リアルタイム内部温度分布可視化システムの構築

長尾亮輔*，渡邉晃彦，大村一郎（九州工業大学）

Internal Temperature Distribution Imaging by Real-Time Simulation

Ryosuke Nagao*,　Akihiko Watanabe, Ichiro Omura (Kyushu Institute of Technology)

Internal temperature imaging system based on a real-time simulation concept is proposed. This system was constructed by combination of a LabVIEW monitoring system and a thermal simulator written with MATLAB. Internal temperature distribution was simulated simultaneously from monitored surface temperature. This system achieves non-destructive analysis of power devices in operation.

キーワード：パワーデバイス，熱シミュレーション，内部温度分布イメージング，リアルタイム・モニタリング
(Power device, Thermal simulation, Internal temperature distribution imaging, Real-time monitoring)

1.　はじめに

パワーデバイスの信頼性の確保には、故障解析が不可欠であり、パワーデバイスの電気特性・熱特性の取得や故障後の外観観察などの手法で行われている[1,2]。しかし、近年パワーデバイスの電流密度の増加に伴い配線構造の複雑化が進み、従来の方法では故障原因の追求が困難となっている[3]。

一方、リアルタイム・モニタリングはパワーデバイスの故障メカニズムを可視化するツールであり、近年研究が進んでいる[4-6]。リアルタイム・モニタリングは、動作中のデバイスの状態をリアルタイムで観測し、故障を引き起こすミクロな現象を明らかにする。これにより、材料物性とデバイス内部での劣化現象との関連性や、シミュレーションではモデル化できていない現象の抽出が可能となる[3]。

しかし、リアルタイム・モニタリングではパワーデバイス内部の温度分布や応力分布などの情報を可視化することができない。そこで本稿では、これらの情報を可視化するするツールとしてリアルタイム・シミュレーションを提案する。リアルタイム・シミュレーションは、リアルタイム・モニタリングにより得られるデータをパラメータとし、逐次シミュレーションモデルの計算を行うことで、パワーデバイス内部の状態をリアルタイムに可視化する。リアルタイム・モニタリングとリアルタイム・シミュレーションによる故障解析の概念を図1に示す。

本稿では、リアルタイム・シミュレーションにより、対象内部の温度分布をリアルタイムで可視化するシステムを構築し、パワーデバイスへの適用を検討する。

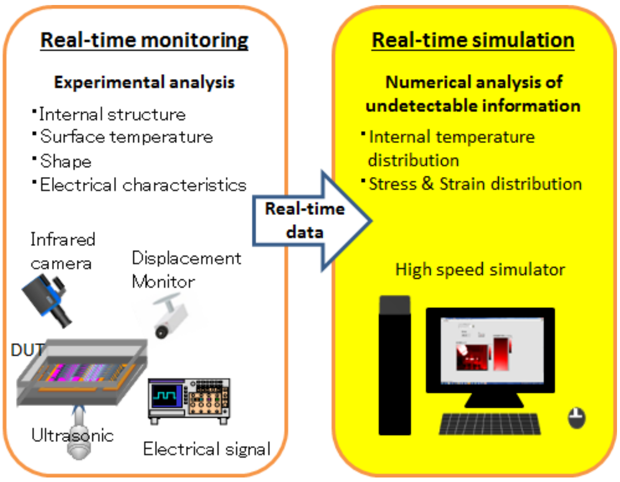


図１　リアルタイム故障解析の概念

Fig.1. Concept of real time failure analysis

2.　リアルタイム解析へ向けた熱シミュレータ

開発したリアルタイム内部温度分布可視化システムは、赤外線カメラにより測定した対象の表面温度をパラメータとし、シミュレーションモデルの計算をリアルタイムに行うことで対象内部の温度分布を逐次可視化する。本稿では、測定系を制御する LabVIEW に組み込み可能かつ高速な熱シミュレータの作成に MATLAB を用いる。作成した 2 次元熱シミュレータは、2 次元非定常熱伝導方程式

$$\rho c\frac{\partial T}{\partial t}=\lambda\left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 T}{\partial y^2}\right)+Q \quad \cdots\cdots\cdots\cdots(1)$$

ρ：密度、c：比熱、λ：熱伝導率、Q：発熱密度

を有限体積法により離散化し構築する[7]。この原理に基づき、3 次元モデルへの拡張も可能である。シミュレータのタイムステップ毎の計算時間は、計算モデルのメッシュ数お

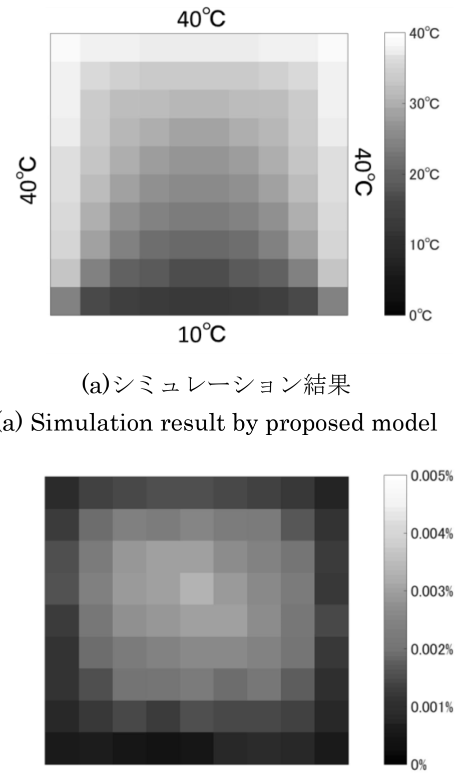
よび PC の処理速度に依存し、本稿で使用している PC の場合、モデルのメッシュ数が 2500（1cm 角のチップにおいて 0.2mm 角の空間分解能に相当）で、0.13 秒の計算時間が必要である。

作成したシミュレータで非定常計算を、材料：Si、モデルサイズ：1mm×1mm、初期温度：20℃、ディリクレ条件：左辺、上辺、右辺 40℃、下辺 10℃、タイムステップ：0.001 秒で行ったシミュレーション結果を図 2(a)に示す。また、同じ条件下における有限要素法熱シミュレータ（Icepak）の結果との相対誤差を図 2(b)に示す。両者の相対誤差は最大でも 0.005%となり、十分な精度があるといえる。

3. 固体内部温度分布のリアルタイム可視化

内部温度可視化システムは、図 3 に示すように赤外線カメラ 1 台と金コーティング鏡 2 枚、データ取得・解析用 PC から構成される。観測対象は金属ブロックで、図 4 の矢印で示す方向からヒートガンで一定の熱流を与え、金属ブロック断面の温度分布を可視化する。作成した 2 次元熱シミュレータは、可視化する対象の内部平面を構成する 4 辺の温度データをパラメータとし温度分布を求める。本稿では、金属ブロックの表面温度のうち 2 辺は赤外線カメラで直接測定し、残り 2 辺は金コーティング鏡を介して測定する。赤外線カメラで測定した表面温度データは LabVIEW で取り込まれ、熱シミュレータに入力される。熱シミュレータは金属ブロックの断面を 2 次元シミュレーションモデルとして解析する。今回の実験では、シミュレーションモデルのメッシュ数を 450(1mm 角の空間分解能)とし、表面温度の取得から測定対象内部の温度の計算、表示までを 0.5 秒毎に行う。

金属ブロックへ 60 秒間熱流を与え、その後自然対流により冷却した場合の金属ブロック断面の温度分布を図 5 に、また、図 4 に示す x 軸に沿った温度プロファイルを図 6 に示す。加熱時、温度勾配は時間と共に急峻になっていくことが確認できる。この分布はノイマン境界条件下における解析結果と類似している[8]。一方、自然対流による冷却時では、熱拡散により時間と共に金属ブロック内の温度分布が均一になっていくことが確認できる。



(a)シミュレーション結果

(a) Simulation result by proposed model

(b)Icepak との相対誤差

(b) Relative error comparing with Icepak

図 2　作成した熱シミュレータによる非定常解析結果

Fig.2. Results of nonsteady-state analysis

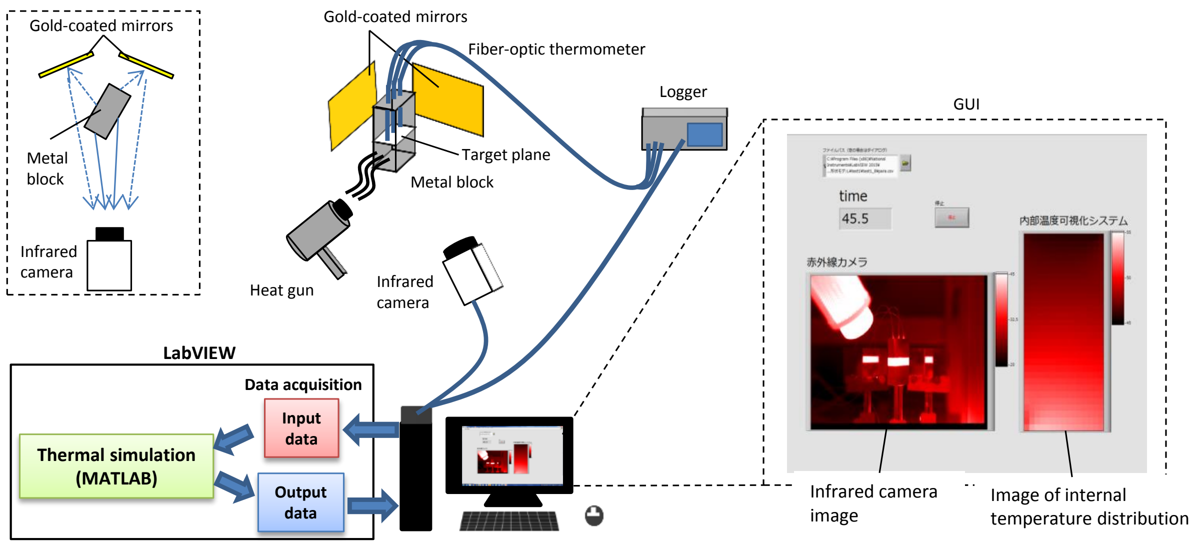


図 3　リアルタイム内部温度可視化システムの構成

Fig.3. Configuration of real-time internal temperature imaging system

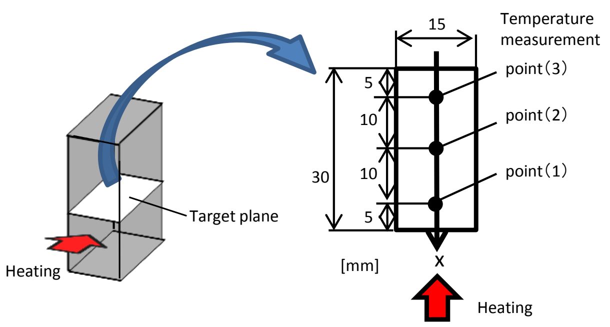


図 4　金属ブロックのサイズと温度計による温度測定点

Fig.4. Size of specimen metal and temperature measurement points

金属ブロック内部に光ファイバ温度計による温度測定点を 3 点設け、各点で内部温度可視化システムの測定と比較した結果を図 7 に示す。測定温度と内部温度可視化システムの結果は、時間変化の傾向に関して良好な一致が確認できる。しかし、両者の示す温度は加熱中ほぼ一致しているのに対し、冷却時は最大 8℃程度の差が生じている。この理由として、加熱時は熱流が金属ブロックの加熱面をほぼ一様に加熱するため、ブロック全体を 2 次元モデルで仮想的に解析できるのに対し、加熱停止後は 3 次元の熱伝導現象となり、2 次元シミュレーションでは現象が正確に現せないためである。この問題は、シミュレーションモデルを 3 次元へ拡張することで解決できる。

4.　パワーデバイス内部温度の可視化へ向けたシステムの拡張

今後、パワーデバイスの内部温度の可視化へ向けてシステムを拡張する。システムの構成を図 8 に示す。複数の赤外線カメラで測定対象の全表面温度を観測し、得られたリアルタイムデータをもとに 3 次元のシミュレーションモデルを計算することで、内部の温度分布を可視化する。今回は、対象へ外部から熱を与えたが、パワーデバイスの通電による自己発熱の場合でも、対象に印加された電力から発熱量を計算し、シミュレーションモデルに入力することで解析可能である。

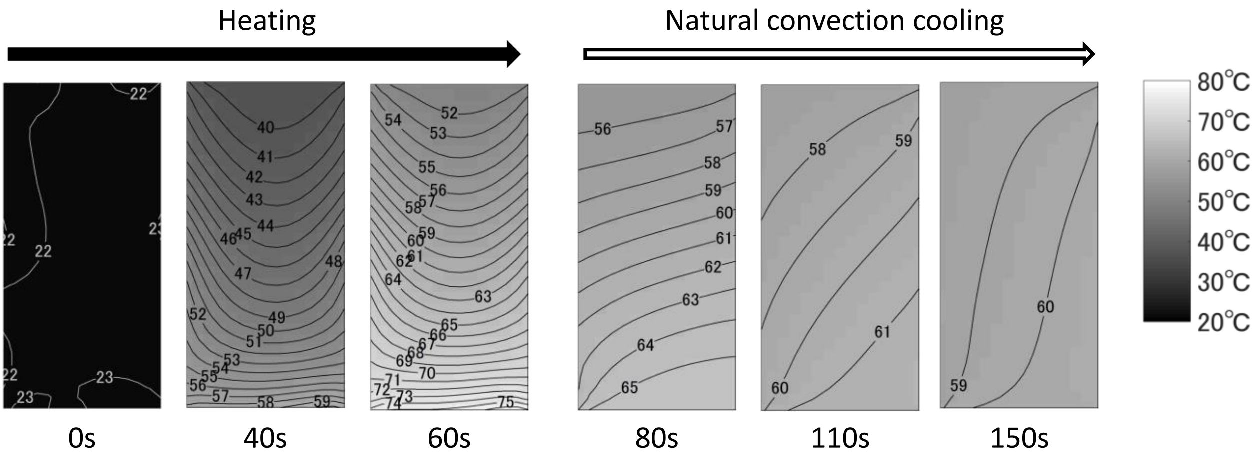
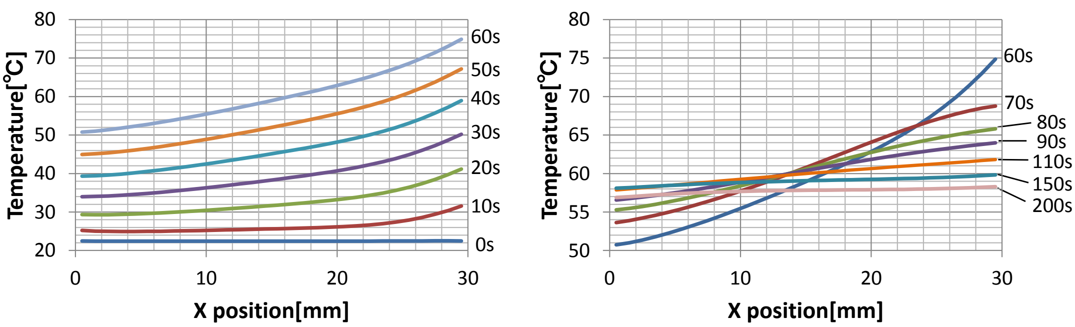


図 5　金属ブロック内部温度分布の時間変化

Fig.5. Time variation of the temperature distribution inside the metal block



(a)加熱時　　(b)自然対流による冷却時

(a)Heating　　(b)Natural convection cooling

図 6　金属ブロック内部温度のラインプロファイル

Fig.6. Temperature profile during heating process and natural convection cooling process.

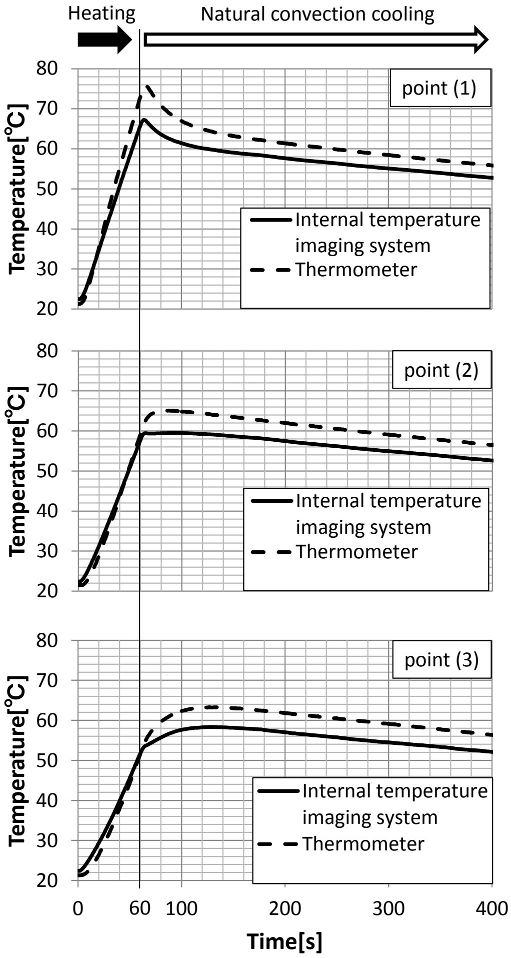


図 7　内部温度可視化システムと実測温度の比較
Fig.7. Temperature variation by internal temperature imaging system and thermometer

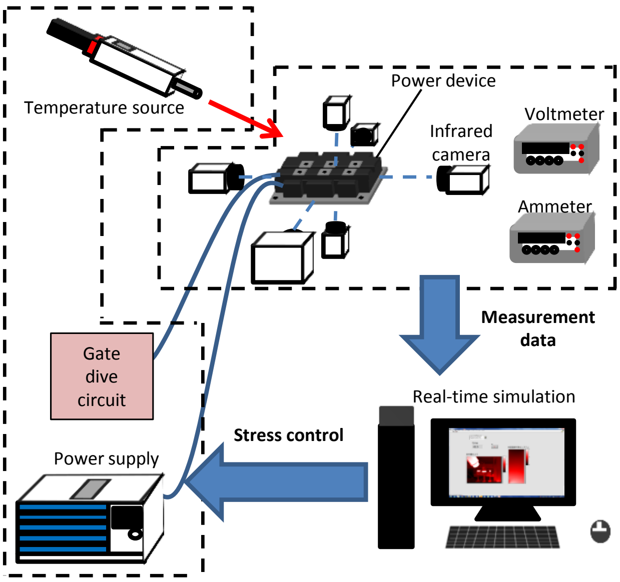


図 8.　パワーデバイス内部温度可視化システムの構成
Fig.8. Internal temperature imaging system for Power devices

5.　まとめ

本稿では、パワーデバイスの新しい故障解析手法として、リアルタイム・シミュレーションシステムを提案した。また、リアルタイム・シミュレーションによるリアルタイム内部温度分布可視化システムを開発した。

金属ブロックを用いたリアルタイム内部温度分布可視化システムを検証した結果、ブロック内部の温度分布とその時間変化が忠実に可視化されることを確認した。シミュレーションモデルを 3 次元へ拡張することで、より高精度の内部温度分布の可視化が可能である。

文　　献

（1） Josef Lutz , Heinrich Schlangenotto , Uwe Scheuermann , and Rik De Doncker : “Semconductor Power Dvices” (2011)
（2） Lukas Tinschert , Atle Rygg Ardal , Tilo Poller , Marco Bohllander , Magnar Hernes , and Josef Lutz : “Possible failure modes in Press-Pack IGBTs” , Microelectronics Reliability , Volume55 , pp903-911 (2015)
（3） 渡邉晃彦・大村一郎 :「パワー半導体の高信頼化を促進するリアルタイム・モニタリング技術」, SCAS NEWS, pp3-6 (2015)
（4） A.Watanabe , M.Tsukuda , and I.Omura : “Failure analysis of power devices real-time monitoring” , Microelectronics Reliability , pp2032-2035 (2015)
（5） 藤本宏海・中道聡・大村一郎 :「InAs 赤外線センサを用いたパワー半導体チップ用高速温度測定技術についての検討」, 電気学会電子デバイス/半導体電力変換合同研究会, (2010)
（6） H.Shiratsuchi , K.Matsushita , and I.Omura : “ IGBT chip current imaging system by scanning local magnetic field” , Microelectronics Reliability , pp1409-1412 (2013)
（7） 中山顕・桑原不二郎・許国良 :「熱流体力学―基礎から数値シミュレーションまで―」, pp136-137 (2002)
（8） Johon H.Lienhard : “A HEAT TRANSFER TEXTBOOK” , pp111-113 (1981)