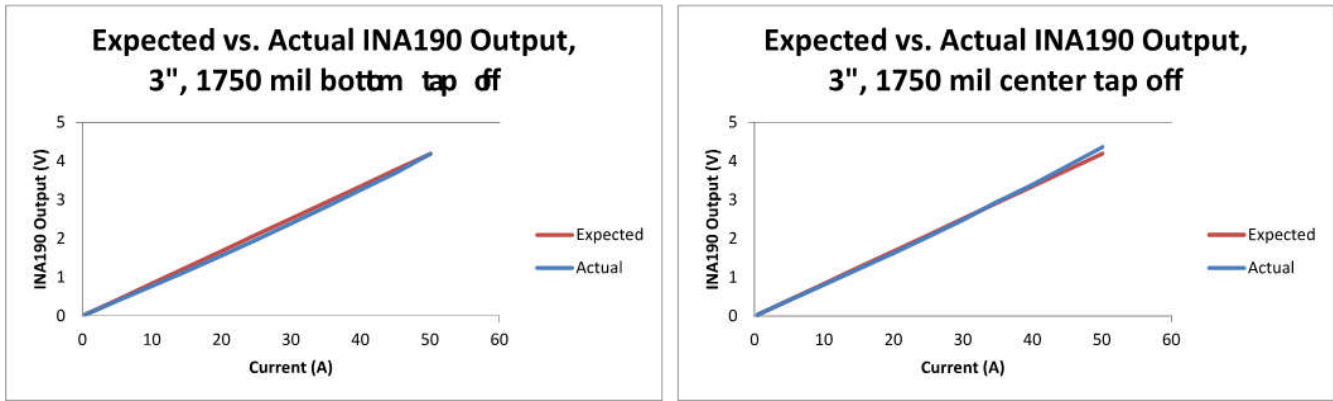


図 3-1. 8 つのパターン構成で期待される INA190 出力と実際の INA190 出力の関係

表 3-1. 室温での平均誤差率

トレース	平均誤差率			平均的
	1"	2"	3"	
8mil	-51.95%	-53.64%	-53.20%	-52.93%
8mil (0.2mm) 平方 (1mil は 1/1000 インチ) (1)	-	-	-58.01%	-58.01%
100mil (2.5mm) 下端タップ オフ、基板 1	-43.08%	-44.20%	-48.73%	-45.34%
100mil (2.5mm) 下端タップ オフ、基板 2	-54.77%	-55.05%	-54.52%	-54.78%
100mil (2.5mm) 中央タップ オフ	-38.53%	-39.25%	-39.15%	-38.98%
200mil (5.1mm) 下端タップ オフ	-31.10%	-32.09%	-32.36%	-31.85%
200mil (2.5mm) 中央タップ オフ	-35.01%	-35.27%	-35.36%	-35.21%
1750mil (5.1mm) 下端タップ オフ	1.48%	-1.25%	-3.44%	-1.07%
1750mil (2.5mm) 中央タップ オフ	0.90%	-1.49%	0.58%	0.00%

(1) 正方形の形状のパターンは、3 インチ (7.6cm) の位置にタップ オフ ポイントが 1 つのみ設置されました。

大きな誤差がない唯一のパターン幅は、1750mil (44.5mm) のパターンです (1mil は 1/1000 インチ)。低電流レベル (1A 未満) では、1750mil (44.5mm) は正の誤差を示しましたが、そこから 50A まで、誤差は負になりました。その他のパターンはすべて非常に大きな誤差がありましたが、かなりの一貫性が見られました。また、100mil (2.5mm) 下端タップ オフのデータポイントの 2 つの事例が示すように、基板 1 と基板 2 で行った測定値の不一致についても留意しました。最後に、パターンの中央での測定値には、下端での測定値との相違が見られました。ただし、この影響は予測不能です。一部では値が近くなりますが、差が大きくなる場合もあります。100mil (2.5mm) のパターンは、誤差で 6.36% の差という最大の相違を示しました。1750mil (44.5mm) のパターンも、中央タップ オフで、より近い値になりました。

大きな誤差の原因を特定するために、基板の 1 つを半分切断し、走査型電子顕微鏡 (SEM) で分析しました。パターン断面の SEM 分析では、パターンの厚さが発注時に想定していた 1oz/ft<sup>2</sup> (300g/m<sup>2</sup>) 銅箔よりを大きく上回っていることが示されました。パターンの断面の 1 つを 図 3-2 に、実際のパターン厚さを 表 3-2 に示します。

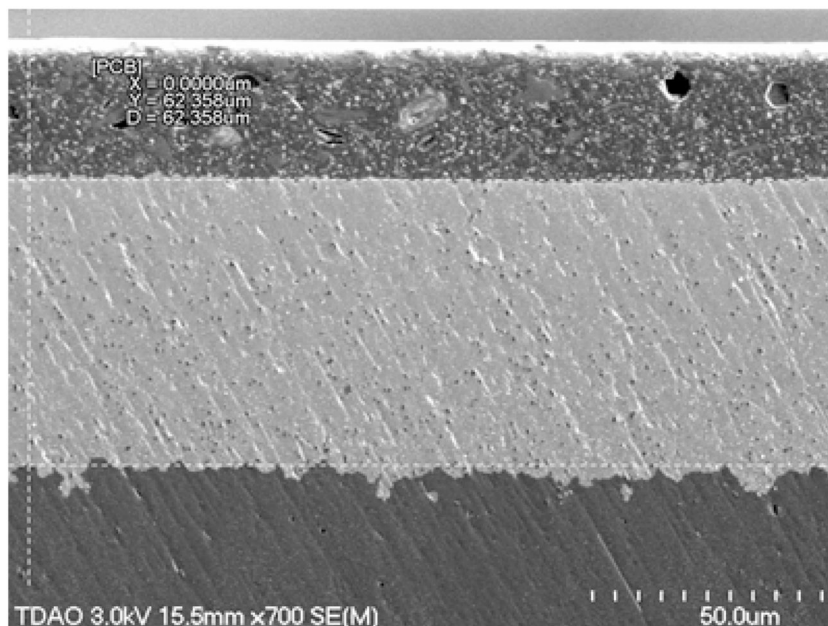


図 3-2. 100mil (2.5mm) 下端タップ オフ パターンの断面図

表 3-2. SEM 分析によって決定されるパターン厚

プリント基板	厚さ (μm)	厚さ (オンス/フィート <sup>2</sup> )	幅 (mm)	幅 (mil)
100mil (2.5mm) の下端 (1mil は 1/1000 インチ)	63.5	1.82	2.50	98.4
100mil (2.5mm) の中央	62.4	1.79	2.28	89.8
1750mil (44.5mm)	41.7	1.20	44.58	1755.1
200mil (5.1mm) の中央	62.1	1.78	4.78	188.2
200mil (5.1mm) の下端	61.2	1.76	4.33	170.5

表 3-2 に示されるように、いくつかのパターンは、実際の 1 オンス (28g、34.8μm) と比較して、期待値の 2 倍近くの厚さになっていました。パターンを厚くすると抵抗値が低下しますので、一部のパターンの誤差率が -40% ~ -50% の範囲にあったことの説明がつかず。

PCB メーカーに連絡すると、小さい銅箔パターンの厚さが期待値を大きく上回る理由が判明しました。PCB の外層に銅をめっきするプロセスの関係で、一般に、周囲の銅箔の面積が小さいパターンの厚さが増加します。100mil (2.5mm) および 200mil (5.1mm) のパターン (1mil は 1/1000 インチ) は他の銅箔パターンから比較的分離されているため、厚さが増加します。ただし、1750mil (44.5mm) のパターンは、この影響を低減するのに十分な大きさがあるため、期待値にかなり近い値になります。これは、電子産業連携協会 (IPC) が発表した規格を精査することによって裏付けられます。IPC 規格では銅箔パターンの最小厚を規定していますが、最大値は規定していません。基本的に、これは、電流シャントとして使用されるすべてのパターンが常に期待される抵抗より小さいことを意味します。つまり、パターン幅を狭くすると、より顕著な影響が発生します。関連する IPC 規格を、図 3-3 に示します。(表は IPC の許可を得て複製)。

Minimum Surface Conductor Thickness = a + b - c

Where:

a = Absolute copper foil minimum (IPC-4562 nominal less 10% reduction).

b = Average copper plating thickness (e.g. 20µm [787 µin] for Class 1 and Class 2; 25 µm [984 µin] for Class3).

c = A maximum variable processing allowance reduction.

**Table 3-14 External Conductor Thickness after Plating**

Weight <sup>1,4</sup>	Absolute Cu Min. (IPC-4562 less 10% reduction) (µm) [µin] <sup>5</sup>	Plus average plating for Class 1 and 2 (20 µm) [787 µin] <sup>2</sup> FOR REFERENCE PURPOSES ONLY	Plus average plating for Class 3 (25 µm) [984 µin] <sup>2</sup> FOR REFERENCE PURPOSES ONLY	Maximum Variable Processing Allowance Reduction <sup>3</sup> (µm) [µin] FOR REFERENCE PURPOSES ONLY	Minimum Surface Conductor Thickness after Processing (µm) [µin]	
					Class 1 & 2	Class 3
1/8 oz.	4.60 [181]	24.60 [967]	29.60 [1,165]	1.50 [59]	23.1 [909]	28.1 [1,106]
1/4 oz.	7.70 [303]	27.70 [1,091]	32.70 [1,287]	1.50 [59]	26.2 [1,031]	31.2 [1,228]
3/8 oz.	10.80 [425]	30.80 [1,213]	35.80 [1,409]	1.50 [59]	29.3 [1,154]	34.3 [1,350]
1/2 oz.	15.40 [606]	35.40 [1,394]	40.40 [1,591]	2.00 [79]	33.4 [1,315]	38.4 [1,512]
1 oz.	30.90 [1,217]	50.90 [2,004]	55.90 [2,201]	3.00 [118]	47.9 [1,886]	52.9 [2,083]
2 oz.	61.70 [2,429]	81.70 [3,217]	86.70 [3,413]	3.00 [118]	78.7 [3,098]	83.7 [3,295]
3 oz.	92.60 [3,646]	112.60 [4,433]	117.60 [4,630]	4.00 [157]	108.6 [4,276]	113.6 [4,472]
4 oz.	123.50 [4,862]	143.50 [5,650]	148.50 [5,846]	4.00 [157]	139.5 [5,492]	144.5 [5,689]

**Note 1.** Starting foil weight of design requirement per procurement documentation.

**Note 2.** Reference: Average Cu Plating Thickness

Class 1 = 20 µm [787 µin] Class 2 = 20 µm [787 µin] Class 3 = 25 µm [984 µin]

**Note 3.** Process allowance reduction does not allow for rework processes for weights below 1/2 oz. and above, the process allowance reduction allows for one rework process.

**Note 4.** For copper foil above 4 oz., utilize the formula provided in 3.6.2.15.

**Note 5.** For foil weights not listed in Table 3-14, the absolute copper minimum shall be calculated using the following algorithms. For microns (µm) use [(34.3 X Weight) X 0.9] and for [µin] microinches use [(1.35 X Weight) X 0.9] X 1000.

### 図 3-3. PCB 銅箔パターン厚さの最小値は規定しているが最大値は規定していない IPC 規格

同じ基板上でのパターン幅のばらつきにより、正方形のパターンがパターン抵抗に影響を及ぼすかどうかを判断するのが困難になります。ただし、この比較は、[セクション 4](#) で説明されているように、2 回目のリビジョンで再検討されました。

[表 3-2](#) のデータを使用して、パターン抵抗の推定値を変更し、実験結果との一致状況を改善しました。1 オンス (28g) 銅箔の代わりに、厚さを [表 3-2](#) の値に設定しました。また、前回の抵抗測定では 25°C の周囲温度を想定していたため、新しい温度は、0A の電流ステップで TMP235 が読み取った温度に設定しました。[表 3-3](#) に調整後の結果を示します。

**表 3-3. 室温、調整済みの平均誤差率**

トレース	平均誤差率			平均的
	1"	2"	3"	
100mil (5.1mm) 下端タップ オフ	-10.11%	22.22%	0.61%	4.24%
100mil (2.5mm) 中央タップ オフ	-13.09%	18.92%	6.69%	4.17%
200mil (5.1mm) 下端タップ オフ	3.14%	1.70%	1.18%	2.01%
200mil (2.5mm) 中央タップ オフ	9.38%	8.68%	8.61%	8.89%
1750mil (5.1mm) 下端タ ップ オフ	21.87%	18.80%	16.10%	18.92%
1750mil (2.5mm) 中央タ ップ オフ	21.17%	18.51%	20.92%	20.20%

調整後、かなりの誤差の増加がみられた 1750mil (44.5mm) のパターン (1mil は 1/1000 インチ) を除いて、パターンの誤差は有意に減少しました。[表 3-1](#) で示されたように、中央タップ オフ ポイントと下端タップ オフ ポイントの違いもそれほど顕著ではなく、1750 mil パターンの場合は逆転まで見られます。

電流が流れると銅箔パターンで熱が発生するため、パターンを流れる電流に対して銅箔パターンの外挿された抵抗値が記録されています。[セクション 2](#) に示すように、測定プロセス全般にわたり、パターンが加熱し続ける可能性があり、これが

誤差の要因となり得ます。温度均一化プロセス中の追加のパターン加熱の影響は、後の試験で得られた観測結果に基づく、最大  $0.5\text{m}\Omega$  程度の差を生じさせる可能性があります。電流によるパターン抵抗の変化を示すグラフを、[図 3-4](#) に示します。8mil (0.2mm) パターンの温度データはありません。

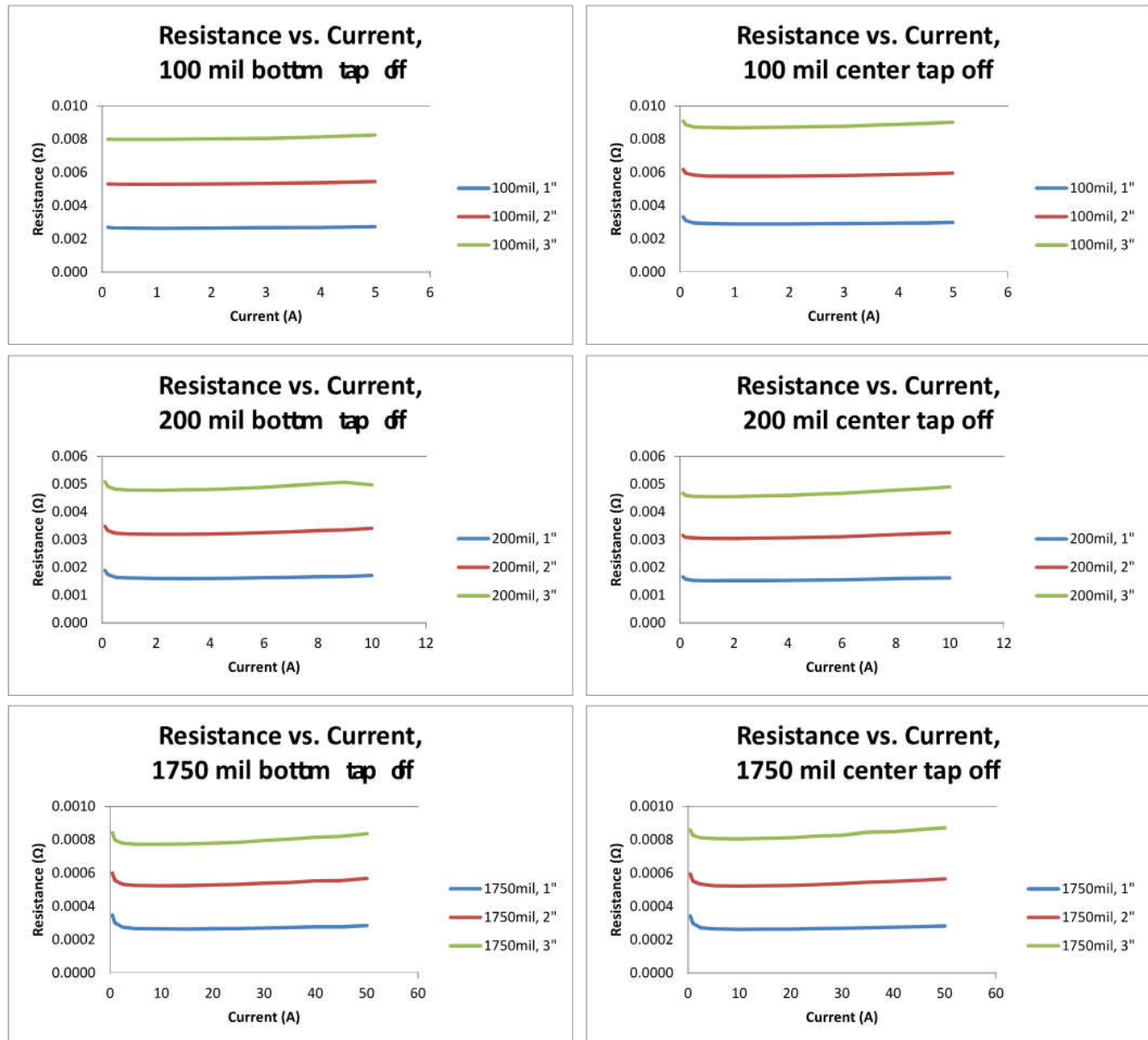
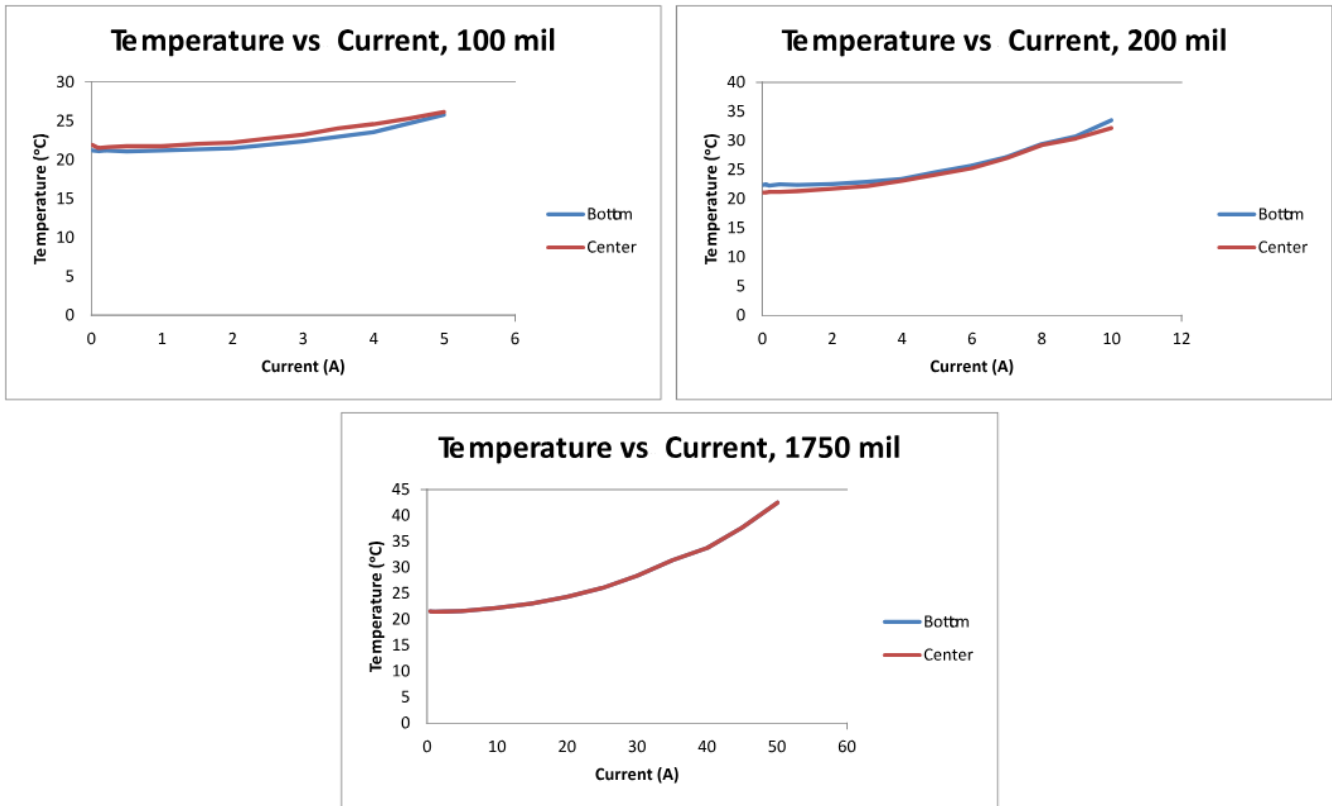


図 3-4. 6 つのパターン構成の抵抗と電流のグラフ

これらのグラフでは、電流値が小さい場合、パターン抵抗が非線形の挙動を示していますが、あるポイント以降、抵抗は電流に対してほぼ直線的に変化することを示しています。これは、出力が小さいほど影響が大きくなる INA190 のオフセット誤差による可能性が最も高くなります。パターンが線形の挙動を始めるポイントは、パターンのサイズに依存します。この領域に入ったのは、100mil (2.5mm) のパターンでは約 0.1A、200mil (5.1mm) のパターンでは約 0.2A、1750mil (44.5mm) のパターンでは約 2.5A でした (1mil は 1/1000 インチ)。この挙動は、パターンに電流を流すだけで抵抗値に影響を及ぼすことを示しているため、考慮しなければならない重要な情報です。銅箔パターンを使用する場合は、パターン抵抗がこのように安定するために必要な時間を考慮する必要があります。

最後に、基板に取り付けた温度センサは、電流の増加に伴ってパターン温度がどのように変化したかを示しています。強い上昇傾向が予想されますが、概ねその通りになりました。パターンが小さい場合、センサと完全に接触しているかどうかを完全に検証できず、周囲の PCB によって温度の測定結果にずれが生じる可能性があります。しかし、センサーで記録

されたパターン温度が上昇を止めるまで温度データは記録されていなかったため、これらの値は、理論的にはすべての変化が起こった後の安定した測定値を表していると言えます。パターン温度のグラフを、[図 3-5](#) に示します。



注

1750mil (44.5mm) の曲線は実質的に判別できません。

**図 3-5. 3つのパターン構成の温度と電流のグラフ**

周囲温度からの上昇が約 20°C になるように、最大電流値を選択しました。これは、[図 3-5](#) のグラフの多くには該当しません。ただし、同様のパターン幅でも、同様の温度上昇が発生しました。この期待した温度上昇がないことは、前述の製造許容誤差の結果である可能性があります。製造時の誤差ではない場合でも、温度上昇の計算にはいくつかの仮定と丸め誤差が含まれるため、重要ではありません。

### 3.2 温度チャンバー テスト

銅箔パターンのシャント抵抗に対する温度変動の影響を判定するため、周囲温度を制御するための温度チャンバー内にパターンを配置しました。パターン測定とパターン測定のために基板がチャンバー温度に達するまでの追加時間が必要なため、チャンバー内で取得するデータポイントは少なくなっています。また、3 インチ (7.6cm) の間隔のみが考慮されます。室温測定と同様に、電流に対するの抵抗値の変化をグラフ化できます。室温においても同様の傾向が観察されました。そのグラフを 図 3-6 に示します。性能はすべてのパターン幅で同様であるため、100mil (2.5mm)、下端タップ オフ (1mil は 1/1000 インチ) のグラフを使用して、温度範囲全体にわたる変化を示します。

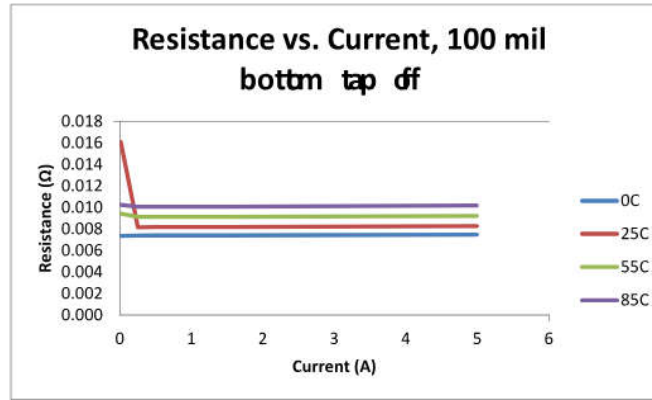


図 3-6. 4 つの温度にわたる 100mil (2.5mm) 下端タップ オフ抵抗と電流のグラフ

図 3-6 のグラフは、周囲温度が上昇すると抵抗値も増加することを示しています。これは、期待される値と以前の結果の両方に一致しています。図 3-7 は、周囲温度に応じて各パターンで記録された最大抵抗をグラフにすることで、温度に応じて抵抗値がどの程度変化するかを示しています。0A での測定抵抗は含まれていません。

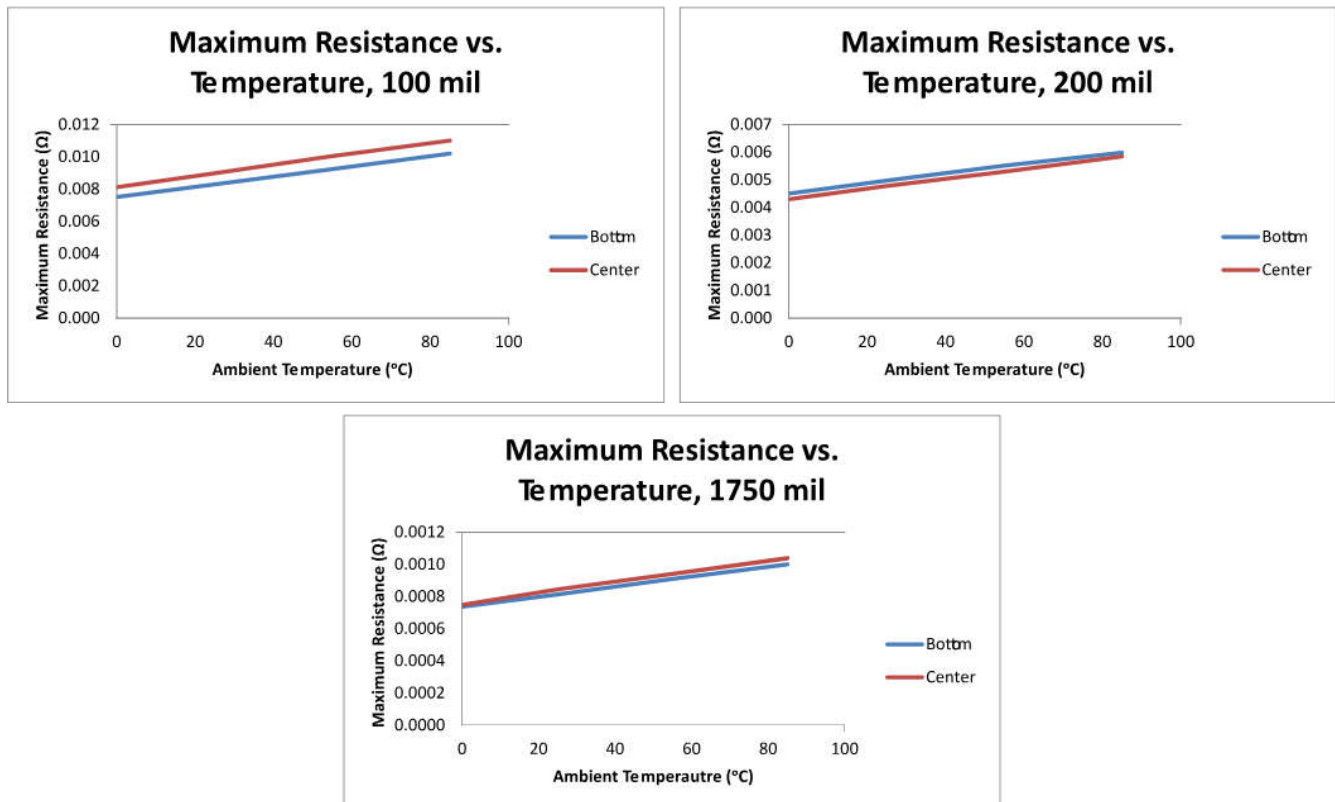


図 3-7. 3 つのパターン構成の最大抵抗値と温度との関係

図 3-7 のグラフは、周囲温度が上昇するにつれて、抵抗の測定値も上昇することを示しています。これは考慮しなければならない重要な要素です。適切な校正のためには、銅箔パターンの電流シャントを使用するアプリケーションの動作温度を考慮しなければなりません。室温環境の場合と同様に、一定の温度範囲にわたる平均誤差率が計算されました。その結果を表 3-4 に示します。

**表 3-4. 温度制御下での平均誤差率**

トレース	平均誤差率				平均的
	0°C	25°C	55°C	85°C	
100mil (2.5mm) 下端タップ オフ	-49.51%	-44.19%	-37.75%	-31.31%	-40.69%
100mil (2.5mm) 中央タップ オフ	-45.34%	-39.47%	-32.25%	-25.63%	-35.67%
200mil (5.1mm) 下端タップ オフ	-39.70%	-33.17%	-25.74%	-20.07%	-29.67%
200mil (5.1mm) 中央タップ オフ	-42.29%	-35.89%	-28.71%	-21.30%	-32.05%
1750mil (44.5mm) 下端タ ップ オフ	-13.72%	-4.75%	6.39%	16.92%	1.21%
1750mil (44.5mm) 中央タ ップ オフ	-10.72%	-1.29%	10.24%	21.46%	4.93%

表 3-4 の値は、潜在的な設計上の検討事項を示しています。1750mil (44.5mm) パターン (1mil は 1/1000 インチ) を除くすべてのパターンでは、温度の上昇に伴って誤差が減少しました。1750mil (44.5mm) パターンで生じる誤差は 25°C で最小になりました。これは、温度とともに抵抗値が上昇するためです。1750mil (44.5mm) のパターンを除くすべてのパターンにおいて、PCB の製造プロセスが原因で、初期の抵抗値が期待値を大幅に下回っていたため、温度と抵抗値の上昇に伴って、パターンが最適値に近づきます。25°C を大幅に上回る温度が発生するアプリケーションでは、温度上昇に応じて、より小さいパターンを使用できます。

## 4 ハードウェア リビジョン B

初期に得られた **セクション 3** の結果からは、パターンの実際の厚さを制御できない点や、電流の影響で銅の抵抗値が変動する特性を考慮すると、銅箔パターンを使用したシャント抵抗は実用的ではないことがわかります。一方、**図 4-1** には、前述の問題を回避するための別の実験構成を採用した第 2 の設計リビジョンが示されています。この設計を、リビジョン B と呼びます。

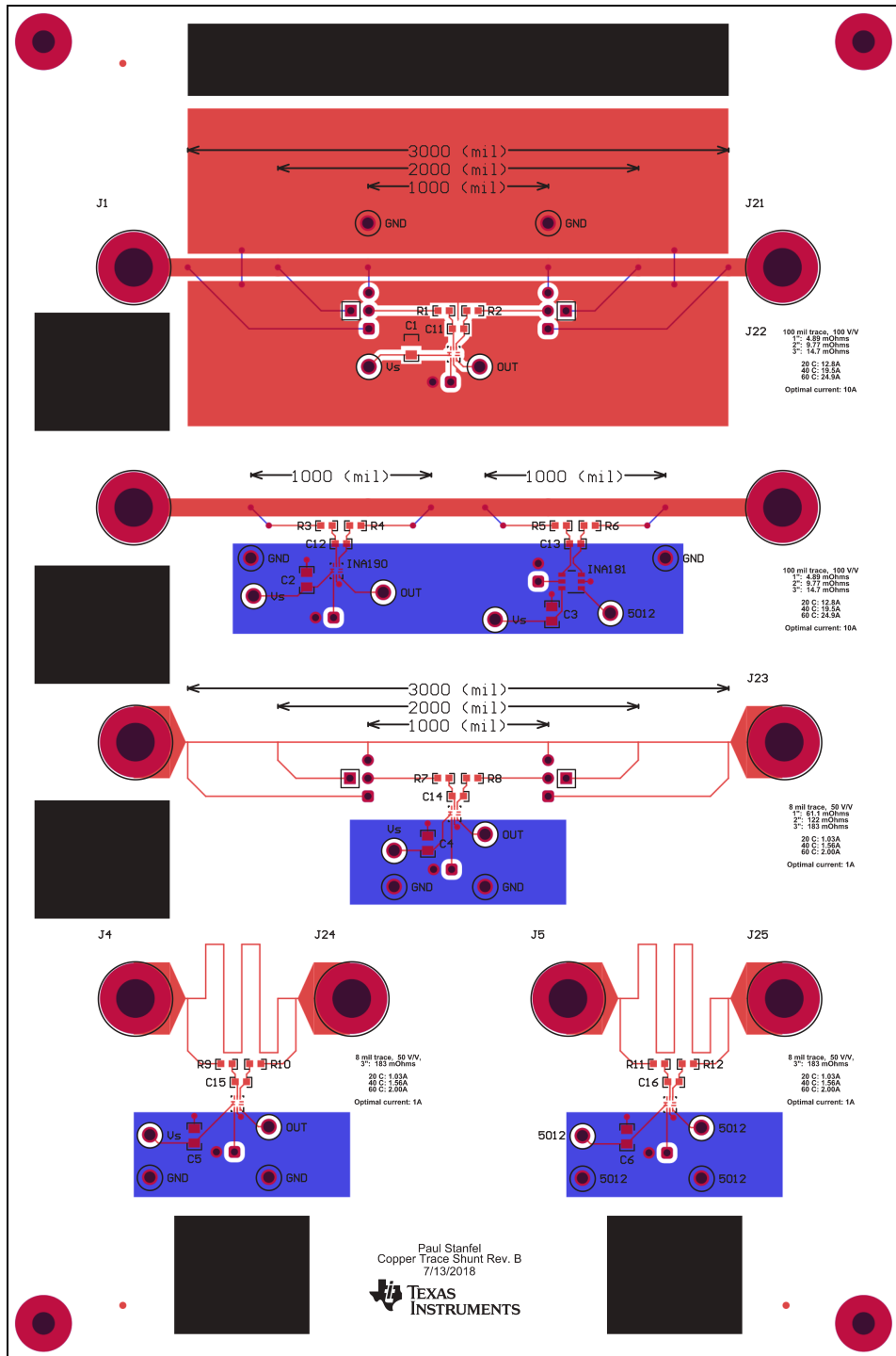


図 4-1. リビジョン B の基板

上面のパターン (図 4-1 を参照) は、100mil (2.5mm) のパターン (1mil は 1/1000 インチ) に大量の周囲の銅 (広いグラウンドプレーン) を追加することで、PCB の製造誤差による影響の低減を図っています。2 番目のパターンは通常の 100mil のパターンで、INA190 (最初のリビジョンで使用) と INA181 の両方で測定されています。INA181 電流センスアンプは、コストを最適化したアプリケーション向けに設計されています。このデバイスは、双方向の電流センスアンプ (電流シャント モニタとも呼ぶ) のファミリに属し、電源電圧にかかわらず、 $-0.2V \sim +26V$  の同相モード電圧において、電流センス抵抗の両端の電圧降下を検出できます。INAx181 ファミリは、整合抵抗ゲイン回路を、4 つの固定ゲイン デバイス オプション (20V/V、50V/V、100V/V、または 200V/V) に統合しています。この整合ゲイン抵抗回路により、ゲイン誤差が最小限に抑えられ、温度ドリフトが低減されます。INA181 と INA190 を比較する理由は、銅箔パターンのシャントを低コストの INA181 と組み合わせて使用できるかどうかを検討し、より安価な電流センス代替手段を開発することにあります。このパターンでは、厚さを制御する調整は一切行っていません。その代わりに、パターンの実際の厚さにかかわらずデバイスの出力を正確に予測するため、2 点校正法を使用します。この種の校正法は、他のパターン幅に対しても検証されています。図 4-1 の最後の 3 つのパターンは、単一基板におけるパターン幅のバラツキを確認する目的で繰り返し配置された 8mil (0.2mm) のパターンです。

グラウンドプレーンを延長した 100mil (2.5mm) パターンの誤差率の結果を表 4-1 に示します。比較のため、表 3-1 に 100mil (2.5mm) パターンの誤差を再掲しています。また、グラウンドプレーンなしの 100mil (2.5mm) パターンを図 4-1 に示します。以前と同様、「基板 1」と「基板 2」は、同じリビジョンにある別のボードを意味します。

**表 4-1. 薄型 100mil (2.5mm) パターンの誤差率**

トレース	平均誤差率			平均的
	1"	2"	3"	
100mil (2.5mm) 拡張グラウンドプレーン、基板 1	-16.71%	-20.29%	-23.22%	-20.07%
100mil (2.5mm) 拡張グラウンドプレーン、基板 2	-18.25%	-21.43%	-24.64%	-21.44%
100mil (2.5mm)、基板 1	-38.87%	-	-	-38.87%
100mil (2.5mm) 下端タップ オフ	-42.96%	-44.08%	-48.38%	-45.14%
100mil (2.5mm) 中央タップ オフ	-38.53%	-39.25%	-39.15%	-38.98%

同一基板上のパターンと比較しても誤差は大幅に低減していますが、依然として大きい値です。ただし、複数の基板をテストした結果から判断すると、誤差は少なくとも一定の傾向を保っていると考えられます。すなわち、この手法は実用的ではあるものの、異なるメーカーの基板間では誤差が変動すると考えられます。さらに、大きなグラウンドプレーンは相当なスペースを占有するため、1750mil (4.4cm) パターンに対する小型の 100mil (2.5mm) パターンの優位性が実質的に失われてしまいます。占有面積がほぼ同等であり、前者の方がより高精度だからです。この実験の結果から、銅箔プレーンの連続性が高いほどパターン厚が期待値に近づくこと、適切な抵抗値を得るためには非常に大きなパターンが必要になることがわかります。

また、この基板はシンプルで省スペースの校正プロセスの有効性を確認する目的でも使用されました。図 3-1 に示す曲線から、期待される出力と実際の出力のずれは単なるゲイン誤差として扱えることがわかります。理論的には、低電流および大電流でパターンを校正することで、実際の曲線上にある任意の出力を予測できます。この手順にはいくつかの複雑な要因があります。1 つ目の要因は、図 3-4 に示すように、電流がパターンを流れるのに合わせて抵抗値が変化する点です。つまり、測定のタイミングによって校正カーブにずれが生じるということです。出力セッティング時間が 5 分を超えたケースもあります。また、基板間のパターン厚に大きなバラツキがある場合、メーカーは各基板を個別に校正する必要があります。また、一括校正のプロセスでは精度が低下します。最後に、この方法による校正では、基準温度から外れた温度変動による変化には対応できません。

2 点校正法の実現可能性を確認するにあたり、最初に現実的なプロセスを評価しました。表 4-2 は、取得データの数、校正出力測定の安定化の有無、テスト出力の安定化の有無という 3 つの観点で分類した 4 種類の構成を示しています。各構成を使用して、トレースに 2.5A が流れる INA190 の出力を予測しました。校正を使用したこの予測と実際の出力との間の誤差率も示しています。これらは図 4-1 において通常の 100mil (2.5mm) パターンを用いて取得しました。

**表 4-2. PCB 厚さエラーを考慮した校正手順**

構成	データポイント数	校正出力が安定している	テスト出力が安定している	エラー率
最大データポイント	4	あり	なし	-1.85%

表 4-2. PCB 厚さエラーを考慮した校正手順 (続き)

構成	データポイント数	校正出力が安定している	テスト出力が安定している	エラー率
データポイントの削減	2	あり	なし	-1.24%
温度の影響を低減	2	なし	なし	-0.58%
最大温度の影響	2	なし	あり	-2.25%

最初の構成で使用した校正データポイントは 4 つあり、そのうち 3 つは低電流範囲にあります。これは最も非現実的なケースでした。実際の運用では、4 つの校正ポイントがそれぞれ安定するまで待ってから記録することは困難であるためです。実際のアプリケーションでは、パターンが熱的平衡に達するまで電流が継続的に流れるのが一般的です。温度が安定する前にテスト出力を記録すると、実際の動作条件のシミュレーションが不正確になります。このため、2 番目と 3 番目の構成も現実的ではありません。実装可能性の観点で最も適しているのは、4 番目の構成です。データポイント数が最小であり、校正に要する待機時間が最も短く、かつテスト電流が長時間流れている状態になっています。残念ながら、この手順は最も誤差が大きくなりますが、大量生産において現実的に実装可能なのはこれのみです。

校正プロセスをテストするため、記録されたデータポイントを使用して校正曲線の勾配と切片を計算しました。電流は、これらの数値を使用して予測し、INA190 からの出力を逆方向から計算できます。実際の電流は既知であるため、パーセント誤差を計算すると、校正の有効性が明らかになります。最初に校正したパターンは、表 4-2 データを取得するために使用された 100mil (2.5mm) のパターンです。使用された校正電流は 0.1A、5A または 10A でした。テスト電流は、0.01A、2.5A、5.5A、7A の 4 種類を使用しました。いずれも INA190 の出力が安定してから記録しました。この手法の有効性を徹底的に検討するため、リビジョン B の 100mil (2.5mm) のパターンを使用して、リビジョン A の 200mil (5mm) パターンにおける INA190 出力を予測しました。表 4-3 および表 4-4 にその結果を示します。校正データは基板 1 のリビジョン B から取得しました。

表 4-3. 100mil の校正結果

ボード	最大校正ポイント	誤差率			
		0.01A	2.5A	5.5A	7A
基板 1、リビジョン B	5A	-36.31%	-1.16%	2.11%	4.03%
基板 2、リビジョン B	5A	-12.72%	-1.58%	1.46%	3.53%
基板 1、リビジョン A	5A	-98.76%	-1.87%	1.98%	4.55%
基板 1、リビジョン B	10A	-20.52%	-4.57%	-1.49%	0.35%
基板 2、リビジョン B	10A	15.20%	-4.97%	-2.12%	-0.14%
基板 1、リビジョン A	10A	-81.22%	-5.25%	-1.62%	0.85%

表 4-4. 200mil パターンに対する 100mil の校正結果

ボード	最大校正ポイント	誤差率			
		0.02A	5A	10A	20A
基板 1、リビジョン A	5A	-79.87%	18.01%	24.96%	49.92%
基板 1、リビジョン A	10A	-55.87%	13.92%	20.54%	44.57%

2 つの異なる校正ポイントをテストすることにより、想定電流に基づいて校正を調整できることがわかります。100mil (2.5mm) のパターンでは、温度上昇を 20°C という比較的無作為な基準内に抑えながら 5A を扱うことができます。高電流に合わせて校正を行うと大電流域の予測精度が上がる一方で、低電流域の外挿は不正確になります。また、異なる幅とリビジョンのパターンに使用すると、校正された予測の精度が著しく低下します。校正条件からの偏差を引き起こす要因が増えるため、この事実は整合性があります。

この校正手順は、拡張されたグランドプレーンを持つパターンや、8mil (0.2mm) のパターンにも使用されました。表 4-5 および表 4-6 に結果を示します。8mil (0.2mm) のパターンに使用した 2 つの校正ポイントは、0.02A と 1A です。

表 4-5. 100mil 拡張グランドプレーンの校正結果

\* これらの電流は一部の出力において飽和が発生しており、その場合は空欄になっています。

ボード	最大校正ポイント	長さ	誤差率			
			0.01A	2.5A	5.5A*	9.5A*
基板 1	5A	1in	800.08%	3.00%	4.57%	10.73%
		2in	65.48%	-0.64%	2.29%	–
		3in	-28.81%	11.92%	–	–
基板 2	5A	1in	796.22%	2.47%	3.63%	10.24%
		2in	81.88%	-1.63%	0.75%	–
		3in	-29.23%	10.39%	–	–

表 4-6. 8mil (0.2mm) の校正結果

\* 最初の 2 枚の基板には 1.5A の電流を使用し、最後の 3 枚には出力飽和を避けるために 1.2A を使用しました。

ボード	誤差率			
	0.005A	0.5A	0.95A	1.5A、1.2A*
リビジョン B、基板 1、1 インチ (2.54cm)	12.99%	-0.72%	0.89%	3.51%
リビジョン B、基板 2、1 インチ (2.54cm)	4.06%	-2.03%	-0.45%	2.00%
リビジョン B、基板 2、3 インチ (7.62cm)	9.91%	1.59%	2.71%	3.58%
リビジョン B、基板 1、正方形	-1.85%	-14.46%	-12.97%	-11.69%
リビジョン A、基板 1、正方形	-9.70%	-8.71%	-7.10%	-5.83%

最後に、INA181 を校正に使用しました。この手順は、INA190 で使用した方法と同一であり、使用デバイスのみが異なります。この校正法を用いて 100mil (2.5mm) パターンのみを検証しました。表 4-7 に結果を示します。

表 4-7. INA181 の校正結果

ボード	最大校正ポイント	誤差率			
		0.01A	2.5A	5.5A	7A
基板 1、リビジョン B	5A	-99.90%	-0.12%	2.24%	4.47%
基板 1、リビジョン B	10A	-99.90%	-2.93%	-0.71%	1.44%
基板 2、リビジョン B	5A	-52.27%	-0.89%	1.61%	3.66%
基板 2、リビジョン B	10A	-27.50%	-3.68%	-1.32%	0.66%

前の表に記載されているデータは、2 点校正プロセスにいくつかの限界があることを示しています。単一基板から得られた校正ポイントは、通常、同一リビジョンの他の基板の出力予測に利用できました。しかし、リビジョンが異なる基板では、PCB 製造時期によってバラツキがあるため、精度が大幅に低下しました。INA181 は INA190 と同等、あるいはそれ以上の性能があるように見えます。このことから、校正でバラツキを補正する場合には、INA181 が INA190 の代替として同様の性能を発揮できることがわかります。

最後に、リビジョン B によってパターン形状の違いが抵抗に与える影響を再評価する機会が得られました。この実験の結果を、表 3-1 と同様の形式で表 4-8 に示します。

**表 4-8. 平均誤差率: 基板 1 の 8mil (0.2mm) パターン**

トレース	平均誤差率			平均的
	1"	2"	3"	
8mil	-51.95%	-53.64%	-53.20%	-52.93%
8mil (0.2mm) 正方形 (左側)	-	-	-58.01%	-58.01%
8mil (0.2mm) 正方形 (右側)	-	-	-51.80%	-51.80%

いくつかの違いは見られますが、そのバラツキがパターン形状によるものなのか、厚さの不均一性によるものなのかを判断するのは困難です。同一形状のパターンにおいて右と左で平均値が異なるという事実は、この差が先述の公差によるものであることを示しており、少なくとも形状による抵抗変化は厚さのバラツキを相殺するほど大きくないことを意味しています。

すべての結果において、非常に低い電流値では大きな誤差率が見られましたが、これは INA190 と INA181 のオフセット誤差を考慮すれば妥当な結果だと言えます。これらの問題は、従来型の SMT 抵抗でも発生します。

## 5 まとめ

通常のシャント抵抗の代わりに銅箔パターンを使用することにはいくつかの利点があります。1 つの利点は、実装コストの削減です。もう 1 つは、銅箔パターンが、パターンのサイズに応じて大きな電流を処理できることです。これは、銅箔パターンの厚さが PCB 製造プロセスの変動の影響を大きく受けやすいという事実と、周囲の条件やパターンを流れる電流による温度変動が抵抗測定に影響を及ぼす可能性があるという事実との間でバランスを取る必要があります。

銅箔パターンのシャント抵抗は、高い精度を必要とするアプリケーション向けには設計されていません。期待値に適度に近いパターン抵抗を確保する唯一の方法は、隙間のない非常に大きな連続パターンを使用することです。これは、大電流の処理に使用できる唯一のパターンでもあります。

または、精度よりもコストの最適化が重要であるアプリケーションでは、製造誤差を考慮するために 2 点校正法を使用することもできます。ただし、製造する基板数が増加すると、それに伴い校正によって得られる近似値が大幅に悪化します。これは、PCB メーカーが基板上の銅めっき量を完全に制御できないためです。また、大電流の場合、校正の予測も悪化します。これらの電流でパターンがより加熱され、期待値からの偏差が大きくなるためです。

銅箔パターンのシャントを実装する場合、いくつかの要因がそれほど重要ではないことが明らかになりました。下端と中央のいずれのタップ オフ ポイントでも測定値に大きな差は見られませんでした。また、パターン形状はパターンの全体的な抵抗に大きな影響を与えないように見えましたが、決定的に証明するのは困難です。

銅箔パターンは SMT シャント抵抗より安価な代替手段ですが、電流測定に際して注意して使用する必要があります。この方法を使用した実装は期待どおりの動作を保証することができません。そのため、変動性を考慮して校正定数を調整する必要があります。

## 6 参考資料

- IPC-6012 の IPC 表は、IPC の許可を得て再掲されています。

## 7 改訂履歴

Changes from Revision * (January 2022) to Revision A (April 2026)	Page
• 「はじめに」セクションを更新。.....	3

## 重要なお知らせと免責事項

TI は、技術データと信頼性データ(データシートを含みます)、設計リソース(リファレンス デザインを含みます)、アプリケーションや設計に関する各種アドバイス、Web ツール、安全性情報、その他のリソースを、欠陥が存在する可能性のある「現状のまま」提供しており、商品性および特定目的に対する適合性の黙示保証、第三者の知的財産権の非侵害保証を含むいかなる保証も、明示的または黙示的にかかわらず拒否します。

これらのリソースは、TI 製品を使用する設計の経験を積んだ開発者への提供を意図したものです。(1) お客様のアプリケーションに適した TI 製品の選定、(2) お客様のアプリケーションの設計、検証、試験、(3) お客様のアプリケーションに該当する各種規格や、その他のあらゆる安全性、セキュリティ、規制、または他の要件への確実な適合に関する責任を、お客様のみが単独で負うものとし、

上記の各種リソースは、予告なく変更される可能性があります。これらのリソースは、リソースで説明されている TI 製品を使用するアプリケーションの開発の目的でのみ、TI はその使用をお客様に許諾します。これらのリソースに関して、他の目的で複製することや掲載することは禁止されています。TI や第三者の知的財産権のライセンスが付与されている訳ではありません。お客様は、これらのリソースを自身で使用した結果発生するあらゆる申し立て、損害、費用、損失、責任について、TI およびその代理人を完全に補償するものとし、TI は一切の責任を拒否します。

TI の製品は、[TI の販売条件](#)、[TI の総合的な品質ガイドライン](#)、[ti.com](#) または TI 製品などに関連して提供される他の適用条件に従い提供されます。TI がこれらのリソースを提供することは、適用される TI の保証または他の保証の放棄の拡大や変更を意味するものではありません。TI がカスタム、またはカスタマー仕様として明示的に指定していない限り、TI の製品は標準的なカタログに掲載される汎用機器です。

お客様がいかなる追加条項または代替条項を提案する場合も、TI はそれらに異議を唱え、拒否します。

Copyright © 2026, Texas Instruments Incorporated

最終更新日 : 2025 年 10 月