

## 電子回路の熱解析

## Thermal Analysis of Electronic Circuits

河野 智行 ・ 関根 信之 ・ 伊藤 賢佑 ・ 梶澤 亮一  
KAWANO Tomoyuki ・ SEKINE Nobuyuki ・ ITO Kensuke ・ KABASAWA Ryoichi

## 要 旨

近年、「CASE (Connected, Autonomous, Shared, Electric)」と呼ばれる技術トレンドが乗用車に始まり、産業車両や建設機械にも波及している。これは電子制御ユニット (ECU: Electronic Control Unit) に対して、どこにでも置きたい (搭載フリー)、機能アップしたい (高・多機能化)、小型化したい (高密度化・統合化) といったニーズとなって現れている。

これらニーズに対応するために発熱部品をより小さな空間に押し込めると、部品温度が上昇し、搭載電子部品の劣化を早めてしまう。

一方でスマートフォンに代表される民生情報機器は一足先に複雑化・小型化を成し遂げた。これは高機能化と高密度化に伴う発熱量の増加を、半導体を中心とした電子部品の省電力化と機器放熱構造の改良により抑え込んできた成果である。

ECU開発で同様に機器放熱構造の改良の取り組みを適用する際には、発熱温度を予測し、発熱密度の限界を追求しつつ必要な製品寿命や性能、品質を確保するための熱対策を盛り込む熱設計技術が必要である。温度予測手法は、形状決定後に熱流体解析による3Dシミュレーションを実施することが多いが、下流工程からの手戻りを発生させないために、上流工程で放熱経路を数式で表現する熱回路網法を用いた1Dシミュレーションを繰り返し実施し成立性の検証することが有効である。

本報では、精度と計算速度を両立した電子回路の放熱経路を確認するための温度予測手法について解説する。

## Abstract

In recent years, due to the “CASE (Connected, Autonomous, Shared, Electric)” technological trend, electronic control units (ECUs) need to be installed at free locations and they need to realize higher performance, have more electronic capabilities, high-density packaging, and integrate multiple functionalities. These requirements crowd heat-generating components and accelerate deterioration. On the other hand, consumer electronic devices such as smartphones are progressing in their complexity and downsizing. These are achieved by saving power through high-performance semiconductors and improving the heat dissipation structure. The thermal design is important to achieve similar performance in ECU. The thermal design makes it possible to secure the required product life, performance, and quality by predicting temperature and dissipating heat, while pursuing the limit of heat generation density. Generally, computational fluid dynamics, which is 3D simulation, is used for the prediction of temperature. However, it is effective to repeat the thermal network method, which is 1D simulation, to verify the feasibility in the upstream area of development flow to prevent rework from the downstream area. This paper reports on detailed modeling to confirm heat phenomena of the electronic circuit and discuss the results of 1D simulation which is accurate and fast.

## 1 緒言

乗用車や建設機械などの電子機器を設計するうえで熱問題への対応は近年重要性を増している。設置に割り当てられるスペースに限りがある一方で、電動化や電子化による消費電力の増加により、機器内部の発熱量増加と温度上昇が搭載部品の劣化を早めるためである。車載電子機器周辺を取り巻く実装技術の動向を図1に示す。

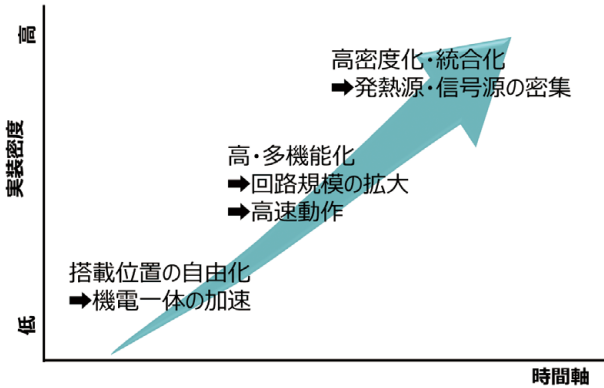


図1 ECUの実装技術動向

製品寿命を保証するためには、省電力化で発熱量を減らし、放熱能力を増強して温度を下げる必要がある。デジタル回路の微細化により、同じ消費電力でも2年で2倍の処理能力向上が行われ、省電力化に寄与している。パワー素子は炭化ケイ素(SiC)や窒化ガリウム(GaN)等の化合物半導体の登場でスイッチング効率の向上と、高スイッチング周波数化で小型化が図られている。放熱能力については、電子部品のパッケージの改良、伝熱素材の進化により、熱が電子機器の中にこもらないようにケースを通して大気に逃がす工夫が施されてきた。

設計においては製品競争力向上のため、発熱密度の限界を追求する必要がある。製品は小さくすればするほど軽量化されコストダウンにつながるが、製品内部の温度が上昇し実装部品の寿命が短くなる恐れや使用温度範囲を超える恐れがあるため、開発の上流の段階で、サイズ、重さ、コスト、寿命、品質等の見積りが不可欠である。

本報では、この見積りにあたり継続的に取り組んでいる技術内容の一部を概説する。具体的には、伝熱を等価電気回路に置き換えて解析を行う熱回路網法に着目して、計算に電子回路シミュレータを用いた解析手法についての解説である。

## 2 電子部品の寿命

電子部品の寿命を縮める要因は主に熱的ストレスである。熱による化学反応が限界値に達すると故障が起きる<sup>1)</sup>。

寿命予測方法は、ある温度 $T$ での化学反応の速度 $K$ を予測するアレニウスの式(1)を用いた加速試験が広く用いられている。

$$K = A \exp\left(-\frac{E_a}{kT}\right) \quad (1)$$

- $A$  : 定数
- $E_a$  : 活性化エネルギー [J]
- $k$  : ボルツマン定数 [J/K]

温度 $T_1$ および $T_2$ における故障に至るまでの時間(寿命)を各々 $L_1$ および $L_2$ とすると式(2)を得る。

$$\ln L_1 - \ln L_2 = \frac{E_a}{k} \left( \frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \right) \quad (2)$$

加速試験で実測した寿命の自然対数と、そのときの温度の逆数をプロットしたものは比例関係にあり、アレニウスプロットと呼ばれる(図2)。直線の傾きで活性化エネルギー $E_a$ を求めることができ、表1に示すような、部品の動作温度と動作時間の設定(温度プロファイル)を与えることで寿命の予測が可能となる。

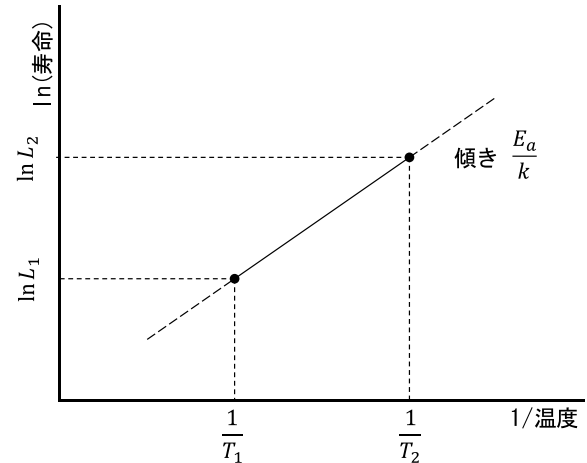


図2 アレニウスプロット概念図

表1 温度プロファイルの例

状態	1日当たり				15年当たり
	tj (°C)	時間 (h/日)	150°C換算時間 (h/日)	割合 (%)	150°C換算時間 (h)
動作	130	0.05	0.01924	11.00	105
	100	0.95	0.07203	41.17	395
	70	7.00	0.07870	44.98	431
静止	25	16.00	0.00500	2.86	27
合計			0.17497	100.00	959
上限			0.18252	100.00	1000

### 3 ECUで発生する熱

ECUで発生する熱は実装電子部品からのジュール熱が支配的である。この熱は、プリント基板を經由してECUの筐体に伝わり大気に放出される(図3)。今回は熱源の電子部品の熱を効率よく外に伝える役割を担うプリント基板に焦点を絞って解説する。

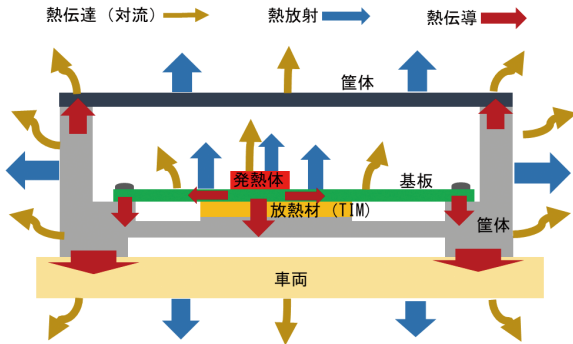


図3 ECUの熱の経路

発熱源の発熱量 $P$ 、大気温度 $T_a$ 、熱の伝わり方を決めている熱抵抗 $\theta$ を把握することができれば、熱源の温度 $T$ を式(3)で推定することができる。

$$T = T_a + \theta P \quad (3)$$

ここで $\theta$ は熱源と大気との間の全ての放熱経路を合わせた熱抵抗である。実際には複数の熱源、複数の熱の経路、大気温度分布(図4)があるために、熱源温度の算出は複雑になるが、各部位の熱抵抗を把握しておけば求める事が可能である。

発熱部品の熱量とプリント基板が大気へ逃がす熱抵抗がわかると、必要な放熱性能を持つ基板の面積を求めることができる。熱源となる電子部品は温度によって発熱量が変わるため、電気と熱の双方を対にして計算ができるシミュレーションツールを活用する必要がある。

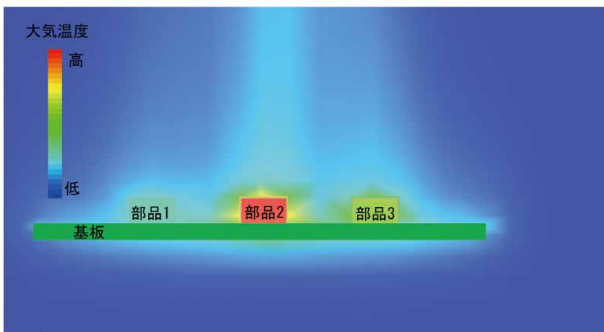


図4 大気への放熱イメージ

### 4 シミュレーションツール

熱に対しては専用の熱流体解析ツールを用いて解析することが多い。開発上流の構想設計段階では、“当たりをつける”ことに重きを置くため、熱流体解析のような3D形状をモデル化したシミュレーションではなく、放熱経路を熱回路網に置き換えて、条件を変化させて繰り返し実施し易い1Dシミュレーションが望ましい<sup>2)</sup>。

熱回路網計算の過程で重要となるのが、電子部品の発熱量と放熱経路の熱抵抗である。以前は発熱量を見積る際にデータシート記載の標準値を使用していたが、この方法では条件により実際の発熱量との乖離が大きくなる場合があった。これは温度により電子部品の発熱量が変化する事、その変化量が電子部品の製造ばらつきで変わる事、電子部品同士が影響しあって温度が変わる事が理由である。解決策は電気と熱の2つの現象を、それぞれの相互作用を併せて解析することである。

この解析を机上計算で実施することも可能だが、何度も繰り返す必要があるためシミュレータを活用することが効率的である。電子回路の1DシミュレーションツールはSPICE (Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis) をベースとしたものが広く使われていることからこれを採用する。SPICEを使用することで、電子回路シミュレーションと熱回路シミュレーションを並行して実施することが可能となる。

最近では電子部品メーカーがSPICE用の熱モデルを提供するケースも出てきているが、熱解析のためには更に基板や大気などを含めて、放熱経路の大部分の熱モデルを作る必要がある。SPICE系シミュレータは与えられた回路の計算をするだけなので、精度の悪い電気モデルおよび熱モデルがあると正確な結果が得られない。作成した回路および熱モデルは評価した上で解析精度を把握しておくことが重要である。

また、電気モデルにおいては電気的特性を把握して、動作条件によっては温度の影響度合いを考慮したチューニングが必要となる場合もある。

一方で解析にかかる時間は短いほどよく、温度が時間的に変化している状態(過渡状態)か、時間が十分に経過して温度が一定になった状態(定常状態)かで、モデルの表現方法が異なる。その為目的に応じた電気および熱のモデルを用意する必要がある。

## 5 電子部品の熱モデル

図5の電子部品の熱モデルを考える。内部は図6のように発熱源の半導体と半導体を覆っているパッケージ材料で構成される。

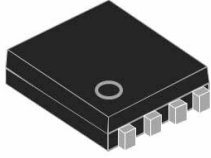


図5 半導体のパッケージ

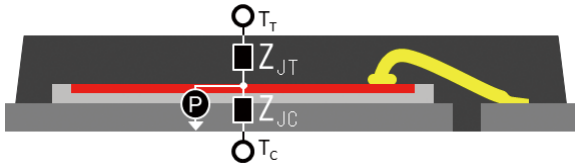


図6 パッケージ内の構造

図6においては発熱源をP、パッケージ上面の温度を $T_T$ 、赤色で示すPN接合部からパッケージ上面の熱インピーダンスを $Z_{JT}$ 、パッケージ下(ケース)面の温度を $T_C$ 、PN接合部からケース間の熱インピーダンスが $Z_{JC}$ である。

熱インピーダンスとは温度と熱流量の比であり、熱回路における熱の流れにくさを表す。抵抗性と容量性の2種類があり、それぞれ抵抗の記号、容量の記号で表すと、熱モデルは図7(A)のはしご型回路となる。

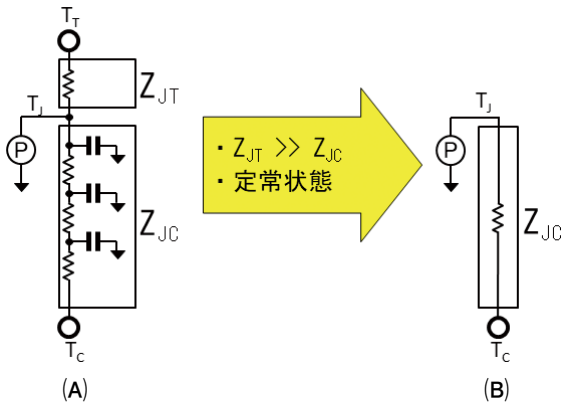


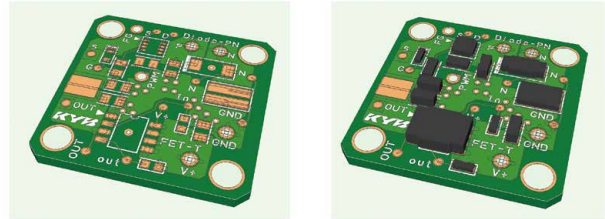
図7 熱モデル (はしご型回路)

定常状態では熱容量の影響は無視できるので、この場合は図7(B)の熱抵抗のみの、回路に簡略化することができる。発熱量 $P$ はパッケージの中に入っている素子の消費電力で決まり、電圧と電流から求められる。

実測との差異がある場合にはモデルの見直しを行い解析精度の向上を図る。

### 5.1 プリント基板

電子部品で発生した熱はプリント基板(図8)を経由して大気へ放熱される。プリント基板の熱抵抗は形状と熱伝導率(表2)から求められ、この熱抵抗をパラメータに使用する<sup>3)</sup>。プリント基板から大気への熱抵抗は熱伝導率とプリント基板の表面積で求められる(図9)。



部品実装前

部品実装後

図8 プリント基板

表2 基板を構成する材料の熱伝導率

材料	熱伝導率 [W/(m・K)]
銅	390
基材	0.35

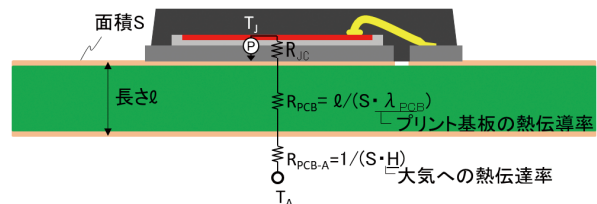


図9 基板の熱のモデル

### 5.2 抵抗器

抵抗値 $R$ の抵抗器は電流 $I$ もしくは電圧 $V$ がわかると式(4)で発熱量 $P$ が求まる部品である。

$$P = VI = \frac{V^2}{R} = RI^2 \quad (4)$$

この発熱量 $P$ を抵抗器のパッケージ材料がもつ熱抵抗 $\theta$ に乗じると温度差が式(3)で求まり、部品の表面温度を求めることができる。抵抗の電気と熱のモデルを図10に示す。

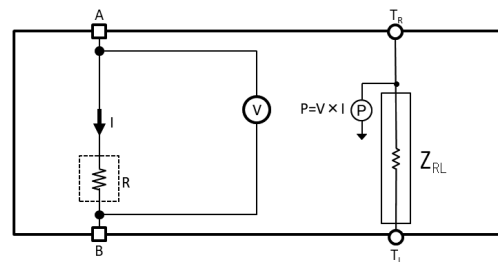


図10 抵抗の電気と熱のモデル

### 5.3 ダイオード

ダイオードはアノードとカソードの2端子を持ち、アノードからカソード方向のみに電流を通し、その逆は通さない半導体部品である。

電気モデルはSPICE形式のものがメーカーから提供されている。これを使って電子回路シミュレーションを行いデータシートの特性と比較した(図11)。

今回評価に使用するダイオードの順方向最大電流( $I_F$ )は1Aであり、この領域での発熱量を見積もることができる電気モデルが必要である。メーカー提供のモデルは温度125°Cでのずれが大きいため、電気モデルを調整し直した(図12)。

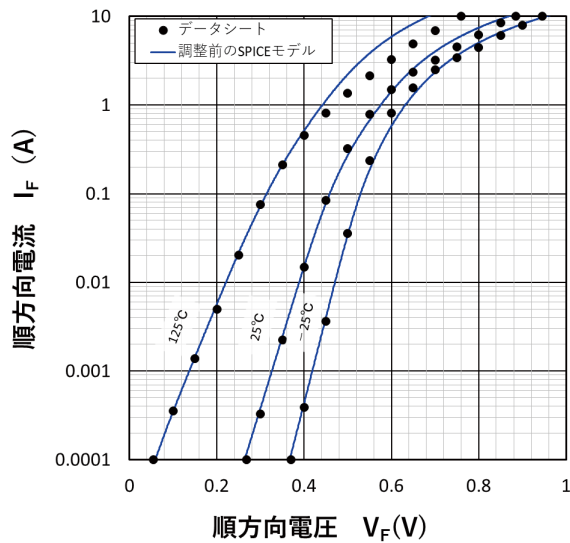


図11 ダイオードの $I_F$ - $V_F$ 特性

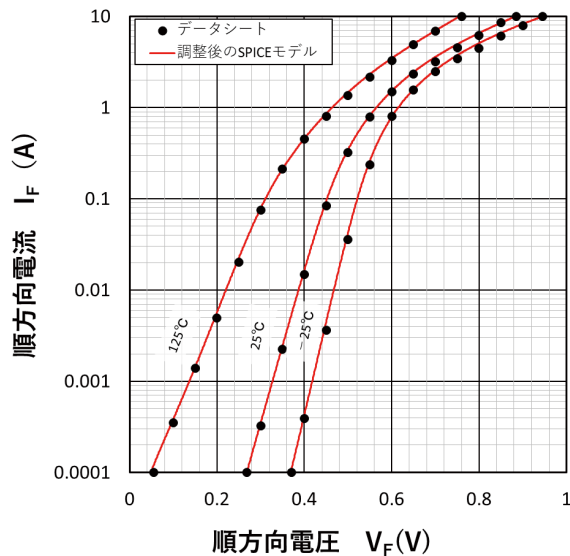


図12 調整したダイオードの $I_F$ - $V_F$ 特性

この作業は電気モデルのパラメータのみの調整では難いため、独自の数式を組み合わせることで誤差の平均値が10%程度になるように調整した。更に、計算負荷を軽減するため、精度が必要な1A近傍以外のモデルを簡略化する。

半導体部品には製造ばらつきがあり、発熱し易さに影響するため、これを考慮して回路動作が満足するように検討を重ねていく。今回は発熱に注目しているため、発熱量が最大となる順方向電圧 $V_F$ を、データシートの電圧と電流から推定する(図13)。

新しく推定した電気モデルの誤差と、先に調整した電気モデルの誤差(平均値10%程度)を許容できるように、設計マージンを設けて回路設計を進める。

ダイオードの特性調整にはこのほかに容量特性の調整や逆回復特性の調整があるが、今回はメーカー提供の電気モデルのままとした。ダイオードの電気と熱のモデルを図14に示す。

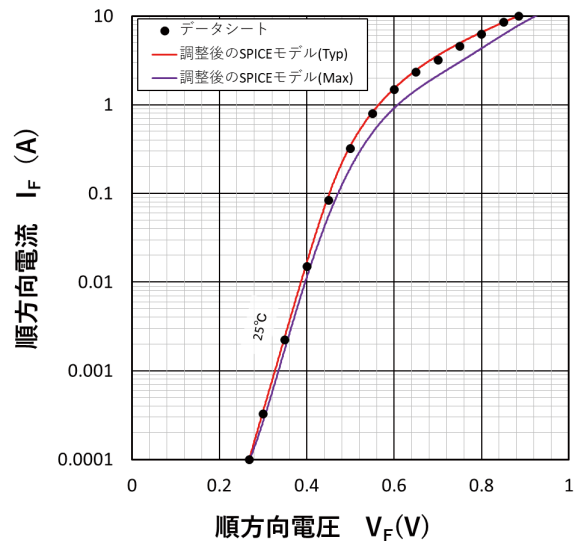


図13 発熱量最大のダイオードの $I_F$ - $V_F$ 特性

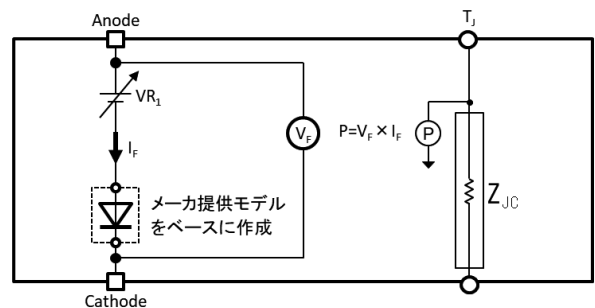


図14 ダイオードの電気と熱のモデル

5.4 FET

FETはドレイン、ゲート、ソースの3端子を持ち、ドレイン-ソース間の電流をゲート-ソース間電圧によってコントロールする半導体部品である。

電気モデルはSPICE形式のものがメーカーから提供されている。FETはドレイン-ソース間の電流が温度に依らず一定となるゲート電圧 (Q点) を持つ特徴があるが、図15のようにメーカー提供の電気モデルの $V_G-I_D$ 特性において、各温度の特性が1点で交わっていない場合には、図16に示すようにQ点が現れるようにパラメータの調整を行う。

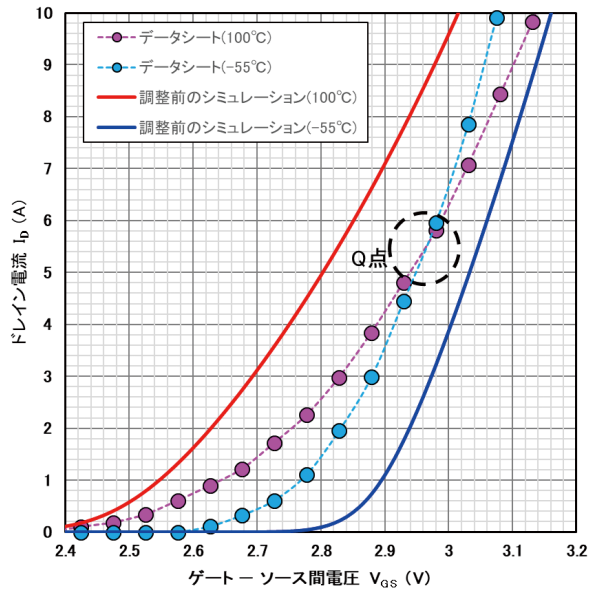


図15 メーカー提供電気モデルの $V_G-I_D$ 特性

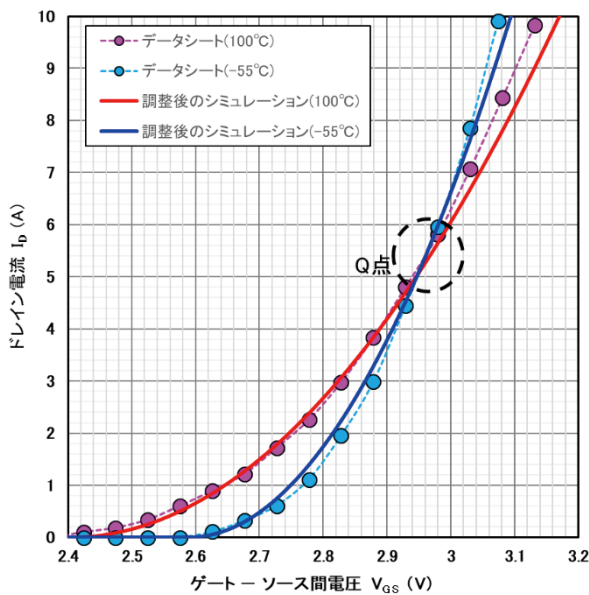


図16 調整した $V_G-I_D$ 特性

FETをオンさせるために必要なゲート-ソース間の電圧 (ゲートしきい値電圧) には温度依存性がある。図17のようにメーカーの電気モデルとデータシートに差異がみられたので、精度が必要な1A近傍のドレイン電流を調整した (図18)。電気モデルの調整が完了したら、次に熱モデルの作成をおこなう (図19)。

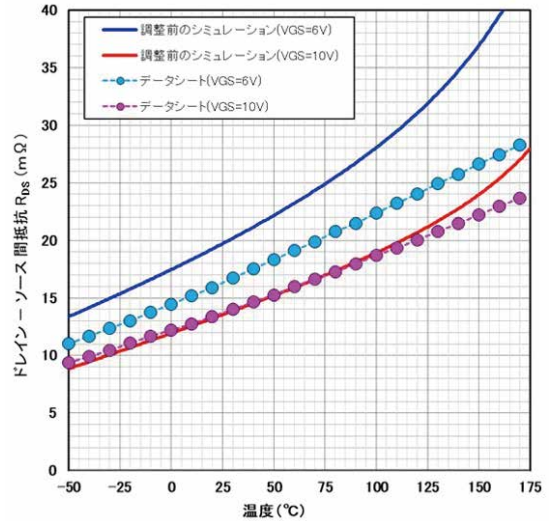


図17 メーカー提供電気モデルの $T_a-R_{DS}$ 特性

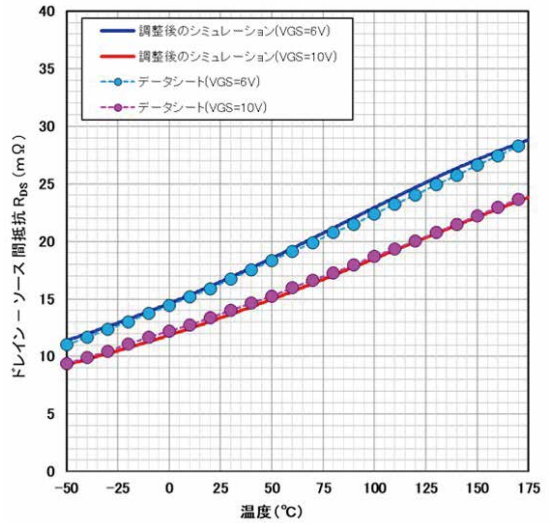


図18 調整した $T_a-R_{DS}$ 特性

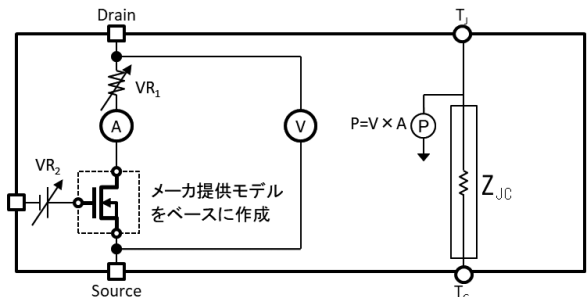


図19 FETの電気と熱のモデル

## 6 開発フロー

以下に実装基板の開発フローの例を示す。

- ①仕様決定
- ②部品選定および回路設計
- ③基板レイアウト設計
- ④基板パターン設計
- ⑤製品状態の温度予測
- ⑥試作品製作および評価

開発フロー初期の2～3の検討を十分行うことにより、試作回数の削減が可能となり、実機検証で発覚する不具合による手戻りを減らすことができる。図20に示すアクチュエータ駆動回路を事例として解説する。発熱部品はFET、ダイオード、抵抗である。

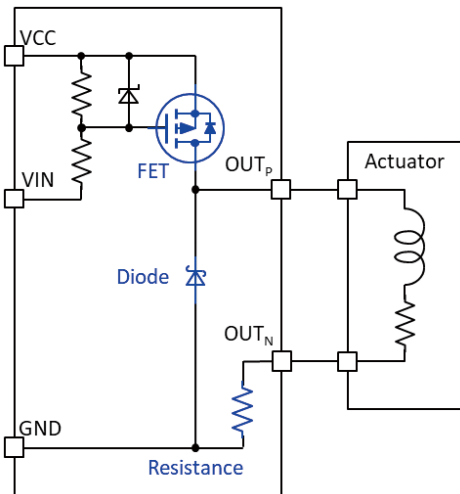


図20 アクチュエータ駆動回路

### 6.1 部品選定

部品選定の重要なポイントは、動作温度仕様を満たすことと、製品寿命を満たすことである。

動作温度仕様については、想定される回路動作で使用温度範囲に収まるよう部品の選定を行う。

各部品の寿命は、製品の使用環境（温度ごとの時間）から推定が可能である。例えば車載グレードの半導体では、150℃、1000時間で信頼性試験が行われることが多い。この条件を満足するように各電子部品の負荷電流、発熱量、放熱量を見積り、温度上限に収まるよう部品の選定を行う。

また、各発熱部品が上記ポイントを満たす条件で回路全体の消費電力を算出し、基板の最低限のサイズを求め仮決めしておく（図21）。基板サイズを小型化していくと熱密度が上がり、基板は高温になるため高温対応部品が必要となる。高温対応部品は高価であることが多く、コストとサイズ（小型化）のバランスを考慮することも重要である。

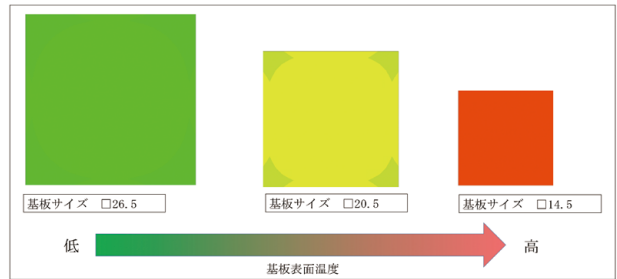


図21 基板サイズと基板表面温度の関係

### 6.2 回路設計

回路図を作成し机上計算およびシミュレーションツールで動作を検証するほか、ロバスト性向上のため電源電圧や環境温度の変化、部品のバラツキを考慮してワースト条件の動作も確認する。ワースト条件を実測で構成するのは困難であるが、シミュレーションであれば容易に確認が可能である。

### 6.3 部品の寿命解析

最も発熱する条件（表3のMax）の製品寿命をシミュレーションで予測する。例としてFETの寿命予測をしたシミュレーション結果を図22に示す。メーカー保証の150℃ 1000時間以内に入っていることが確認できる。

表3 製造ばらつきでの最も発熱する条件

消費電力 (W)		
Min	Typ	Max
0.42	0.54	0.62

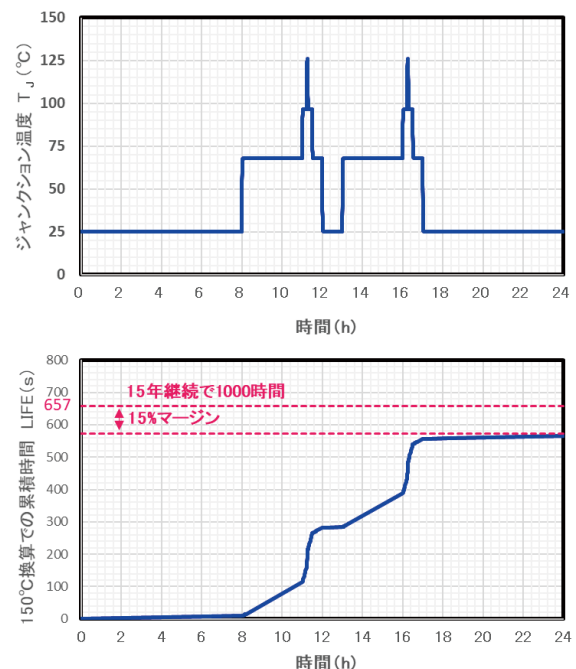


図22 FETの寿命予測

### 6.4 基板レイアウト設計

仮決めした基板サイズでワースト条件の電気モデル及び熱モデルで解析を行い熱の分布を求める。熱が集中する場所で使用温度範囲を超える場合は、目標温度を達成できるように配置と基板サイズを調整する。図23から図25に1Dシミュレーションと3Dシミュレーションの結果を示す。図23は基板サイズが小さく部品温度が上限を超過し成立しない例、図24は部品の温度は余裕があるが基板サイズが必要以上に大きい例、図25は部品温度、基板サイズとも適切な例である。

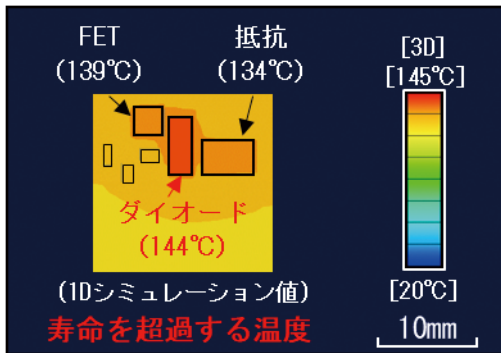


図23 基板サイズが小さすぎる例

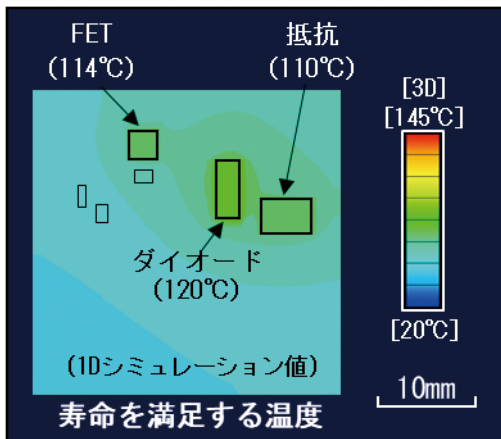


図24 基板サイズが大きすぎる例

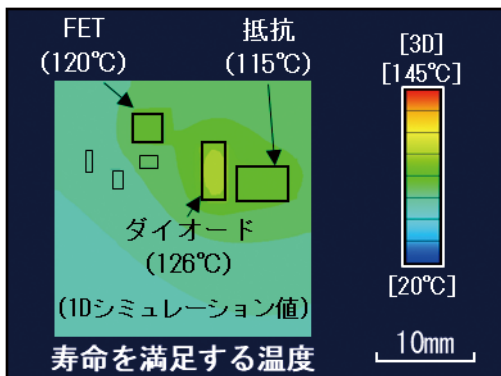


図25 基板サイズが適切な例

### 7 試作品の評価

1Dシミュレーションの結果をもとに基板サイズを決定し、試作基板を作成した(写真1)。

温度の実測とシミュレーションとの比較を行った。最も温度が高くなる素子はダイオードで、実測値と1Dシミュレーション値の差は3°C以内になっている(図26)。また、3Dシミュレーションの温度分布は実測に近い傾向を再現できている(図27)。

温度が高いほど部品寿命が縮むため、最高温度の部品の差が小さく望ましい結果となっている。

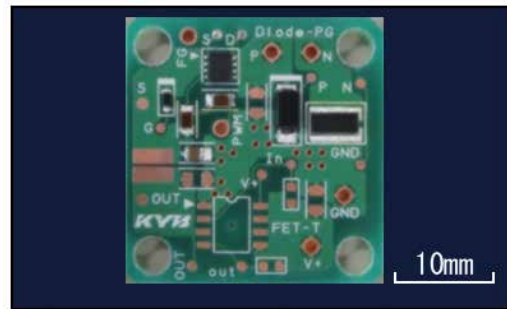


写真1 試作基板

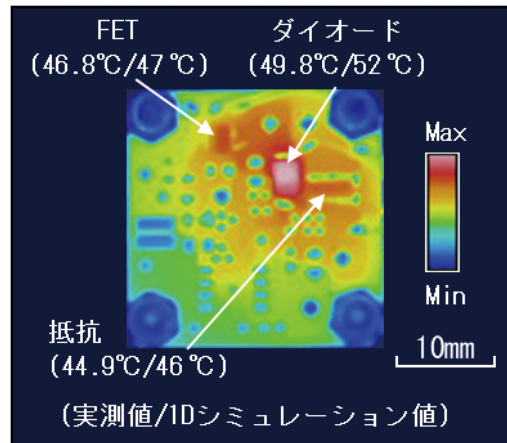


図26 実験と1Dシミュレーションの比較

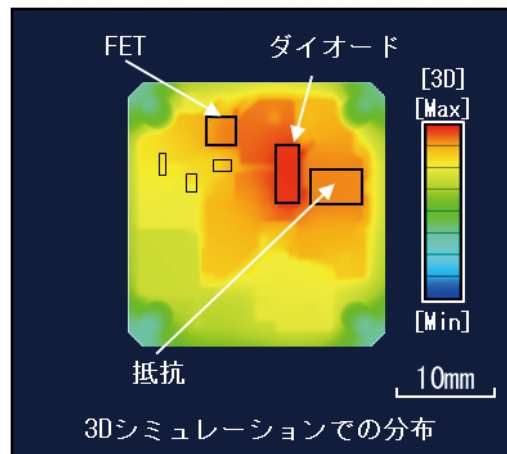


図27 3Dシミュレーションの結果



## 8 結言

電気モデル及び熱モデルを用いた1Dシミュレーションによる熱解析，温度の実測を行い，発熱部品の温度予測値と実測値の差異を20%以内にする事ができた。また，1Dシミュレーションは熱流体解析による3Dシミュレーションの計算時間に比べて結果を得られるまでの時間が大幅に短いことを確認した。3Dシミュレーションに依らず温度予測ができるようになると，開発初期の構想設計段階で要求サイズでの成立性を確認できるようになる。その結果，3D形状設計後の手戻りのリスクが低減するため，開発全体の効率化につながる。

今後は実測値の裏付けのあるデータを蓄積していき，各種モデルのパラメータ最適化を進めて新規開発製品の初期熱検討の高精度化を図り，電子機器製品開発の高効率化と高付加価値化に貢献していく所存である。

### 参 考 文 献

- 1) 日本信頼性学会:信頼性ハンドブック,日科技連, (2014年)
- 2) 島田:「1Dシミュレーション, 1DCAE」, KYB技法第61号, (2020年10月).
- 3) 国峰尚樹:電子機器の熱流体解析入門, 日刊工業新聞社, (2009年)

## 著 者



河野 智行

2012年入社。技術本部基盤技術研究所電子技術研究室。電子機器製品の回路設計および熱設計に従事。



関根 信之

2014年入社。技術本部基盤技術研究所電子技術研究室。電子機器製品の基板設計および熱設計に従事。



伊藤 賢佑

2015年入社。技術本部基盤技術研究所電子技術研究室。電子機器製品の回路設計および熱設計に従事。



栴澤 亮一

2012年入社。技術本部基盤技術研究所電子技術研究室 室長。電子技術センター開発室を経て現職。