

# マイクロフィルムセンサを用いた電流集中現象の画像化

松下 幸平\* 白土 博章 大村 一郎 (九州工業大学)

## IGBT chip current imaging system by scanning local magnetic field

Kohei Matsushita\*, Hiroaki Shiratsuchi, Ichiro Omura, (Kyushu Institute of Technology)

This paper develops an imaging system for current distribution on chips of a power device including an IGBT. The system is useful for finding current concentration that may cause a failure of the power device. This paper uses very thin and very compact, mass producible at low cost, micro-film sensor that can be measured non-destructive and non-contact, 4-axis robot, analog amplifier, digitizer, a function generator. It integrates with LabVIEW on the whole system, the measurement can be performed automatically.

**キーワード** : パワーデバイス, マイクロフィルムセンサ, IGBT, 画像化, LabVIEW  
(power device, micro-film sensor, IGBT, imaging, LabVIEW)

### 1. はじめに

IGBTを始めパワーデバイスの小型化・集積化が進められているが、それに対して測定技術の進歩が追従していない。より信頼性が高く高耐量なデバイスを実現するためには、デバイスの評価・測定技術の高度化が必要不可欠である。

パワーデバイスの故障は負荷短絡時などにチップの一部に電流が集中することによって起こると考えられている。電流集中を測定するためには、チップ上に1mm程度の間隔で電流を測定する必要があるが、CT(Current Transformer)などの従来の電流センサではサイズが大きいく(1cm~数cm程度)測定が難しい。また、デバイスの実装形態を変更することなく非破壊・非接触で測定する必要がある。

本研究では、4軸ロボットとマイクロフィルムセンサを用いた電流集中画像化システムを構築する。プリント基板加工技術を用いて、フレキシブル基板上に超小型コイルを形成したマイクロフィルムセンサを使用した。このマイクロフィルムセンサはパワーデバイスを非破壊・非接触で測定できる。また、IGBTチップ上のボンディングワイヤの近接磁場をスキャンし電流分布を測定できる。LabVIEWを用いてファンクションジェネレータと4軸ロボットの動作制御、デジタイザからのデータを収録する(図1)。表1にシステムの構成要素とその機能を示す。このシステムはLabVIEWを用いることで、電源回路、デジタイザ、ロボット制御を自動的に行うように設計されている。このシステムを構築することで電流集中現象の画像化を可能にした。

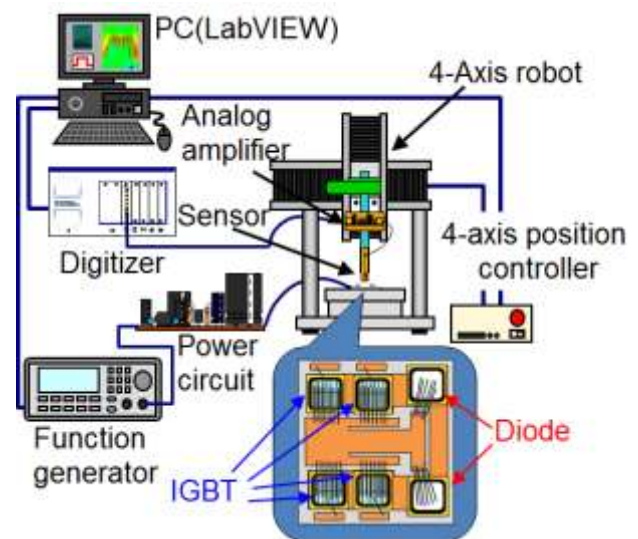


図1 電流集中画像化システム

Fig. 1 Scanning system for IGBT chip current imaging

表1 システム構成

Table.1 System configuration

構成要素	機能
マイクロフィルムセンサ	近接磁束の変化を電圧に変換
センサアンプ	センサの出力を磁束(電流)波形に変換
4軸スキャンロボット	高精度位置制御とスキャン
LabVIEW、デジタイザ	システム自動制御と高速波形処理

## 2. 測定センサとセンサアンプの設計

### 〈2-1〉 マイクロフィルムセンサの概要

図2にマイクロフィルムセンサを示す。これは  $60\mu\text{m}$  の厚さのポリミドフィルムに、2対のスパイラルコイルを銅でパターン化している<sup>(1)</sup>。スパイラルコイルのサイズは  $1.5\text{mm} \times 1.5\text{mm}$ 、銅パターンの線幅は  $70\mu\text{m}$  である。このコイルはプリント基板加工技術を用いて製造されるため、低価格で大量生産可能であるだけでなく、そのパターンの

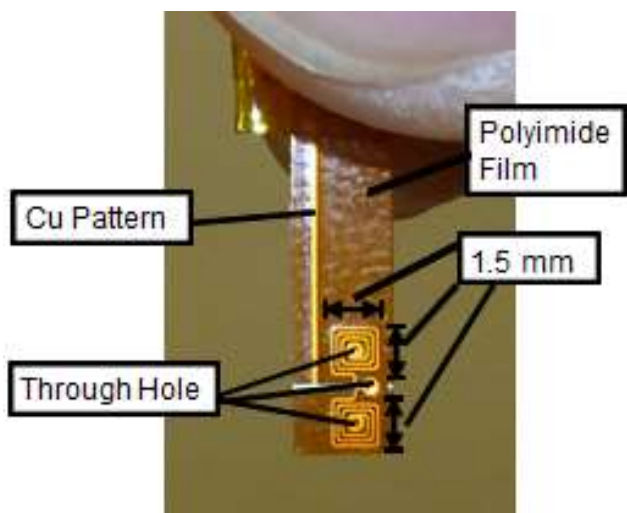


図2 マイクロフィルムセンサの詳細な画像  
Fig.2 Detailed picture of the coil sensor

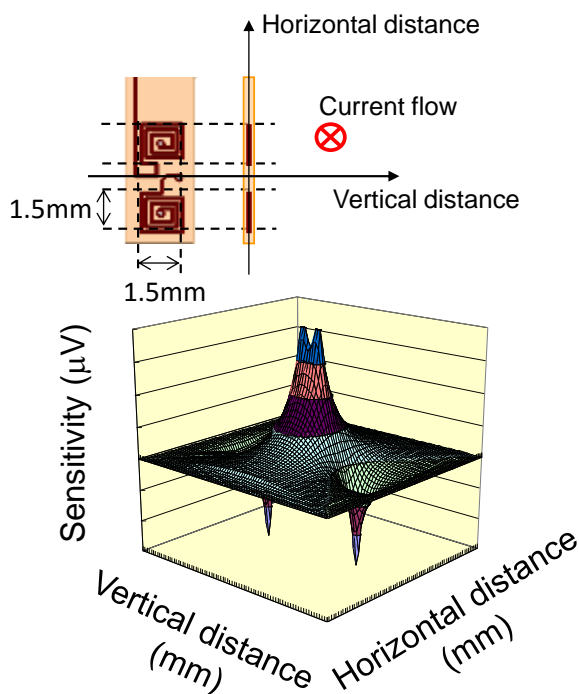


図3 ワイヤの位置に対するマイクロフィルムセンサの感度  
Fig.3 Sensitivity of the coil sensor for different wire positions

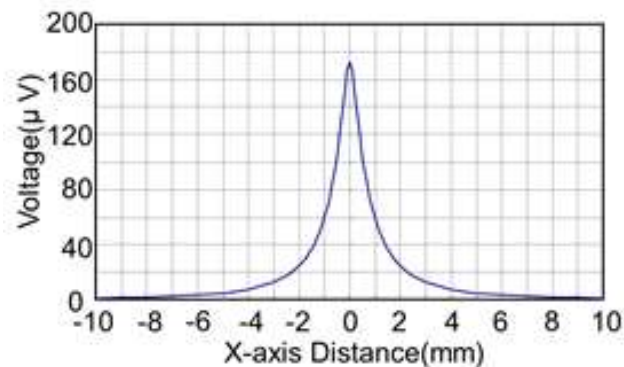


図4 ワイヤの位置に対するマイクロフィルムセンサの水平方向の感度

Fig.4 Sensitivity of the coil sensor for different wire positions

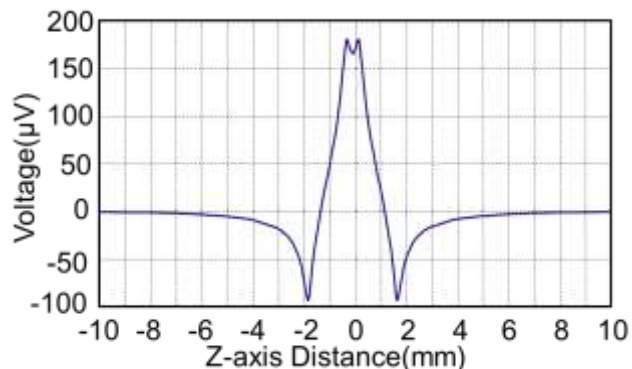


図5 ワイヤの位置に対するマイクロフィルムセンサの垂直方向の感度

Fig.5 Sensitivity of the coil sensor for different wire positions

精度は高い。マイクロフィルムセンサの帯域幅は  $110\text{MHz}$  である。これはマイクロフィルムセンサと同様に測定出来るログスキーコイル<sup>(2, 3, 4)</sup>に比べ広帯域である。

### 〈2-2〉 マイクロフィルムセンサの電流分布測定性能

ファラデーの法則によれば、コイルを横切る磁束の変化(近磁場コイルセンサ)に比例して電位差が生じる。マイクロフィルムセンサは、2対のスパイラルコイルが逆極性で接続されている。2対のコイルに平行に通過する磁束が作る電圧は相殺され、各コイルを通過する磁束の差の成分のみが出力電圧と生じる。したがって、2対のコイルの間に位置する電流が作る磁束のみを検出し、遠方の電流が作る磁束には影響しない。図3は、ワイヤ位置によるマイクロフィルムセンサの感度を示している。この図は、近傍の磁界が強く、2対のスパイラルコイルの構成により遠方の磁束が減少していることを示している。図4及び図5はそれぞれ、マイクロフィルムセンサを水平方向(x軸)と垂直方向(z軸)に移動させたとき、マイクロフィルムセンサとワイヤの位置との相対距離を示している。図4から水平方向の分

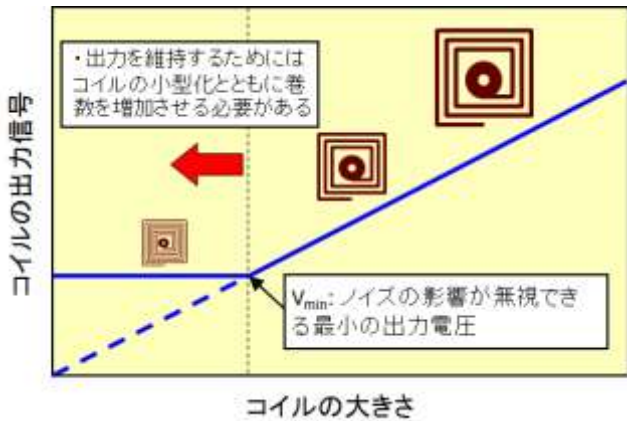


図6 コイルの小型化に伴う S/N 比への影響

Fig.6 Impact on the S / N ratio due to miniaturization of the coil

解能は 1.5mm である。同様に、図 5 から水平方向の分解能は上下方向に 2mm である。IGBT 上のボンディングワイヤは 1mm 間隔程度であり、図 4 よりセンサから 1mm 離れると感度は 63% 減少する。

〈2・3〉 センサとセンサアンプの設計

マイクロフィルムセンサはログスキーコイルと比べて出力信号が弱く、センサ自身だけでなくアンプの設計に留意する必要がある。コイルを小型化するとスケージング則により出力信号も小さくなり、ノイズレベルを下回るおそれ

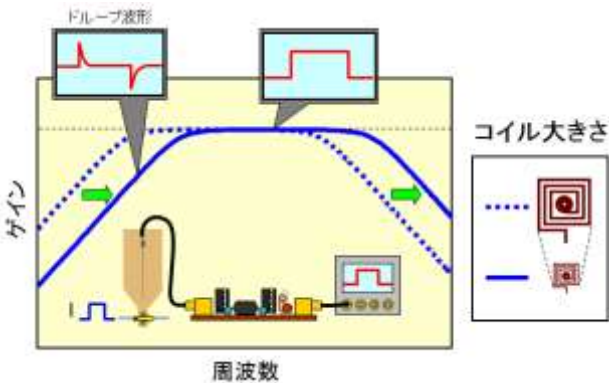


図7 センサとセンサアンプを含めたアナログ部分の周波数特性

Fig.7 Frequency characteristics of the analog portion including an amplifier and sensor

がある。コイルをさらに小型化するためには、パターンの巻数を増加させる必要がある。

次にセンサとセンサアンプ（積分アンプ）を含めたアナログ部分の周波数特性を図 7 に示す。マイクロフィルムセンサを小型化するとアナログ部分の周波数特性は高周波側へと移る。言い換えると、マイクロフィルムセンサを小型化してアナログ部分が最適な状態になるように設計することで、測定システムはより優れた高周波特性を持つようになる。マイクロフィルムセンサに誘起される電圧は電流の

時間微分に比例するため、電圧を積分することにより、電流を測定することができる。よって、マイクロフィルムセンサを用いたでは積分回路は必要不可欠である。しかし、コイルを小型化すると低周波側のゲインが減少してしまい、後述するドロープ現象が発生する。

〈2・4〉 デジタル演算処理を用いたドロープ補正技術

ドロープとは図 8 のようにアンプから出力される波形が時間の経過とともに徐々に減衰する現象のことである。この現象は積分回路のフィードバック部分のコンデンサに蓄えられた電荷がコンデンサと並列に接続された抵抗に流れることによって起こり、波形はフィードバック部の CR 時定数で減衰する。ドロープはコイルを小型化した場合や低周波の電流を測定する場合に顕著に現れる。この問題を解決するために本研究ではデジタル演算処理を用いてドロープ補正を施している。ドロープ補正技術を用いることで低周波側の特性もカバーされ幅広い周波数特性をもった電流分

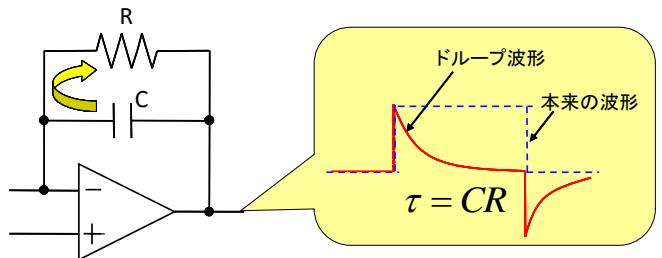


図8 ドロープ現象が起こるメカニズム

Fig.8 The mechanism that droop phenomenon occurs

布測定システムが実現できる。超小型のコイルを用いる必要がある本研究の電流分布測定システムではドロープ現象に対する対策は必須である。

そこで測定波形のデジタルデータを数学的演算処理することで解決している。測定電流と積分アンプの出力電圧の間には次式の関係が成り立つ。

$$I(t) \propto V(t) + \frac{1}{CR} \int V(t) dt \quad \dots \quad (1)$$

ここで  $I(t)$ ,  $V(t)$ ,  $C$ ,  $R$  はそれぞれ測定する電流、積分アンプの出力電圧、フィードバックコンデンサ、フィードバック抵抗である。右辺第二項の積分で波形の減衰した部分を求めており、それをドロープが発生しているセンサアンプの出力波形に加えることで測定電流波形を求めている。本稿で構築した電流測定システムでは、センサアンプからの出力信号をデジタルで集録して A/D 変換を行い、式(1)を演算するプログラムにより補正を行っている。高速なアナログ部分と、低周波領域をカバーするドロープ補正技術により本研究の電流測定システムは数 kHz から 110MHz までの幅広い周波数特性を実現している。



### 3. 電流測定システム

#### 〈3・1〉 センサアンプとデジタイザ

センサアンプは、マイクロフィルムセンサの近くに配置されるように設計され、ノイズを低減するためにシールドしている。増幅器の帯域幅は1MHzであり、時間分解能は1マイクロ秒である。60MS/秒の高速デジタイザは、図9に示すように、デジタルデータとしてアンプ出力を保存し、LabVIEWのGUIを有する制御PCに送信する。高速デジタイザを使うことにより、データの送信速度が速くなり測定時間の短縮に繋がる。

#### 〈3・2〉 LabVIEW を用いた測定と画像化プログラム

図9はLabVIEWにおける測定の順序を示している。マイクロフィルムセンサは指定した測定開始のポイントに移動し、デジタイザは電源回路からIGBTチップに電流を供給したときにマイクロフィルムセンサによって検出された磁束強度を出力する。マイクロフィルムセンサは全ての測定点の測定が終わるまで、次の測定点に繰り返し移動させる。測定のシーケンス全体は、LabVIEWのGUIで制御している。磁界分布の過渡的変化の3D/2DアニメーションはPC上に保存されたデータから計算する。

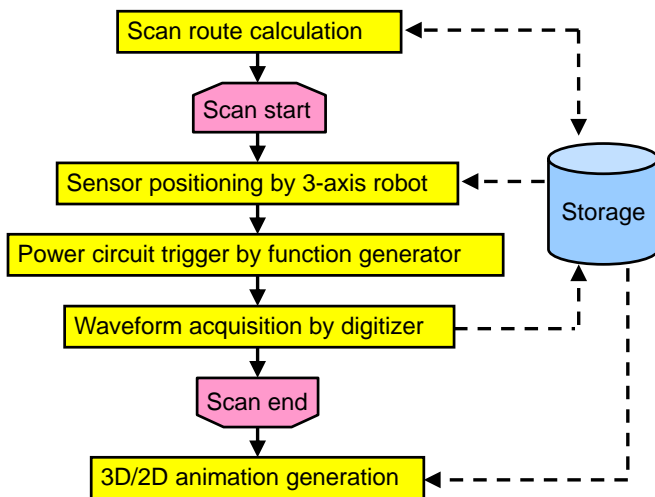


図9 LabVIEWによる電流測定のシーケンス

Fig.9 The sequence of current measurement by LabVIEW

### 4. 実験結果

図10はDBC基板上のIGBTチップ4つを40A下でスイッチングしたときに得られた画像である。提案したシステムはIGBTチップ上のボンディングワイヤに流れる電流により発生する磁界をスキャンし、そのデータを画像化することが出来た。磁場データは、これらの波形を用いて二次元画像に変換した。マイクロフィルムセンサは測定範囲データに基づいて、任意の間隔でIGBTチップ上を沿って移

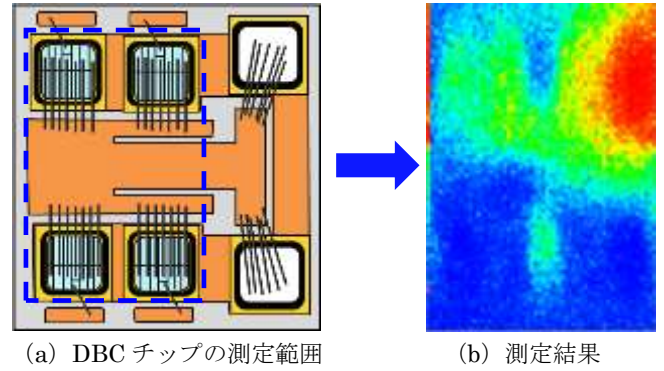


図10 DBCチップの測定結果

Fig.10 Magnetic field distribution with IGBT bonding wire currents (digital droop compensated)

動させる。この測定では、外部の電磁波による磁場への影響はごくわずかである。

### 6. 結論

本稿では、パワーデバイスの故障の原因となっている電流集中を画像化するため、4軸ロボットとマイクロフィルムセンサを用いた電流分布画像化システムを提案した。このシステムはチップ接続の変更や分解をすることなく、空間的及び時間領域の電流分布を測定出来る。

IGBTチップのスイッチング時の実験を行い、4つのIGBTチップ間で電流の集中が生じることを確認し、提案したシステムの有効性を明らかにした。

### 文 献

- (1) Y. Kasho, H. Hirai, M. Tsukuda, and I. Omura. Tiny-scale "stealth" current sensor to probe power semiconductor device failure. Proc. of 22th ESREF, pp. 1689-1692, 2011.
- (2) W. F. Ray et al. Developments in Rogowski Current Transducers. EPE'97, Aug. 9, 1997, pp. 3.308-3.312, 1997.
- (3) W. F. Ray and C. R. Hewson. High performance Rogowski current transducers. Conference Record of the 2000 IEEE, vol. 5, pp. 3083-3090, 2000.
- (4) Y. Ikeda et al. Non-destructive current measurement for surface mounted power MOSFET on VRM board using magnetic field probing technique. Proc. of ISPSD '09, pp. 65-68, 2009.