

プリント基板を活用したパワーエレクトロニクス機器の 低コスト実装技術

白形雄二* 藤井健太*
中島浩二** 佐藤翔太*
熊谷 隆*

Low Cost Electronics Packaging Technology for Power Electronics Equipment Utilizing Printed Circuit Board
Yuji Shirakata, Koji Nakajima, Takashi Kumagai, Kenta Fujii, Shota Sato

要 旨

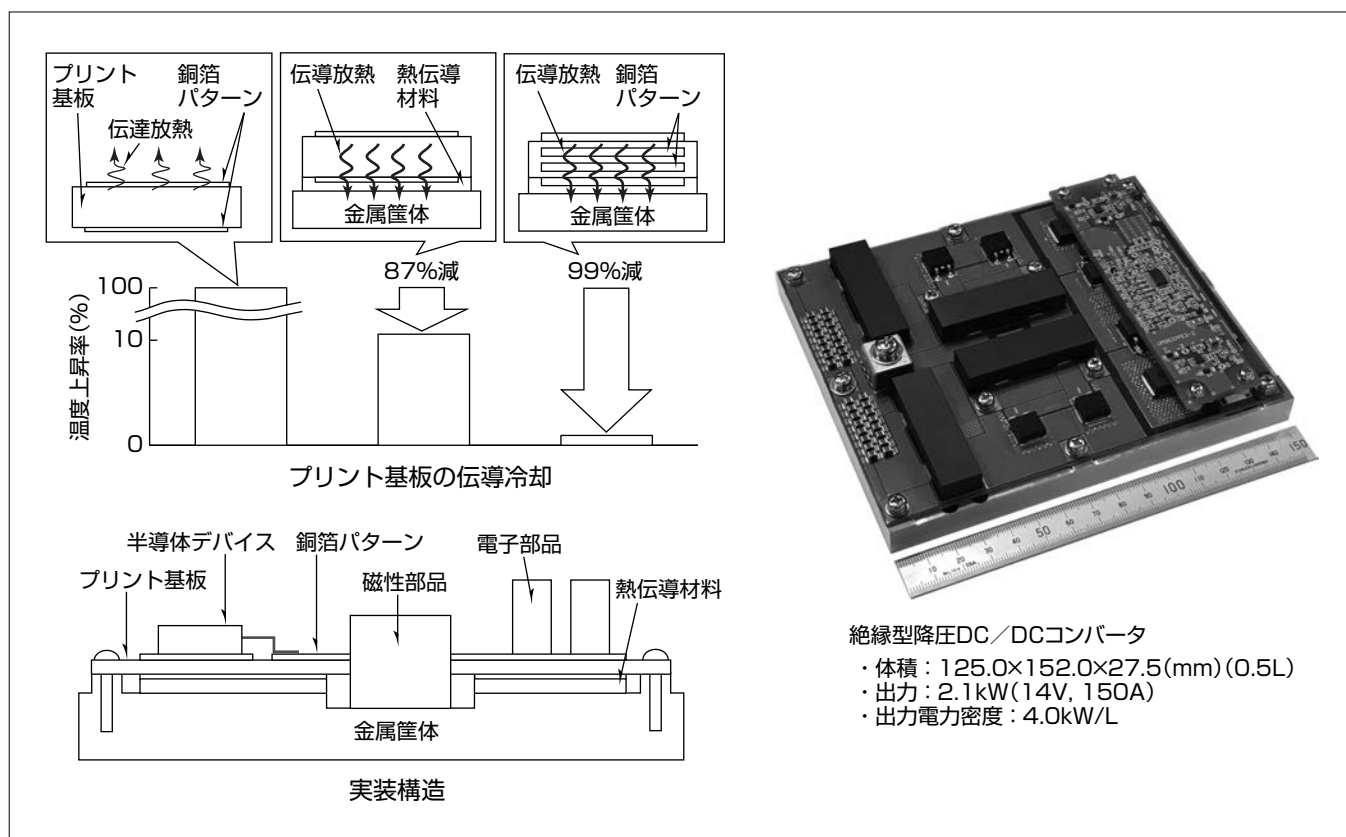
パワーエレクトロニクス技術は、これまで、主に電動機を駆動するインバータ技術として発展を遂げてきた。近年では、太陽光発電システムや車載電動化機器の市場拡大によって、直流電圧を変換するコンバータ技術も重要視されている。コンバータは、パワー半導体デバイスだけでなく、トランスやリアクトルなどの磁性部品で構成されるため、これまで以上に機器の実装技術が重要なキーとなる。

三菱電機では、電子機器実装の要ともいえるプリント基板に簡易な冷却手段を取り入れることで、安価な汎用のプリント基板のパワーエレクトロニクス分野への活用を進めてきた。プリント基板に伝導・放熱補助部材を組み合わせるとともに、設計指標を設けることで大電流化を実現し

ており、これらの複合化要素技術を総称してPAB(Power circuit Assembled Board：大電流回路基板)技術と呼び、100Aまでの主回路をプリント基板化し、様々な製品に適用してきた。

更なる冷却手段として、磁性部品をプリント基板に一体化し、半導体デバイスとともに、冷却器を兼ねる金属筐体(きょうたい)に伝導冷却するTC-PAB(Thermal Conductive PAB：伝導冷却大電流回路基板)技術を開発した。

この技術を適用した、150A出力の絶縁型降圧DC/DCコンバータをプリント基板に構成・試作して、当社従来比約2倍の出力電力密度4.0kW/Lを達成した。



TC-PAB技術

プリント基板を効果的に伝導冷却することで、汎用プリント基板の大電流化や、磁性部品のプリント基板化を可能にするTC-PAB技術を開発した。この技術は、様々な冷却要素技術を複合化したもので、部品の固定、配線、接続、絶縁といったプリント基板の機能を最大限に活用した低コスト実装技術である。パワーエレクトロニクス機器の主回路を、ハーネスやブスバー、特殊な厚銅箔(どうか)基板を用いずに、1枚のプリント基板上に構成できる。

1. ま え が き

当社では、パワーエレクトロニクス機器の主回路を、汎用プリント基板をベースに構成する実装技術の開発を進めている。図1に、一般的な電子機器実装の変遷を示す。電子機器実装には、半世紀以上も前にプリント基板が導入され、部品の固定、配線、接続、絶縁といった4つの要素機能を集約することで、機器の小型化と大幅なコスト削減が可能になった。しかし、電流が50Aを超えるパワーエレクトロニクス機器の主回路は旧態依然としており、多数の部品が個別に実装されていることが多い。パワーエレクトロニクス機器の主回路にもプリント基板を適用できれば、製品構造を簡素化できる。一般に、プリント基板に大電流を通電する方法としては、特殊な厚銅箔基板が用いられるが、高コストな点が課題である。これに対し、汎用のプリント基板に、簡素な補助部材を組み合わせることで、100Aまでの主回路をプリント基板上に構成するPAB技術を開発し、製品に適用してきた。さらに、汎用のプリント基板と金属筐体を組み合わせた伝導冷却によって、150A以上に対応するTC-PAB技術を開発した。

本稿では、これらパワーエレクトロニクス機器の主回路を小型・低コスト化する実装技術について述べる。

2. PAB技術

2.1 プリント基板の利点

従来の配線接続方法は、主にビニル被覆電線などのハーネスやブスバーをねじ止めする方法が主流であったが、モールド型パワーデバイスの大容量化(50~75A)が進むことによって、パワーエレクトロニクス機器の主回路のプリント基板化が必要となってきた。

プリント基板は部品の相互接続と固定の両機能を兼ね備えているため、加工費を大幅に削減できる。

表1に、ビニル被覆電線とプリント基板銅箔の比較を示す。導体に流すことのできる電流値は、主に絶縁物の温度で制限される。広く用いられるビニル被覆電線は、断面が円形であり、単位断面積あたりの表面積の割合が小さい上、絶縁被覆で放熱性が劣るため大電流には適さない。

銅箔は、単位断面積あたりの表面積が大きく放熱性に優れるが、支持・固定と絶縁に課題がある。プリント基板は、放熱性に優れ、この2つの課題を同時に解決できるため、元来、大電流を流す導体部材に適している。

2.2 補助部材による放熱構造

銅箔パターンの設計指針としては、IPC-2221等の規格が知られているが、そのまま大電流化すると幅広の銅箔パターンが必要でプリント基板の大型化を招く。

これに対し、比較的 low コストの、厚さ70~105 μ mの銅箔パターンを持つプリント基板について、電流とパターン

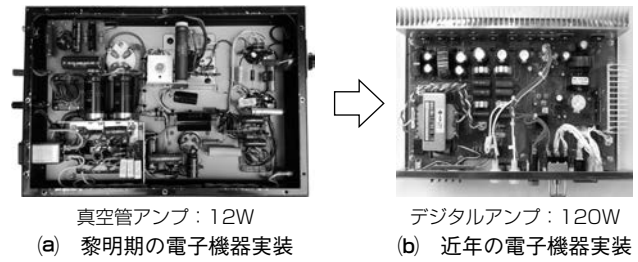
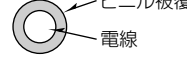
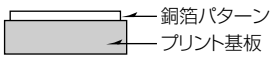


図1. 電子機器実装の変遷

表1. ビニル被覆電線とプリント基板銅箔の比較

	ビニル被覆電線	プリント基板銅箔
断面積	$\Phi 1\text{mm}$ $\approx 0.79\text{mm}^2$ 	厚さ: 35 μm ×幅: 22.5mm $\approx 0.79\text{mm}^2$ 
表面積	100%	1,400%
電流値	100%	370%
特徴	・放熱性が悪い ・固定が必要 ・接続はねじ締め作業 ・配線作業スペース要	・放熱性が良い ・配線と部品が固定済み ・はんだ付けで一括組立て ・配線スペースは不要

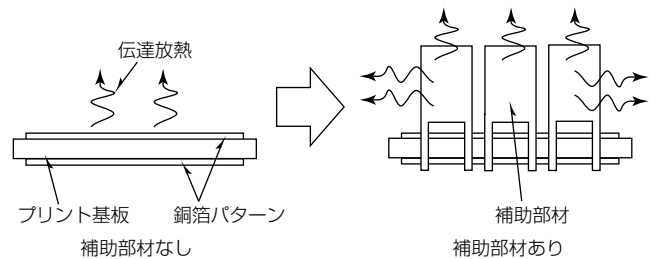


図2. 伝導・放熱補助部材の放熱構造

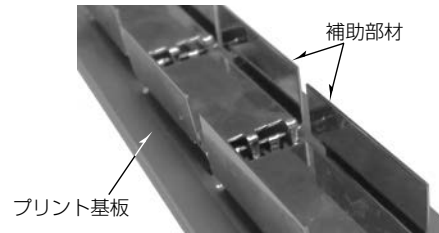


図3. 伝導・放熱補助部材の一例

幅を変数として温度データを実測し、最大許容電流を規定した。さらに、伝導・放熱補助部材を実装して電気抵抗を下げるとともに、放熱面積を増加させて温度上昇を抑制することによって、35 μ mの銅箔パターン比5倍以上の大電流化を実現し、設計指標をマニュアル化した。これら冷却機能を付加した回路基板技術をPAB技術と呼んでいる。

図2に伝導・放熱補助部材の放熱構造を、図3に伝導・放熱補助部材の一例を示す。伝導・放熱補助部材は、汎用のジャンパ線や端子部品等から専用の部材まで、設計仕様によって使い分ける。

このように、伝導・放熱補助部材を用いたPAB技術によって、最大、100Aまでのパワーエレクトロニクス機器の主回路に汎用プリント基板の適用が可能となった。

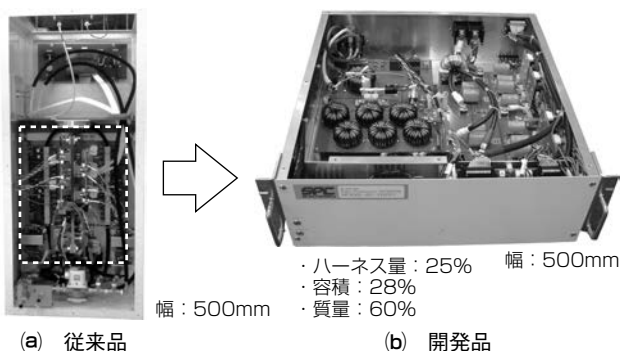


図4. PAB技術の適用事例

2.3 PAB技術の適用事例

PAB技術を10kWの高周波誘導加熱用インバータに適用した事例を図4に示す。従来品の破線部分の主回路(主回路電流60A)を小型化し、ハーネスの使用量を25%、容積を28%、質量を60%に削減した。この事例では、筐体内に空気を循環させることで、プリント基板のほか、発熱が大きな電気部品も冷却している。

このPAB技術を、パッケージエアコンやエレベーター制御盤、IH(Induction Heating)クッキングヒーターなどの製品にも順次適用し、小型・低コスト化を進めている。

3. TC-PAB技術

PAB技術ではプリント基板から外気への放熱面積を増加させることで温度上昇を抑制し、100Aまで通電可能としたが、筐体への伝導冷却をプリント基板に活用することで、銅箔パターンの大電流化を更に推し進めた。

伝導冷却によって、トランスやリアクトルなどの磁性部品や、MOSFET(Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor)、IGBT(Insulated-Gate Bipolar Transistor)やダイオードなどの半導体デバイスをプリント基板に集約することを可能にした。これらの要素技術を総称してTC-PAB技術と呼んでいる(図5)。

図6に伝導冷却の効果を示す。冷却器を兼ねる金属筐体に伝導冷却することで、外気だけに放熱する場合と比較してプリント基板の温度上昇を87%低減できる。

3.1 要素技術

図7にTC-PAB技術を適用したパワーエレクトロニクス機器の実装構造を示す。次に、この構造に用いる主要素技術について述べる。

3.1.1 プリント基板の層構成

図8にプリント基板の層構成と温度上昇の関係を示す。層構成の最適化による電気抵抗と熱抵抗の低減によって、温度上昇を更に約90%低減可能になる。これによって、銅箔厚さ105 μ mの4層プリント基板に150A通電を実現し、設計指標をマニュアル化した。

3.1.2 放熱材料の選定方法⁽¹⁾

プリント基板と金属筐体とを低熱抵抗で熱接続するため

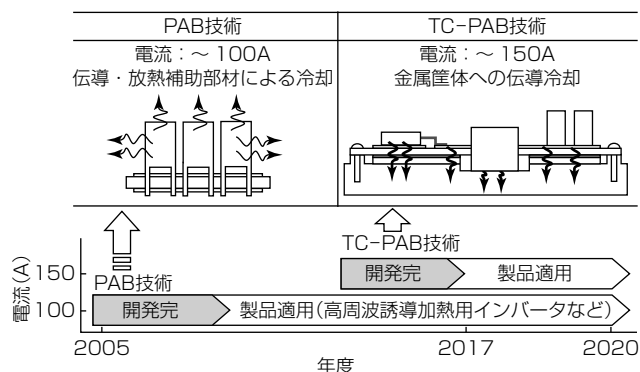


図5. PAB技術とTC-PAB技術の開発

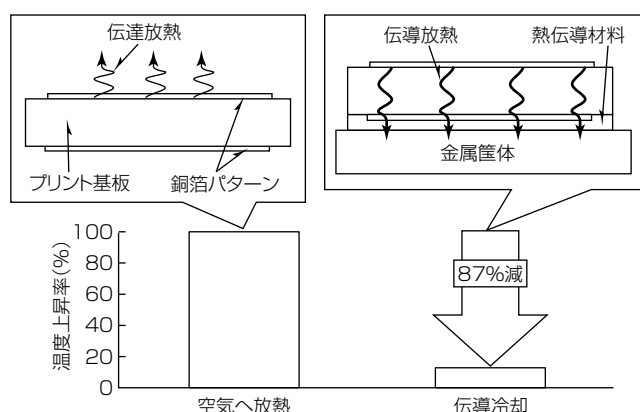


図6. 伝導冷却の効果

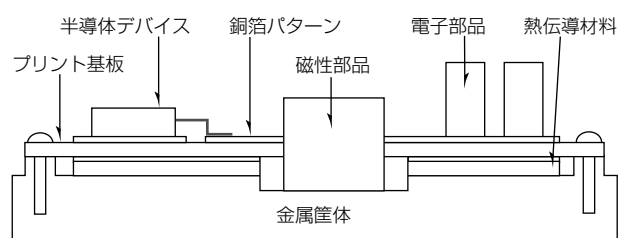


図7. TC-PAB技術適用の実装構造

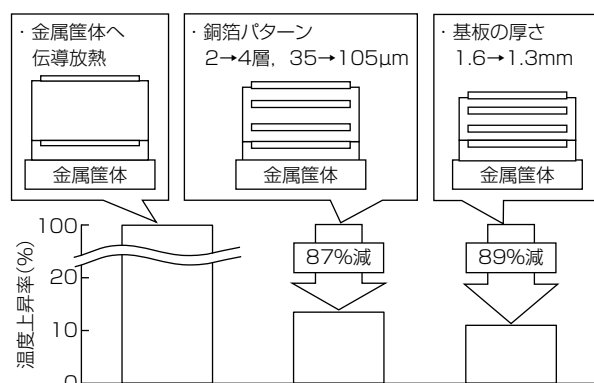


図8. プリント基板の層構成と温度上昇の関係

のTIM(Thermal Interface Material: 熱伝導材料)には、熱伝導シートや硬化型樹脂を用いる。

熱伝導シートを用いる場合は、接触界面に発生する接触熱抵抗を加味して優劣を判断する必要があるため、接触熱

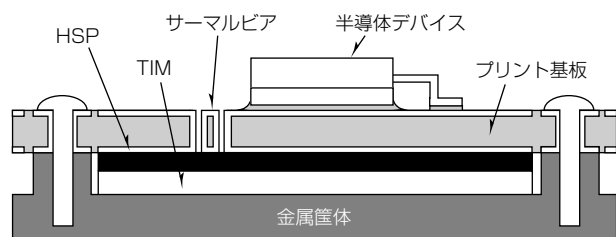


図9. HSPを用いた実装構造

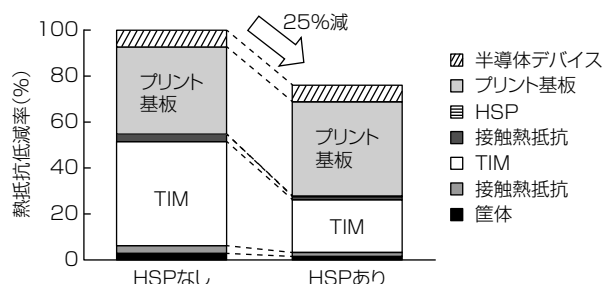


図10. HSP有無による熱抵抗の比較

抵抗を安定に評価できる手法を構築し、多品種の熱伝導シートの正確なデータを取得して設計情報とした。

3.1.3 半導体デバイスの冷却⁽²⁾

面実装型半導体デバイスの放熱性を高める方法として、デバイスの実装箇所の裏面に高熱伝導の板材であるHSP (Heat Spreader Plate：熱拡散プレート)を実装した。

図9にHSPを用いた実装構造の模式図を、図10にHSP有無による熱抵抗の比較を示す。面実装型半導体デバイスから筐体に熱が伝わる経路で、熱伝導性に優れるHSP内で、平面方向に熱を拡散することで、熱がTIMを通過する際の断面積を拡大し、熱抵抗を低減できる。これによって、銅インレイ基板などの高価な部材を使わずに熱抵抗の低減を可能とした。

3.1.4 プレーナトランス

トランスなどの磁性部品を、プリント基板上に形成したパターンコイルと、プリント基板上に勘合するコアとで構成することで、主回路プリント基板上にプレーナトランスを形成して小型化する。伝導冷却しづらいコア貫通部のパターンは、コア形状を細長形状にしつつ、コアを分割することで最小化し、パターン露出部の割合を拡大して伝導冷却の効果を高める。また、コア貫通部のパターンに、HSPを実装し、平面方向に熱伝導させてパターン露出部に効果的に熱輸送している。

さらに、トランスの巻線は、最小巻線数が0.5ターンの2次巻線を2回路用いて磁気回路を成立させる方式(図11)を採用することによって、パターンコイルの巻数を削減し、銅損を約40%削減した。

3.2 絶縁型降圧DC/DCコンバータへの適用事例

TC-PAB技術を適用して設計・試作した絶縁型降圧DC/DCコンバータの例を図12に示す。

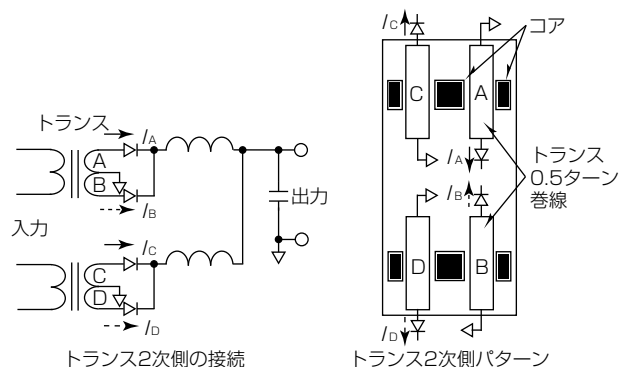


図11. 0.5ターン巻線を用いたトランス巻線

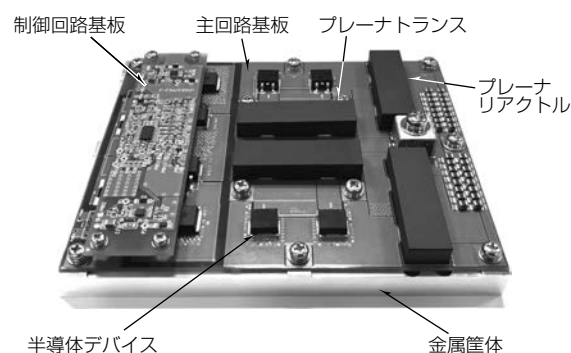


図12. TC-PAB技術を適用した絶縁型降圧DC/DCコンバータ

主回路は、汎用の半導体デバイスを用いた発振周波数100kHzの絶縁型ZVS (Zero Voltage Switching：ゼロ電圧スイッチング)方式である。トランスやリアクトルを含む主回路部品をプリント基板上に集約することによって、主回路の全てを1枚のプリント基板上で構成し、体積：0.5リットル(125.0×152.0×27.5(mm)、冷却器を除く)で、出力：2.1kW(14V, 150A)、出力電力密度：4.0kW/Lを達成した。

4. む す び

電子機器の実装技術は、部品の固定、配線、接続、絶縁、冷却等の要素機能を集約することで進化してきたが、当社が開発したPAB技術によって、汎用プリント基板上で100A通電を可能にし、さらに、TC-PAB技術による伝導冷却によってこれら要素機能を統合し、150A以上の通電を可能とした。今後は、この技術の製品適用を進めていく。

参 考 文 献

- (1) 藤井健太, ほか：熱伝導材料のプリント基板の伝導冷却への適用, 第23回エレクトロニクスにおけるマイクロ接合・実装技術シンポジウム論文集, 23, 375～378 (2017)
- (2) 佐藤翔太, ほか：プリント基板上の面実装デバイス効果的な熱伝導冷却技術, 第23回エレクトロニクスにおけるマイクロ接合・実装技術シンポジウム論文集, 23, 371～374 (2017)