

# IGBT モジュール高信頼化に向けた チップ間電流不均衡計測技術の開発

山口 治之\*<sup>1</sup> 附田 正則<sup>2</sup> 渡邊 晃彦<sup>1</sup> 大村 一郎<sup>1</sup>

<sup>1</sup>九州工業大学 <sup>2</sup>アジア成長研究所

Development of current imbalance measurement technique among ships in IGBT module

Haruyuki Yamaguchi\*<sup>1</sup>, Masanori Tsukuda<sup>2</sup>, Akihiko Watanabe<sup>1</sup>, Ichiro Omura<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Kyushu Institute of Technology <sup>2</sup> Asian Growth Research Institute

IGBT modules need to have higher reliability since their demand is expanding. To realize highly reliable modules, an ultra-small PCB current probe was developed, which enables to measure current imbalance among chips without changing inside structure of the module. This technique can be applied to wiring design and built-in current sensing for highly reliable module.

キーワード：超小型 PCB 電流プローブ, IGBT, 電流不均衡, ロゴスキーコイル, 高信頼モジュール, 埋め込みセンサ  
(ultra-small PCB current probe, Insulated Gate Bipolar Transistor, current imbalance Rogowski coil, highly reliable module, built-in current sensing)

## 1. はじめに

IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) モジュールは省エネルギー社会のキーデバイスとして需要が拡大しており、今まで以上の信頼性が求められる。故障の少ない高信頼 IGBT モジュールを実現するためには、故障要因である短絡や経時劣化によって生じるチップ間の電流不均衡<sup>(1)</sup>を検出し、チップを保護できるよう、チップごとに流れる電流を計測する必要がある。チップ電流を計測する際、チップの実装状態を変更してしまうと、微小な回路パラメータの変化が生じ、チップに流れる本来の電流を正確に計測することができない。したがって、非破壊かつ回路パラメータを変化させずに、チップごとに流れる電流を計測する測定技術が求められる。

代表的な市販電流センサとして Current Transformer (CT)とロゴスキーコイル<sup>(2-5)</sup>が挙げられる。CT は外部磁界の影響を受けずに正確な電流測定ができるが、サイズが大きいためチップの実装状態を変更せずにチップ電流を測定することは困難である。また市販のロゴスキーコイルは非破壊・非接触でチップに流れる電流を測定できるが、高価なためチップごとの電流測定をする際にはコストがかかってしまう。

そこで本研究では、ロゴスキーコイルの原理を用いた超小型 PCB 電流プローブを開発した<sup>(6-7)</sup>。本プローブの仕様を表 1 に示す。この PCB 電流プローブ外径は 10.6mm で、厚さは

0.6mm と薄いため、チップの実装状態を変更せずにチップごとの電流測定が行える。この PCB 電流プローブはプリント基板加工技術を用いて PCB 基板 (FR4) 上にロゴスキーコイルを形成しているため、プローブの個体差が小さく、非常に安価である。

本稿では、開発した PCB 電流プローブを用いて、DBC 基板に実装されている IGBT チップの電流不均衡を検出できることを証明した。

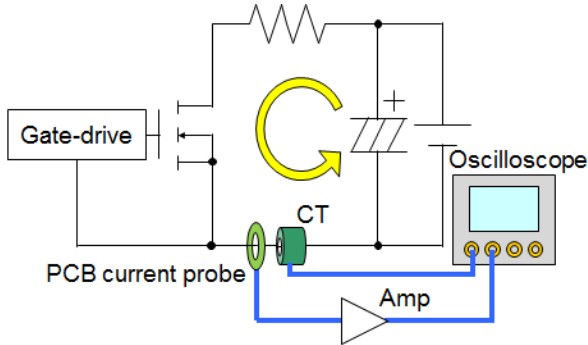
表 1 PCB 電流プローブの仕様  
Table 1 Specification of PCB current probe

外径	10.6mm
厚さ	0.6mm
コイルターン数	48 ターン
コイル幅	1mm

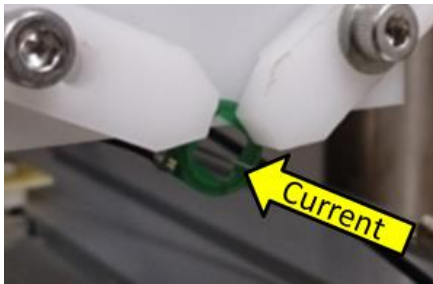
## 2. 超小型電流プローブ

### 〈2・1〉超小型 PCB 電流プローブの特性計測

PCB 電流プローブで誘起される電圧は電流の時間微分に比例するので、PCB 電流プローブからの出力信号を積分アンプに通すことにより、電流波形が得られる。本プローブとアンプを組み合わせた特性を計測するため、図 1 の実験回路<sup>(6)</sup>を用いて市販電流センサ (CT) と比較を行った。



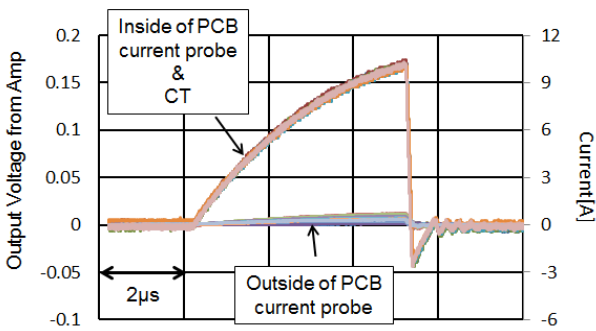
(a) 実験回路図



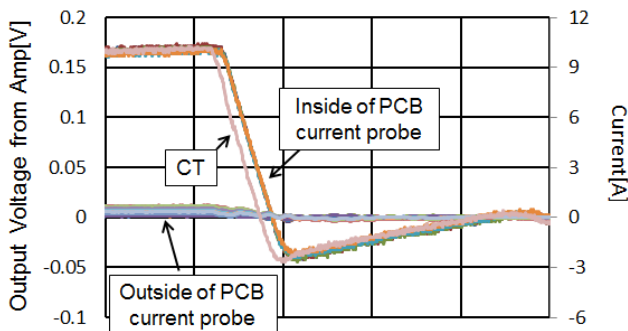
(b) 電流測定の様子

図 1. PCB 電流プローブを用いた電流計測実験

Fig. 1 Setup of current measurement



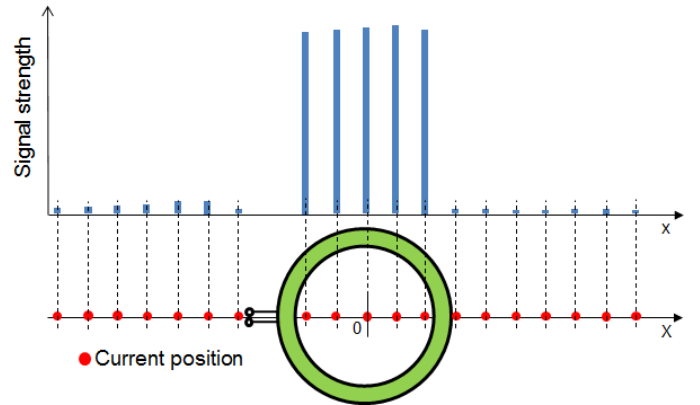
(a) PCB 電流プローブ出力波形 (積分増幅後)



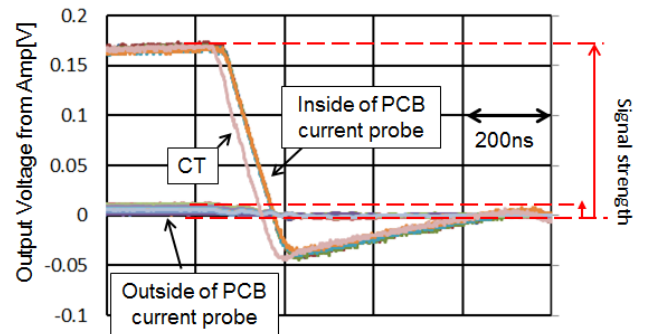
(b) ターンオフ部拡大波形

図 2 PCB 電流プローブによる電流計測結果

Fig. 2 Result of current measurement



(a) 各電流通過位置による PCB 電流プローブの信号強度 (積分増幅後)



(b) 信号強度算出定義

図 3 電流通過位置による PCB 電流プローブの信号強度 (積分増幅後)

Fig. 3 Signal strength depending on current position (After integrating amplifier)

観測波形を図 2 に示す。観測波形より、プローブ内を通った電流による PCB 電流プローブの信号波形 (積分増幅後) は CT の波形と非常によく一致していた。ただし、CT と比べて約 20ns の遅れが見られた。これはアンプの遅れと考えられる。

電流通過位置による PCB 電流プローブの信号強度 (積分増幅後) を図 3(a) 示す。この信号強度は図 3 (b) に示すように、各電流通過位置において、MOSFET のターンオフ時における PCB 電流プローブの最大出力値 (積分増幅後) を信号強度としている。プローブ内を通った電流による信号強度はプローブ外の電流によるものより非常に大きく、プローブ内の電流通過位置による信号強度の誤差は 2%~3% であった。プローブ外の電流における信号強度は PCB 電流プローブから遠くなるほど徐々に小さくなっており、信号強度の最大値はプローブ内信号強度の 7% であった。このことから、この PCB 電流プローブは CT と同等の波形観測ができ、外部磁界からの影響をほとんど受けないことがわかる。

## 〈2・2〉理論値との比較

ログスキーコイルの出力電圧はファラデーの法則に基づいている。ファラデーの法則によると、コイルが誘起する電圧はコイルを横切る磁束の変化に比例して電位差を生じる。また、アンペールの法則により磁束は電流に比例するので、ログスキーコイルからの出力は電流の時間変化に比例する<sup>(9)</sup>。

$$V = -n \frac{d\Phi}{dt} \quad (\text{ファラデーの法則})$$

$$= -n \frac{d(\mu HS)}{dt} = -n \frac{\mu S}{2\pi r} \cdot \frac{dI}{dt}$$

PCB 電流プローブの出力電圧理論値と実測値を比較した(図4)。その結果、開発した PCB 電流プローブの出力電圧はほぼ理論通りの出力を示した。

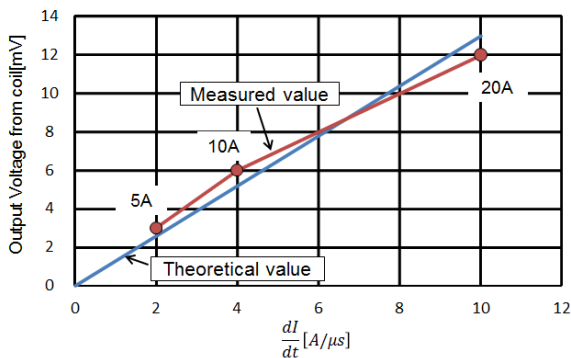


図4 PCB 電流プローブ出力電圧の理論値との比較  
Fig. 4 Theoretical analysis of output voltage

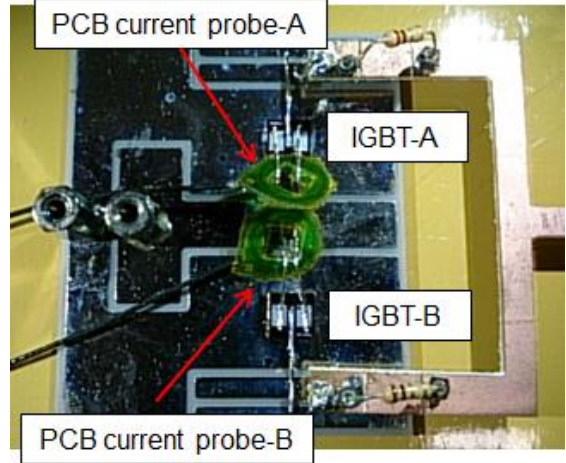
## 3. IGBT チップ間の電流不均衡計測

### 〈3・1〉IGBT チップごとの電流計測

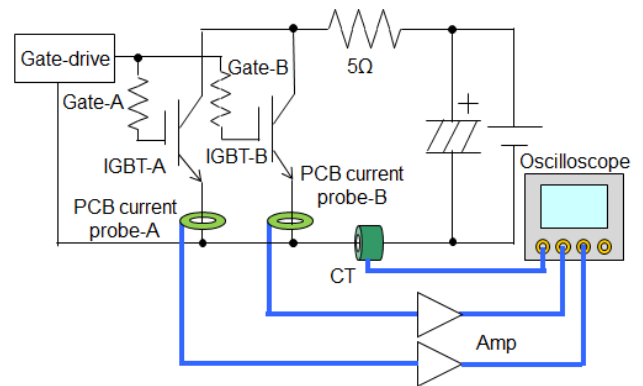
チップ間で生じる電流不均衡を計測するため、チップが実装されている DBC 基板に対して、図 5(a)のように PCB 電流プローブ内にワイヤーを通してボンディングを行い、PCB 電流プローブをセットした。計測回路を図 5(b)に示す。チップごとの電流不均衡は、ゲート抵抗の値を変え、IGBT のゲート電圧を意図的に変化させることで発生させている<sup>(10)</sup>。ゲート抵抗値は表 2 に示す。

表 2 電流計測時における各ゲート抵抗値  
Table 2 Gate resistance value

	Gate-A	Gate-B
条件 1	1Ω	1Ω
条件 2	1Ω	2Ω
条件 3	1Ω	0Ω (V <sub>G</sub> =-15V)



(a) PCB 電流プローブを DBC 基板に挿入した様子



(b) 電流不均衡計測回路図

図 5 電流不均衡計測実験

Fig. 5 Measurement circuit of imbalanced current

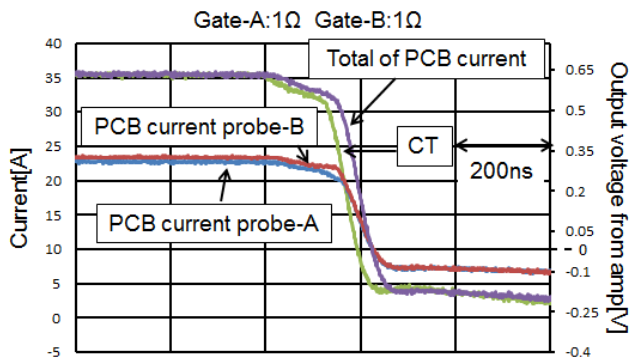
### 〈3・2〉電流不均衡計測

条件 1 での測定結果を図 6(a)に示す。PCB 電流プローブからの信号(積分増幅後)は CT 波形と比較的比較できるように、左右の縦軸を調整している。実際の PCB 電流プローブからの信号がマイナスの値を出力しているのは、積分アンプにおいてドループが発生しているからである。条件 1 ではゲート抵抗の値が同じなので、スイッチング波形に大きな変化はなく、2 つのチップに均等に電流が流れていることがわかる。ターンオフ時においてチップ間で電流の微小な違いが見られる。

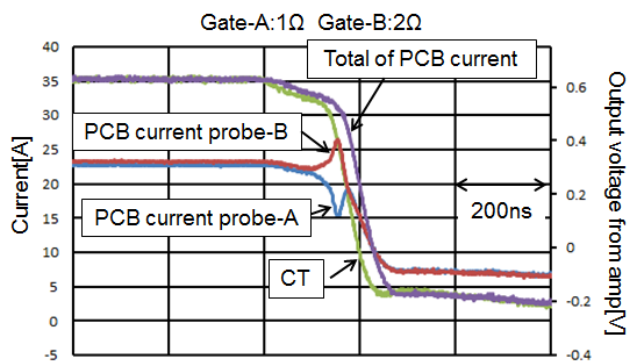
図 6(b)の波形は条件 2 での測定で得られたものである。図 6(b)ではターンオフ時に電流不均衡が確認できる。これは IGBT-B のゲート抵抗の値が IGBT-A よりも大きいため、ゲートの閾値に達するまでに時間がかかり、ターンオフ時に IGBT-B に電流が集中しているからである。

条件 3 での測定結果を図 6(c)に示す。IGBT-B に電流が流れないように、IGBT-B のゲートに -15V を印加している。PCB 電流プローブ-B からの信号がほとんど出力されていないので、電流は全て IGBT-A の方に流れていることが確

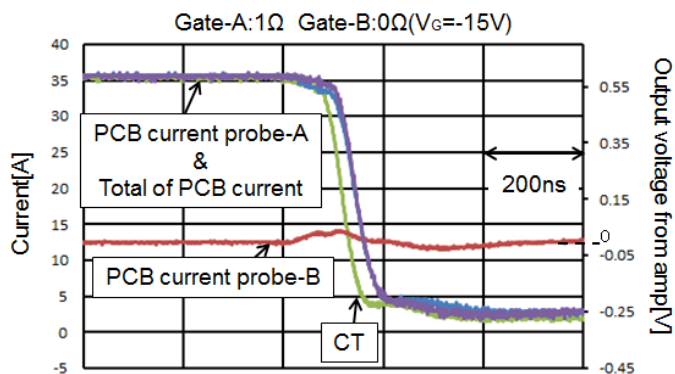
認できるが、ターンオフ時に PCB 電流プローブ-B から信号がわずかに出ている。これは、外部磁界の影響だと考えられる。



(a) 均一電流測定波形



(b) チップ間電流不均衡測定波形



(c) 1 チップに全電流が流れた時の測定波形

図 6 電流不均衡計測結果

Fig. 6 Result of imbalance current measurement

#### 4. 結論

本研究では、チップの実装状態を変更せずにチップ電流が測定できる超小型 PCB 電流プローブを開発した。この PCB 電流プローブは小さいながらも市販電流センサと同等の特性を有しており、外部磁界の影響はほとんど受けない。また、本プローブによりチップ間に生じる電流不均衡を計測できることを確認した。

#### 文 献

- (1) L. Dalessandro, N. Karrer, M. Ciappa, A. Castellazzi, W. Fichtner, "Online and Offline Isolated Current Monitoring of Parallel Switched High-Voltage Multi-Chip IGBT Modules", Power Electronics Specialists Conference, 2008. PESC 2008. IEEE, Pages 2600 -2606
- (2) C. R. Hewson, W. F. Ray and R. M. Davis, "Verification of Rogowski Current Transducer's Ability to Measure Fast Switching Transients", Applied Power Electronics Conference and Exposition, 2006. APEC '06. Twenty-First Annual IEEE
- (3) W. F. Ray, C. R. Hewson. "High Performance Rogowski Current Transducers" 35th IAS Annual Meeting and World Conference on Industrial Applications of Electrical Energy, vol.5, Pages 3083-3090
- (4) W. F. Ray et al. "Developments in Rogowski Current Transducers". EPE'97, Aug. 9, 1997, pp. 3.308-3.312, 1997
- (5) A. Ahmed, L. Coulbeck, A. Castellazzi and C. M. Johnson, "Design and test of a PCB Rogowski coil for very high di/dt detection", Power Electronics and Motion Control Conference (EPE/PEMC), 2012 15th International, DS1a.2-1 - DS1a.2-4
- (6) T. Guillod, D. Gerber and J. Biela, "Design of a PCB Rogowski Coil based on the PEEC Method", Integrated Power Electronics Systems, International Conference on, 2012 7<sup>th</sup>, Pages 1-6 (2012)
- (7) D. Gerber, T. Guillod, and J. Biela, "IGBT gate-drive with PCB Rogowski coil for improved short circuit detection and current turn-off capability", Pulsed Power Conference (PPC), 2011 IEEE, Pages 1539 - 1364
- (8) Yuya Kasho, Hidetoshi Hirai, Masanori Tsukuda, Ichiro Omura. "Tiny-scale "stealth" current sensor to probe power semiconductor device failure," Microelectronics Reliability, Volume 51, Issues 9-11, September-November 2011, Pages 1689-1692
- (9) D. A. Ward and J. La T. Exon, "Using Rogowski coils for transient current measurements" ENGINEERING SCIENCE AND EDUCATION JOURNAL, JUNE 1993, pp105-113
- (10) ABB Switzerland Ltd. Semiconductors, "Paralleling of IGBT modules", Application Note 5SYA 2098-00