

# パワー半導体モジュールのマルチフィジックスシミュレーション

## Multi-physics Simulation Methods for Power Semiconductor Modules

山田 靖\*、加藤拓磨\*、水野元博\*、村瀬寛弥\*

Yasushi Yamada, Takuma Kato, Motohiro Mizuno, Tomoya Murase

### Summary

Multi-physics simulation methods for power semiconductor modules have been studied. Thermo-mechanical simulations have been carried out using conventional finite element method, consequently some relationships were observed. Electro-thermal simulation was examined using RC thermal models on an electronic circuit simulator including thermal dependency of the power devices.

キーワード：パワー半導体, モジュール, シミュレーション

Keywords : Power Semiconductor, Module, Simulation

### 1. はじめに

地球温暖化の主な原因である CO<sub>2</sub> の総排出量に対して、自動車等の輸送部門の占める割合は 20%程度<sup>1)</sup> と大きく、自動車からの CO<sub>2</sub> 排出抑制技術の開発は重要な課題となっている。また、NO<sub>x</sub> 等の自動車から有害ガスの排出量は、1 台あたりでは減少しているものの、自動車総数は増加しているため、都市部における有害排ガス濃度は横ばいの状況にある<sup>2)</sup>。今後、アジア等での自動車台数の増加を考慮すると、電気自動車やハイブリッド車のように、自動車の走行に電気を用いるものは有力な方策であり、本格的な普及期を迎えている。

電気自動車では、直流である電池から、モータを駆動するための三相交流を作り出し、さらに刻々とその回転数を変化させるために、インバータが用いられる。そのインバータには、パワー半導体素子を多数実装した、パワー半導体モジュール (Fig. 1) が用いられる<sup>3)</sup>。このモジュールは、電力変換回路を構成することに加え、半導体素子で生じる熱を効率良く冷却媒体に伝えること、冷熱サイクルやパワーサイクルといった環境・負荷変動に対して十分な信頼性を有することが必要である。

現状の Si を用いたパワー半導体素子では、その材料物性上、低損失化の限界に近づいていることに加え、温度上限は 150°C 前後である。そこで近年では、ワイドバンドギャップ半導体である SiC や GaN を用いた素子の研究が盛んになっている。これらの素子では、さらなる低損失化に加え、200°C 以上の高温動作が期待できる<sup>4-5)</sup>。しかし半導体素子が高温になれば、冷間時との温度差が大きいだけでなく、温度分布も大きくなるため、配線、絶縁層、冷却器などの実装構造に、大きな熱応力が生じ、劣化や破壊が懸念される。従って、信頼性を確保するために、実装構造や材料の検討が重要になっている。

その際、構造を作製して評価することに加え、シミュレーションにより、仮想的な構造、材料物性、あるいは動作条件を設定し、諸特性を計算により求めることは、開発期間の短縮や、材料に対する要求や方向性を示すのに大変有用である。

パワー半導体モジュールで用いるシミュレーションとしては、伝熱、構造、電気(回路)の 3 つが代表的であり、それぞれ単独では広く用いられている。それらの特性は、Fig. 2 に示すように互いが関係しており、連成して解析するマルチフィジックスシミュレーションが必要となる<sup>6-10)</sup>。しかし、一般にスイッチング特

\* 大同大学 工学部電気電子工学科

性や素子の温度依存性など、全てを連成して計算することは容易ではない。

本論文では、パワー半導体モジュールを検討する上で有用と思われる2つずつの特性を連成させた、伝熱-構造、および電気(回路)-伝熱のマルチフィジックスシミュレーションに関して試みたので報告する。

## 2. 各シミュレーションの概要

### 2.1 伝熱シミュレーション

パワー半導体モジュールにおける伝熱シミュレーションは、有限要素法を用いた3次元解析が一般的である。試料の構造をモデル化し、構成材料の熱物性値、境界条件、発熱条件等を入れれば、各部の温度を求めることができる。しかし、冷却器の詳細な構造をモデル化し、流体解析により性能を求めることは煩雑なため、実験を併用して熱伝達係数を求め、それを用いることが多い。

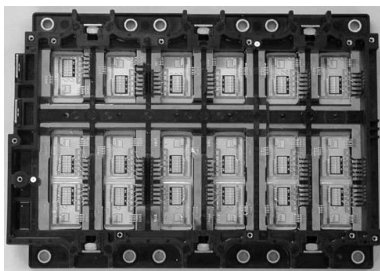


Fig. 1 パワー半導体モジュール

### 2.2 構造シミュレーション

パワー半導体モジュールでは、一般に、熱膨張係数の異なる材料を積層することが多い。そこに温度サイクルがかかると、熱応力を生じ、変形や破壊を生じることがある。そこで一般に有限要素法を用いて、実装材料のヤング率や熱膨張係数などの機械的物性値を入力し、温度が変化した時の応力や変形を求める。なお、材料が非線形的な挙動を示す場合は、数表や構成式などを用いる。

### 2.3 電気(回路)シミュレーション

パワー半導体モジュールは、その内部構造が電力変換回路を構成している。そこで、パワー半導体のモデルに配線のモデルを加え、スイッチング動作時の電圧、電流などを求める。なお、パワー半導体のモデルは、その挙動が複雑であるために、多数のパラメータを最適化して、実物の挙動にフィッティングして用いる。

## 3. マルチフィジックスシミュレーションの概要と解析例

### 3.1 伝熱-構造連成シミュレーション

伝熱と構造を連成させたシミュレーションは、有限要素法を用いて行うことができる。伝熱解析に用いる熱物性値も若干の応力依存性を示すが、パワー半導体モジュールで用いる温度範囲では大きくないため、始めに伝熱解析を行ない、その結果である各部の温度情報を構造解析に送ることにより、連成解析ができる。

#### 3.1.1 温度分布を用いた構造解析

パワー半導体モジュールでは、搭載機器の始動と共に、全体の温度がほぼ一様にゆっくりと上昇するモードと、大電流のスイッチングに伴い、半導体のみが発熱し、大きな温度分布が生じるモードが重なる。それらは温度分布が異なるために、変形や応力の状態も異なる。そこで、半導体を基板に接合したモデルについて定常伝熱解析と構造解析をリンクして行った。なお、本研究では解析手法を検討するため、敢えて熱膨張係数差の大きな構造を対象とした。

Fig.3に解析モデルを示す。半導体上面に熱流束を、一方、基板下面に熱伝達係数を与え、各部の温度を求めた(Fig.4)。その結果を用いて構造解析し、各部の変

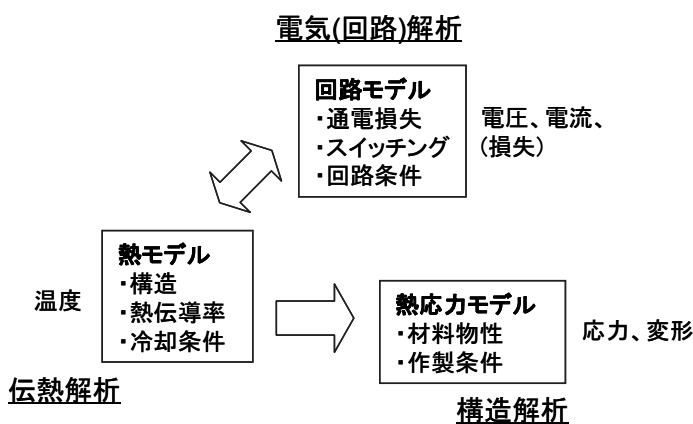


Fig. 2 マルチフィジックスシミュレーションの概要

形量を求めた結果を Fig.5 に示す。温度が上昇することで各部が伸びるが、熱膨張係数差があるため、上面の変形は少ないが、下面はかなり下に凸に変形する。

比較のため、温度が一様に変化した場合の変形量を Fig. 6 に示す。この場合は、熱膨張係数差に伴う単純な反りとなる。Fig. 5 と 6 を比較すると、上面の変形の様子が異なることがわかる。

### 3.1.2 面内の熱伝達係数を不均一にした場合の変形

パワー半導体モジュールでは、半導体素子の熱流束が高いために、大きな温度分布を生じ、一般に素子中央付近が最高温度となる。半導体素子の温度上限は最高温度で決まるため、仮に端部の温度が上がったとしても、中心付近の温度下げたいニーズがある。

そこで、噴流式など半導体素子中央付近の冷却性能を高めたものを仮定し、下面の熱伝達係数を不均一にした場合の変形解析を試みた。

Fig.7 に示すように、下面を中心付近と周辺部分の2区画に分け、それぞれが同一面積になるようにし、両者の熱伝達係数の和が一定値になるように解析条件を設定した。そして、伝熱解析により温度分布を求め、引き続き構造解析により変形量を求めた。その結果、Fig. 8 に示すように、中心付近の熱伝達係数が一定の場合に、変形量が最小になることがわかった。なお、同図中には、熱伝達係数の設定を四角形にした場合も示すが、両者にはほとんど差は見られなかった。

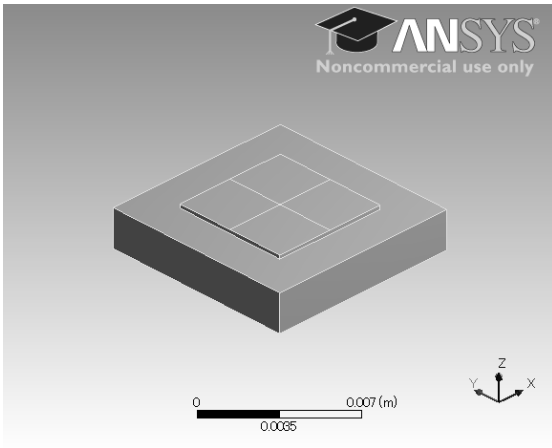


Fig. 3 解析モデル  
 上板 : Si, □6mm, t=0.2mm  
 下板 : Al, □10mm, t=2mm

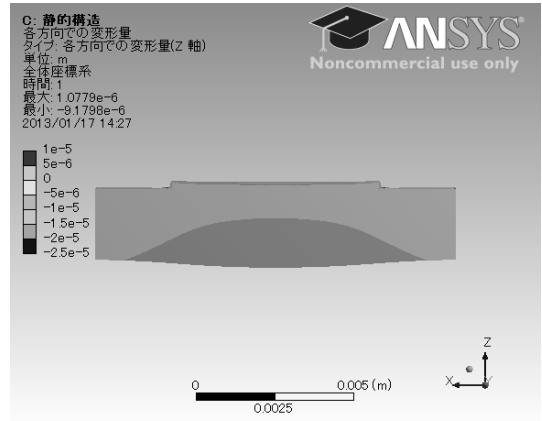


Fig. 5 変形量(温度分布がある場合)

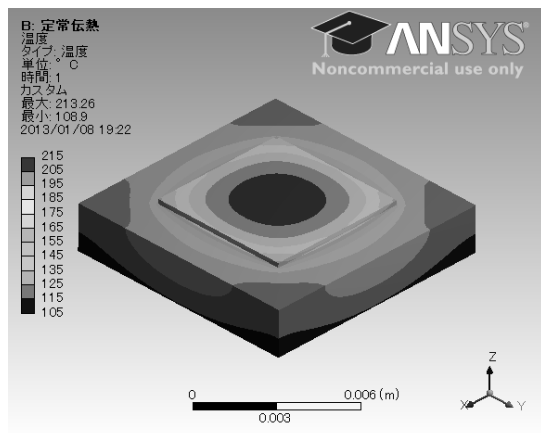


Fig. 4 伝熱解析結果

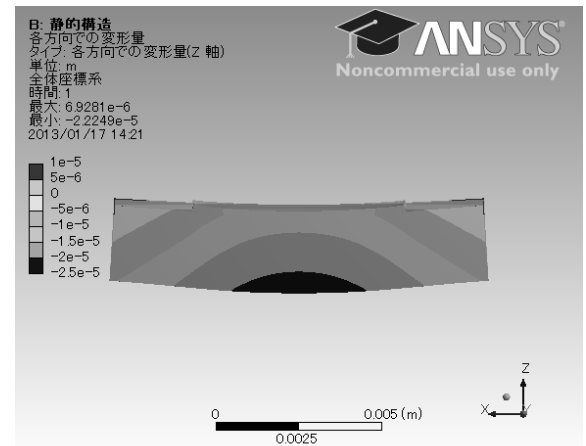


Fig. 6 変形量(一様の温度変化の場合)

### 3.1.3 熱流束を変えた場合の変形

パワー半導体モジュールでは、半導体素子での発熱量が変化すると温度分布も変わる。一般に、発熱量が大きければ、温度分布が大きくなる。そのように温度分布が変わると変形量も変わってくるため、伝熱-構造解析により、熱流束を変えた時の変形量を求めた。

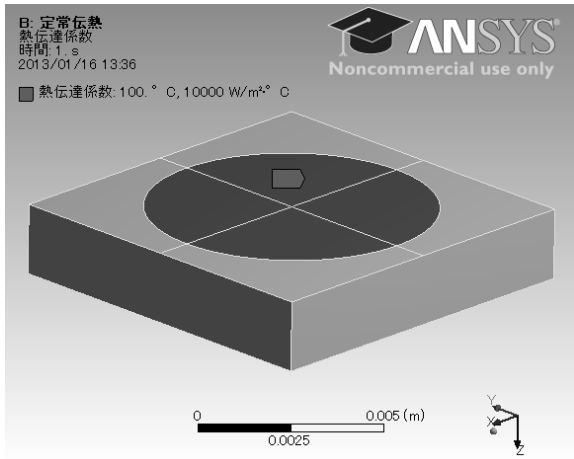


Fig. 7 熱伝達係数を不均一にした場合のモデル

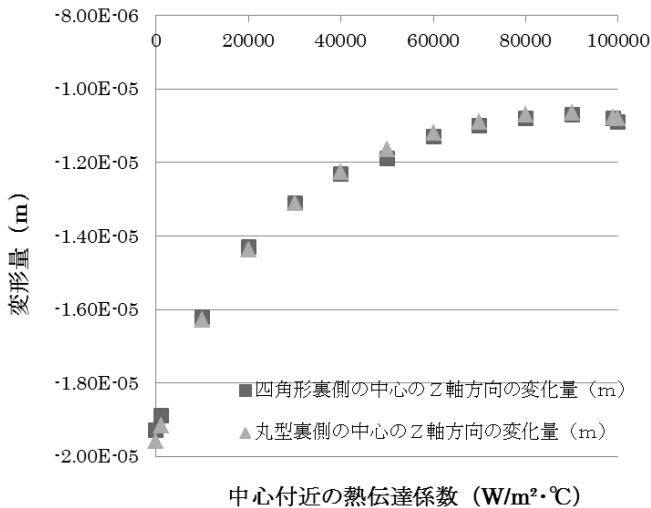


Fig. 8 熱伝達係数を不均一にした場合の変形量

Fig.9 に温度を、Fig.10 に変形量を示す。熱流束の増加と共に、温度が増加する。下面の変形量は単調に増加するが、一方、上面の変形量は、ある値を境に負から正に転じており、最適点がある様子が見られた。

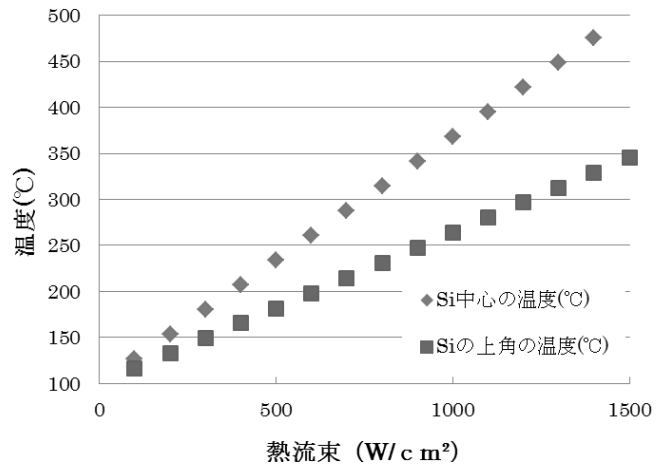


Fig. 9 熱流束を変えた場合の温度

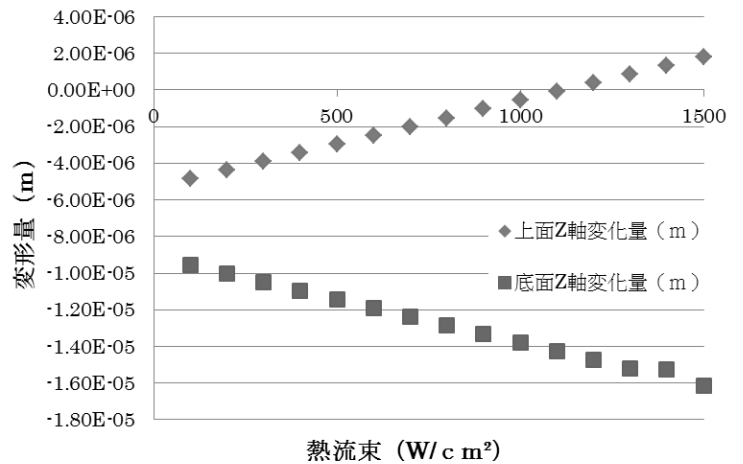


Fig. 10 熱流束を変えた場合の変形量

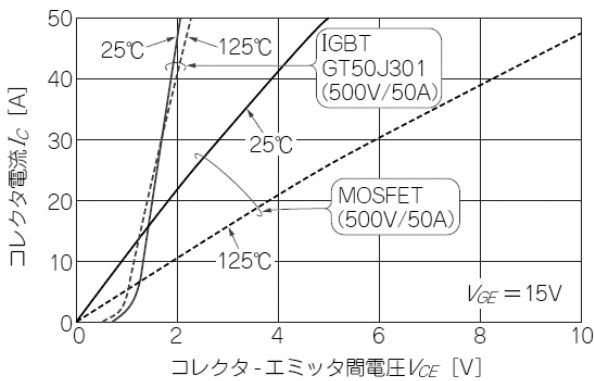
### 3.2 電気(回路)-伝熱連成シミュレーション

電気(回路)解析と伝熱解析では、プラットフォームが異なるため、一般に同時解析は難しい。さらに、半導体は温度依存性が大きく、発熱量はその半導体特性や回路条件に強く依存するために、両者を連成して解析することが必要となる。

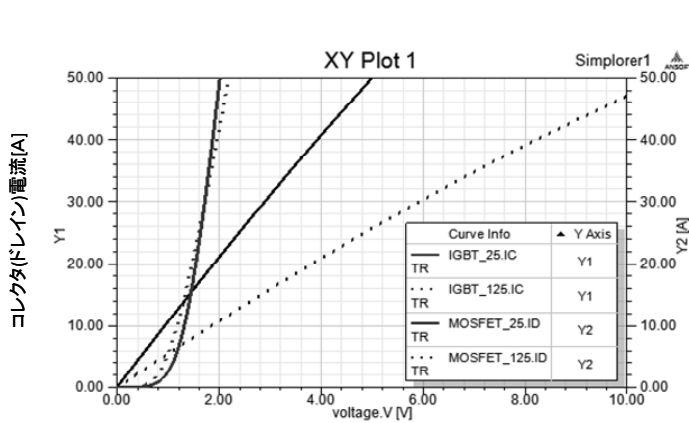
そこで、伝熱解析を有限要素法にて行った後に、回路シミュレータ上に R および C で熱インピーダンスをモデル化し、電流を発熱量に、電圧を温度にみなすことで、回路動作と連成させて、解析を行った。

ここでは、温度依存性の小さい IGBT(Insulated Gate Bipolar Transistor)と、温度依存性の大きい MOSFET(Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor)を題材として、スイッチング動作時の温度変化を求めた。

はじめに、IGBT と MOSFET の温度依存性のモデル化を行った。Fig.11 に示すように、文献値に近づけるために各素子のパラメータを適合させた。



(a) 文献値



(b) 本解析で用いたモデル

Fig. 11 半導体素子の温度依存性

次に、Fig.12 に示すような構成で、半導体素子を一定電流でスイッチングさせ、その際の温度変化を調べた。その結果、Fig.13 に示すように、MOSFET の場合は、時間と共に温度が増加した。これは、半導体素子の温度依存性が大きいためである。一方、IGBT の場合は、飽和する傾向が見られ、これは、温度依存性が小さいためと思われる。

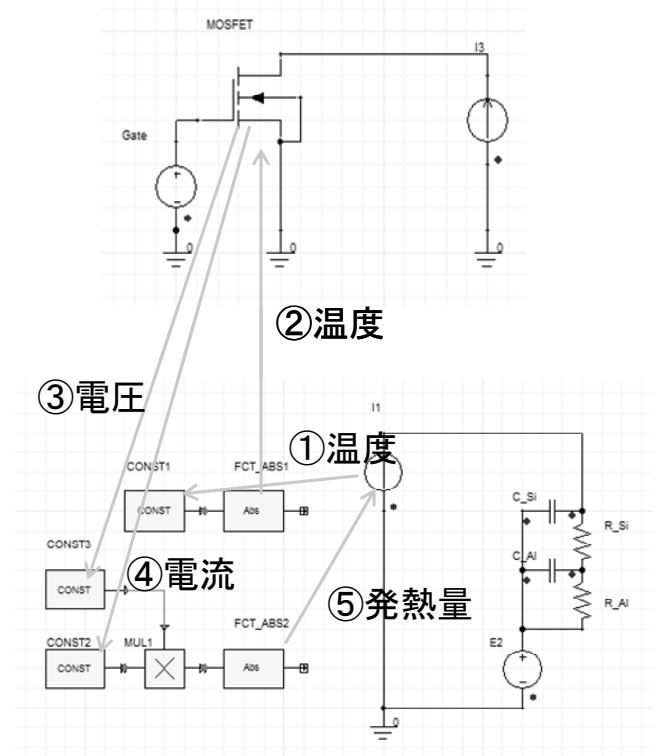


Fig. 12 電気(回路)-伝熱連成解析のモデル

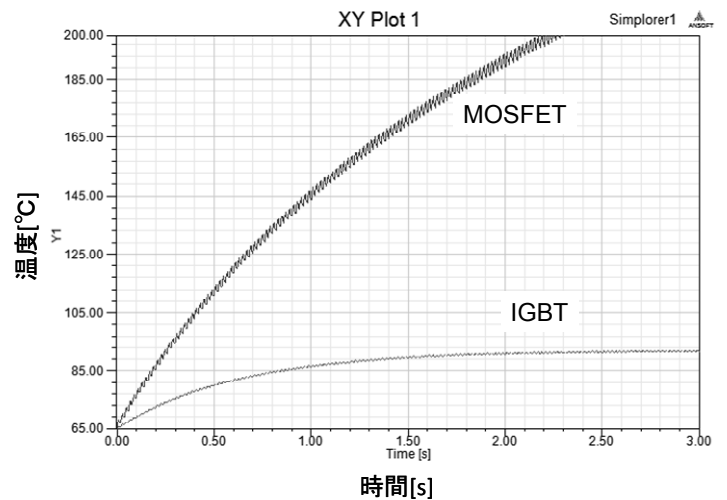


Fig. 13 解析結果

## 4. まとめ

パワー半導体モジュールのマルチフィジックスシミュレーション法として、伝熱・構造および電気(回路)・伝熱の連成シミュレーションを試み、その例を示した。今後はこれらの手法を活用して、実装構造、熱、および材料の研究などに役立てていく予定である。

## 謝辞

本研究は、大同大学平成 24 年度研究助成金を受けて遂行された。

## 参考文献

- 1) 国土交通省ホームページ <http://www.mlit.go.jp/>
- 2) 環境省「平成 17 年度大気汚染状況報告書」
- 3) Y. Yamada et al. “Pb-free high temperature solder joint for power semiconductor devices”, Trans. of JIEP, Vol.2, No.1 (2009) pp. 79–84.
- 4) 河野他 “高温で動作する低損失の 1.2kV 級 SiC 縦型パワー MOSFET, 東芝レビュー Vol.65, No.1 (2010) pp.23-26
- 5) 浅野他 “5kV 級 4H-SiC SEJFET のオン特性の温度依存性及びスイッチング特性, 電気学会論文誌 D, Vol.125, No.2 (2005) pp.147-152
- 6) M. Ciappa et. al. “Extraction of Accurate Thermal Compact Model for Fast Electro-Thermal Simulation of IGBT Modules in Hybrid Electric Vehicles, Microelectronics Reliability Vol.45, No.9-10 (2005) pp.1694-1699
- 7) Yun, C-S, et. al. “Thermal Component Model for Electrothermal Analysis of IGBT Module Systems” IEEE Trans. on Adv. Packg. Vol.24 (2001) pp.401-406
- 8) 碓井他 “電気・熱連成シミュレーションを用いたパワー半導体チップの温度分布評価 IEEJ Trans. IA, Vol.124, No.1 (2004) pp.108-115
- 9) T. Kojima, et.al. “High-accuracy Temperature Prediction of an HV Inverter Using Electro-thermal Coupling Simulation” R&D Review of Toyota CRDL, Vol.43, No.2 (2011) pp.5-12
- 10) K. Shinohara, et.al “Evaluation of Fatigue Life of Semiconductor Power Device by Power Cycle Test and Thermal Cycle Test Using Finite Element Analysis” Engineering Vol.2 (2010) pp.1006-1018