



大電力降圧変換に対する 冷却コンセプトの評価

大電力降圧変換に対する冷却コンセプトの評価

著者 : **Sushrut Pattar**
フィールドアプリケーションシステムエンジニア
Matthias Ulmann
フィールドアプリケーションシステムエンジニア

はじめに

自動車OEM(自動車メーカー)全社が自動運転を次の大きな目標にしている時代において、自動車内の電子制御ユニット(ECU)の数が大幅に増加しました。ECUは、運転支援カメラや、データフュージョンECUなどの多様なアプリケーションを扱い、またそれらの消費電力も管理します。アプリケーションの種類や動作範囲により、プリレギュレータの出力電力は、パーキングアシストECUの数ワットから、データフュージョンECUの数百ワット以上の範囲に及びます。このホワイトペーパーでは、電子デバイスに加わる熱的ストレスを軽減するために、ヒートシンクの使用が根本的に重要であること、そしてシステムの放熱性能はヒートシンクの位置やサイズなど、さまざまな要因に依存することを説明します。

最初に、測定に使用したセットアップ、テストボードの概要、実験に使用した各種ヒートシンクについて説明します。測定値を提示し、大出力電力のプリレギュレータを設計する際に、ヒートシンクを使用する効果について詳述します。

セットアップ

Figure 1に、テストボードの熱評価に使用したセットアップを示します。以下の機器を使用しました。

- 電源 : Toellner TOE8872
- 電子負荷 : Prodigit 3311C
- パワーアナライザ : Fluke Norma 5000
- Keysightマルチチャンネルデータロガー34970A
- 被試験デバイス(DUT)

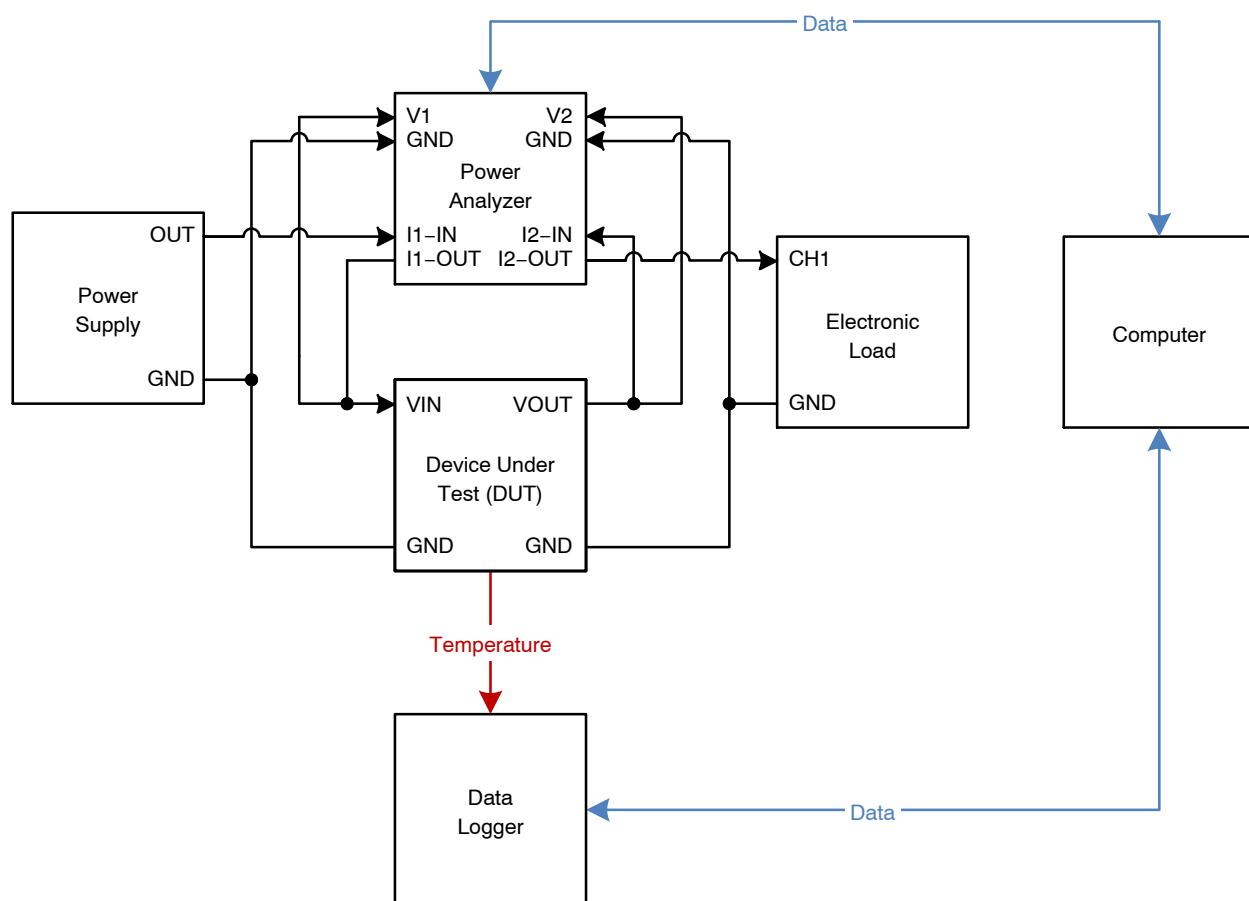


Figure 1. Test Setup

電流は電源のOUTポートからパワーアナライザの入力電流ポートI1-INに流れ、このポートでパワーアナライザが電流を測定します。次に、電流はパワーアナライザのI1-OUTを経由して、被試験デバイス(DUT)のVINポートに流れます。パワーアナライザV1はDUTのVINポートに接続され、入力電圧を測定します。電源のGNDはDUTのGNDとパワーアナライザのGNDに接続します。

出力側では、電流はDUTのVOUTポートからパワーアナライザの入力電流ポートI2-INに流れます。I2-INポートでパワーアナライザが電流を測定します。次いで、電流はパワーアナライザのI2-OUTポートを経由してDC電子負荷のCH1ポートに流れます。この電子負荷でDUTの負荷電流が設定されます。パワーアナライザのV2をDUTのVOUTポートに接続して、出力電圧を測定します。パワーアナライザのGNDを、DUTのGNDとDC電子負荷のGNDに接続します。

電源には検出機能が搭載されており、DUTに供給される電圧を一定に保持し(ケーブル損失を補償)、センサラインに断線が生じた場合は敏感な負荷を保護します。データロガーは、DUT内の各種IC部品の温度を測定します。

高精度で再現可能な結果が確実に得られるように、システム全体が完全に自動化されています。Pythonベースのソフトウェアが、入力電圧や出力負荷の設定から、部品の温度測定

やシステム全体の効率の計算まで、セットアップ全体を制御します。Figure 2にこのソフトウェアのGUIを示します。

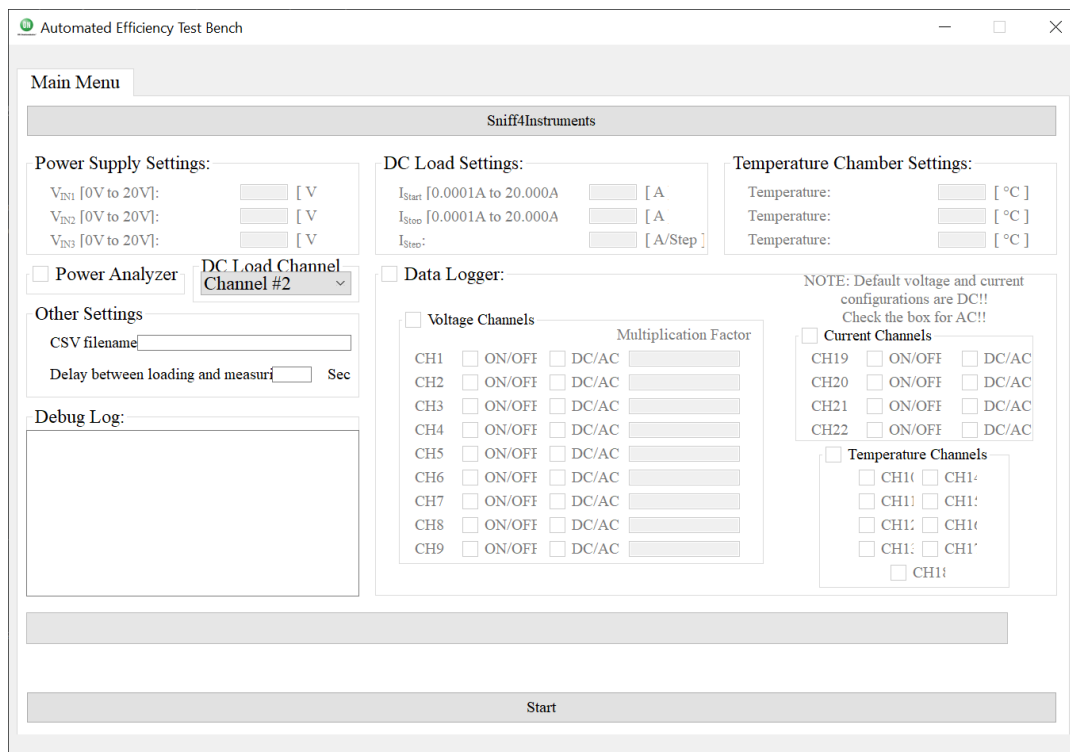


Figure 2. Software GUI

テストボードとヒートシンク

各種ヒートシンクの性能と効果を評価するために、[100 W車載プリレギュレータ設計](#)に基づき、熱評価用に最適化されたPCBを使用して専用ボードを設計しました。Figure 3に、出力電圧5 V、出力電流供給能力が最大20 Aの同期降圧コンバータの回路図を示します。車載用降圧コントローラ「[NCV881930](#)」は、410 kHzの固定スイッチング周波数を使用します。このコントローラは、車載認定済み40 V MOSFET「[NVMFS5C460NL](#)」(底面に露出パッド付きSO-8FL)を2個並列に接続し、降圧コンバータのハイサイド(HS)とローサイド(LS)に配置して、最大20 Aの大出力電流の供給を可能にしています。

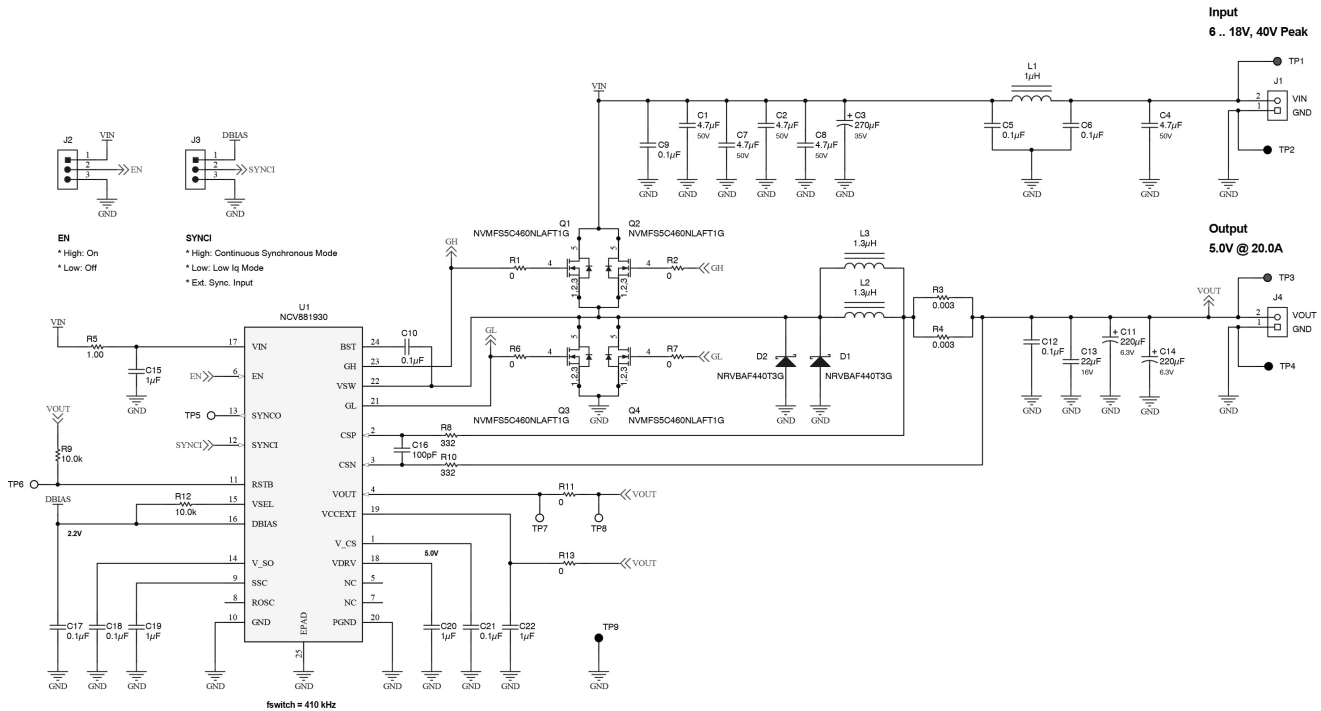


Figure 3. Test Board Schematic

レイアウトに以下の改造を加えた結果、ボードの熱評価を実施できるようになりました。

- PCBの上面と底面に50 mm x 50 mmのヒートシンクを取り付けることができるよう、PCBの面積を拡大
- ヒートシンク用の取り付け穴を配置
- PCBの底面にインダクタを取り付けるための追加面積を確保

Figure 4とFigure 5にPCBの上面図と底面図を示します。上面と底面に1個のヒートシンクを取り付けることができます。

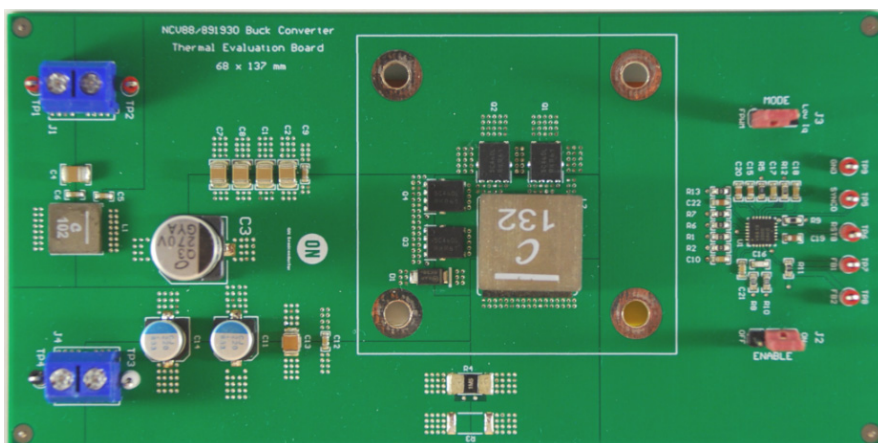


Figure 4. DUT Top Side

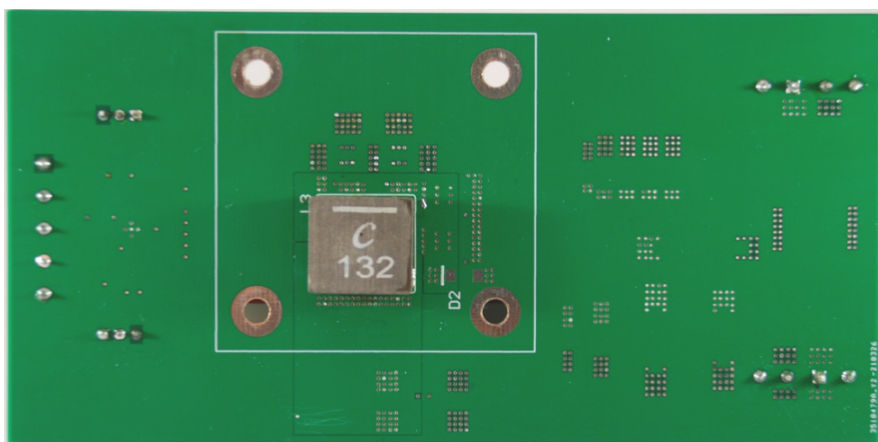


Figure 5. DUT Bottom Side

上記の構成で3種類のテストセットアップが可能であり、解析を実施しました。

Table 1. TEST SETUPS

Setup	Placement MOSFETs	Placement Inductor	Placement Heat Sink
#1	Top	Top	No heat sink
#2	Top	Bottom	Top (on MOSFETs)
#3	Top	Top	Bottom (on PCB)

機械的な観点からいえば、ヒートシンクを適切かつ交換可能な形でPCBに取り付けることが最も困難な部分になります。どの構成でも、良好な熱伝導性を達成できるように、ヒートシンクと放熱面の間にフィルムギャップパッドを入れることが大切です。PCBやMOSFETのパッケージのような放熱面は、完全に平坦ではなく、ヒートシンクに平行になっているわけでもありません。そのため、ギャップパッドを入れると、両者の間に良好な薄い熱伝導層が形成されます。材料の選定は重要であり、放熱性能に大きな影響を

与えます。例えば、高電圧に耐える必要がある材料は、導電性グラファイトをベースとする材料に比べると、常に放熱抵抗がかなり高くなります。

テストセットアップでは、KERAFOLの「SOFTTHERM」の厚さ0.5 mmの材料を選定しています(Table 2参照)。どの測定も、3.0 W/(m·K)の材料を使用して実施しました。この材料の熱抵抗は0.41 K/Wです。6.0 W/(m·K)の材料(熱抵抗は0.20 K/W)は、両方の材料を比較する目的で1回だけ使用しました。その結果はこのホワイトペーパーの最後に掲載しています。

Table 2. FILM GAP PADS

Material	Thermal Conductivity	Thermal Resistance	Thermal Impedance	Thickness	Breakdown Voltage
86/300 SOFTTHERM	3.0 W/(m·K)	0.41 K/W	164 (K·mm ²)/W	0.5 mm	7.0 kV
86/600 SOFTTHERM	6.0 W/(m·K)	0.20 K/W	80 (K·mm ²)/W	0.5 mm	1.5 kV

- 熱伝導性は材料の特性であり、形状(外形やサイズ)に依存しません。このパラメータは内部の熱伝導能力を表し、複数の材料を比較するときに役立ちます。
- 熱抵抗は、特定の厚さを持つ材料が、熱の流れに抵抗する度合いを表します。厚さは熱抵抗に直接関係するので、厚い材料よりも薄い材料の方が熱伝導性に優れています。
- 熱インピーダンスは、形状やサイズ、厚さ、圧力によって異なります。熱インピーダンスは表面の平坦さや圧力など、すべての変数が考慮されるので、具体的なアプリケーションにとってより現実的な値です。

ヒートシンクを取り付ける際に加えるトルクも、熱インピーダンスに関係します。一般的に、強く圧縮するほど熱抵抗が小さくなります。これは圧縮すると全体の厚さが薄くなり、材料の密度が高くなるからです。両方の要因とも、熱伝導性の向上につながります。厚さ5 mmの86/300 SOFTTHERM材は、圧力がゼロのときの熱抵抗は4.1 K/Wです。30 N/cm²の圧力を加えると厚さは3.7 mmになり、熱抵抗は3.0 K/Wに低下します。この材料の最も薄いバージョンは厚さ0.5 mmです。このケースでは、30 N/cm²の最大圧力を加えると材料は厚さ0.3 mmに圧縮できます。同時に、熱抵抗は0.4 K/Wから0.25 K/Wに低下します。過度に高い圧力を加えると、フィルムギャップパッドが損傷(例：リークアウト)することがあります。例えば、86/300 SOFTTHERMの場合、圧縮が元の厚さの30%を超えないようにしなければなりません。

このテストセットアップの場合、過度に高いトルクや圧力を加えてフィルムギャップパッドや機械的セットアップが損傷しない限り、圧力の絶対値が特に重要なわけではありません。最も重要な点は、どのヒートシンクおよびセットアップでも同じ圧力を加える必要があることです。そうでないと、測定結果が比較できなくなります。前述したように、圧力と熱抵抗の関係は、圧力がシステム全体の放熱性能に大きな影響を与えることを明確に示しています。厚さ0.5 mmのフィルムギャップパッドでは、最大圧力30 N/cm²から圧力ゼロまでの範囲で熱抵抗が60%増大します。

比較的シンプルで信頼性の高いセットアップとして、ヒートシンクをコンピュータのCPUに取り付けるのによく使用されるのが、スプリングを使う方法です。このような機械的セットアップの場合、スプリングをネジで所定の場所に固定し、CPUの上部にヒートシンクを押し付けます。圧力はスプリングの弾性力によって決まり、ネジのトルクには関係ありません。ネジのトルクではヒートシンクやCPUに圧力が加わらないからです。

Figure 6に、PCBにヒートシンクを取り付けた状態のセットアップを示します。インダクタとMOSFETは底面に取り付けます。熱はPCBを通じてヒートシンクから放散されます。PCBの熱抵抗を低減し、PCB内の垂直方向の熱流を改善するために、PCBのホットスポット周辺に多数のビアが配置されています。ヒートシンクとPCBの間のフィルムギャップパッドは、粗い表面や凹凸を平坦にして、熱抵抗を最小限に抑えます。ヒートシンクには、ヒートシンクとスプリングを固定するためのネジ山があります。スプリングにはネジで軽くストレスが加えられ、ヒートシンクがPCBに押し付けられます。スプリングの力は圧縮されたスプリングの長さに比例します。各スプリングを固定する際に圧力が等しくなるように、4個のスプリングをすべて同じ長さにする必要があります。各セットアップで、スプリングの長さと機械的な力を等しくすると、再現可能かつ比較可能な結果が得られます。

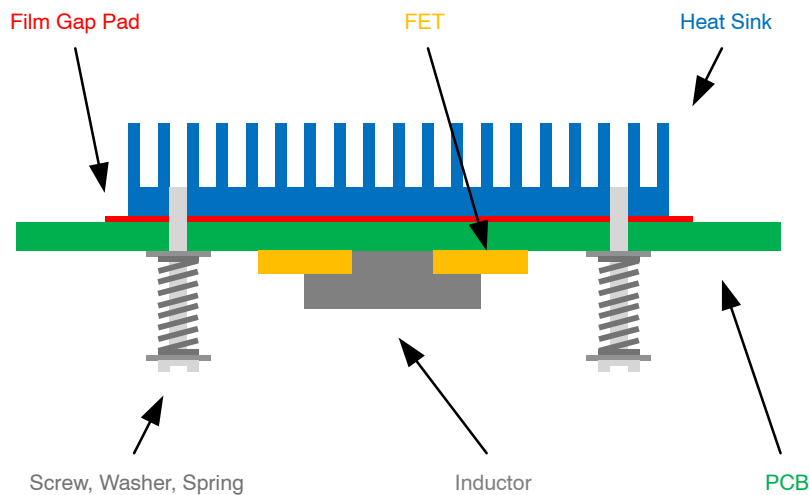


Figure 6. Heat Sink on PCB

Figure 7に、MOSFETの上部にヒートシンクを取り付けた構成を示します。このセットアップは前の例によく似ています。違いは、MOSFETの上部にヒートシンクを取り付けることができるよう、インダクタが底面に配置されていることです。

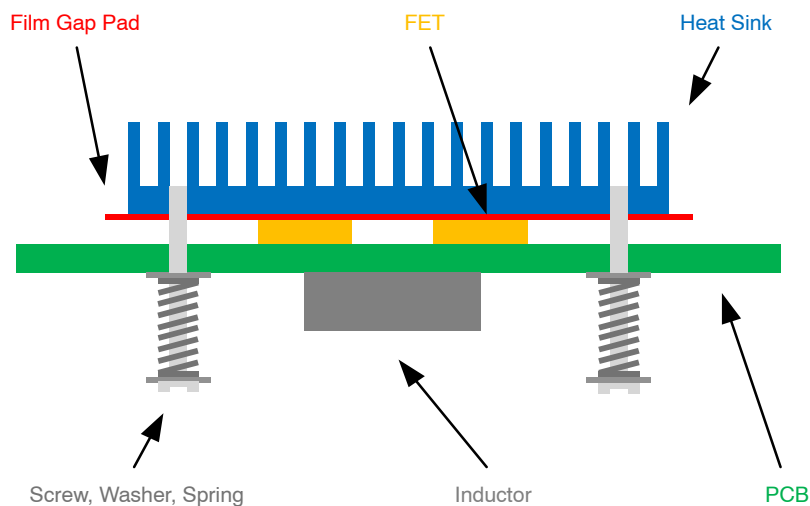


Figure 7. Heat Sink on MOSFETs

Fischer Elektronik製でベース面積が50 x 50 mmの3種類のヒートシンクを使用して、測定を行いました(Table 3参照)。

Table 3. HEAT SINK OVERVIEW

Part Number	Thermal Resistance	Height	Drawing
SK 548 50 SA	7.4 K/W	10 mm	
SK 567 50 SA	4.0 K/W	25 mm	
SK 527 50 SA	2.5 K/W	60 mm	

これらのヒートシンクは、放熱フィンの高さに応じて熱抵抗に大きな違いが生じるような製品を選定しています。フィンが高くなるほど、熱抵抗は半分程度ずつ減少しています。このように選定すると、ヒートシンクの違いに基づいて熱抵抗を明確に区別するのに役立ちます。

MOSFET間の電力分割

損失およびHS MOSFETとLS MOSFET間での損失分割の分配を適切に説明するには、以下の測定値を理解することが重要です。したがって、MOSFETに関連するすべての損失を計算して、主な要因を理解してください。LS MOSFETと並列に1個のショットキダイオードを配置すると、逆回復損失を防止できるほか、デッドタイム損失がLS MOSFETからショットキダイオードに移動します。

Table 4に損失の計算に使用したパラメータを示します。

Table 4. PARAMETERS FOR LOSS CALCULATION

Parameters	Value	Notes
U_{in}	12.0 V	Input voltage
U_{out}	5.0 V	Output voltage
I_{out}	20.0 A	Output current
$I_{L,min}$	19.83 A	Minimum inductor current at 20.0 A load
$I_{L,max}$	20.17 A	Maximum inductor current at 20.0 A load
η	92.2%	Efficiency
f_{sw}	410 kHz	Switching frequency
t_{dead}	20 ns	Typical dead time between HS and LS MOSFET switching of NCV881930 buck controller
R_{shunt}	1.5 m Ω	Current sense resistor
$R_{ds(on)}$	5.8 m Ω	Typical on-resistance at 4.5 V gate-source voltage
C_{oss}	800 pF	Typical output capacitance at 12.0 V drain-source voltage
$V_{f,SK}$	0.485 V	Forward voltage of the Schottky diode

出力電力

$$P_{out} = U_{out} \cdot I_{out} = 5.0 \text{ V} \cdot 20.0 \text{ A} = 100.000 \text{ W} \quad (\text{eq. 1})$$

入力電力

$$P_{in} = \frac{P_{out}}{\eta} = \frac{100.0 \text{ W}}{0.922} = 108.500 \text{ W} \quad (\text{eq. 2})$$

全損失

$$P_{loss,total} = P_{in} - P_{out} = 108.5 \text{ W} - 100.0 \text{ W} = 8.500 \text{ W} \quad (\text{eq. 3})$$

シャント損失

$$P_{shunt} = I_{out}^2 \cdot R_{shunt} = (20.0 \text{ A})^2 \cdot 1.5 \text{ m}\Omega = 0.600 \text{ W} \quad (\text{eq. 4})$$

インダクタ損失

$$P_{inductor} = 0.600 \text{ W} \quad (\text{Coilcraft web tool for XAL1580-132ME})$$

HS MOSFETの導通損失

$$I_{HS,RMS,single} = 6.5 \text{ A} \quad (\text{for single MOSFET, 13.0 A for both MOSFETs in parallel})$$

$$P_{HS,conducted,single} = I_{HS,RMS,single}^2 \cdot R_{ds,on} = (6.5 \text{ A})^2 \cdot 5.8 \text{ m}\Omega = 0.245 \text{ W} \quad (\text{eq. 5})$$

$$P_{HS,conducted,total} = 2 \cdot P_{HS,conducted,single} = 2 \cdot 0.245 \text{ W} = 0.490 \text{ W} \quad (\text{eq. 6})$$

LS MOSFETの導通損失

$$I_{LS,RMS,single} = 7.7 \text{ A (for single MOSFET, 15.4 A for both MOSFETs in parallel)}$$

$$P_{LS,conducted,single} = I_{LS,RMS,single}^2 \cdot R_{ds,on} = (7.7 \text{ A})^2 \cdot 5.8 \text{ m}\Omega = 0.344 \text{ W} \quad (\text{eq. 7})$$

$$P_{LS,conducted,total} = 2 \cdot P_{LS,conducted,single} = 2 \cdot 0.344 \text{ W} = 0.688 \text{ W} \quad (\text{eq. 8})$$

ショットキダイオードでのデッドタイム損失

HS MOSFETからLS MOSFETに、またはその逆に電流が遷移するとき、「デッドタイム」と呼ぶ特定の時間、すべてのMOSFETがオフになります。この短い時間(標準20 ns)、電流はLS MOSFETのボディダイオードを経由して流れます。LS MOSFETと並列に1個のショットキダイオードを配置すると、デッドタイムの期間中、電流はショットキダイオードを通じて流れます。これはボディダイオードの順方向電圧(標準0.86 V)よりも、ショットキダイオードの順方向電圧(標準0.485 V)が低いからです。ショットキダイオードを追加する主な利点は、ボディダイオードの逆回復損失を回避できることです。これはショットキダイオードに逆回復損失が生じないためです。順方向電圧降下に起因するデッドタイム損失は、ショットキダイオードで発生します。また、 $I_{L,MIN}$ (LS MOSFETをオフに切り替え)と $I_{L,MAX}$ (LS MOSFETをオンに切り替え)を考慮する必要があります。

$$P_{LS,deadtime} = V_{f,SK} \cdot t_{dead} \cdot f_{sw} \cdot (I_{L,min} + I_{L,max}) = 0.485 \text{ V} \cdot 20 \text{ ns} \cdot 410\text{kHz} \cdot (19.83 \text{ A} + 20.17 \text{ A}) = 0.160 \text{ W} \quad (\text{eq. 9})$$

容量性損失

HS MOSFETの出力容量は、toffの期間中に($V_{in} - V_f$)に充電されます。このMOSFETをオンに切り替えると、オン抵抗が出力容量を短絡します。それにより、蓄積されたエネルギーが熱に変換されます。

$$P_{COSS} = \frac{1}{2} \cdot C_{OSS} \cdot (V_{in} - V_{f,SK})^2 \cdot f_{sw} = \frac{1}{2} \cdot 800 \cdot \text{pF} \cdot (12.0 \text{ V} - 0.485 \text{ V})^2 \cdot 410 \text{ kHz} = 0.022 \text{ W} \quad (\text{eq. 10})$$

他の損失に比べると容量性損失はごくわずかなので、以下の計算では無視します。

スイッチング損失

スイッチング損失は、ゲートドライバパターンに存在する寄生インダクタンスなど、いくつかの複雑なパラメータに依存しているため推定は困難です。したがって、このケースではスイッチング損失を求めるために別のアプローチを使用します。全損失から既知の損失と計算した損失をすべて差し引くと、全スイッチング損失が求められます。もちろん、PCBの銅抵抗に起因する損失など、他の損失も存在しますが、これらは既知ではなく優先的でもないので同様に無視します。

$$P_{\text{switching,total}} = P_{\text{loss,total}} - P_{\text{shunt}} - P_{\text{inductor}} - P_{\text{HS,conducted,total}} - P_{\text{LS,conducted,total}} - P_{\text{dead}}$$

$$P_{\text{switching,total}} = 8.500 \text{ W} - 0.600 \text{ W} - 0.600 \text{ W} - 0.490 \text{ W} - 0.688 \text{ W} - 0.160 \text{ W} = 5.962 \text{ W} \quad (\text{eq. 11})$$

LS MOSFETのスイッチングは、ほぼゼロ電圧で行うため(MOSFETがオン・オフするとき、ドレイン-ソース間電圧はダイオードの順方向電圧に等しい)、計算で求めるスイッチング損失の大部分はHS MOSFETに起因します。

HS MOSFETの全損失

$$P_{\text{HS,total}} = P_{\text{HS,conducted,total}} + P_{\text{switching,total}} = 0.490 \text{ W} + 5.962 \text{ W} = 6.452 \text{ W} \quad (\text{eq. 12})$$

LS MOSFETの全損失

$$P_{\text{LS,total}} = P_{\text{LS,conducted,total}} = 0.688 \text{ W} \quad (\text{eq. 13})$$

上記の計算に基づくと、LS MOSFETに比べて、HS MOSFETの全損失は非常に大きい値です。その結果、HS MOSFETの温度上昇は、LS MOSFETの温度上昇よりはるかに大きいという想定につながります。Figure 8は、負荷電流がどの値でもLS MOSFETの損失が1.0 W未満であるのに対し、負荷電流が20.0 AのときHS MOSFETの損失は6.0 W以上であることを示しています。



Figure 8. MOSFET Losses

測定の準備

ボードの放熱性能を評価するために、以下の3つの構成を使用します。

- セットアップ#1：ヒートシンクなし
- セットアップ#2：ヒートシンクを上面に取付け
- セットアップ#3：ヒートシンクを底面に取付け

3つの構成すべてにおいて、以下の電氣的パラメータ (Table 5) を使用してボードをテストします。ついで、いくつかの特定の動作ポイントで、効率と全損失を測定します。

Table 5. OPERATION POINTS

Input Voltage	Output Voltage	Output Current	Total Losses	Efficiency
12.0 V	5.0 V	5.0 A	1.2 W	95.3%
12.0 V	5.0 V	10.0 A	3.1 W	94.1%
12.0 V	5.0 V	15.0 A	5.1 W	93.5%
12.0 V	5.0 V	20.0 A	8.4 W	92.2%

Figure 9に、20.0 Aまでの負荷電流に対する効率プロットを示します。

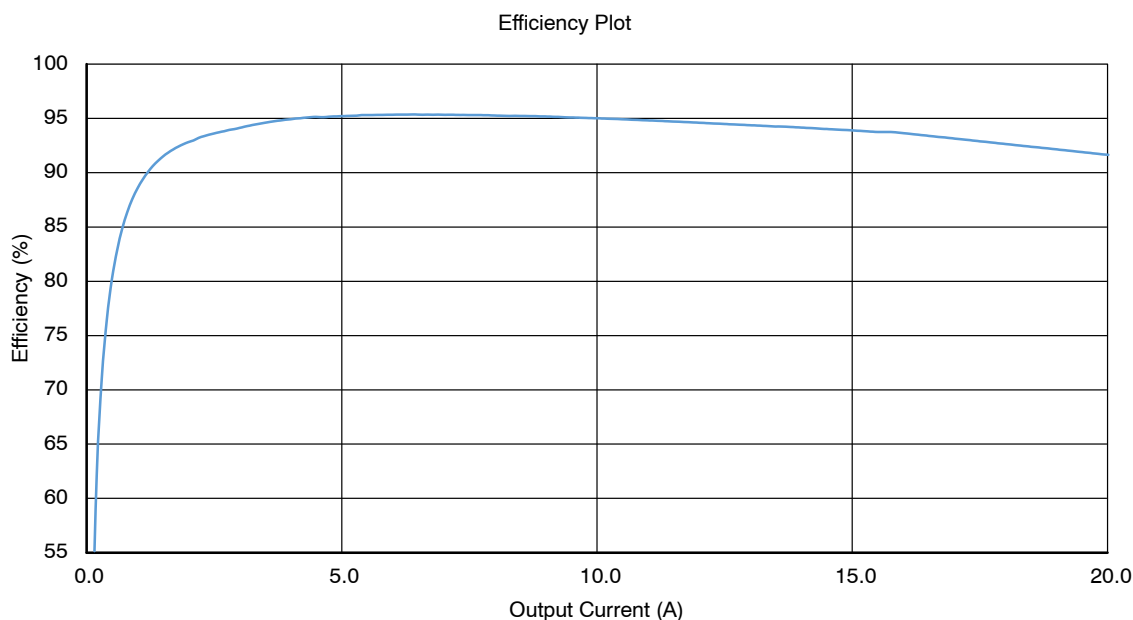


Figure 9. Efficiency Plot

測定を実行する前に、MOSFETの温度が安定して、より精度の高い結果が得られるように何回か試験的な測定を行い、MOSFETの温度が安定するまでの時間を把握しました。どの測定でも、K型熱電対とHERNON 746 SET-04熱接着剤を使用し、MOSFETとPCBに熱電対を取り付けています。

加えて、ボードに電源を投入する前に、両方の熱電対をMOSFETに取り付け、室温で測定を行って、それらが同じ温度を示すことを確認しました。24.0°Cの周囲温度で、両方のセンサ間の偏差は0.3°C未満でした。これは今回の評価にとって十分な精度です。

Table 6は、MOSFETの温度が約20～25分後に安定した値に落ち着くことを示しています。20分と25分経過後の違いは無視できるので、測定から次の測定までの間に温度データを記録する際に、経過時間と精度の妥協点として20分の期間を選択しました。

Table 6. TEMPERATURE PROFILE OVER TIME WITHOUT A HEAT SINK

Setup #1 – Without Heat Sink – $V_{in} = 12\text{ V}$, $V_{out} = 5\text{ V}$, $I_{out} = 20\text{ A}$		
Time-lapse	Low-side MOSFET Temperature	High-side MOSFET Temperature
5 minutes	71.3°C	79.5°C
10 minutes	77.8°C	85.0°C
15 minutes	80.7°C	85.1°C
20 minutes	81.6°C	86.6°C
25 minutes	81.8°C	87.0°C

Table 7に、PCBの底面に60 mmヒートシンクを取り付けたときの温度を示します。約25分経過後に温度が安定しています。25分、30分、35分経過後の測定で、温度差はごくわずかなので、測定と測定の間で最適経過時間として30分を選択しました。

Table 7. TEMPERATURE PROFILE OVER TIME WITH 60 MM HEAT SINK

Setup #3 – With 60 mm Heat Sink on the Bottom Side – $V_{in} = 12\text{ V}$, $V_{out} = 5\text{ V}$, $I_{out} = 20\text{ A}$		
Time-lapse	Low-side MOSFET Temperature	High-side MOSFET Temperature
5 minutes	44.7°C	47.4°C
10 minutes	49.6°C	52.7°C
15 minutes	52.7°C	55.6°C
20 minutes	54.2°C	57.6°C
25 minutes	54.7°C	58.5°C
30 minutes	55.1°C	58.7°C
35 minutes	55.3°C	58.9°C

前のセクションで、HS MOSFETの損失とLS MOSFETの損失に大きな違いがあることを説明しました。20.0 Aの負荷電流を使用する場合、HS MOSFETの消費電力は約6.5 W、LS MOSFETは約0.7 Wで、およそ1/10です。ここから、HS MOSFETとLS MOSFETの温度差も同様に大きいという想定につながります。しかし、測定値が示すように、この想定は当たっていません。すべてのMOSFETの温度はよく似ており、偏差は10%をかなり下回っています。

その理由はPCBのレイアウトです。今回のPCBは、熱伝導性と放熱性能が最適化されています。MOSFETの周囲に多数のビアを配置し、基板の外層と内層(4層PCB、銅の厚さ35 μm)に広い面積の銅プレーンを確保する方法で、MOSFETで発生した熱を効果的に分散してPCB内で拡散します。その結果、消費電力が非常に小さいLS MOSFETが、ボードの主な熱源であるHS MOSFETによって加熱されることとなります。HS MOSFETとLS MOSFETの温度差は、異なる電力損失レベルを示しています。それでも、損失の推定に基づいて予想できる温度差に比べると、実際の温度差はそれほど小さくなく、今回のPCBの放熱性能が優れていることを実証しています。

測定

セットアップ#1：ヒートシンクなし

Figure 10に示すように、PCBにヒートシンクを取り付けず、HS MOSFETのうち1個とLS MOSFETのうち1個に、熱接着剤を使用して熱電対を取り付けます。このボードに、5 A、10 A、15 A、20 Aの負荷電流を流します。ボードに各負荷電流を流し始めてから20分経過後、データロガーが両方の熱電対からの温度情報を保存します。

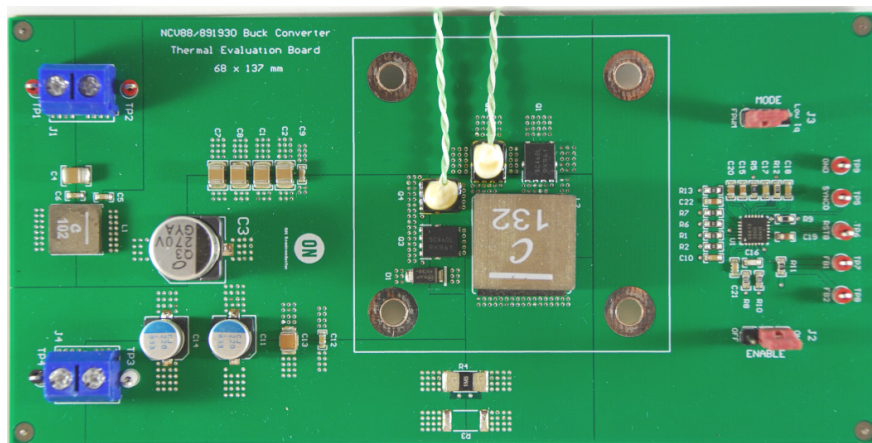


Figure 10. Setup #1 – Without Heat Sink

Table 8に4種類の出力電流での測定結果を示します。

Table 8. SETUP #1 – WITHOUT HEAT SINK

Output Current	Low-side MOSFET Temperature	High-side MOSFET Temperature
5.0 A	40.2°C	42.1°C
10.0 A	49.2°C	52.3°C
15.0 A	65.3°C	70.6°C
20.0 A	83.4°C	89.7°C

Figure 11に温度のグラフ表示を示します。一般的に、HS MOSFETはLS MOSFETよりわずかに温度が高くなります。負荷電流が大きいほど、両方のMOSFETの温度も上昇します。負荷電流が5.0 Aから20.0 Aに増加する際の温度上昇は直線的ではありません。これはスイッチング損失は直線的に増加するが、導通損失は直線的ではないためです ($P_{Conducted} = I_{RMS}^2 \cdot R_{DS,On}$)。

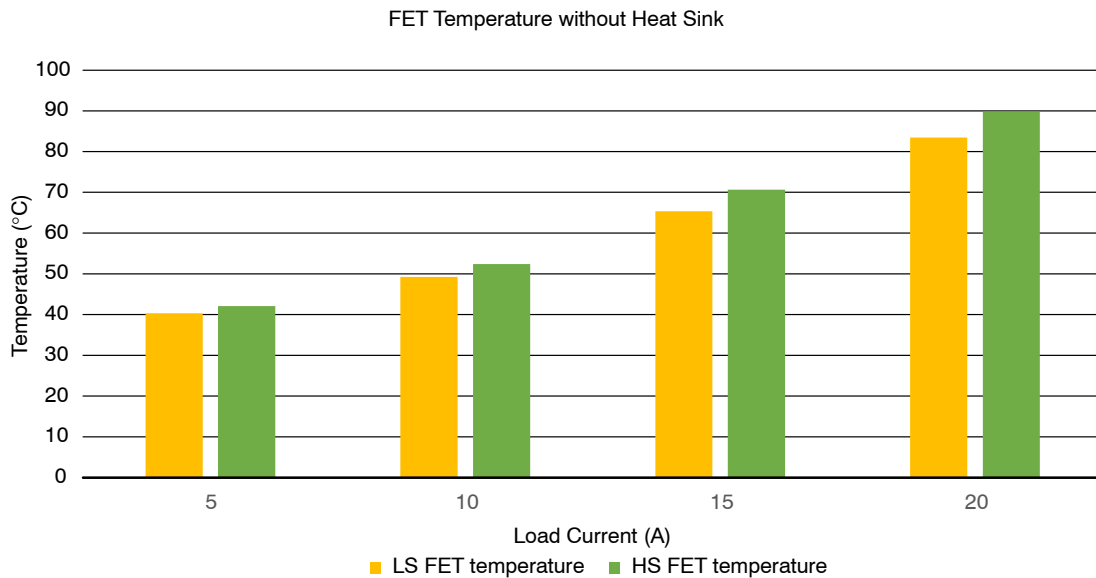


Figure 11. Setup #1 – Without Heat Sink

セットアップ#2：ヒートシンクを上面に取り付け

Figure 12に、ヒートシンクをPCBの上面に取り付けられたボードを示します。ヒートシンクはHS MOSFETとLS MOSFETの上部に置き、エアギャップができないよう、間にギャップパッドを入れて、粗い表面を平坦にして、熱伝導性を高くしています。測定は、フィンの高さがそれぞれ10 mm、25 mm、60 mmのヒートシンクを使用し、各負荷電流を流してから30分経過後に測定を行い、熱伝導性と放熱の効果を理解するよう行われました。前のセクションで説明したように、PCBの底面からネジとスプリングを使用してヒートシンクを取り付けています。

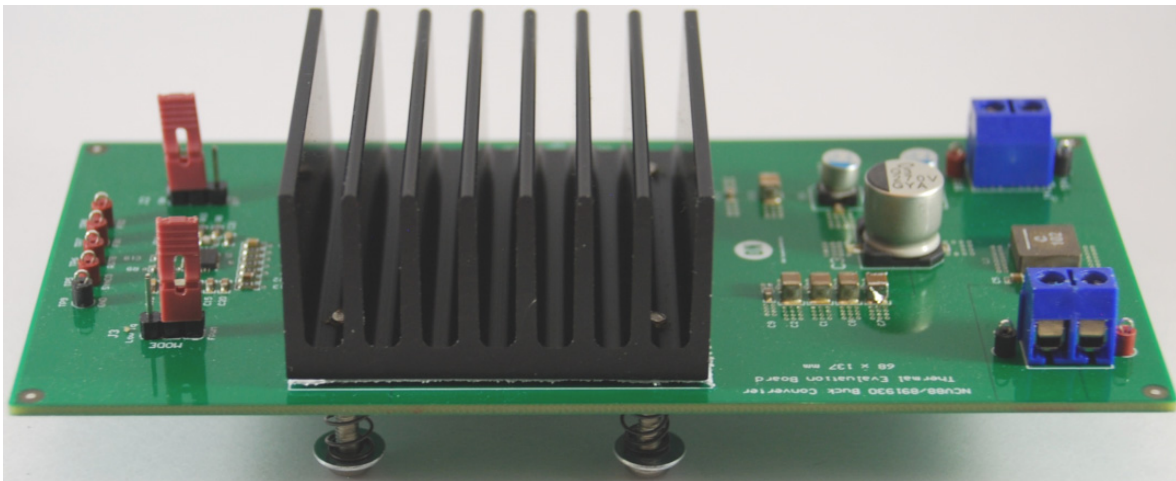


Figure 12. Setup #2 – Heat Sink on the Top Side

MOSFETの上部に熱電対を置くと、ヒートシンクの取り付け面にでこぼこができます。そのため、Figure 13に示すように、HS MOSFETとLS MOSFETの間に熱電対を取り付けています。

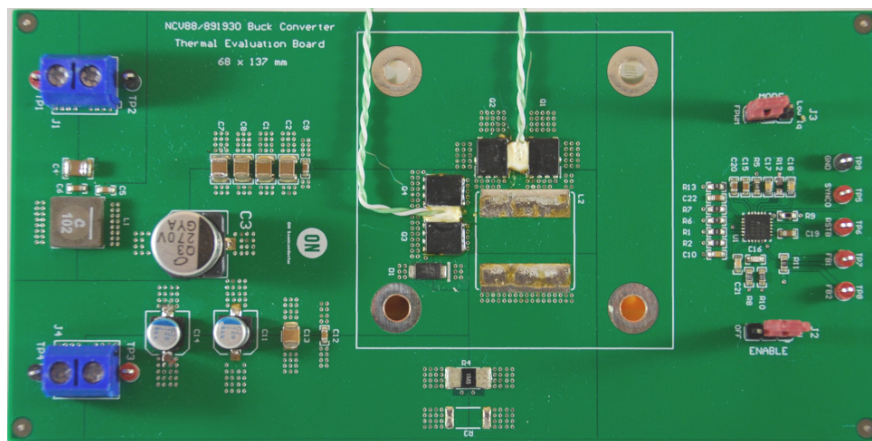


Figure 13. Placement of the Thermocouples

Table 9. SETUP #2 – 10 mm HEAT SINK ON THE TOP SIDE

Setup #2 – 10 mm Heat Sink on the Top-side – $V_{in} = 12\text{ V}$, $V_{out} = 5\text{ V}$		
Output Current	Low-side MOSFET Temperature	High-side MOSFET Temperature
5.0 A	37.0°C	37.5°C
10.0 A	45.9°C	46.0°C
15.0 A	58.0°C	58.1°C
20.0 A	75.1°C	75.2°C

Table 10. SETUP #2 – 25 mm HEAT SINK ON THE TOP SIDE

Setup #2 – 25 mm Heat Sink on the Top-side – $V_{in} = 12\text{ V}$, $V_{out} = 5\text{ V}$		
Output Current	Low-side MOSFET Temperature	High-side MOSFET Temperature
5.0 A	34.3°C	35.2°C
10.0 A	40.0°C	40.8°C
15.0 A	49.5°C	50.9°C
20.0 A	61.0°C	63.6°C

Table 11. SETUP #2 – 60 mm HEAT SINK ON THE TOP SIDE

Setup #2 – 60 mm Heat Sink on the Top-side – $V_{in} = 12\text{ V}$, $V_{out} = 5\text{ V}$		
Output Current	Low-side MOSFET Temperature	High-side MOSFET Temperature
5.0 A	34.1°C	34.7°C
10.0 A	39.1°C	40.2°C
15.0 A	45.7°C	47.4°C
20.0 A	53.8°C	57.1°C

10 mmヒートシンクを使用した場合、HS MOSFETとLS MOSFETの間に大きな温度差はありません。しかし、25 mmや60 mmのヒートシンクを使用する場合は、HS MOSFETとLS MOSFETの間に小さいながら注目すべき温度差を観測できます。この温度差はヒートシンクの高さに応じて大きくなります。この作用は、小形ヒートシンクは体積が小さく、熱抵抗が高いことを示します。これが原因でヒートシンクの熱飽和が生じ、より損失が大きいHS MOSFETで温度が上昇し、熱伝導性に優れたPCBを通じてLS MOSFETを加熱することになります。ヒートシンクがない前のセクションの例でも、このことを観測できました (Table 8)。

ヒートシンクの高さを大きくし、熱抵抗を小さくすると、ヒートシンクの熱伝導性が改善されるため、MOSFETが他のMOSFETに及ぼす影響が小さくなります。熱は最も抵抗が低い経路、つまりヒートシンクに流れ、そこで周囲に放散されます。小形ヒートシンクを使用しない場合、熱は主にPCBを通じて分散され、MOSFETごとに消費電力が異なるにもかかわらず、すべてのMOSFETで同様の温度になります。

Figure 14とFigure 15に、ヒートシンクの大きな効果を示します。特に、負荷電流が大きいほどそれが顕著です。負荷電流が20.0 AのLS MOSFETの場合、60 mmヒートシンク付きをヒートシンクなしの測定値と比べると、温度は約30°C低くなります。HS MOSFETでは、60 mmヒートシンク付きをヒートシンクなしの測定値と比べると、温度は約32°C低くなります。

5.0 Aのように負荷電流が小さい場合、4つのセットアップ間での温度差は比較的小さく最大で6°Cです。この程度では、ヒートシンクに余分なコストをかけるかどうか疑問です。

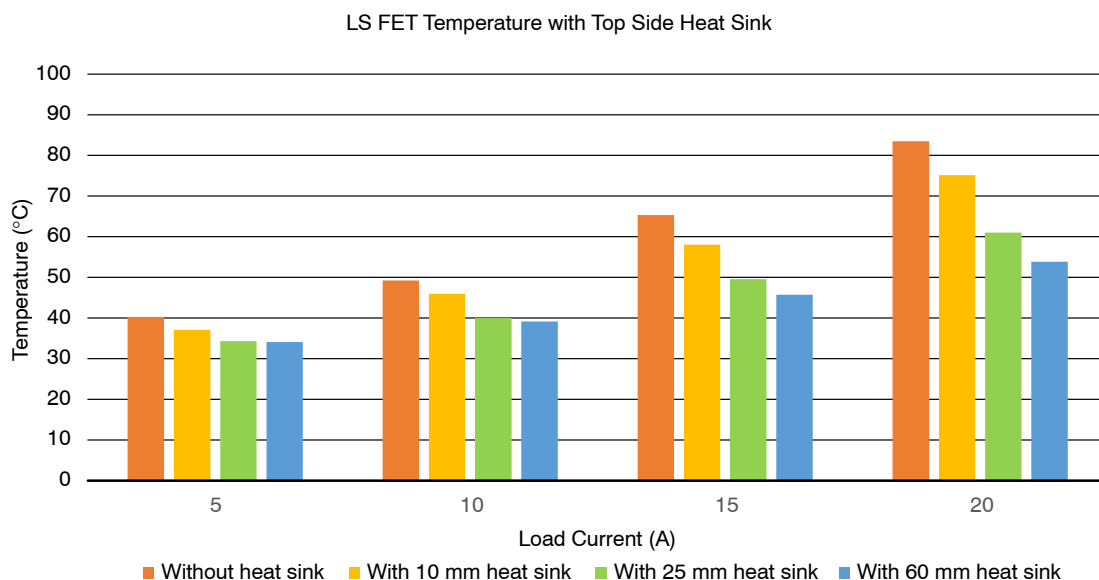


Figure 14. Setup #2 – LS MOSFET Temperature with Top-Side Heat Sink

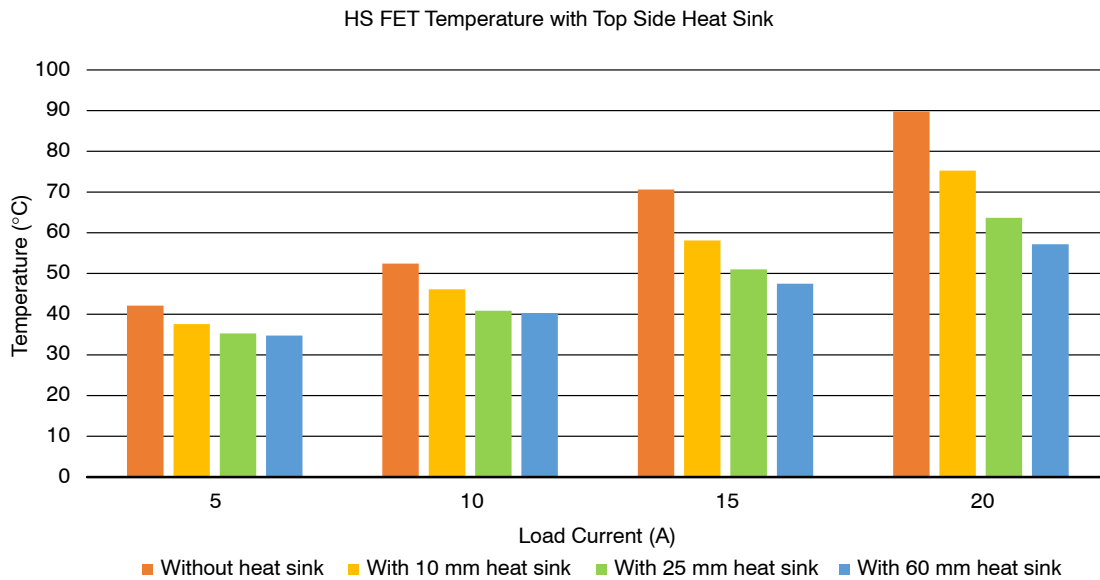


Figure 15. Setup #2 – HS MOSFET Temperature with Top-Side Heat Sink

Figure 16とFigure 17に、さまざまな負荷電流で各種ヒートシンクを使用した場合の、HS MOSFETとLS MOSFETの温度変化を示します。60 mmヒートシンク使用時には10 mmヒートシンク使用時に比べて、大きな温度低下がみられます。負荷電流が20.0 Aのとき、LS MOSFETの温度は約22°C低くなり、25 mmヒートシンク使用時には10 mmヒートシンク使用時に比べて、LS MOSFETの温度は約14°C低いことがわかります。負荷電流がこれより小さい場合も同様のパターンになりますが、ヒートシンクの効果はそれほど大きくありません。

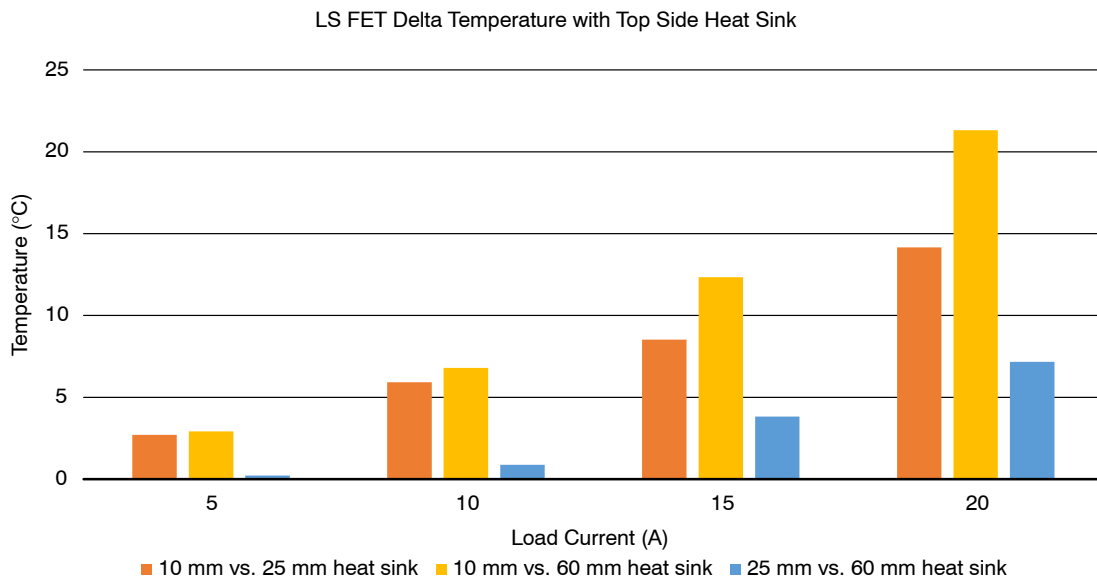


Figure 16. Setup #2 – LS MOSFET Delta Temperature with Top-Side Heat Sink

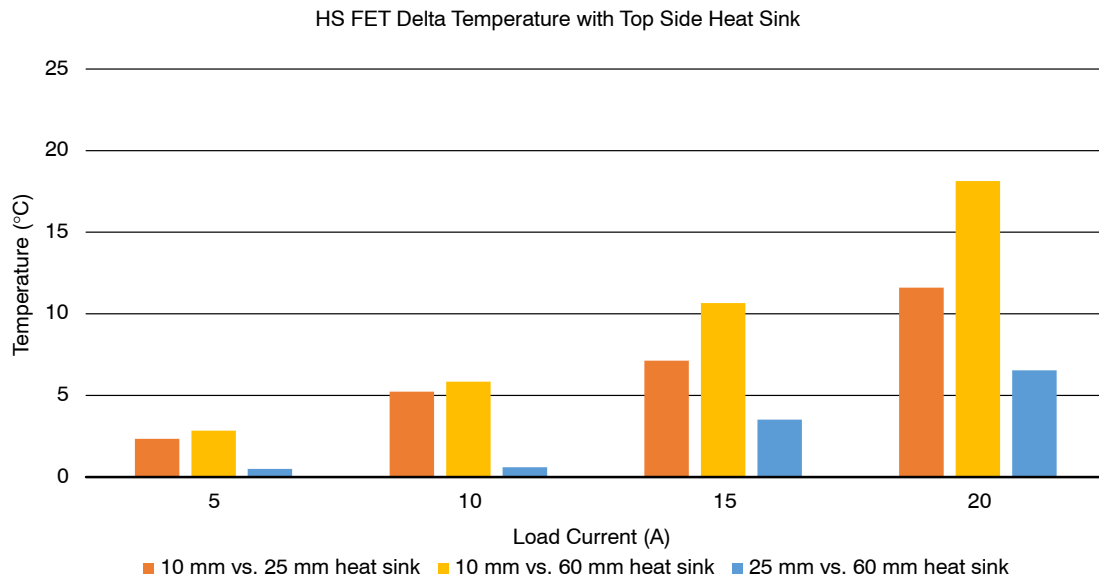


Figure 17. Setup #2 – HS MOSFET Delta Temperature with Top-Side Heat Sink

同じ測定で、各種ヒートシンクと負荷電流の違いによるHS MOSFETの温度変化を示します。ここでも同様の結果を観測できます。すなわち、負荷電流が20.0 Aのとき、60 mmヒートシンク使用時には10 mmヒートシンク使用時に比べて、HS MOSFETの温度は約18°C低くなります。25 mmヒートシンク使用時には10 mmヒートシンク使用時に比べて、HS MOSFETの温度は約12°C低くなります。

セットアップ#3：ヒートシンクを底面に取り付け

ヒートシンクを底面に取り付けるには、インダクタをPCBの上面に半田付けする必要があります。Figure 19に示すように、熱電対を熱接着剤でHS MOSFETとLS MOSFETの上面に接着します。上面に取り付けたセットアップで使用したのと同じスプリングとネジを使用して、ヒートシンクを底面に取り付けます。この構成では、熱界面を最適化するために、ヒートシンクとボードの間にギャップパッドを置きます。前のセクションと同様、3種類のヒートシンクを使用して放熱性能を解析します。

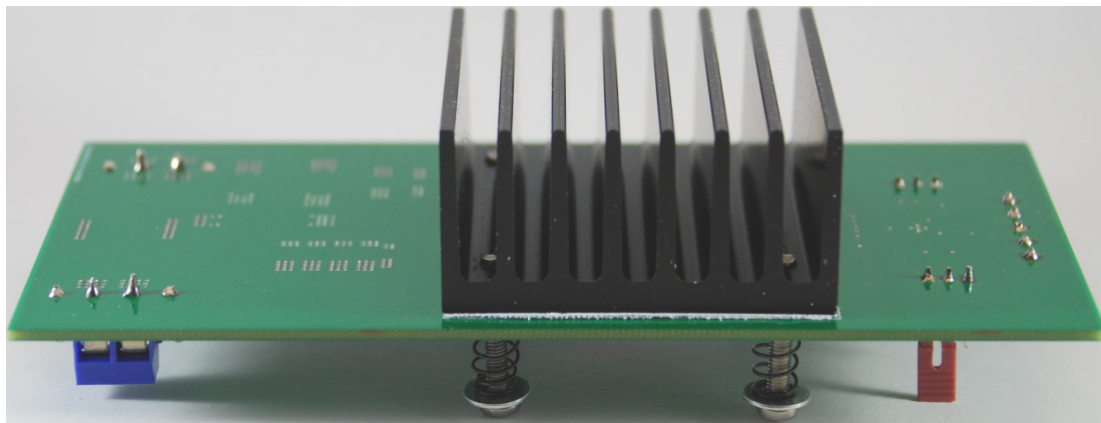


Figure 18. Setup #3 – Heat Sink on the Bottom Side

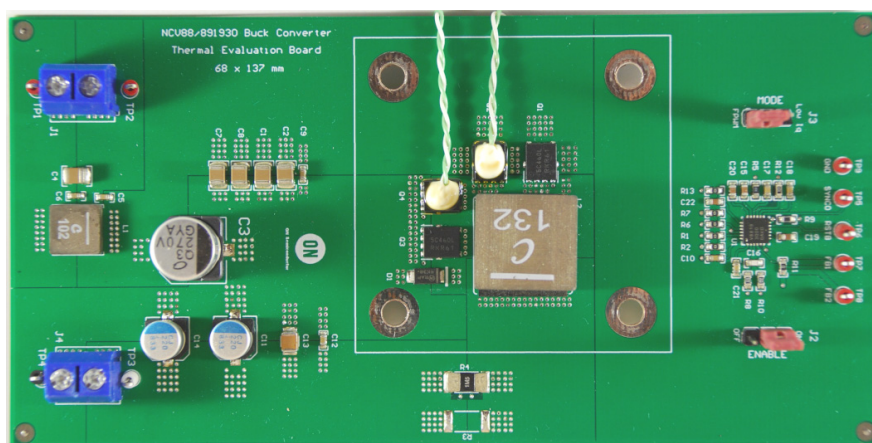


Figure 19. Placement of the Thermocouples

Table 12. SETUP #3 – 10 mm HEAT SINK ON THE BOTTOM SIDE

Setup #3 – 10 mm Heat Sink on the Bottom-side – $V_{in} = 12\text{ V}$, $V_{out} = 5\text{ V}$		
Output Current	Low-side MOSFET Temperature	High-side MOSFET Temperature
5.0 A	37.3°C	38.7°C
10.0 A	43.9°C	47.2°C
15.0 A	53.9°C	59.2°C
20.0 A	70.6°C	77.7°C

Table 13. SETUP #3 – 25 mm HEAT SINK ON THE BOTTOM SIDE

Setup #3 – 25 mm Heat Sink on the Bottom-side – $V_{in} = 12\text{ V}$, $V_{out} = 5\text{ V}$		
Output Current	Low-side MOSFET Temperature	High-side MOSFET Temperature
5.0 A	35.4°C	36.1°C
10.0 A	39.9°C	41.6°C
15.0 A	47.2°C	50.0°C
20.0 A	60.2°C	64.3°C

Table 14. SETUP #3 – 60 mm HEAT SINK ON THE BOTTOM SIDE

Setup #3 – 60 mm Heat Sink on the Bottom-side – $V_{in} = 12\text{ V}$, $V_{out} = 5\text{ V}$		
Output Current	Low-side MOSFET Temperature	High-side MOSFET Temperature
5.0 A	34.5°C	34.9°C
10.0 A	39.2°C	40.6°C
15.0 A	45.5°C	48.0°C
20.0 A	54.8°C	58.6°C

3種類のうちのどのヒートシンクを使用する場合でも、特定の負荷電流においてHS MOSFETの温度がLS MOSFETより高くなるパターンがあります。以前の測定でも、ヒートシンクなしの場合とPCBの上面にヒートシンクを取り付けた場合で、同様のパターンを確認できました。

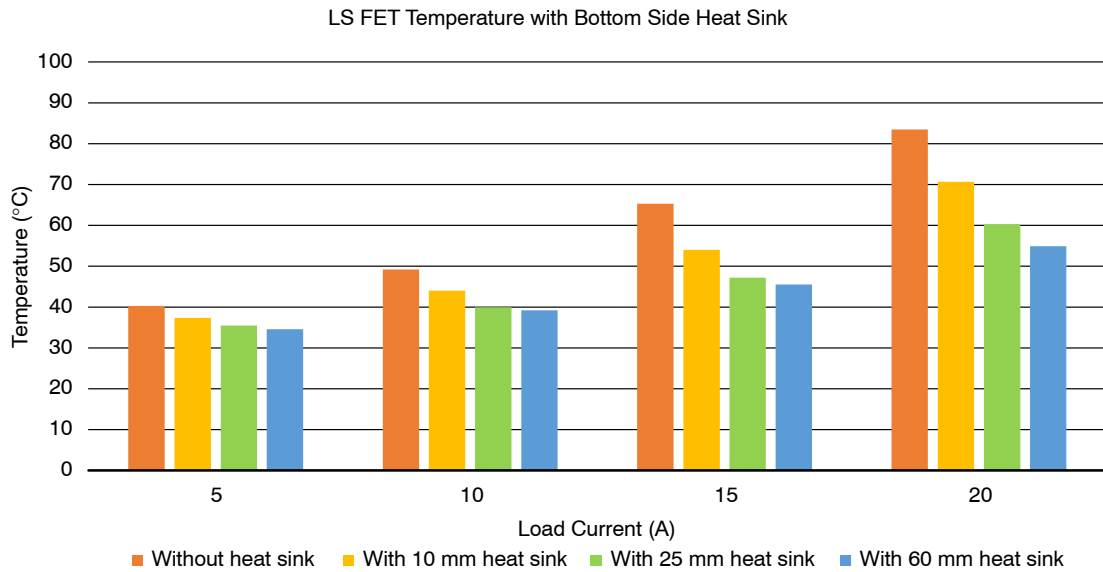


Figure 20. Setup #3 – LS MOSFET Temperature with Bottom-Side Heat Sink

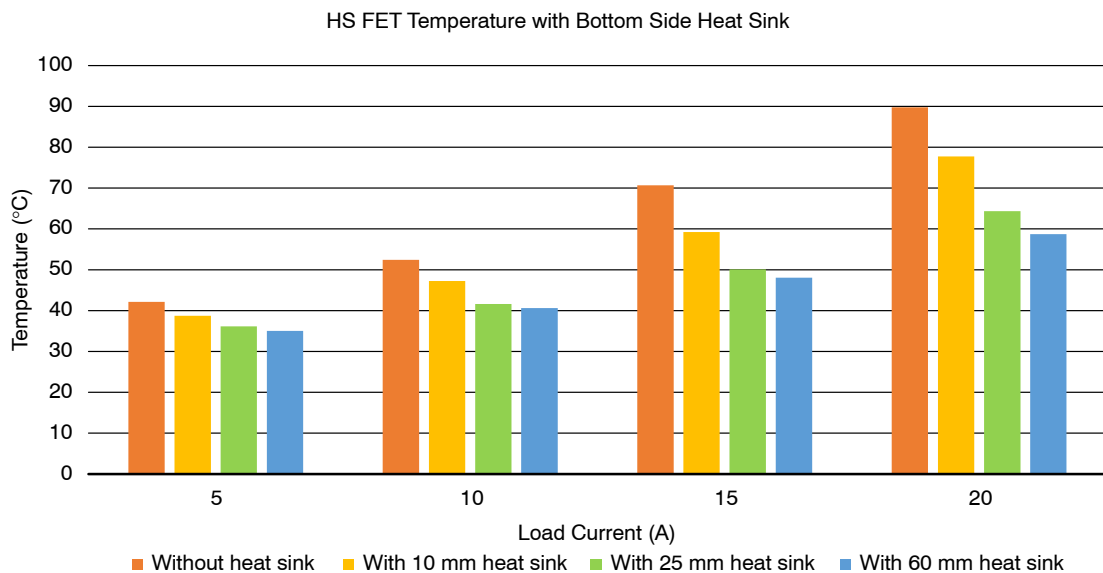


Figure 21. Setup #3 – HS MOSFET Temperature with Bottom-Side Heat Sink

Figure 20とFigure 21に、ヒートシンクなしの構成に比べて、各種ヒートシンクを使用した場合のLS MOSFETとHS MOSFETでの放熱の改善を示します。負荷電流が20.0 Aのとき、LS MOSFETの温度は、60 mmヒートシンク使用時にはヒートシンクなしの場合に比べて、約29°C低くなります。HS MOSFETの温度は、60 mmヒートシンク使用時にはヒートシンクなしの場合よりも約31°C低くなります。

前のセットアップと同様に、負荷電流が小さいときの温度差は比較的小さなものです。

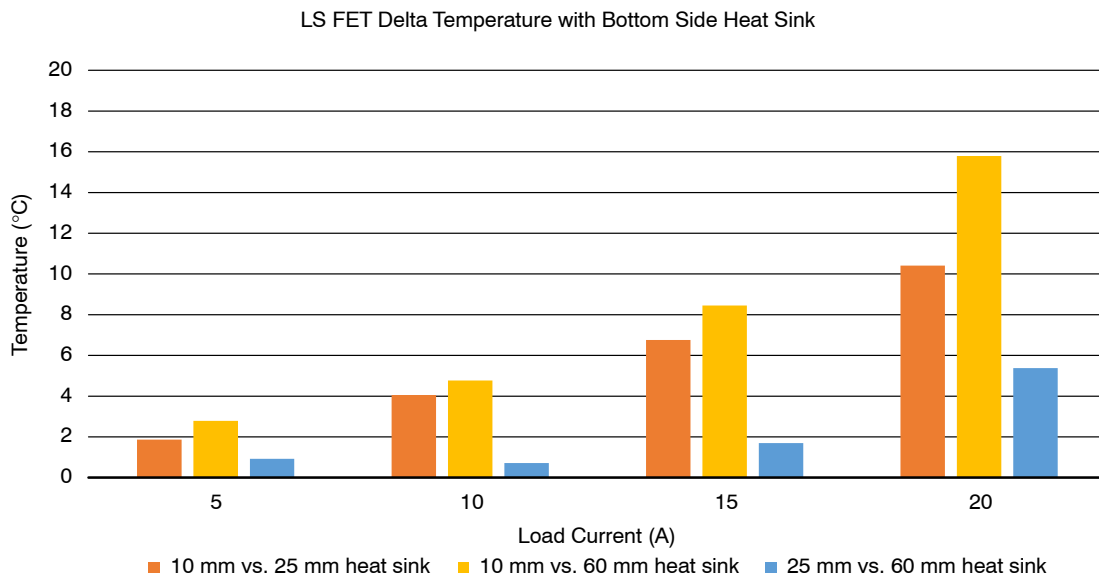


Figure 22. Setup #3 – LS MOSFET Delta Temperature with Bottom–Side Heat Sink

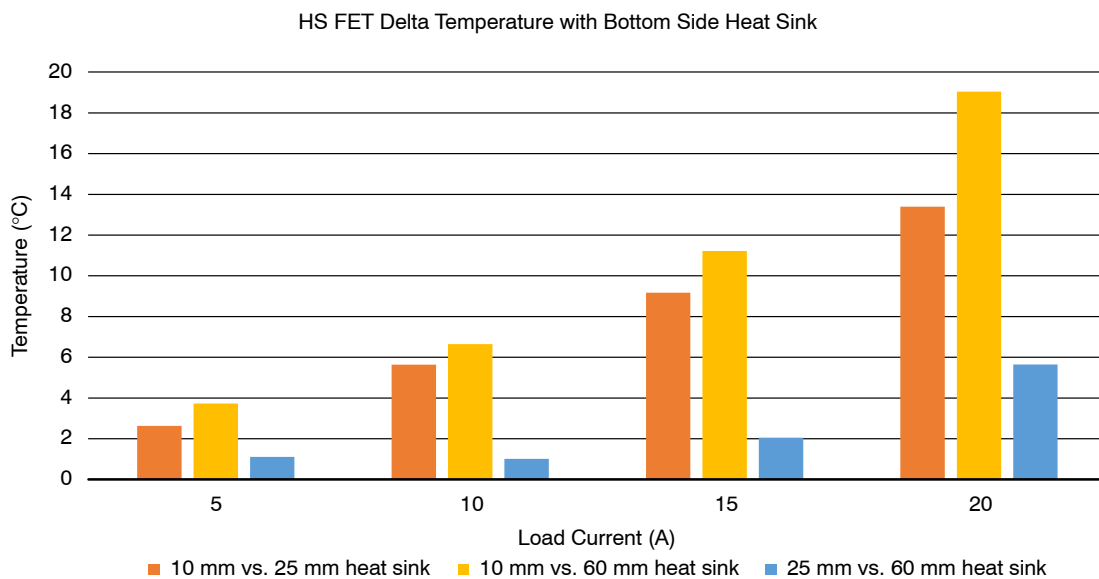


Figure 23. Setup #3 – HS MOSFET Delta Temperature with Bottom–Side Heat Sink

Figure 22とFigure 23に、異なるヒートシンクを底面に取り付けた場合の、HS MOSFETとLS MOSFETにおける温度変化を示します。ヒートシンクを上面に取り付けた前回の構成と同様、60 mmヒートシンク使用時は10 mmヒートシンク使用時に比べて、HS MOSFETの温度は約19°Cと大幅に低下します。LS MOSFETについても同様のパターンを観測できます。ただし、25 mmヒートシンク使用時と60 mmヒートシンク使用時の温度差は、10 mmヒートシンク使用時と25 mmヒートシンク使用時の温度差ほど大きくはありません。また、負荷電流が小さい場合より、大きい場合のほうがこの違いが重要になります。

ヒートシンクありとヒートシンクなしの比較

Figure 24とFigure 25に、ヒートシンクなしの場合とヒートシンクを上面に取り付けた場合のMOSFETの温度差を示します。負荷電流が大きいほど、ヒートシンクなしのLS MOSFETは、ヒートシンクを上面に取り付けた場合よりも温度が上昇します。負荷電流が20.0 Aのとき、60 mmヒートシンク使用時のLS MOSFETの温度はヒートシンクなしに比べると約30°C低くなります。同様に、25 mmヒートシンク使用時のLS MOSFETの温度はヒートシンクなしよりも、約22°C低くなります。

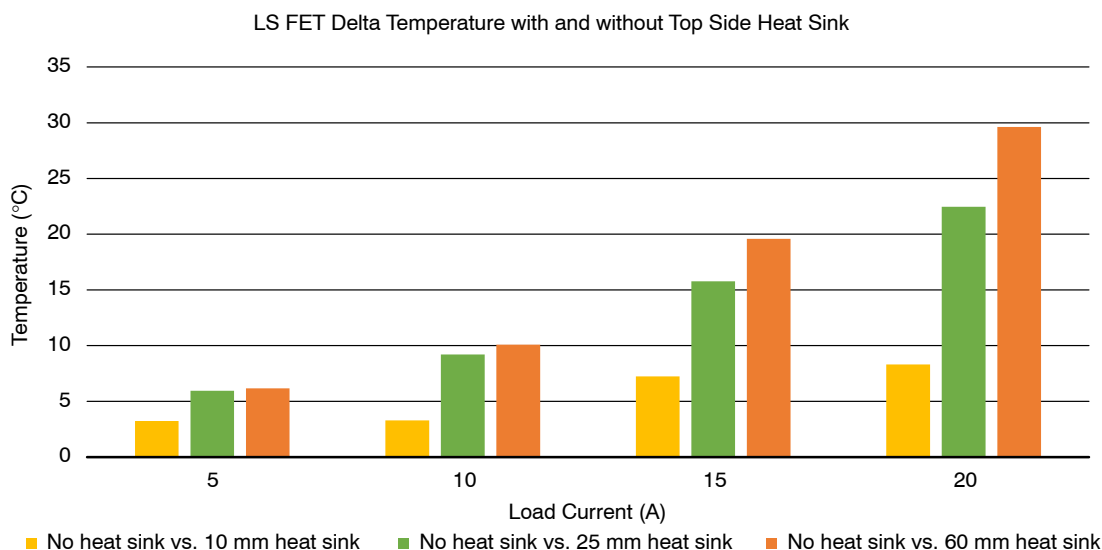


Figure 24. LS MOSFET Delta Temperature without and with a Top-Side Heat Sink

負荷電流が20.0 Aのとき、60 mmヒートシンク使用時のHS MOSFETの温度は、ヒートシンクなしに比べると、約33°C低くなります。同様に、25 mmヒートシンク使用時のMOSFETの温度は、ヒートシンクなしよりも約26°C低くなります。

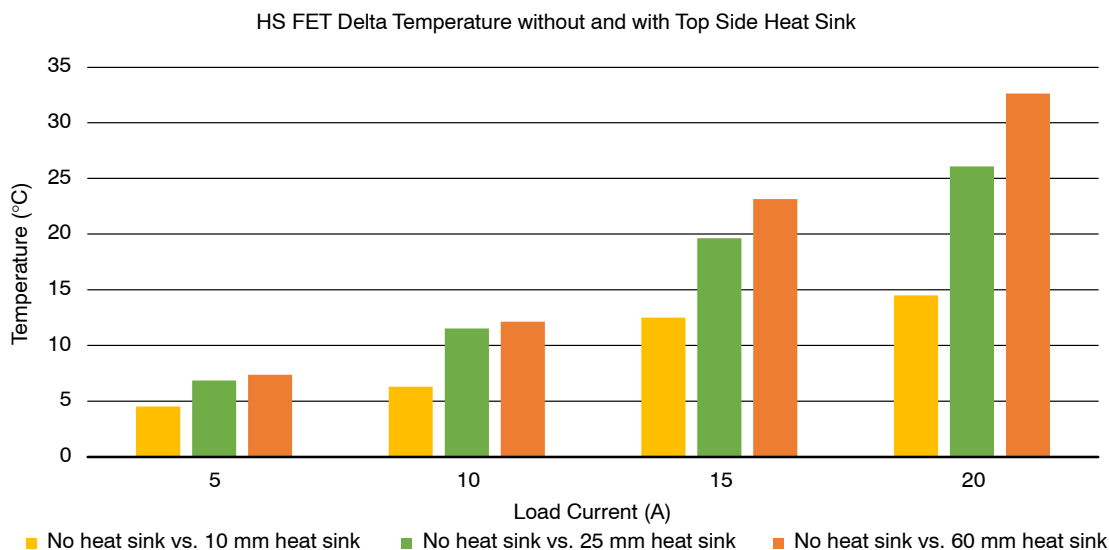


Figure 25. HS MOSFET Delta Temperature without and with a Top-Side Heat Sink

Figure 26とFigure 27に、ヒートシンクなしの場合とヒートシンクを底面に取り付けた場合のMOSFETの温度差を示します。負荷電流が大きいほど、ヒートシンクなしのLS MOSFETはヒートシンクを底面に取り付けた場合よりも温度が上昇します。負荷電流が20.0 Aのとき、60 mmヒートシンク使用時のLS MOSFETの温度は、ヒートシンクなしに比べると約29°C低くなります。同様に、25 mmヒートシンク使用時のLS MOSFETの温度は、ヒートシンクなしよりも約23°C低くなります。

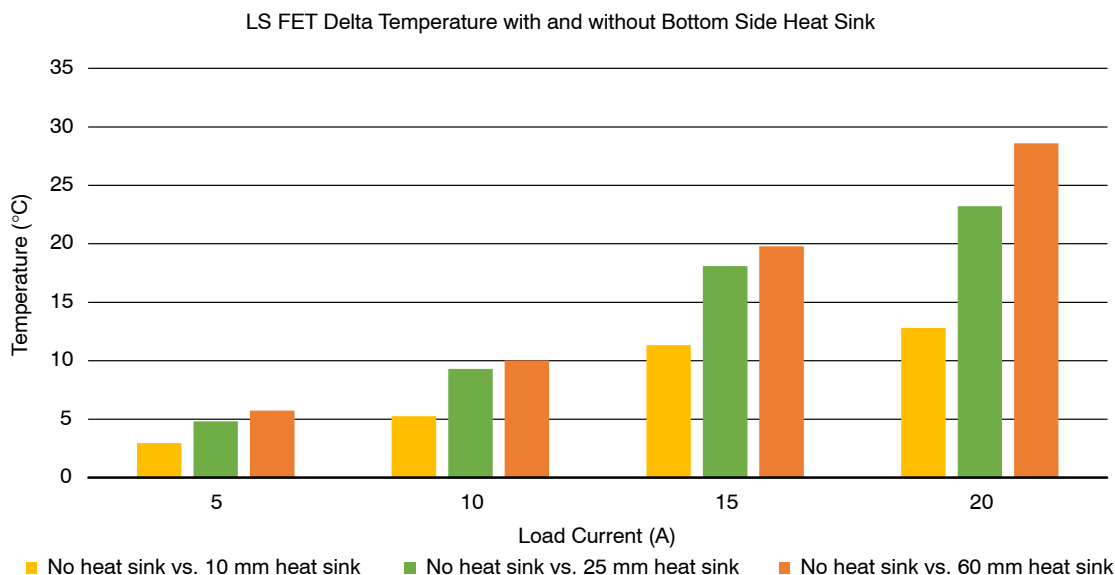


Figure 26. LS MOSFET Delta Temperature without and with a Bottom-Side Heat Sink

負荷電流が20.0 Aのとき、60 mmヒートシンク使用時のHS MOSFETの温度は、ヒートシンクなしに比べると約31°C低くなります。同様に、25 mmヒートシンク使用時のHS MOSFETの温度はヒートシンクなしよりも約25°C低くなります。

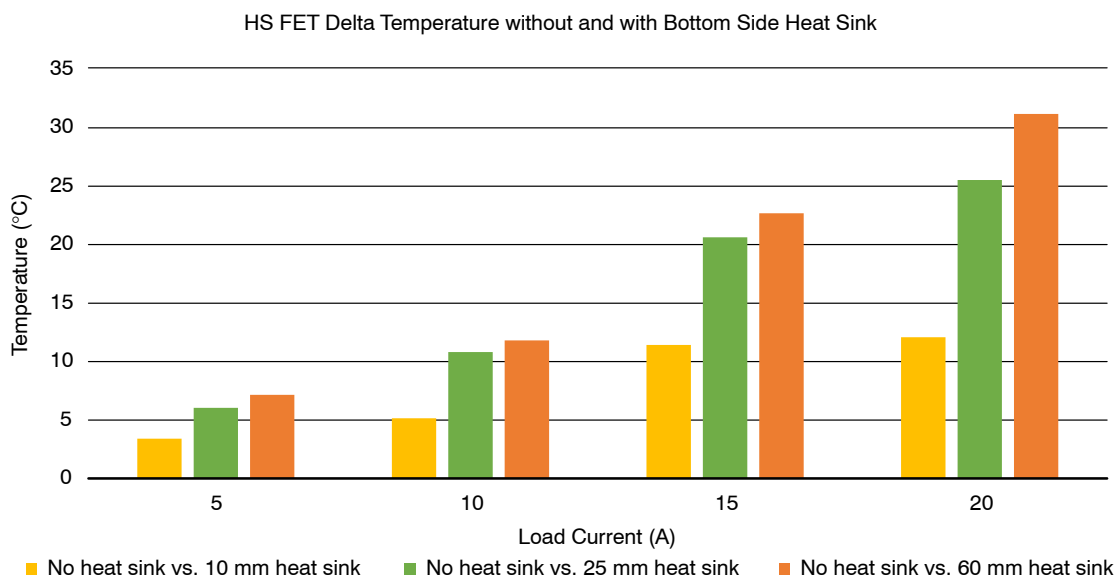


Figure 27. HS MOSFET Delta Temperature without and with a Bottom-Side Heat Sink

ギャップパッドの効果

ギャップパッドの厚さが放熱性能に与える効果を理解するために、60 mmヒートシンクと3 W/(m·K)および6 W/(m·K)のギャップパッドを使用し、20.0 Aの負荷電流を流して、以下の測定結果を記録しました。使用した2種類のギャップパッドは、このホワイトペーパーの冒頭にあるTable 2に掲載したKERAFOL 86/300 SOFTTHERMと86/600 SOFTTHERMです。

上面にヒートシンクを取り付けた場合、3 W/(m·K)のギャップパッドを熱抵抗が半分の6W/(m·K)のギャップパッドに切り替えると、LS MOSFETの温度は1.6%低下し、HS MOSFETの温度は3.5%低下したことを観測しました(Table 15)。

Table 15. GAP PADS WITH A TOP-SIDE HEAT SINK

60 mm Heat Sink on the Top-side - $V_{in} = 12\text{ V}$, $V_{out} = 5\text{ V}$, $I_{out} = 20\text{ A}$			
	3 W/(m·K)	6 W/(m·K)	Difference
Low-side MOSFET Temperature	53.8°C	52.9°C	-1.6%
High-side MOSFET Temperature	57.1°C	55.1°C	-3.5%

底面にヒートシンクを取り付けた場合、LS MOSFETで約7.6%、HS MOSFETで約6.6%の温度低下を測定しました(Table 16)。

Table 16. GAP PADS WITH A BOTTOM-SIDE HEAT SINK

60 mm Heat Sink on the Bottom-side - $V_{in} = 12\text{ V}$, $V_{out} = 5\text{ V}$, $I_{out} = 20\text{ A}$			
	3 W/(m·K)	6 W/(m·K)	Difference
Low-side MOSFET Temperature	54.8°C	50.6°C	-7.6%
High-side MOSFET Temperature	58.6°C	54.7°C	-6.6%

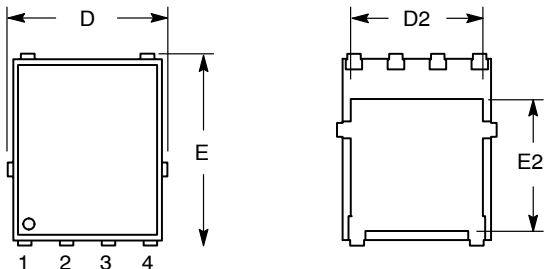
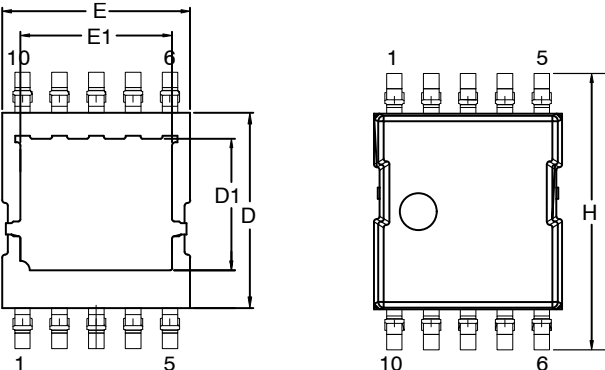
上面露出パッドと底面露出パッド

これまでに説明したように、今回のPCBは熱伝導性と放熱性能が最適化されており、MOSFETにとって非常に効果的なヒートシンクの役割を果たします。複数の熱源が存在するときなど、実際のアプリケーションでこのアプローチが望ましくないことも多々あります。その場合はPCBの放熱性能が制限されます。推奨冷却方法は、ECUのハウジングで熱を放散することであり、ハウジングはPCBに熱的に接続されます。「Top Cool」パッケージに収納されたMOSFETは、熱源(MOSFET)とヒートシンク(ハウジング)間で最小熱抵抗を達成し、PCBに向かう熱の流れを抑えながら、MOSFET上面の露出パッドとヒートシンクの間で直接的な熱接続を可能にします。

放熱性能を直接比較するために、ダイが同じでパッケージが異なるMOSFETが必要です。これまでの測定ではすべて「NVMFS5C460NL」を使用しています。しかし、このMOSFETには「Top Cool」パッケージのバリエーションはありません。したがって、以下の測定には、「[NVMFS5C450N](#)」(底面露出パッド付きSO-8FL)と「[NVMJST3D3N04C](#)」(上面露出パッド付き「Top Cool」パッケージ)を選択しました。

「NVMJST3D3N04C」は標準レベルのデバイスのみ入手可能ですが、「NVMFS5C460NL」はロジックレベルのデバイスです。この種のアプリケーションでは、標準レベルのデバイスがロジックレベルのデバイスよりも効率がわずかに低いことを予想できます。それでも、損失は小さくなく、放熱性能のみ異なるだけなので、「NVMFS5C450N」と「NVMJST3D3N04C」を比較することができます。

Table 17. PACKAGE OVERVIEW

<u>NVMFS5C450N</u>	<u>NVMJST3D3N04C</u>
40 V, 1.2 mΩ max. @ 10.0 V	40 V, 1.2 mΩ max. @ 10.0 V
SO-8FL (Case 488AA)	TCPAK57 (Case 760AG)
 <p style="text-align: center;">BOTTOM VIEW BOTTOM VIEW</p>	 <p style="text-align: center;">BOTTOM VIEW BOTTOM VIEW</p>
<p>Dimensions:</p> <ul style="list-style-type: none"> ● D: 5.15 mm (nom.) ● E: 6.15 mm (nom.) ● D2: 4.00 mm (nom.) ● E2: 3.65 mm (nom.) ● Plastic case surface area: approximately 31.7 mm² ● Exposed pad surface area: approximately 14.6 mm² 	<p>Dimensions:</p> <ul style="list-style-type: none"> ● D: 5.30 mm (nom.) ● E: 5.10 mm (nom.) ● D1: 3.57 mm (nom.) ● E1: 4.12 mm (nom.) ● H: 7.50 mm (nom.) ● Plastic case surface area: approximately 27.0 mm² ● Exposed pad surface area: approximately 14.7 mm²

31.7 mm²のSO-8FLに封止された「NVMFS5C450N」の上面にあるプラスチック領域の面積は、27.0 mm²のTCPAK57に封止された「NVMJST3D3N04C」の底面にあるプラスチック領域の面積よりわずかに大きくなっています。両デバイスの露出パッドのサイズはほぼ同じです。

以下の測定では、ヒートシンクの制限を回避し、発熱の違いを最適化して放熱性能を最大限に高めるために、高さ25 mmのヒートシンクを使用しました。

底面露出パッド付きMOSFET (NVMFS5C450N)の測定

Table 18とTable 19に、ヒートシンクありとヒートシンクなしの場合での、ハイサイドおよびローサイドMOSFET(「NVMFS5C450N」)の温度を示します。このヒートシンクは、MOSFETの上面(プラスチックハウジング)に取り付けられています。

Table 18. NVMFS5C450N – NO HEAT SINK

NVMFS5C450N – No Heat Sink – $V_{in} = 12\text{ V}$, $V_{out} = 5\text{ V}$		
Output Current	Low-side MOSFET Temperature	High-side MOSFET Temperature
5.0 A	46.3°C	50.2°C
10.0 A	65.9°C	69.6°C
15.0 A	86.3°C	88.4°C
20.0 A	109.4°C	109.6°C

Table 19. NVMFS5C450N – 25 mm HEAT SINK ON THE TOP SIDE

NVMFS5C450N – 25 mm Heat Sink on the Top Side – $V_{in} = 12\text{ V}$, $V_{out} = 5\text{ V}$		
Output Current	Low-side MOSFET Temperature	High-side MOSFET Temperature
5.0 A	40.0°C	41.9°C
10.0 A	47.9°C	50.8°C
15.0 A	58.7°C	62.0°C
20.0 A	69.5°C	73.0°C

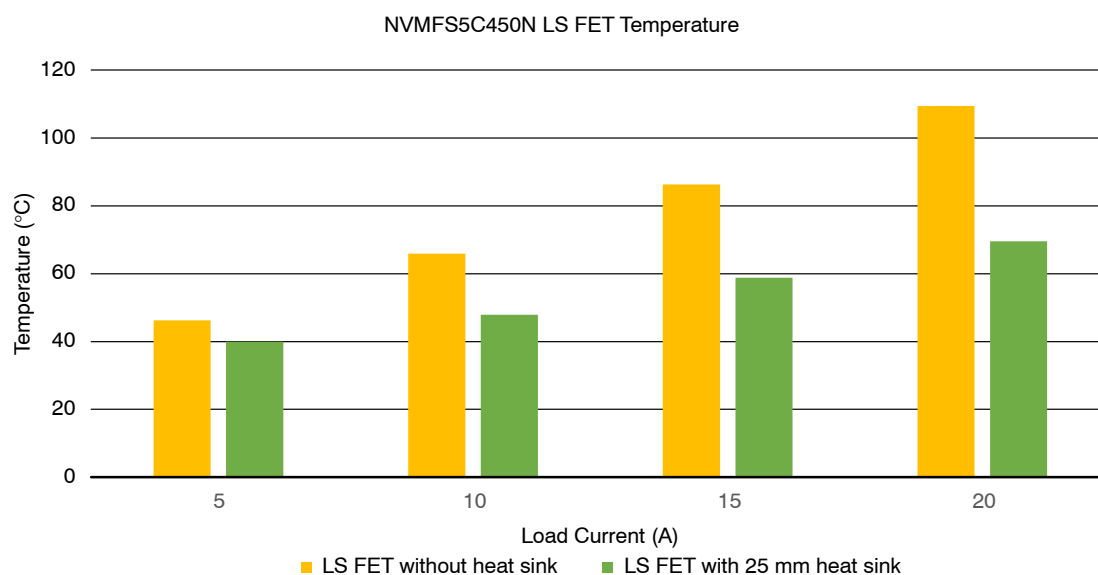


Figure 28. NVMFS5C450N – LS MOSFET Temperature with and without Heatsink

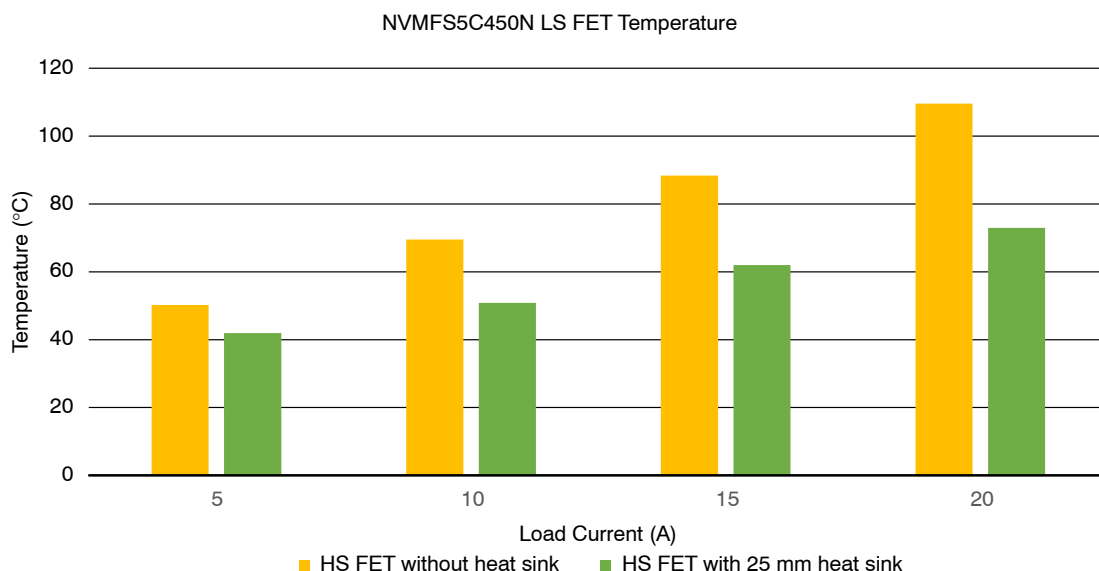


Figure 29. NVMFS5C450N – HS MOSFET Temperature with and without Heatsink

Figure 28とFigure 29に、MOSFETのプラスチック上面にヒートシンクを取り付けた場合のLS MOSFETとHS MOSFETにおける放熱の改善を示します。

負荷電流が5.0 Aのとき、LS MOSFETの温度はヒートシンクなしの場合に比べて約6°C低く、HS MOSFETの温度は約8°C低くなります。それに対して、負荷電流が20.0 Aのとき、LS MOSFETの温度はヒートシンクなしの場合に比べて約40°C低く、HS MOSFETの温度は約37°C低くなります。

両方の測定で、放熱性能は予想範囲内であり、ヒートシンクを取り付けると、MOSFETの温度が大幅に低下します。全般的に、「NVMFS5C460NL」を使用していたこれまでの測定より温度が高くなっています。原因は、ゲート電荷が大きいため「NVMFS5C450N」のスイッチング速度が低速になるためです。ただし、オン抵抗はわずかに低くなっています。

上面露出パッド付きMOSFET (NVMJST3D3N04C)の測定

Table 20とTable 21に、ヒートシンクありとヒートシンクなしの場合での、ハイサイドおよびローサイドMOSFET (「NVMJST3D3N04C」)の温度を示します。このヒートシンクはMOSFETの上面(露出パッド)に取り付けてあります。

Table 20. NVMJST3D3N04C – NO HEAT SINK

NVMJST3D3N04C – No Heat Sink – $V_{in} = 12\text{ V}$, $V_{out} = 5\text{ V}$		
Output Current	Low-side MOSFET Temperature	High-side MOSFET Temperature
5.0 A	45.2°C	47.1°C
10.0 A	60.5°C	61.0°C
15.0 A	82.7°C	78.4°C
20.0 A	113.1°C	103.7°C

Table 21. NVMJST3D3N04C – 25 mm HEAT SINK ON THE TOP SIDE

NVMJST3D3N04C – 25 mm Heat Sink on the Top Side – $V_{in} = 12\text{ V}$, $V_{out} = 5\text{ V}$		
Output Current	Low-side MOSFET Temperature	High-side MOSFET Temperature
5.0 A	37.6°C	37.1°C
10.0 A	49.7°C	48.3°C
15.0 A	61.3°C	57.0°C
20.0 A	73.5°C	66.9°C

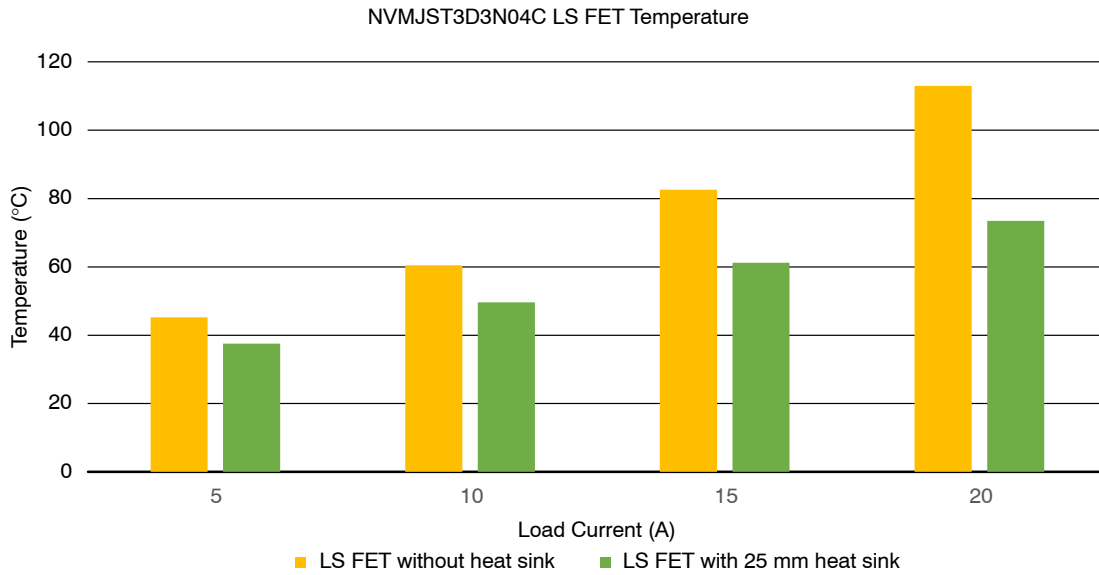


Figure 30. NVMJST3D3N04C – LS MOSFET Temperature with and without Heatsink

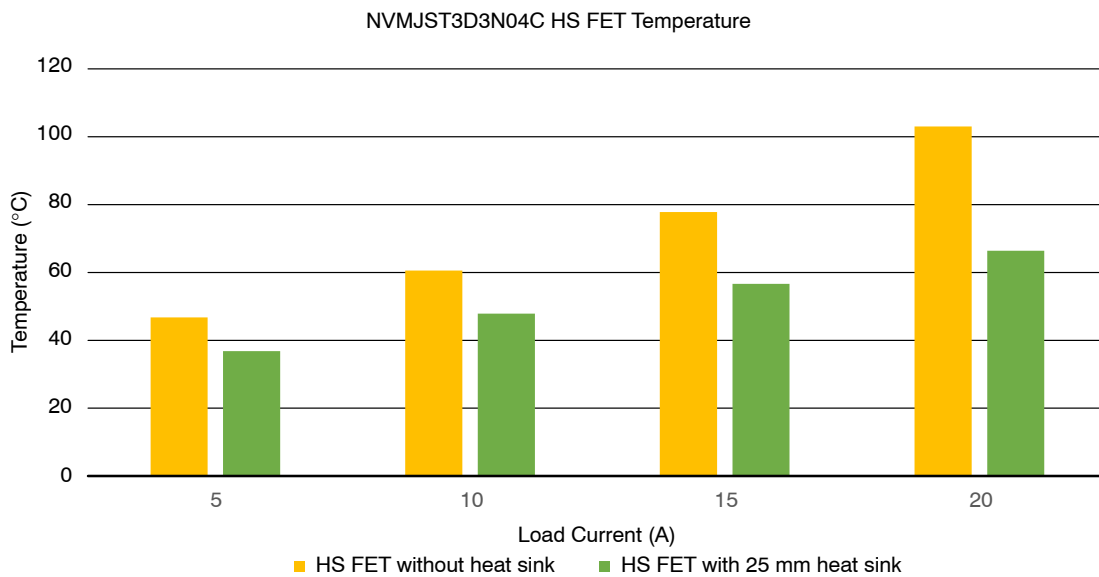


Figure 31. NVMJST3D3N04C – HS MOSFET Temperature with and without Heatsink

Figure 30とFigure 31は、MOSFET上面の露出パッドにヒートシンクを取り付けたときのLS MOSFETとHS MOSFETにおける放熱の改善を示しています。

負荷電流が5.0 Aのとき、LS MOSFETはヒートシンクなしの場合に比べて温度が約8°C低く、HS MOSFETは約10°C低くなります。それに対し、負荷電流が20.0 Aのとき、LS MOSFETはヒートシンクなしの場合よりも温度が約40°C低く、HS MOSFETは約37°C低くなります。

また、この測定では放熱性能は予想したとおりでした。「NVMJST3D3N04C」と「NVMFS5C450N」は同じダイを使用していますが、これらの製品はNVMFS5C460NLを使用したこれまでの測定よりも損失と発熱が大きくなっています。原因はゲート電荷が大きいため、スイッチング損失が大きくなるためです。

底面露出パッドと上面露出パッドの比較

Figure 32では、底面露出パッド(「NVMFS5C450N」)と、ヒートシンクを上面に取り付けた上面露出パッド(「NVMJST3D3N04C」)でのLS MOSFETの温度を比較しています。

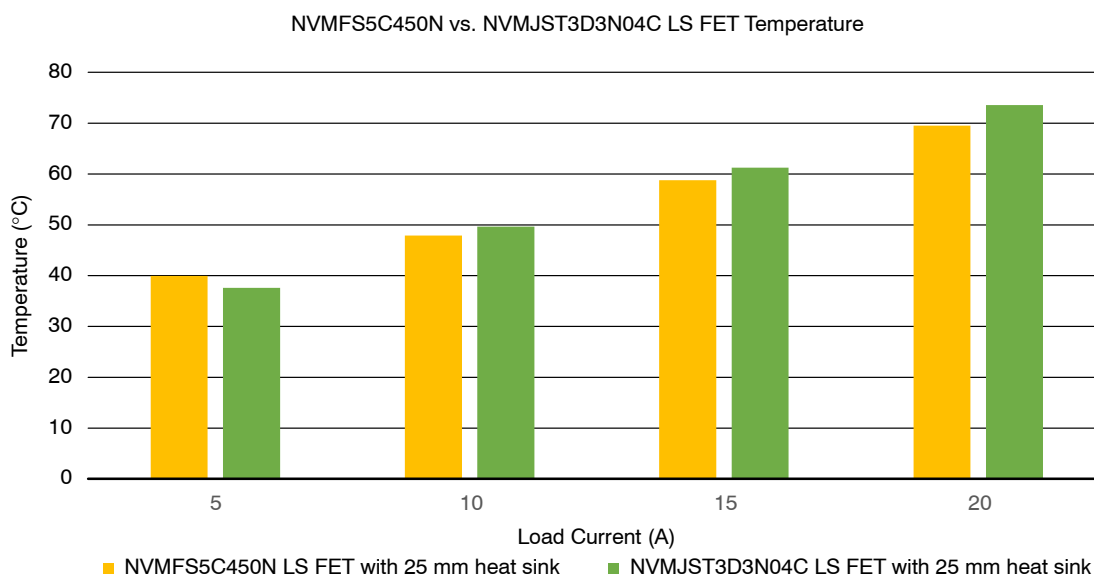


Figure 32. NVMFS5C450N vs. NVMJST3D3N04C – LS MOSFET Temperature with Heat Sink

Figure 33では、底面露出パッド(「NVMFS5C450N」)と、ヒートシンクを上面に取り付けた上面露出パッド(「NVMJST3D3N04C」)でのHS MOSFETの温度を比較しています。

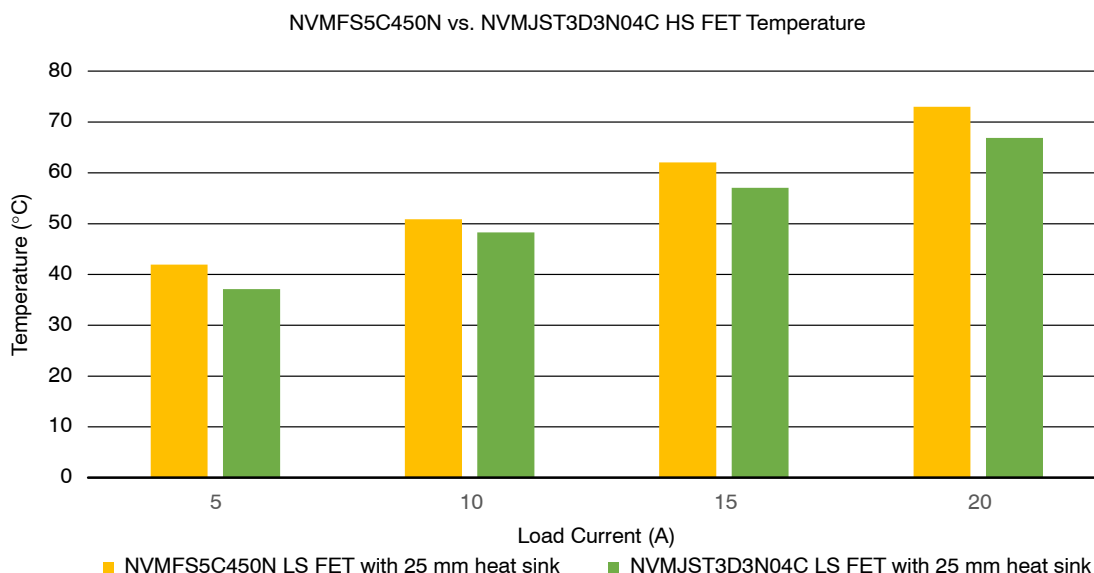


Figure 33. NVMFS5C450N vs. NVMJST3D3N04C – HS MOSFET Temperature with Heat Sink

全般的に、MOSFETが底面露出パッド付きかMOSFETパッケージの上部にヒートシンクを取り付けた上面露出パッドかに関係なく、このPCBとセットアップでは放熱性能はほとんど変わりません。LS MOSFETでは底面露出パッド付きパッケージのほうが上面露出パッド付きパッケージよりも放熱性能がわずかに優れています。HS MOSFETの場合は逆になります。

底面露出パッド付きMOSFETの場合、PCBに大量の熱が流れ込みます。今回のセットアップでは、PCBが効果的なヒートシンクとなるように最適化されています。MOSFET上面にあるプラスチック領域にヒートシンクを取り付けても、MOSFET温度の低下に役立ちません。

上面露出パッド付きMOSFETは、PCBとパッケージ底面にあるプラスチック領域との間の熱的結合がそれほど良くありません。しかし、PCBに半田付けされたリード端子も、熱をPCBに流すのに役立ちます。MOSFET上面の露出パッドは、ヒートシンクに接続されており効率よく熱を分散します。

どちらの構成もMOSFETパッケージの底面と上面を經由して熱を放散します。底面露出パッケージの場合、MOSFETとPCBの間の熱抵抗はMOSFETとヒートシンクの間の熱抵抗に比べて低くなっています。上面露出パッケージの場合はこれが逆になります。MOSFETとヒートシンクの間の熱抵抗が低くなっています。これにより、大幅に異なる構成でも、同様の放熱性能を達成でき、両方のタイプのパッケージに対して、効果的な冷却コンセプトを実装できます。

まとめ

さまざまな測定と比較を通じて、電源素子に取り付けたヒートシンクがMOSFETの温度に与える効果を示しました。これらの結果に基づき、今回のセットアップについては、以下の説明が有効であると結論付けることができます。

- 熱伝導と放熱に対して熱的に最適化されたPCBと、底面露出パッド付きMOSFETを使用して、ヒートシンクをPCBの底面に取り付けるか、MOSFETの上面に取り付けた場合、MOSFETの温度差はわずか3°C未満です。
- MOSFETの温度はヒートシンクのサイズによって異なります。
 - ◆ 負荷電流が20.0 Aのとき、60 mmヒートシンク使用時のMOSFETの温度は、ヒートシンクなしの構成に比べて約30°C低くなります。
 - ◆ 25 mmヒートシンク使用時のMOSFETの温度は、ヒートシンクなしのセットアップに比べて約15~20°C低くなります。
 - ◆ 10 mmヒートシンク使用時のMOSFETの温度は、ヒートシンクなしのセットアップに比べて温度低下は10°C未満です。
 - ◆ この変化は3種類のヒートシンクの熱抵抗にかなり比例しています。これらの結果は、放熱性能が最適化されたPCBレイアウトを使用する場合、温度を大幅に低下させるには、ヒートシンクにある程度の体積と熱伝導性が必要なことも示しています。
- 負荷電流が20.0 Aのとき、25 mmヒートシンクと60 mmヒートシンク使用時のMOSFETの温度差は6°Cであり、この値は当初の予想より小さいものです。
- 負荷電流が15.0 A以下のとき、25 mmヒートシンク使用時と60 mmヒートシンク使用時におけるMOSFETの温度差は比較的小さく、約2°Cです。負荷電流が15.0 A以上のとき、温度差は最大約6°Cまで広がります。
これらの結果は、コストと放熱改善との間で最適なバランスを図るには、ヒートシンクを適切に選定する必要があることを示しています。
- 上面露出パッド付きMOSFETとヒートシンクを組み合わせた場合は、底面露出パッド付きMOSFETを放熱性能が最適化されたPCBに取り付けて、パッケージ上面にヒートシンクを取り付けた場合と同様の放熱性能を実現できます。PCBに流れ込む熱を最小化する必要がある場合は、上面露出パッド付きMOSFETが適切な選択肢となります。その理由は、上面露出パッド付きMOSFETは、パッケージ上面に取り付けたヒートシンクに対する熱抵抗が最小になるからです。
- すべての測定値には一貫性があり、再現可能で、一般の理論的予測とも合致しています。この事実は、今回の電気的および機械的セットアップが正しく機能し、信頼できることを示しています。

もちろん、今回のテストのセットアップは実際アプリケーションとは大きく異なります。例えば、電源は通常、冷却フィン付きのカスタムアルミハウジング内部に設置されている複雑なECUの一部です。しかし、今回の測定結果は、ヒートシンクの熱抵抗やギャップパッドの厚さなど、さまざまなパラメータがMOSFETの温度に及ぼす影響を説明しています。また、熱源(今回の場合はMOSFET)の上面にヒートシンクを取り付ける場合と、PCBの裏面にヒートシンクを取り付ける場合(PCBレイアウトは、PCBのすべての層にサーマルビアと面積が広い銅領域が配置され、熱がPCBを通過して裏面に流れるように放熱性能が最適化されていることを想定)で、同様の性能を達成できることを明確に示しています。

PCBに流れ込む熱を最小化するには、上面露出パッドをヒートシンクに接続したMOSFETを使用する必要があります。

onsemi, Onsemi, and other names, marks, and brands are registered and/or common law trademarks of Semiconductor Components Industries, LLC dba "**onsemi**" or its affiliates and/or subsidiaries in the United States and/or other countries. **onsemi** owns the rights to a number of patents, trademarks, copyrights, trade secrets, and other intellectual property. A listing of **onsemi**'s product/patent coverage may be accessed at www.onsemi.com/site/pdf/Patent-Marking.pdf. **onsemi** reserves the right to make changes at any time to any products or information herein, without notice. The information herein is provided "as-is" and **onsemi** makes no warranty, representation or guarantee regarding the accuracy of the information, product features, availability, functionality, or suitability of its products for any particular purpose, nor does **onsemi** assume any liability arising out of the application or use of any product or circuit, and specifically disclaims any and all liability, including without limitation special, consequential or incidental damages. Buyer is responsible for its products and applications using **onsemi** products, including compliance with all laws, regulations and safety requirements or standards, regardless of any support or applications information provided by **onsemi**. "Typical" parameters which may be provided in **onsemi** data sheets and/or specifications can and do vary in different applications and actual performance may vary over time. All operating parameters, including "Typicals" must be validated for each customer application by customer's technical experts. **onsemi** does not convey any license under any of its intellectual property rights nor the rights of others. **onsemi** products are not designed, intended, or authorized for use as a critical component in life support systems or any FDA Class 3 medical devices or medical devices with a same or similar classification in a foreign jurisdiction or any devices intended for implantation in the human body. Should Buyer purchase or use **onsemi** products for any such unintended or unauthorized application, Buyer shall indemnify and hold **onsemi** and its officers, employees, subsidiaries, affiliates, and distributors harmless against all claims, costs, damages, and expenses, and reasonable attorney fees arising out of, directly or indirectly, any claim of personal injury or death associated with such unintended or unauthorized use, even if such claim alleges that **onsemi** was negligent regarding the design or manufacture of the part. **onsemi** is an Equal Opportunity/Affirmative Action Employer. This literature is subject to all applicable copyright laws and is not for resale in any manner.

ADDITIONAL INFORMATION

TECHNICAL PUBLICATIONS:

Technical Library: www.onsemi.com/design/resources/technical-documentation
onsemi Website: www.onsemi.com

ONLINE SUPPORT: www.onsemi.com/support

For additional information, please contact your local Sales Representative at www.onsemi.com/support/sales