

特集 パワーデバイス熱抵抗  $\theta_{JC}$  の抽出手法の検証\*

## Verification of the Method to Determine Thermal Resistance Junction to Case of Power Devices

篠田 卓也

Takuya SHINODA

井上 鑑孝

Noritaka INOUE

伊藤 哲也

Tetsuya ITO

Thermal simulation becomes conventional in thermal design for all electronic devices including automotive electronic control unit (ECU) and highly quantitative accuracy is demanded nowadays. The thermal resistance of junction-to-case ( $\theta_{JC}$ ) is a key factor to predict temperature rise by self-heating or heat receiving precisely with thermal simulation, but it is difficult to obtain the quantity of thermal resistance directly due to several reasons such as industrial secrets. So it is valuable to establish highly reliable measurement method of  $\theta_{JC}$  and standardize it. We previously developed novel measurement method which is based on the method standardized by JEDEC. In this report, we show the procedure to convert measured  $\theta_{JC}$  into a thermal circuit model for thermal simulation. The accuracy of the thermal circuit model is demonstrated with thermal-fluid analysis by comparing full 3D simulation as a reference and thermal circuit + 3D simulation.

**Key words :** Thermal resistance, Heat transfer design, Semiconductor device, Transient interface dual interface test method, Structure function, JEDEC, Knick

## 1. まえがき

現在、車両制御コンピュータは省燃費や安全性による要求により、車両制御の高機能化や車両搭載制約からのサイズ小型化が進んでいる。すなわち発熱量・発熱密度増加による熱の問題への対応が求められており、筐体や回路だけではなく、熱源でもある半導体デバイスに対する熱設計も必須となっている。

しかし、実製品、実駆動の半導体デバイスにおいてジャンクション温度を測定することは困難であり、多くは熱電対で測定できるケース温度に対する上昇分を電力とジャンクションケース間熱抵抗  $\theta_{JC}$  から算出している。この  $\theta_{JC}$  は半導体メーカーより提供されるが、測定に関わる誤差により過大なマージンが上乘せされていることがある。

そこで我々は、米国のJEDEC半導体技術協会によって2010年11月にJESD51-14<sup>1)</sup>として規格化されたTransient Dual Interface Test Method (以下TDI法)に着目し、“半導体デバイス熱抵抗  $\theta_{JC}$  の国際標準規格に対する提案”<sup>2)</sup>によってTDI法を補完し得る新たな2つの  $\theta_{JC}$  抽出手法を確立した。これによりTDI法の信頼度を向上することができた。以下に2つの手法を示す。

①素子の納入仕様書から入手できる形状および材料情報、文献値から得られる物性値を基に熱容量を

算出し、構造関数から熱抵抗を読み取る。

②構造関数の変化点(クニック)により読み取る。

本稿は、TDI法および提案手法により抽出された  $\theta_{JC}$  の精度検証について述べたものである。またその検証には、測定により得られた構造関数から記述した熱回路モデルを用いており、提案手法の精度検証だけではなく、測定して得られた実測データの数値解析への活用事例を示している。

この提案手法および活用方法は、車両制御用コンピュータを含む、半導体を使用するすべての電子機器の熱設計において有用である。

以下では、2章 検証手法、3章 検証結果、4章 本研究のまとめを述べる。

2.  $\theta_{JC}$  抽出手法の精度検証2.1 構造関数<sup>2)</sup>

最初に、構造関数について簡単に説明する。構造関数とはジャンクションから環境までの放熱経路を熱抵抗と熱容量で表現した関数である。構造関数を構成する熱抵抗と熱容量は、過渡熱抵抗をFig. 1に示すCauer型のRC熱回路網に変換することにより得られる。このラダー状のRC熱回路網モデルは理想的なHeat sinkに取り付けられた断熱側面を持つ連続した直方体の物理

モデルと対応する。

2.2 精度検証の手法

我々はTDI法を補完するため  $\theta_{JC}$  を抽出する以下2手法：1.半導体デバイスの熱容量を算出し、構造関数からその熱容量における熱抵抗を読み取る、2.構造関数のクニックから読み取る、を提案した。しかし各手法の相対的な検証は実施できたが、精度に関する検証は不十分であり、追加検証が必要であった。

そこで数値解析を用いて精度検証を実施する。数値解析は半導体デバイスの情報を、出来栄えに依存しない形状、測定誤差を含まない物性値、更に実物では見ることができない熱流束まで把握することができ、試験では再現が難しい接触界面の熱抵抗を任意に固定し検証することができる。

検証の手順は、

1. 半導体デバイスを詳細に再現したモデル（以下、Detail model）にて、TDI法のDry条件とWet条件のジャンクション温度を計算する。
2. TDI法と、半導体デバイスモデルの熱容量、そして構造関数のクニックから  $\theta_{JC}$  を抽出する。

3. 各  $\theta_{JC}$  までの構造関数を熱回路網モデル（以下、TDI model, Thermal capacity model, Knick model）で記述し、Detail modelと置き換えてジャンクション温度を計算する。
4. ジャンクション温度結果をDetail model（手順1）と熱回路網モデル（手順3）で比較し精度を検証する。

2.3 環境条件

検証に用いた数値解析ツールはFloTHERM<sup>3)</sup>であり、ジャンクション温度の構造関数への変換ツールはT3Ster-Master<sup>4)</sup>である。検証に用いたモデルをFig. 2に示す。Detail modelは接触熱抵抗を介してCold plateに設置されている。境界条件は35℃の開境界で、Cold plateの下面は35℃に拘束している。ここで実際の半導体デバイスに近づけるため、発熱エリアはChipに対して小さく設定（約80%）し、ジャンクション温度はChip表面に均等に配置したMonitor pointの平均値を用いる。また熱伝導率、密度、比熱の設定値をTable 1に示す。

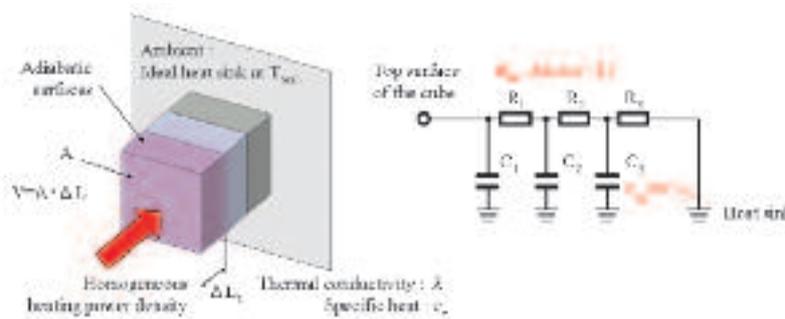


Fig. 1 Cauer ladder model and Thermal model

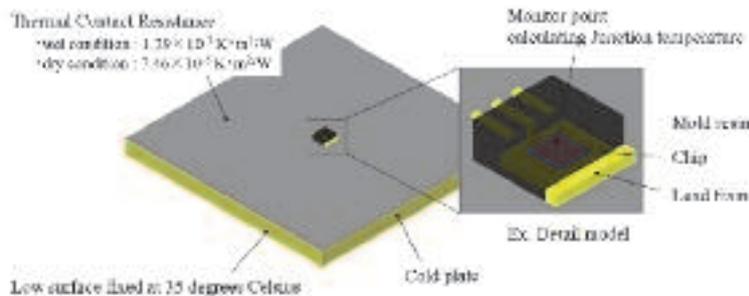


Fig. 2 CFD analysis model used for validation

Table 1 Set value of the analysis model

	Mold resin	Lead frame	Chip	Cold plate
Conductivity [W/(m · K)]	1.05	301.5	117.5	385
Density [kg/m <sup>3</sup> ]	1930	8850	2330	8960
Specific Heat [J/(kg · K)]	849	366	700	385

評価・解析

### 2.4 各 $\theta_{JC}$ 抽出手法による熱回路網モデル

各手法により抽出した  $\theta_{JC}$  を検証するための熱回路網モデルとそのトポロジーを Fig. 3 に示す。構造関数から各抽出手法で得られた  $\theta_{JC}$  までの熱抵抗と熱容量を用いて、熱回路網モデル作成する。但しTDI法の測定対象はジャンクションからパッケージケースの一面へ一次元的な伝熱経路を有する半導体デバイスとして、Junction NodeとTop Nodeの間に定義されている熱抵抗  $R_{top}$  は不明である。そこでパッケージケース上面への放熱は無視できるほど小さいと考え、100 K/Wと仮定する。また熱回路網モデルの形状はDetail modelと同じ高さとし、設置面積は主放熱面と考えられるLead frameと同面積の正方形とする。

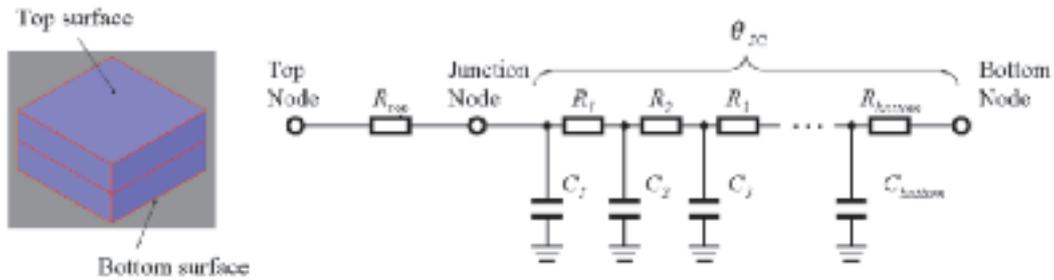


Fig. 3 RC network model and the topology

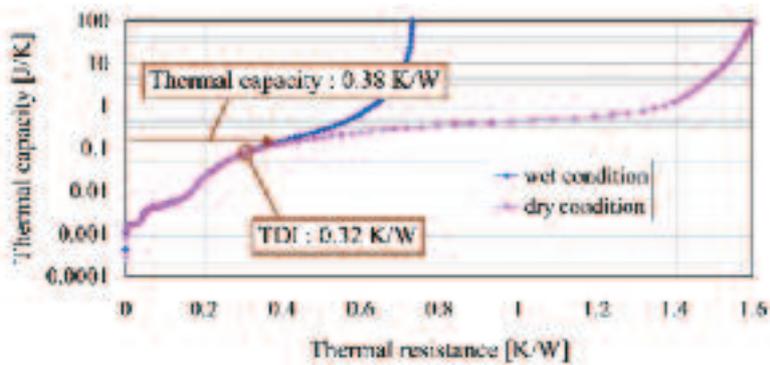


Fig. 4 Structure function of the detail model

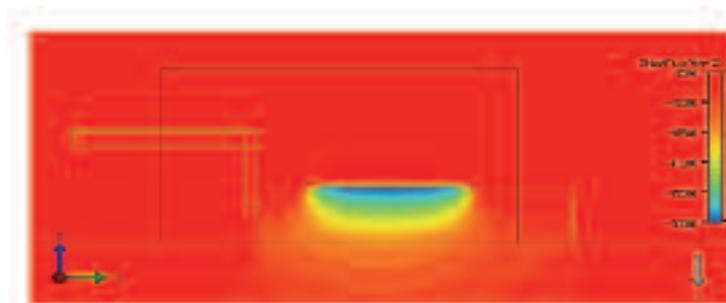


Fig. 5 Cross section of the heat flux distribution along the Z direction

### 3. $\theta_{JC}$ 抽出手法の検証結果

#### 3.1 各抽出手法による $\theta_{JC}$ の結果

Detail modelの数値解析により得られたWet条件とDry条件の結果から、TDI法、熱容量による読み取り、クニックによる読み取りを実施した  $\theta_{JC}$  抽出結果を以下に示す。

##### 3.1.1 TDI model

Fig. 4にDetail modelの数値解析の結果より得られた構造関数を示す。Wet条件とDry条件の分岐点をT3Ster-Masterを用いて  $\theta_{JC}$  を算出すると、0.32 K/Wとなる。TDI法の定義に従い、過渡熱抵抗で  $\theta_{JC}$  を算出した場合、本モデルでは0.32 K/Wで一致している。

### 3.1.2 Thermal capacity model

Thermal capacity modelのための熱容量を算出する。ジャンクションの放熱に寄与する部位であるChipとLead frameの熱容量を算出するが、Fig. 5に示すDetail modelのZ方向の断面熱流束分布より、Lead frameの上面端部は放熱に寄与していないことがわかる。そこで、熱容量の算出に用いるLead frameの体積はChipから45度の角度で下面へ広がる四角錐台として計算する。Table 2にChipと四角錐台におけるLead frameの熱容量を示す。算出した熱容量0.13 J/Kを用いてFig. 4の構造関数から $\theta_{JC}$ は0.38 K/Wと読み取れる。

### 3.1.3 Knick model

クニックを明確にするため、Fig. 6に微分構造関数を示す。読み取りに用いる構造関数はWet条件にパッケージケース面を示すクニックが明確に見られないため、Dry条件とする。 $\theta_{JC}$ は0.28 K/Wから0.42 K/Wの範囲と読み取れる。

### 3.2 検証結果

各手法で抽出した $\theta_{JC}$ による熱回路網モデルを用いた数値解析を実施し、得られたジャンクション温度の結果をFig. 7に示す。Detail modelに最も一致したのは、Thermal capacity modelで環境温度35°Cからの温度上昇と比較すると約0.2%の乖離である。次点は、TDI modelで約-3.5%の乖離である。Knick modelは、前記二つのモデルを内包し約-5.9%から約2.6%の乖離である。

この結果は実測における検証と同一の傾向を示している。また一見してThermal capacity modelの精度が高いが、数値解析であるため熱容量を正確に算出できたことに注意する必要がある。

またKnick modelにおいては、前述したようにWet条件のように接触熱抵抗が小さい場合、パッケージケース面を表すクニックは読み取れない。これはLead frameとCold plateの熱特性が似ているためと考えられる。従ってDry条件のように大きな接触熱抵抗を設ける必要がある。そこで接触熱抵抗の影響を確認するた

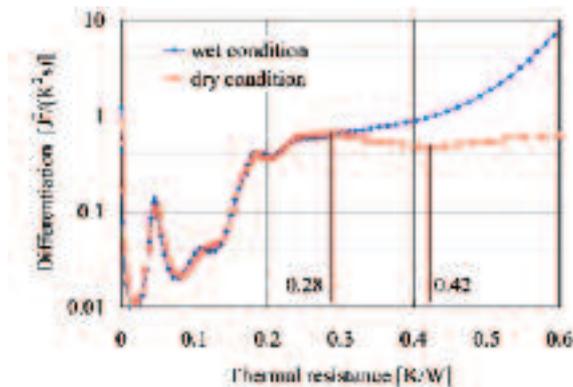


Fig. 6 Differential structure function

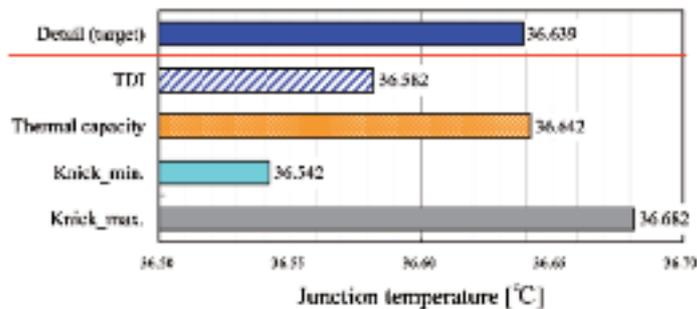


Fig. 7 Junction temperature of the RC network model by each extracting method

Table 2 Thermal capacity

	Chip	Lead frame	Total
Density [kg/m <sup>3</sup> ]	2330	8850	
Volume [m <sup>3</sup> ]	3.36 × 10 <sup>-3</sup>	3.86 × 10 <sup>-6</sup>	
Specific heat [J/(kg · K)]	700	365	
Thermal capacity [J/K]	0.00548	0.125	0.130

評価・解析

め、Fig. 8に接触熱抵抗を変化させた場合の微分構造関数を示す。接触熱抵抗が大きくなるにつれ、読み取り範囲の最大値も大きくなるのがわかる。

TDI modelは、Detail modelに対して小さい結果となっているが、クニックによる読み取りと同様に、Fig. 9に示すよう接触熱抵抗が大きくなるにつれ、Wet条件と各Dry条件の過渡熱抵抗（TDI法の定義より構造関数の分岐点より大きい値を示したため採用）の分岐点は大きくなり、 $\theta_{JC}$ はDetail modelに近づく。

実測における精度を向上させるためには、熱容量からの読み取りにおいては放熱経路の適切な予測、TDI法とクニックによる読み取りにおいては、Dry条件の定義が必要である。但し最も精度が高い各部位の熱容量から読み取る抽出手法は、半導体デバイスのChipサイズや正確な物性値情報を要するため、ユーザーには不向きであると言える。また当然Detail modelの情報は更に入手が困難である。故に、ユーザーによる熱設計においてはTDI法をTyp.（代表値）とし、クニックによる読み取り値の最大値を最悪値として扱うことが可能である。

#### 4. むすび

TDI法、熱容量からの読み取りまたはクニックによる読み取りのどれも乖離量は小さい $\theta_{JC}$ の測定および抽出手法であることが確認できた。また構造関数から熱回路網モデルを作成して数値解析に適用できることが確認できた。これにより、精度が高く可視化された熱設計が可能となり、適正なマージンで製品設計ができる。また、半導体メーカーとそのユーザーで $\theta_{JC}$ の測定手法を統一することと、半導体デバイスの熱特性を熱回路網により記述することが業界標準となることが望まれる。

#### <参考文献>

- 1) JESD51-14, “Transient Dual Interface Test Method for the Measurement of the Thermal Resistance Junction to Case of Semiconductor Devices with Heat Flow Trough a Single Path”, (November 2010)

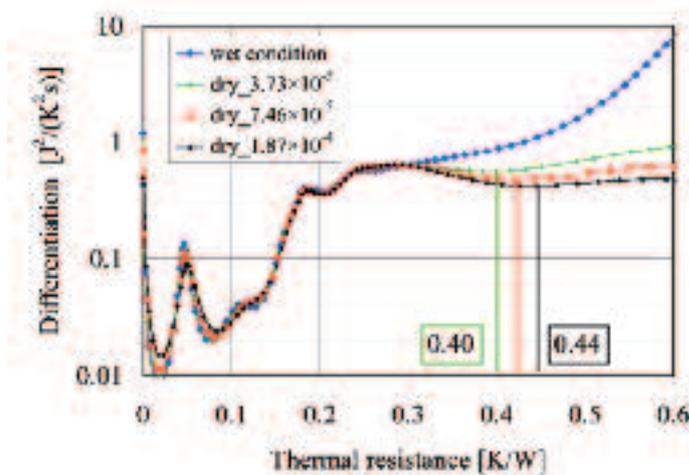


Fig. 8 Differential structure function change with thermal contact resistance

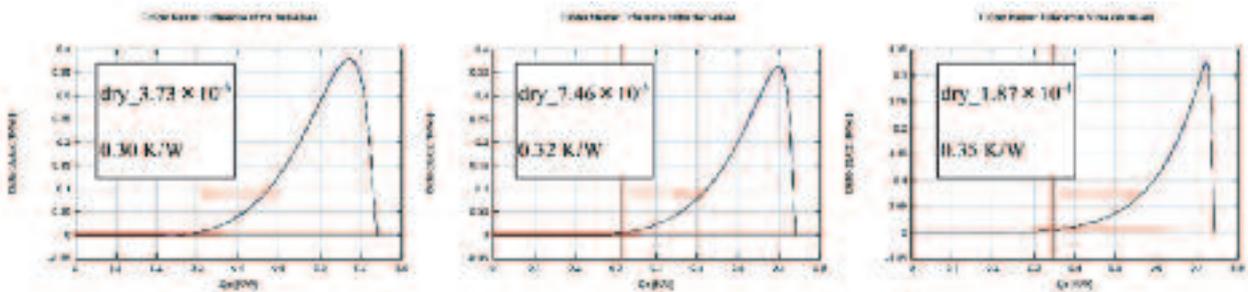


Fig. 9 Separation point of TDI by T3Ster-Master

- 2) Takuya, S. and Noritaka, I., Tetsuya, I. “Proposal to International Standard of Thermal Resistance Junction to Case ( $\theta_{JC}$ ) of Semiconductor Devices”, Thermal Science & Engineering, Vol.23 No.1 (2015), p.1-4
- 3) FloTHERM® Version fth10.1
- 4) T3Ster®-Master Version T3M 2.2

---

<著 者>



篠田 卓也  
(しのだ たくや)  
技術開発センター  
DP-EDA改革室  
電子設計のフロントロー  
ディング開発に従事



井上 鑑孝  
(いのうえ のりたか)  
先端研究部  
生体分子のシミュレーション  
技術開発に従事



伊藤 哲也  
(いとう てつや)  
株式会社エクシード  
電子制御機器の熱流体解析に  
従事