

# 電流分布に基づくパワーモジュールの新しいスクリーニング法の提案

附田 正則\* (北九州市環境エレクトロニクス研究所)

結城 大介 朝長 大貴 金 亨燮 大村 一郎 (九州工業大学)

## Proposal of New Screening Method of Power Modules based on Current Distribution

Masanori Tsukuda\* (Green Electronics Research Institute, Kitakyushu)

Daisuke Yuki, Hiroki Tomonaga, Hyoungeop Kim, Ichiro Omura (Kyushu Institute of Technology)

We developed a screening equipment for ceramic substrate level power module of IGBT. The equipment acquires current signals and finally classifies to normal/abnormal module. We established statistics based classification with image processing. It is expected to be applied for screening in a production line and failure analysis of power modules.

**キーワード：** IGBT, パワーモジュール, スクリーニング, 電流分布, 画像処理, 不良分析  
(IGBT, Power module, Screening, Current distribution, Image processing, Failure analysis)

## 1. はじめに

IGBT モジュールなどのパワーモジュールはパワーエレクトロニクスのキーコンポーネンツとして広い分野で使用されている。例えばハイブリッド自動車・電気自動車や電車、風力発電機などに応用されており、その市場は年率 10% 以上で拡大している<sup>(1)</sup>。

パワーモジュールは大電流化・高パワー化に向け IGBT チップを 2 並列または 3 並列で用いているが、先行研究では実験またはシミュレーションから寄生インダクタンスやゲート閾値電圧の違いにより IGBT チップごとの電流不均衡

が予測されている<sup>(2)~(3)</sup>。そのため電流不均衡が直接信頼性低下を招いていることが考えられると同時に、間接的にもたらされるチップごとの温度不均衡が特定のチップの温度ストレスを上昇させ信頼性低下を招いていることも考えられる。

これまでのパワーモジュールのスクリーニングでは、IGBT チップ単体およびパワーモジュール完成後の総合的な特性は確認しているが、IGBT チップを並列接続したときの電流分布は測定してないかった。この大きな理由は、空間分解が高く（小さく）測定対象を高速に交換できるセンサが存在しなかったためである。例えば、一般的に市販されているカレント・トランス（CT）やログスキコイルは空間分解

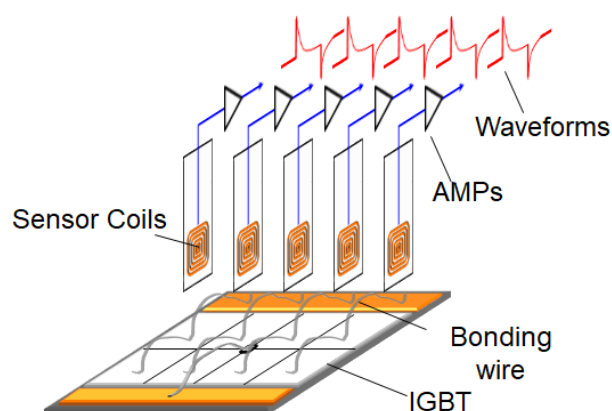


図 1 磁束信号の測定方法の模式図

Fig. 1. Schematic view of measurement method of magnetic flux signals.

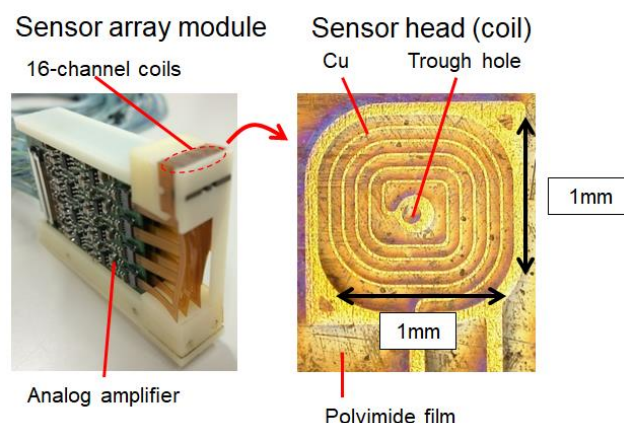


図 2 作製したセンサレイモジュール

Fig. 2. Fabricated sensor array.

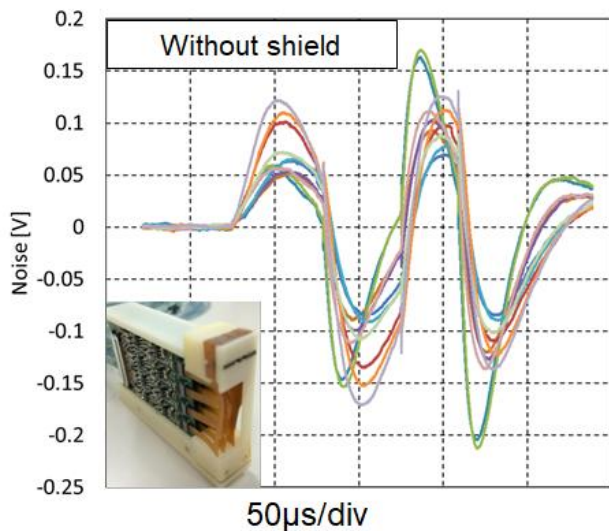


図3 入力信号無しでの出力信号  
Fig. 3. Output signal without input signal.

能が(形状が)大きい上に電流経路を囲む時間が必要になる(4)～(5)。

従来の市販されている電流センサでは、スクリーニングに要求される空間分解能(小型化)と測定対象交換の高速性が不十分であるため、著者らは九州工業大学のシーズ技術を基本としたセンサアレイモジュールとこれを内蔵したスクリーニングテストのプロトタイプを開発し、チップ上のセンサアレイモジュールから得られる並列チップや単チップ内の電流分布(磁束分布)の違いから異常パワーモジュールを判定可能であることを実証した(図1参照)<sup>(6)～(16)</sup>。

本研究では、スクリーニングテストプロトタイプに用いられた技術とスクリーニングの実証結果を述べる。

## 2. 新しいスクリーニングテストのノイズ対策と信号処理に用いた技術

### 〈2・1〉 信号配線とアナログアンプのノイズ対策

一辺が1mmのセンサ(コイル)から出力される電圧は数mVから数十mV程度であるため、信号線はパワーモジュールの配線や半導体チップの電圧や電流の影響を受ける。そのためセンサとアナログ積分アンプをセンサアレイモジュールとして一体化しノイズの影響を低減する(図2参照)。

センサとアナログアンプの一体化の欠点であるアナログアンプ基板への電圧と電流の影響の増加については、パーマロイのノイズシールドでアナログアンプを覆いノイズを低減する(図3参照)。

### 〈2・2〉 電流波形への変換とセンサバラツキの校正

各センサは電流の時間変化に応じた電圧を出力するため、電流に変換するためには基本的には積分と倍率補正が必要となる。また、センサ16個を1モジュールとして構成した場合、センサごとの特性を揃えるための校正が必要となる。本研究では、部品の特性を揃えるなどアナログ的に校

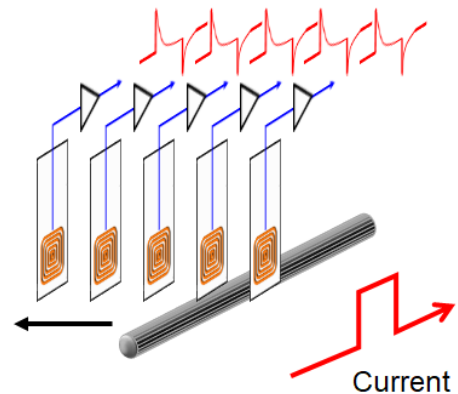
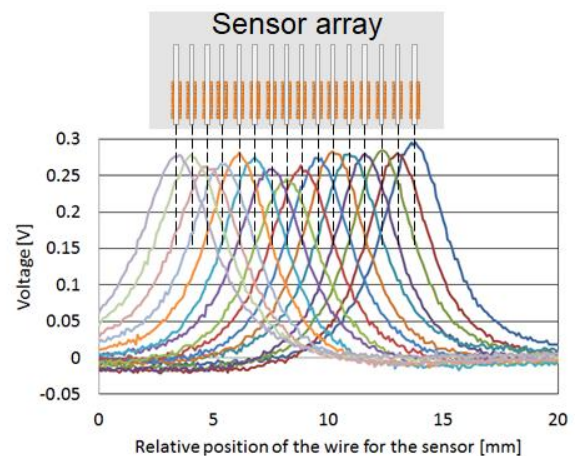
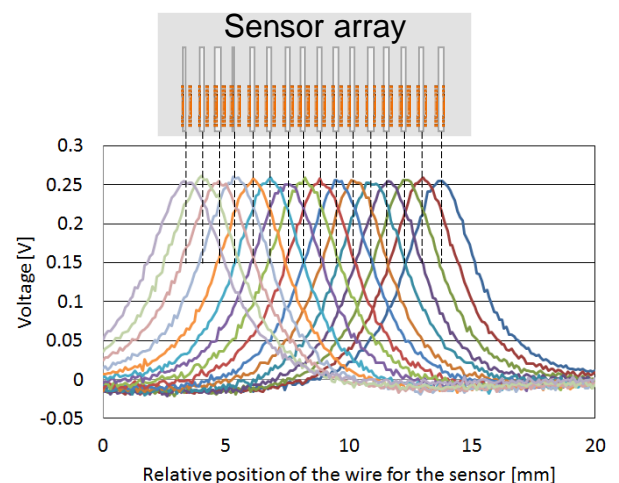


図4 校正用波形の測定方法  
Fig. 4. Method of signal measurement for calibration.



Original signals (before digital calibration)



Calibrated signals (After digital calibration)

図5 増幅度のデジタル校正の結果  
Fig. 5. Result of digital calibration for amplitude.

正するのは難しく部品コストも高額になることから、校正はデジタル的に PC 上で行うこととした。上記の電流波形への変換と信号校正を含めた変換式を次に示す。

$$I(t) = (A + \Delta A) \left( (V(t) + V_{offset}) + \frac{1}{CR + \Delta CR} \int V(t) + V_{offset} dt \right)$$

$V(t)$ ,  $V_{offset}$ ,  $CR$ ,  $A$  はそれぞれアンプからデジタイザへの入力電圧、オフセット補正電圧、積分アンプフィードバック部の  $CR$  時定数、電圧から電流へ変換するための倍率補正係数を示す。

センサごとの特性を揃えるために、基準波形に対する倍率補正係数と  $CR$  時定数の差を用い校正する。倍率補正係数と  $CR$  時定数の差分は、スイッチング波形を連続的に流した電流をセンス部直下でスキャンさせそれぞれの差分値を抽出する（図 4 参照）。今回はまず電流の倍率補正係数を最大値により調整し（図 5 参照）、その後に  $CR$  時定数を調整した（図 6 参照）。

アナログアンプで積分を行うためデジタイザに入力された信号は既に積分されているが、電流に補正するためには各センサにはデジタル的に次のような処理が必要となる。まず、多くの場合オフセット電圧が重畳しているのを、オフセット補正を行う。次にアナログ積分アンプで原理的に発生するドループを補正するため、積分アンプのフィードバック部に用いる抵抗とキャパシタの  $CR$  時定数からドループ補正をする。つまり抵抗を通してキャパシタから放電する電荷量を計算し、その電荷量から求められる電圧を仮想

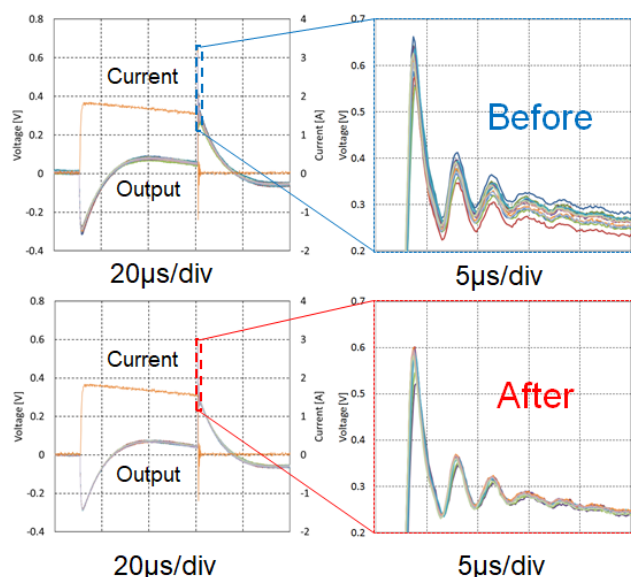


図 6 CR 時定数のデジタル校正の結果  
Fig. 6. Result of digital calibration for CR time constant.


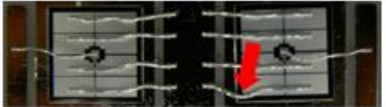





	Configuration of two paralleled IGBT with original assembling
Normal DBC-module	<div>Left chip Right chip</div>  <div>25 modules</div>
Abnormal DBC-module	<div>Bending 1</div>  <div>Bending 2</div>  <div>Disconnection 1</div>  <div>Disconnection 2</div>  <div>Imbalanced <math>R_G</math> of 5 %</div>  <div>Imbalanced <math>R_G</math> of 25 %</div>  <div>1 module each</div>

図 7 正常／異常サンプル  
Fig. 7. Normal/Abnormal samples.

的に加えることでドループの無い状態の電圧に補正する。最後に電流値に変換するための係数を乗じて電流波形に補正する。これで各センサのアナログ積分回路後の信号が電流波形に変換される。



## 〈2・3〉 標準信号分布を用いた誤差分布への変換

電流分布の正常／異常を判断するための指標としては標

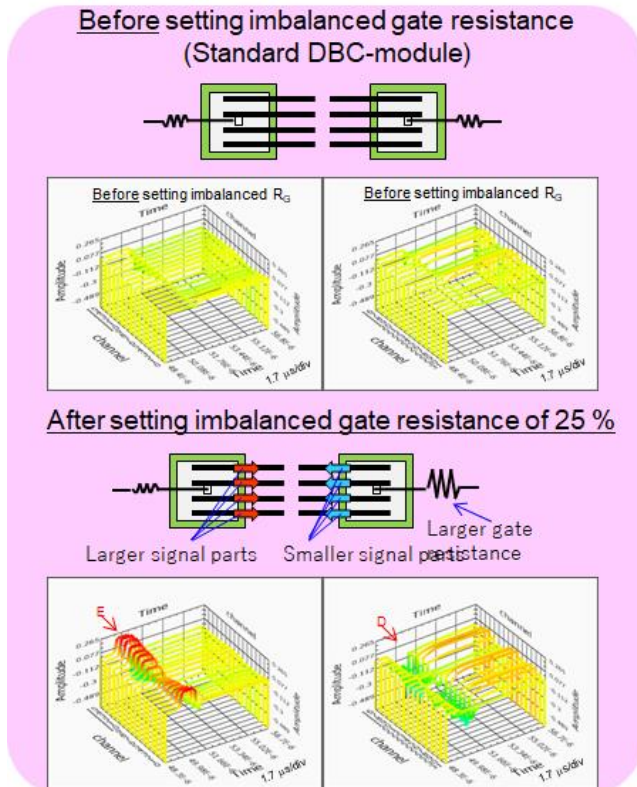
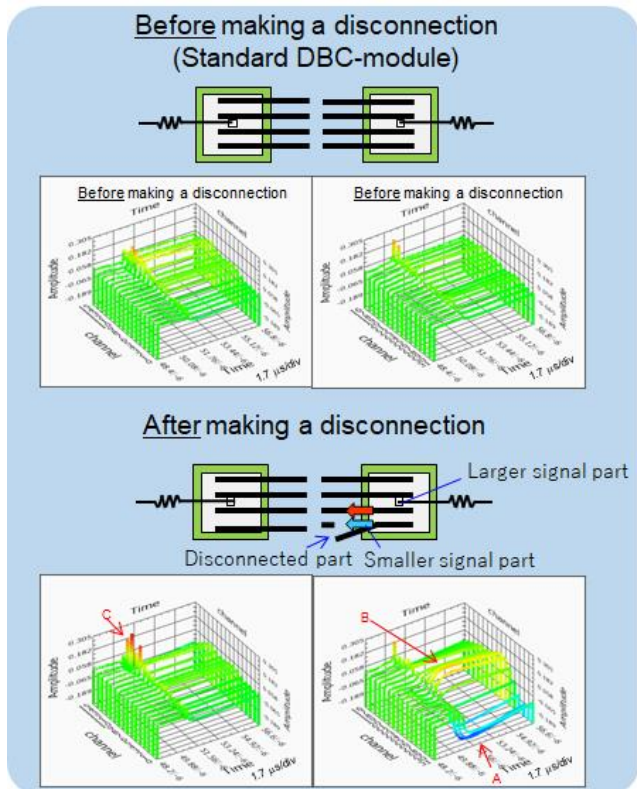


図8 正常／異常サンプルの信号分布

Fig. 8. Signal distribution of normal/abnormal samples.

準サンプルからのズレを積算して数値化した。具体的には IGBT チップの実装された標準サンプル 25 枚の平均値から標準信号分布を作製し、サンプルそれぞれのズレ値を積算した。異常サンプルはボンディングワイヤを曲げたり、切ったり、ゲート抵抗の値を 2 並列 IGBT の間で変えることで作製した (図 7 参照)。

異常値検出を確認するために、誤差信号の分布を観測した (図 8 参照)。ボンディングワイヤを切る前はズレが少ないが、切った後は特にスイッチング部で大きなズレを示す。ボンディングワイヤを切ったところの電流の減少によるズレ値が大きく、同じチップの他の部分に転流した電流による電流の増加を示すズレ値の増加がみられる。また並列接続されている別の IGBT チップでも転流した電流によるズレ値の増加がみられる。ゲート抵抗が同じ場合はターンオフのタイミングのズレが無いので標準信号とのずれは少ないが、ゲート抵抗を変えるとターンオフのタイミングの違いによりチップごとに電流上昇に伴うズレと電流減少に伴うズレがみられる。このズレが生じる期間はミラー期間であり、合計電流が変わらない中でのそれぞれの変化であることを考えれば妥当であり、過去に発表されている研究結果からみても妥当である。

## 〈2・4〉 パワーモジュール (IGBT) の正常／異常判定

パワーモジュール (実装 IGBT) の正常／異常判定は基本的にズレ値の積算値を用いて統計処理を行う (図 9 参照)。2 並列 IGBT のどちらかが偏差値 70 などの閾値を越えた時を異常と判定する単純な手法を用いると、切断やゲート抵抗値が大きく異なる場合を除き正常サンプルの一部と異常サンプルが同程度のズレ値となり閾値の設定が困難である (図 10 参照)。I 社の IGBT 以外に A 社の IGBT でも、正常サンプルと異常サンプルの閾値設定が困難であった。

単純な統計処理による閾値設定が困難であったため、画像処理技術の一つであるローカル・バイナリ・パターンを適用し、正常と異常のグレーゾーンにあるサンプルを再判定する判定処理を適用した (図 11 参照)。この結果、データ取得とデータ処理、表示に要する 10 秒に加えて 3 秒程度処理時間が増えるものの正常サンプルと故意に作製した異常サンプルを判定により完全に分離することに成功した (図 12 参照)。

## 3. まとめ

電流分布に基づくパワーモジュールの新しいスクリーニング法の提案を行い、このスクリーニング法を実現する信号処理技術を搭載したスクリーニング装置を開発した。信号処理技術はハード的な内容も含み、ノイズ除去、電流変換、信号校正、エラー分布変換、正常／異常判定 (判定基準作製) という過程を経て高精度判定が可能となった。今後はパワーモジュールの異常判定に特化した研究と電流波形・分布の測定精度向上という 2 つの方向性が考えられる。

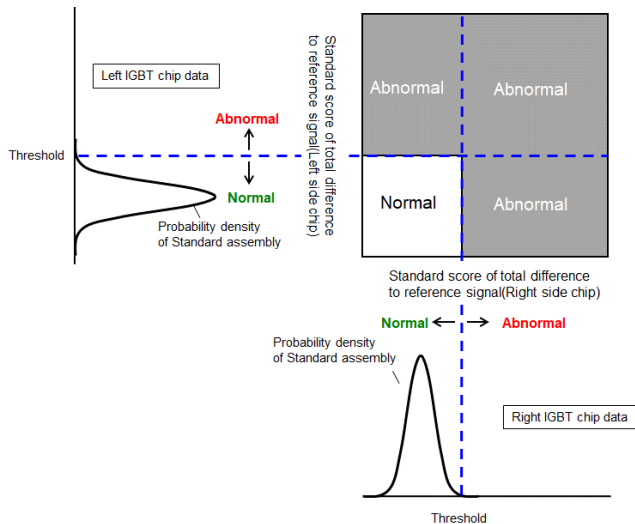
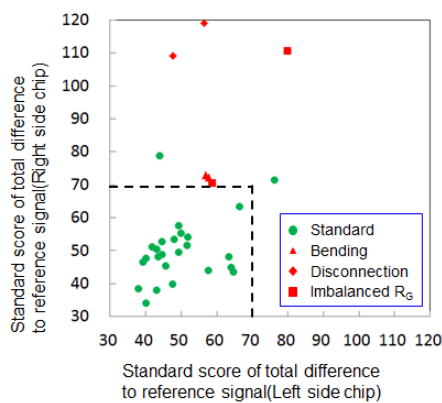
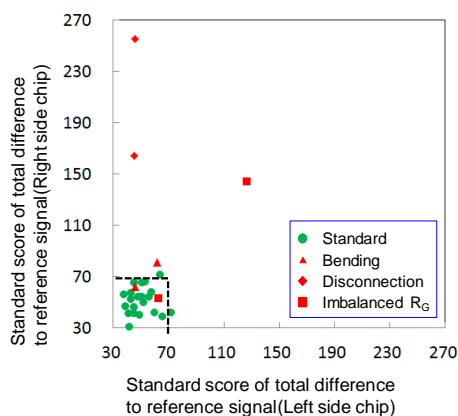


図 9 単純な統計手法を用いた正常／異常分類の概念  
Fig. 9. Schematics of normal/abnormal classification with simple statistical approach.



IGBT chips by Maker I



IGBT chips by Maker A

図 10 単純な統計手法を用いた正常／異常分類の結果  
Fig. 10. Results of normal/abnormal classification with simple statistical approach.

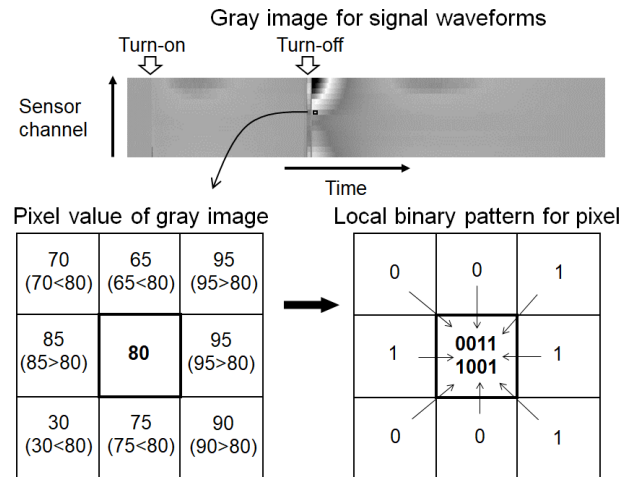


図 11 ローカル・バイナリ・パターンという画像処理の概念

Fig. 11. Schematics of image processing named local binary pattern.

	Accuracy rate	Normal/Abnormal classification time (From signal acquisition to Result display)
Simple statistical method	94 %	10 sec
<b>Statistical method with image processing method</b>	<b>100 %</b>	<b>13 sec</b>

\*In case of IGBT chips by Maker I



図 12 画像処理の有無による正常／異常分類の結果  
Fig. 12. Results of normal/abnormal classification with/without image processing.

## 謝辞

この研究は経済産業省の戦略的基盤技術高度化支援事業（サポイン事業）および北九州銀行に部分的に支援を受けた成果である。

著者らはセンサ作製やスクリーニング装置作製に関し支援を受けた、コペル電子株式会社の大胡田清一様と、株式会社シーディーエヌの野田龍三様、長友一則様、松尾和顕様と、株式会社豊光社の田代勝治様、篠原長勇喜様に感謝申し上げる。

## 文 献

- (1) 「拡大するパワーモジュールの最新動向と将来展望 2017」, 矢野経済研究所

- (2) T. Shoji, M. Ishiko, T. Fukami, T. Ueta, K. Hamada, "Investigations on current filamentation of IGBTs under unclamped inductive switching conditions," Proc. of ISPSD'05, pp. 227-230, 2005.
- (3) S. Milady, D. Silber, F. Pfirsch, F.-J. Niedernostheide, "Simulation studies and modeling of short circuit current oscillations in IGBTs," Proc ISPSD'09, pp. 37-40, 2009.
- (4) Pearson ELECTRONICS, <http://www.pearsonelectronics.com/>.
- (5) Power Electronic Measurements, <http://www.pemuk.com/>.
- (6) Yuya Kasho, Hidetoshi Hirai, Masanori Tsukuda, Ichiro Omura, "Tiny-scale 'stealth' current sensor to probe power semiconductor device failure," Microelectronics Reliability, Vol. 51, pp. 1689-1692, 2011.
- (7) H. Hirai, Y. Kasho, M. Tsukuda, I. Omura, "Bonding wire current measurement with tiny film current sensors," Proc. of ISPSD, pp. 287-290, 2012.
- (8) H. Shiratsuchi, K. Matsushita, I. Omura, "IGBT chip current imaging system by scanning local magnetic field," Microelectronics Reliability, Vol. 53, pp. 1409-1412, 2013.
- (9) Masanori Tsukuda, Seiichi Okoda, Ryuzo Noda, Katsuji Tashiro and Ichiro Omura, "High-throughput DBC-assembled IGBT screening for power module," International Conference on Integrated Power Electronics Systems, pp. 25-30, 2014.
- (10) H. Tomonaga, M. Tsukuda, S. Okoda, R. Noda, K. Tashiro and I. Omura, "16-Channel micro magnetic flux sensor array for IGBT current distribution measurement," Microelectronics Reliability, pp. 1357-1362, 2015.
- (11) M. Tsukuda, H. Tomonaga, S. Okoda, R. Noda, K. Tashiro and I. Omura, "High-throughput and full automatic DBC-module screening tester for high power IGBT," Microelectronics Reliability, pp. 1363-1368, 2015.
- (12) H. Tomonaga, I. Omura, M. Tsukuda, S. Okoda, R. Noda and K. Tashiro: "Power module current imaging system by magnetic flux sensor array", IEE Japan, EDD-15(87-105), pp. 53-58 (2015-10) (in Japanese)  
朝長大貴・大村一郎・附田正則・大胡田清一・野田龍三・田代勝治：「磁束センサアレイを用いたパワーモジュール内電流の可視化システムの開発」，電気学会電子デバイス研究会資料，EDD-15(87-105)，pp. 53-58 (2015-10)
- (13) Masanori Tsukuda, Kazuaki Matsuo, Hiroki Tomonaga, Seiichi Okoda, Noda Ryuzo, Katsuji Tashiro, Ichiro Omura, "Magnetic flux signal simulation with 16-channel sensor array to specify accurate IGBT current distribution," International Conference on Integrated Power Electronics Systems, pp. 408-411, 2016.
- (14) Daisuke Yuki, Hyoungseop Kim, Joo Kooi Tan, Seiji Ishikawa, Masanori Tsukuda, Ichiro Omura, "Development of A Supporting System for Visual Inspection of IGBT Device Based on Statistical Feature and Complex Multi-Resolution Analysis," Proceedings of International Conference on Control, Automation and Systems, pp.1551-1554, 2015.
- (15) D. Yuki, J.K. Tan, H. Kim, M. Tsukuda, I. Omura, "Development of a supporting system for visual inspection of IGBT device," Proceedings of International Conference on Information and Communication Technology Robotics, 2016.
- (16) Masanori Tsukuda, Daisuke Yuki, Hiroki Tomonaga, Hyoungseop Kim, Ichiro Omura, "Current Distribution Based Power Module Screening by New Normal/Abnormal Classification Method with Image Processing," Proc ISPSD'17, pp. 407-410, 2017.

## 付録

### 〈付録・1〉センサアレイモジュールの高空間分解能化

著者らは空間分解能を向上させるために、16chのセンサアレイモジュール以外に試験的に32chのセンサアレイモジュールを試作した（図13参照）。センサ間のスペーサの厚みを約半分にして同じセンサ部の幅に2倍のセンサを積層

している。取得信号分布を比較すると、32chセンサの空間分解能が増し強度分布がより連続的に変化していることが判明した。

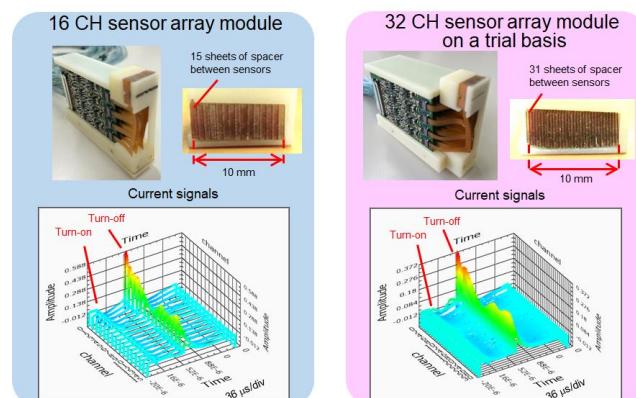


図13 試験的に作製した32chセンサと16chセンサの画像

Fig. 13. Image from fabricated 32ch and 16ch sensor array module.

### 〈付録・2〉本スクリーニング装置を用いた電流測定結果

本スクリーニング装置の判断基準は基本的には電流分布に基づいているものの、最終的には正常／異常を判断することが目的であるので本章では電流分布を示していない。本研究の中で、ボンディングワイヤからの高さが数mm異なる信号の差分から試験的に電流を求めた（図14参照）。遠方の電流による信号は差分によりキャンセルされるが、直下にあるボンディングワイヤの電流による信号は差分しでも残るため、結果的にボンディングワイヤの電流だけが観測できる。ボンディングワイヤの本数が異なるIGBTサンプルの電流を測定した結果、ワイヤの数に対応した信号が得られ、この手法で電流分布の取得が可能であることが判明した。ただし精度や遠距離からの観測に関しては今後の改善が必要である。

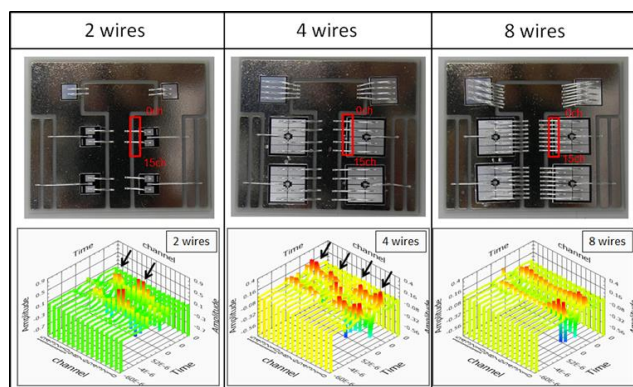


図14 高さ差分画像による電流分布画像

Fig. 14. Current distribution image by differential signal of height.