

パワーMOSFET の熱設計ガイドラインの策定

この記事では、筐体内での MOSFET の熱挙動をシミュレーションし、ファンやグリルや放熱器などの冷却機構と組み合わせて、MOSFET の配置に関するシステム設計を改善するためのガイドラインを作成しています。電子機器の熱管理における設計の際、ご参考になりますと幸いです。

MOSFET は電子機器のいたるところにあり、その性能は機器設計の熱特性に大きな影響を与えます。その影響を物理的に評価することは難しいですが、図 1 に示すように、ANSYS 社などのソフトウェア・ツールを使って、熱の流れをシミュレーションするための近似モデル化を行うことができます。

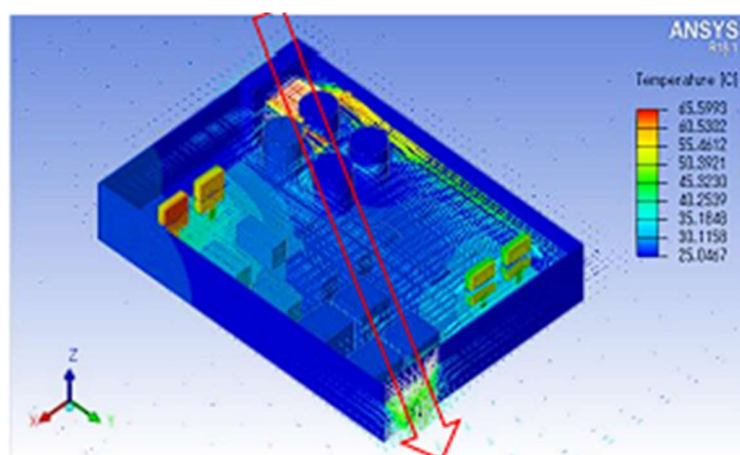


図 1. シミュレーションにより、MOSFET の配置と熱性能の関係を可視化できる

第 1 章: 熱シミュレーションの条件

時間とコストの制約から、起こりうるすべての熱条件を再現する評価ボードを開発することは困難です。しかし、十分に練られたシミュレーションにより、気流や冷却装置の追加に関する詳細な考察が可能となります。このようなモデルは適応性が高いため、さまざまな条件での考察が可能であり、評価ボード関連のコストもかかりません。

本稿では、密閉筐体内における MOSFET の熱挙動のシミュレーション・モデリングについて述べます。以下の影響について考察します。

- 筐体のタイプ
- PCB サイズ
- MOSFET の配置と間隔
- グリルサイズ
- 強制冷却と対流冷却
- MOSFET と筐体放熱器

シミュレーション結果と、それに基づいた設計上の推奨事項が示されます。

2 つの異なるシステム・モデルの概要

本稿では、異なる筐体寸法、PCB 寸法とその構造、および追加部品の有無に関する 2 つの異なる設計モデルを検証します。

2 つの筐体モデル

シミュレーションには 2 種類の筐体モデルが使用されます。

- モデル 1 筐体は 120 x 200 x 40 mm で、筐体の 6 面すべてが断熱材として構成されています。このモデルを図 2 に示します。
- モデル 2 筐体は 140 x 200 x 40 mm で、6 面すべてに 1 mm 厚のアルミ板を配し、筐体の温度解析を容易にするとともに、放熱器としても機能します。

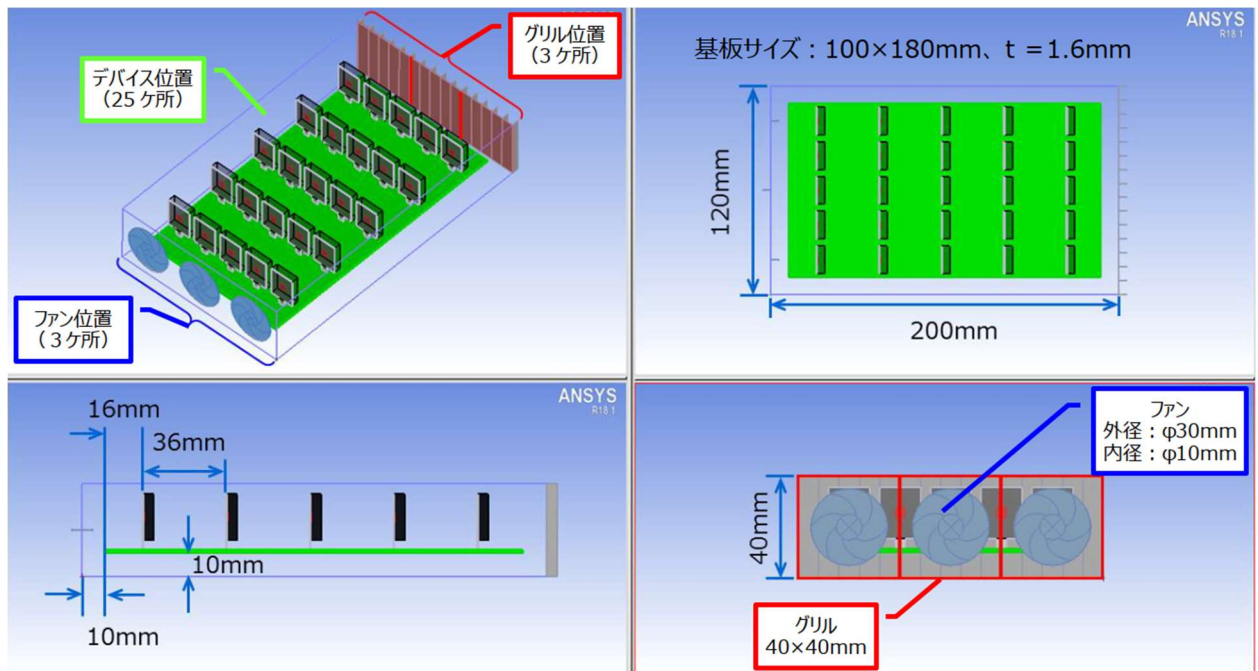


図2. モデル1の詳細寸法とデバイス位置

2つのPCBモデル

モデル1のPCBは100 x 180 x 1.6 mmで4層。上層、下層、内層のパターン厚はいずれも35 μm。

モデル2のPCBは125 x 175 x 1.6 mmで4層。このモデルの上層、下層、内層のパターン厚はそれぞれ70, 70, 35 μm。

すべてのPCB基板はFR4で作られており、パターンの銅の割合は80%に設定されています。基板表面には半田レジスト層がなく、シミュレーションの設定には、その層の影響を補正するための放射率のみが含まれています。また、基板にはスルーホールやサーマルビアはありません。

部品

MOSFETのモデルは、チップサイズ4 x 4 x 0.25 mm、リード厚0.6 mm、モールドサイズ16 x 20 x 4.4 mmのTO-247パッケージに基づいています。解析時間を最適化するため、MOSFETはモールド、チップ、リードの3構成でモデル化し、ボンディングワイヤーとチップマウント用半田は無視しています。そして最終的には直方体に近似させました。

モデル 2 には、IC デバイス、インダクター（コイルやトランスなど）、電解コンデンサーも含まれています。インダクターと IC デバイスは、発熱デバイスではなく、気流に対する抵抗としてモデル化されています。このモデルの代表的なレイアウトを図 3 に示します。

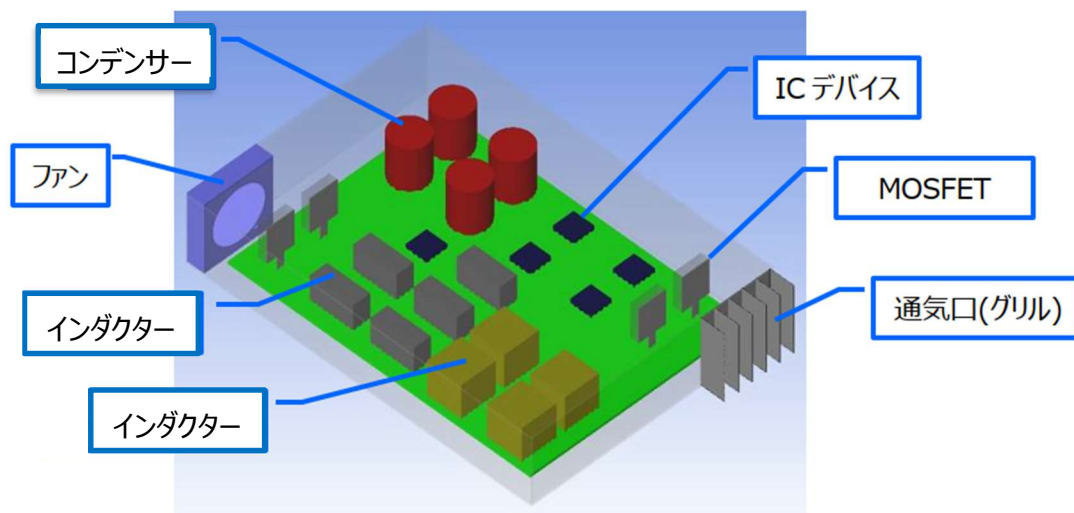


図 3. モデル 2 のコンポーネント配置例

ファンとグリル

シミュレーションには 40 x 40 mm のファンを使用し、さまざまな P-Q（静圧-風量）曲線を設定しています。

筐体壁面に取り付けられたグリルは、ファンを吸込みファンまたは吐出しファンとして使用することにより、吸気口または排気口として構成することができます。なお、グリルの開口率は 1.0（100%の流れの出入口）です。

第 2 章: MOSFET の配置評価

2-1: シングル MOSFET の配置評価

ここでのシミュレーションは最も単純なケースで、熱源として MOSFET 1 個（電力損失 2 W）を使用したモデル 1 を使用しています。筐体内のさまざまな位置に配置された 1 つの MOSFET の熱挙動を、さまざまなファンとグリルの配置とともに十分に理解することが、今後のシミュレーションの出発点となります。

図 4 は、MOSFET、グリル、ファンの位置のさまざまな組み合わせを示しています。



図 4. モデル 1 で使用される MOSFET、ファン、グリルの構成

A1、A2、A3、A4、および A5 にデバイスを配置した場合の、解析ソフトウェアを使用して得られた気流の解析結果を図 5 に示します。ここで、ファンは A の位置に、グリルは C の位置に配置されています。

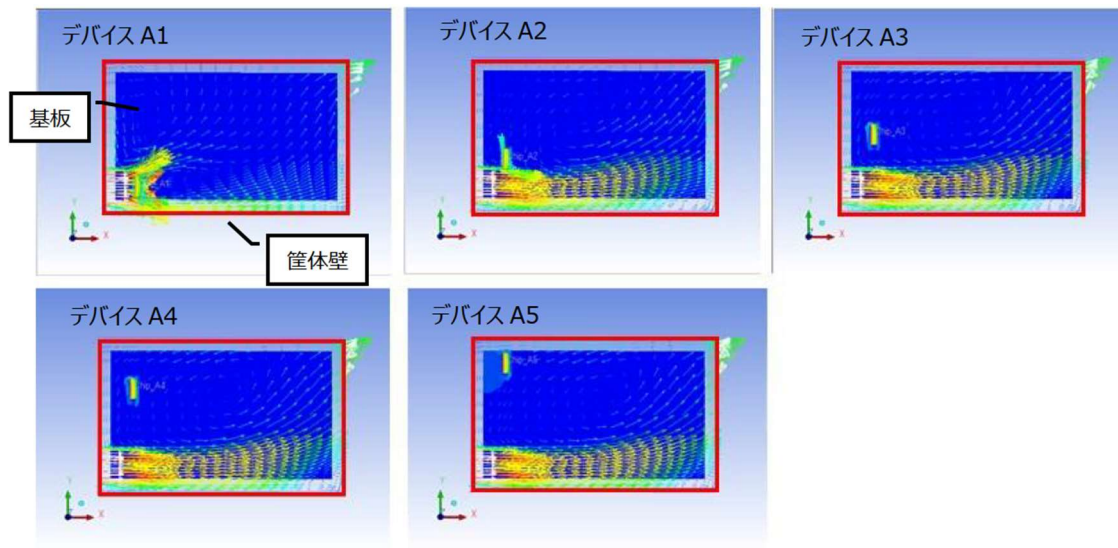


図 5. モデル 1 で使用した MOSFET、ファン、グリル構成での気流の解析結果

このシミュレーションと今後のすべてのシミュレーションにおける MOSFET の熱抵抗は、以下の式に従って計算されます。

$$\text{熱抵抗} = (\text{チップ温度シミュレーション平均値} - \text{周囲温度}) / \text{電力損失}$$

デバイス、グリル、ファンの配置のすべての可能な組み合わせでの結果によると、ファンからグリルに直接つながる経路に沿って MOSFET を配置することが最も効果的なアプローチであることが明らかになりました。

2-2: 25 個の MOSFET の配置評価

次に、モデル 1 の左下（ファン位置 A）にファンを、右上（グリル位置 C）にグリルをそれぞれ配置し、合計 25 個の MOSFET をモデル内に配置して同時に電源を投入します。

シングル MOSFET シミュレーションと同様に、MOSFET チップの平均温度を測定し、MOSFET の熱抵抗を計算します。このシミュレーションで重要な変数は、MOSFET の間隔です。

想定通り、図 6（間隔が狭い）と図 7（間隔が広い）の結果は、最良の熱制御を達成するためには間隔が重要であることを示しています。間隔が広いほど、吸込みファン（各画像の左側）と吐出しファン（各画像の右側）のどちらを使用しても、空気が MOSFET 間をよりスムーズに移動し、MOSFET の熱抵抗が減少しました。

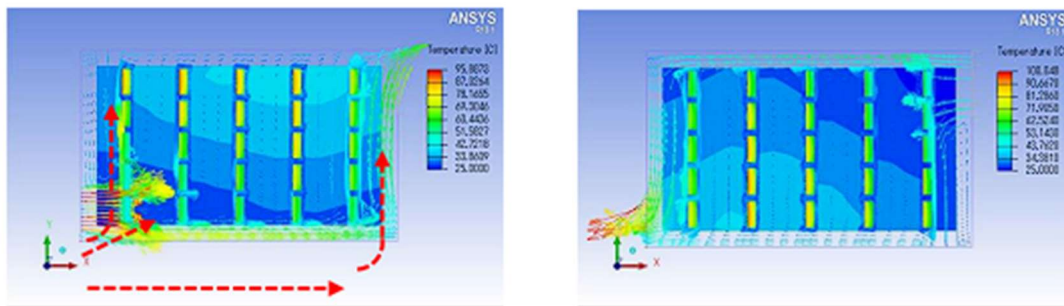


図 6. 25 個の MOSFET を密に配置し、ファンを吸込みモード（左）と吐出しモード（右）にした場合の温度と風量の分布

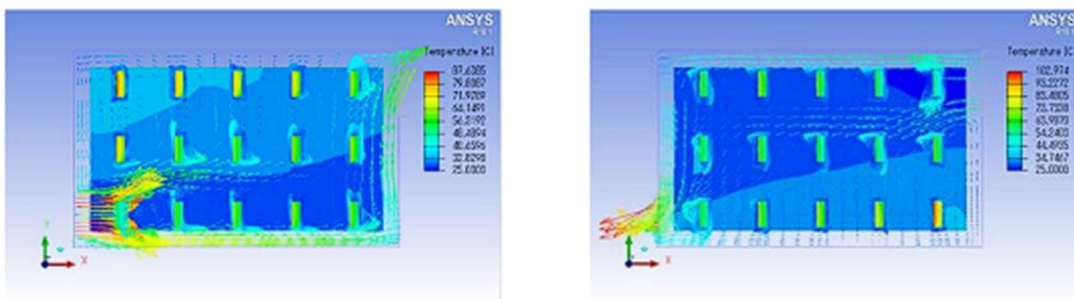


図 7. 25 個の MOSFET を広く配置し、ファンを吸込みモード（左）と吐出しモード（右）にした場合の温度と風量の分布

MOSFET の間隔が狭い場合も広い場合も、吸込みファンは吐出しファンほど性能が良くありません。

第 3 章: 実使用を想定した熱シミュレーション

3-1: より現実的なモデルによる熱シミュレーション

図 8 に示すように、より現実的な条件でシミュレーションを行います。IC、コイル、インダクター、その他の部品が追加されていることに注意してください。また、ファンとグリルの配置にも注目してください。

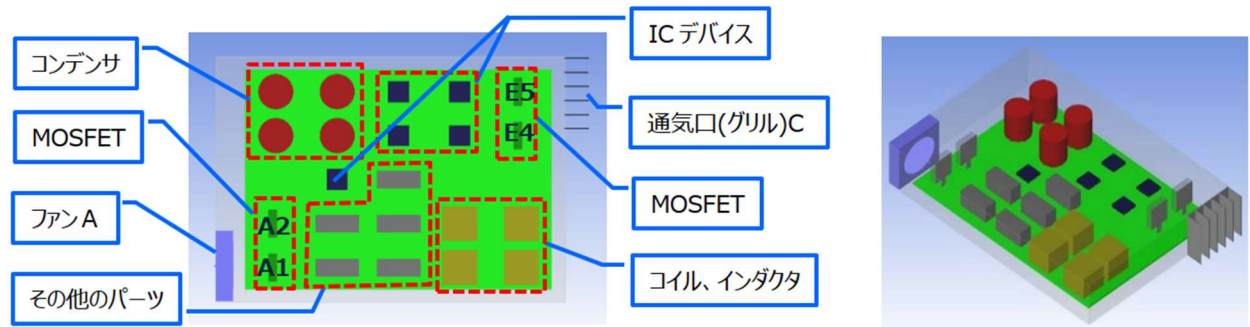


図 8. より現実的なモデルでの、部品、ファン、グリル、MOSFET の配置

この一連のシミュレーションでは、ファンとグリルの位置を再び変化させ、MOSFET の熱抵抗を計算しました。結果を表 1 に示します。

表 1. 筐体レイアウトと送風機動作の関数としての熱抵抗

吸込みファンモデル MOSFET 熱抵抗 (°C/W)									
ファン位置	A			B			C		
グリル位置	A	B	C	A	B	C	A	B	C
Chip-A1	12.7	12.7	12.7	17.7	17.0	16.6	20.1	20.2	20.0
Chip-A2	13.0	13.0	12.9	15.7	15.6	16.0	18.1	17.9	18.2
Chip-E4	19.2	15.5	14.0	15.5	14.8	13.3	14.7	14.3	14.4
Chip-E5	21.2	17.3	14.3	16.9	16.5	13.7	14.6	14.3	14.0

吐出しファンモデル MOSFET 熱抵抗 (°C/W)									
ファン位置	A			B			C		
グリル位置	A	B	C	A	B	C	A	B	C
Chip-A1	13.4	13.2	13.9	13.9	16.6	16.6	14.4	20.7	19.6
Chip-A2	13.8	13.0	13.8	13.5	14.0	14.9	14.0	18.5	17.6
Chip-E4	18.1	15.5	12.5	18.0	14.8	12.5	18.0	14.7	12.6
Chip-E5	18.3	20.2	12.7	18.2	19.0	12.7	18.2	19.2	12.8

ファン位置 A / グリル位置 C の組み合わせは、どちらのファン動作モードでも総合的に最高の熱性能を発揮しました。

3-2: グリルの大きさが熱性能に及ぼす影響

モデル 2 を使って、吐出しファンでのグリルサイズの効果調べました。解析の結果、図 9 の左側に示す筐体モデル内に配置した 6 個の MOSFET の熱抵抗とグリルのサイズに関するデータが得られました。図 9 の右側に示した結果は、グリルが大きいほど、筐体内の空間全体をより効果的に冷却できることを示しています。

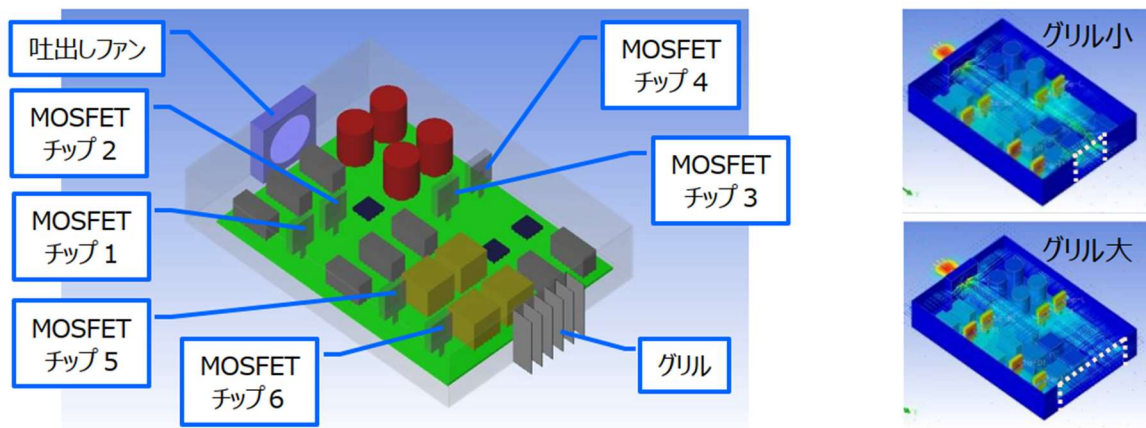


図 9. 小型グリルと大型グリルの熱性能比較

3-3: 自然空冷と強制空冷

強制空冷は冷たい外気を筐体内に引き込みますが、自然空冷は熱源からの熱い空気が上昇し、その代わりに冷たい空気が引き込まれることで冷却を実現します。自然空冷はグリルの代わりに上部に開口部が必要であることに注意が必要です。自然空冷はファンを必要としないため導入コストは安いですが、一般的に効果は劣ります。

シミュレーションの設定と部材の配置を図 10 に示します。左側の図は自然空冷、右側の図は強制空冷です。

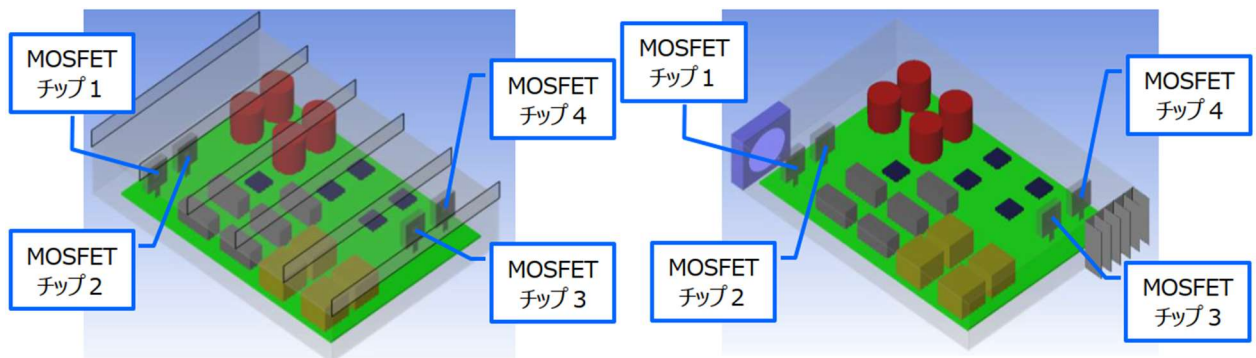


図 10. 自然空冷 (左) と強制空冷 (右) のシミュレーションモデル

図 11 にシミュレーション結果を示します。これにより、強制空冷がすべての電力レベルにおいて、より低い温度でより優れた熱性能を提供することが明白です。ファンが、その関連コストにもかかわらず、熱設計において望ましい選択であることが分かります。

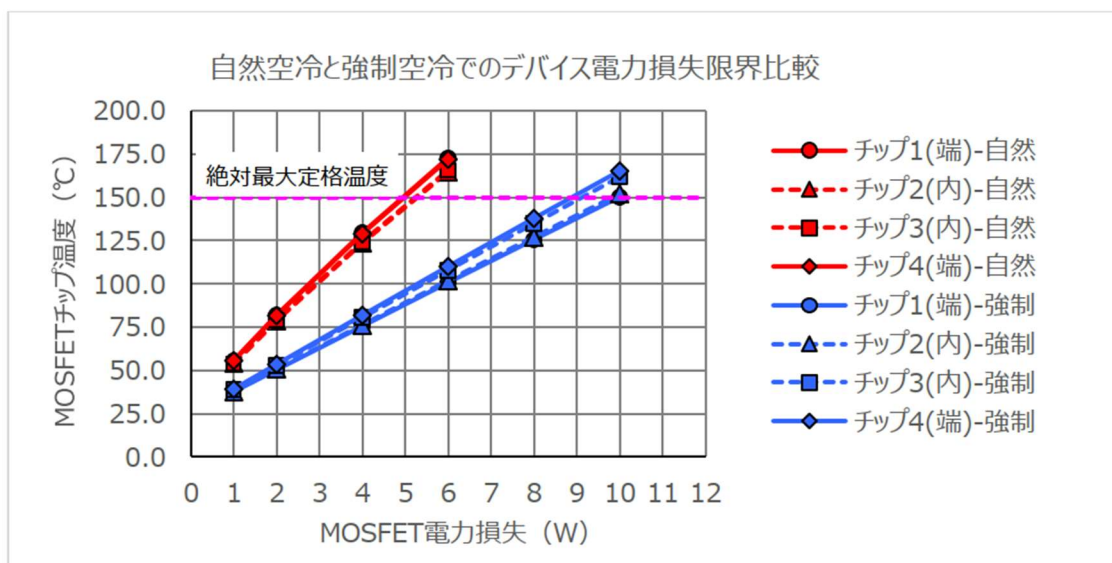


図 11. 自然空冷と強制空冷における MOSFET の温度と電力損失

第 4 章: 各種放熱対策の効果

4-1: 筐体幅、およびファンからの MOSFET までの距離による影響

次のシミュレーションでは、筐体幅に関連した強制空冷の結果を調べることに焦点を当てます。図 12 は、幅の広い筐体、およびファン幅と同等の狭い筐体を使用した 2 つのレイアウトを示しています。

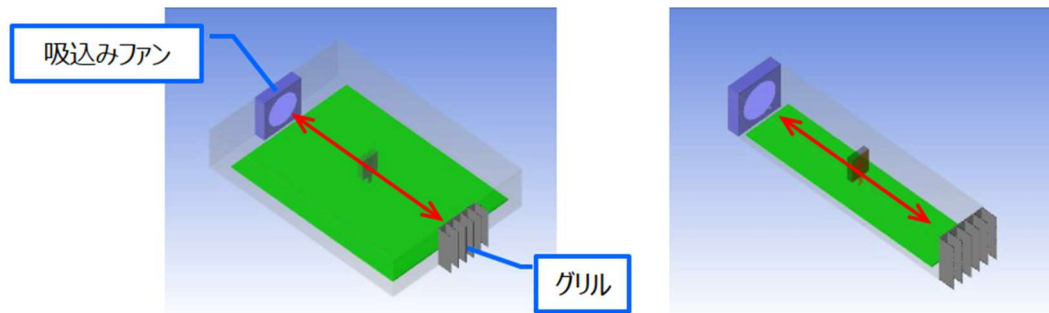


図 12. 筐体幅とファン-MOSFET 間距離の関係を解析するためのモデル

吐出しファンと吸込みファンの両方がシミュレーションされ、その結果が図 13 にまとめられています。小型筐体の場合、ファンからの距離は、気流があまり纏まらない大型筐体ほどには影響しません。

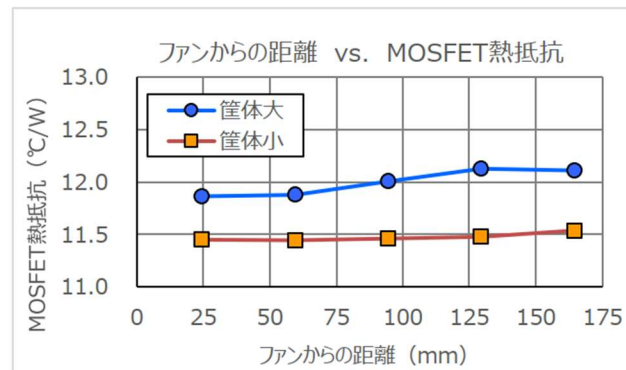


図 13. ファンからの距離に対する MOSFET 熱抵抗

4-2: 気流量の関数としての熱性能

ファンの性能は熱設計に影響を与えます。図 14 は、高、中、および低 Q（風量）ファンを使用して、ファンの性能が 4 つの MOSFET の熱抵抗に与える影響を評価するためのシミュレーションレイアウトを示しています。

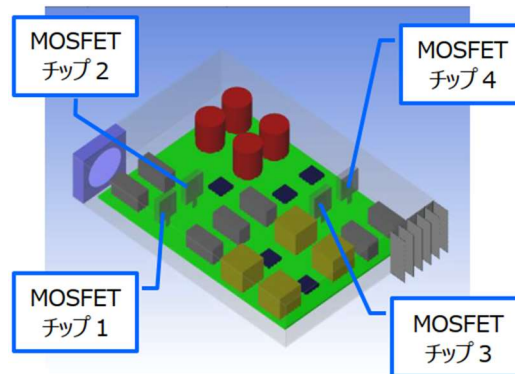


図 14. ファンの風量 (Q) の解析モデル

図 15 はシミュレーションの結果をまとめたもので、予想通り、大風量ファンは 4 チップすべてで熱抵抗が低くなっています。吸込みファンの場合、ファンに最も近い MOSFET の熱抵抗が最も低くなります。吐出しファンの場合はその逆で、グリルに最も近い MOSFET の熱抵抗が最も小さくなります。これらの MOSFET は入ってくる冷たい空気に最も近いため、これは直感的に理解できます。

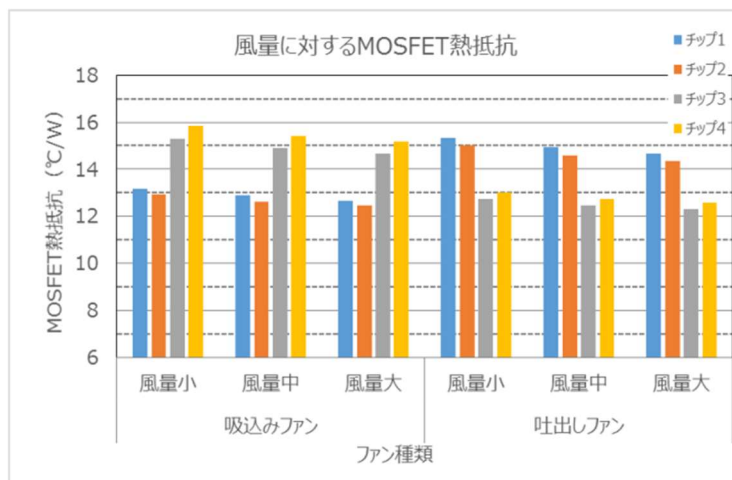


図 15. 3 種類のファンの風量と MOSFET 熱抵抗の比較

4-3: MOSFET 放熱器の効果

MOSFET の熱設計におけるもう 1 つの一般的なアプローチは、表面積を大きくすることで熱放散を促進する MOSFET 放熱器を使用することです。放熱器の向きには、水平（フィンが PCB と同一平面上にある）と垂直の 2 方向があります。評価した 6 つのモデルを図 16 に示します。3 つの異なるデバイスと放熱器の向きを、自然空冷または強制空冷のいずれかの方法を用いて交差させました。

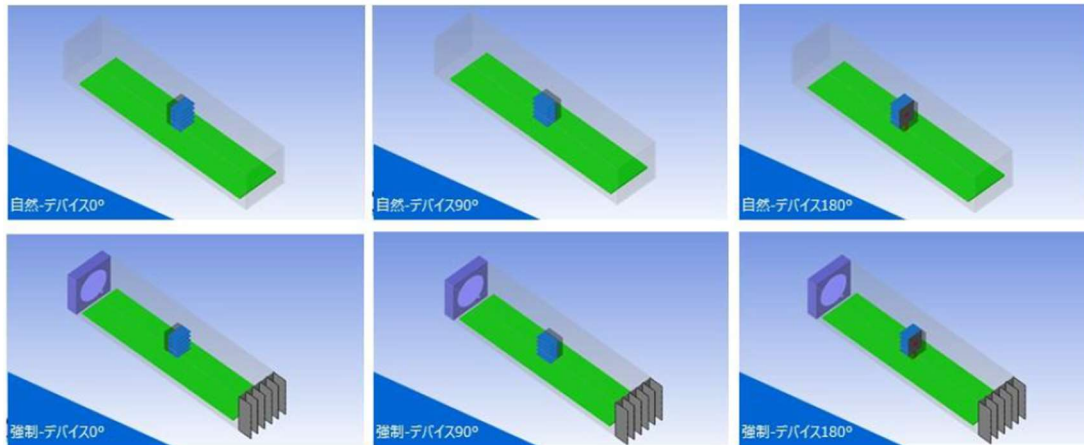


図 16. 自然空冷と強制空冷のシミュレーションにおける放熱器とデバイスの向き

その結果を表 2 に示します。自然空冷、強制空冷ともに、放熱器は熱抵抗を減らしています。

表 2. MOSFET 放熱器のシミュレーション結果

冷却方法	放熱器		MOSFET 熱抵抗 (°C/W)		
	有無	向き	デバイス方向		
			0°	90°	180°
自然	無	—	23.2	23.2	23.2
自然	有	水平	19.6	19.6	19.6
自然	有	垂直	18.9	19	18.9
強制	無	—	11.5	11.4	11.3
強制	有	水平	7.4	6.4	6.5
強制	有	垂直	7.1	7.2	6.1

4-4: 冷却性を向上させる筐体放熱器

筐体放熱器は、パワーエレクトロニクスの熱設計におけるもう 1 つの一般的なアプローチです。スペースに制約がある場合、個々の MOSFET に放熱器を取り付けるのは難しいため、本稿での最終的な解析では、筐体自体を放熱器として使用した場合の効果を検証します。

ここでは、アルミニウム筐体と MOSFET の間に熱伝導材料（TIM: Thermal Interface Material）を挿入し、電気絶縁を行います。構成と 3 つのアプローチを図 17 に示します。放熱器なし、4 つのエッジ配置された MOSFET すべてに放熱器を取り付けたもの、4 つのエッジ配置された MOSFET すべてを筐体放熱器へ取り付けたものです。

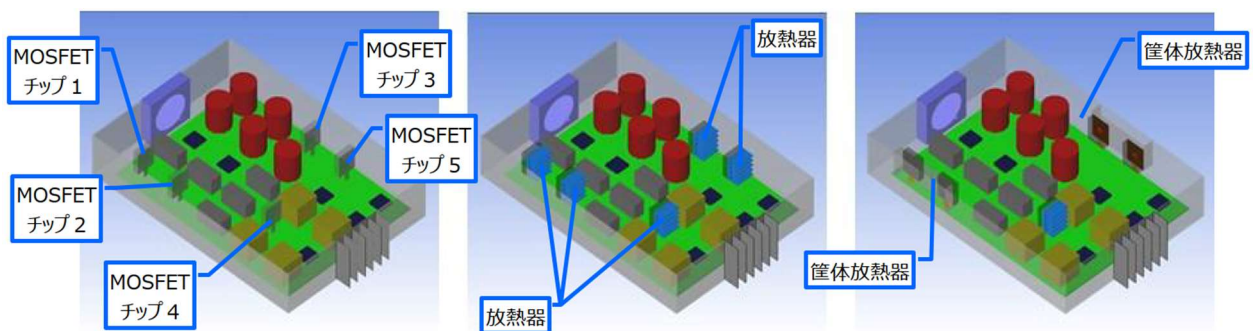


図 17. さまざまな放熱器ソリューションを評価するためのモデル

図 18 はその結果をまとめたものです。筐体を放熱器として使用することは非常に効果的ですが、同等の結果を得るためには筐体の材質を考慮する必要があります。

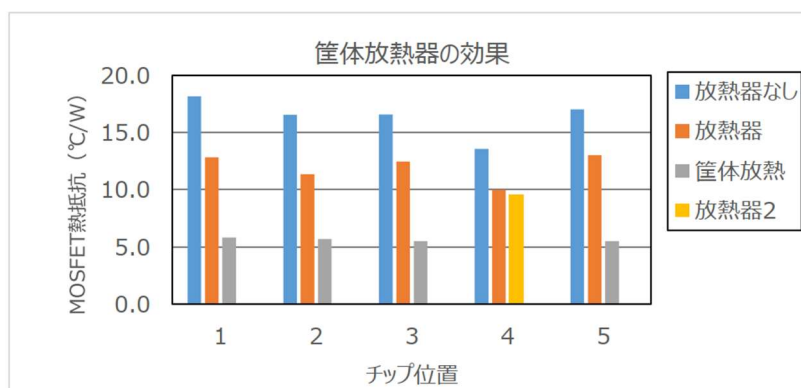


図 18. さまざまな放熱器実装における熱抵抗

第5章: まとめとガイドライン

以上の結果をまとめると、MOSFET を採用したシステム設計の一般的なガイドラインをいくつか導き出すことができます。

1. 強制空冷は自然空冷より優れている。なぜなら、強制空冷はより速い風速を発生させ、より大きな冷却効果をもたらすからである。
2. 大風量のファンは、吸込みファンであれ吐出しファンであれ、MOSFET の平均熱抵抗に大きな影響を与える。
3. 吸込みファンは高温のデバイスを直接冷却する場合に効果的で、吐出しファンは基板全体を冷却する必要がある場合に効果的である。
4. MOSFET はファンに近いほど効果的に冷却される。
5. MOSFET は、ファンとグリル間の経路に沿って配置し、可能な限りファンの近くに配置する。
6. 大型のコンポーネントは、筐体全体のエアフローを損なうため、ファンの前に直接設置しない。
7. グリルが大きいほど、室内空間全体の冷却効果が高まる。
8. MOSFET 放熱器を使用する場合、空気に直接触れているときに最も効果的であり、構成上、ファンとグリルの間で最も大きな面積が気流にさらされていなければならない。
9. 筐体放熱器は、筐体の材質が良好な熱特性を持つと仮定して、MOSFET を筐体の側面に沿って配置する場合に最も効果的である。

関連リンク

熱設計にご興味ある方は、こちらの記事もご覧ください。

[特集記事「ディスクリット半導体デバイスを使用する際の熱設計マネジメント」](#)

製品取り扱い上のお願い

株式会社東芝およびその子会社ならびに関係会社を以下「当社」といいます。

本資料に掲載されているハードウェア、ソフトウェアおよびシステムを以下「本製品」といいます。

- 本製品に関する情報等、本資料の掲載内容は、技術の進歩などにより予告なしに変更されることがあります。
- 文書による当社の事前の承諾なしに本資料の転載複製を禁じます。また、文書による当社の事前の承諾を得て本資料を転載複製する場合でも、記載内容に一切変更を加えたり、削除したりしないでください。

- 当社は品質、信頼性の向上に努めていますが、半導体・ストレージ製品は一般に誤作動または故障する場合があります。

本製品をご使用頂く場合は、本製品の誤作動や故障により生命・身体・財産が侵害されることのないように、お客様の責任において、お客様のハードウェア・ソフトウェア・システムに必要な安全設計を行うことをお願いします。なお、設計および使用に際しては、本製品に関する最新の情報（本資料、仕様書、データシート、アプリケーションノート、半導体信頼性ハンドブックなど）および本製品が使用される機器の取扱説明書、操作説明書などをご確認の上、これに従ってください。また、上記資料などに記載の製品データ、図、表などに示す技術的な内容、プログラム、アルゴリズムその他応用回路例などの情報を使用する場合は、お客様の製品単独およびシステム全体で十分に評価し、お客様の責任において適用可否を判断してください。

- 本製品は、特別に高い品質・信頼性が要求され、またはその故障や誤作動が生命・身体に危害を及ぼす恐れ、膨大な財産損害を引き起こす恐れ、もしくは社会に深刻な影響を及ぼす恐れのある機器（以下“特定用途”という）に使用されることは意図されていませんし、保証もされていません。特定用途には原子力関連機器、航空・宇宙機器、医療機器（ヘルスケア除く）、車載・輸送機器、列車・船舶機器、交通信号機器、燃焼・爆発制御機器、各種安全関連機器、昇降機器、発電関連機器などが含まれますが、本資料に個別に記載する用途は除きます。

特定用途に使用された場合には、当社は一切の責任を負いません。なお、詳細は当社営業窓口まで、または当社 Web サイトのお問い合わせフォームからお問い合わせください。

- 本製品を分解、解析、リバースエンジニアリング、改造、改変、翻案、複製等しないでください。
- 本製品を、国内外の法令、規則及び命令により、製造、使用、販売を禁止されている製品に使用することはできません。
- 本資料に掲載してある技術情報は、製品の代表的動作・応用を説明するためのもので、その使用に際して当社及び第三者の知的財産権その他の権利に対する保証または実施権の許諾を行うものではありません。
- 別途、書面による契約またはお客様と当社が合意した仕様書がない限り、当社は、本製品および技術情報に関して、明示的にも黙示的にも一切の保証（機能動作の保証、商品性の保証、特定目的への合致の保証、情報の正確性の保証、第三者の権利の非侵害保証を含むがこれに限らない。）をしておりません。

- 本製品、または本資料に掲載されている技術情報を、大量破壊兵器の開発等の目的、軍事利用の目的、あるいはその他軍事用途の目的で使用しないでください。また、輸出に際しては、「外国為替及び外国貿易法」、「米国輸出管理規則」等、適用ある輸出関連法令を遵守し、それらの定めるところにより必要な手続を行ってください。

- 本製品の RoHS 適合性など、詳細につきましては製品個別に必ず当社営業窓口までお問い合わせください。

本製品のご使用に際しては、特定の物質の含有・使用を規制する RoHS 指令等、適用ある環境関連法令を十分調査の上、かかる法令に適合するようご使用ください。お客様がかかる法令を遵守しないことにより生じた損害に関して、当社は一切の責任を負いかねます。