

小型・高効率 DC-DC コンバータの開発

Development of Small-Sized and Highly Power-Efficient DC-to-DC Converter

野村 富二夫 青木 善郎 タン トロン ロン

■NOMURA Fujio

■AOKI Yoshiro

■THAN TRONG Long

現在、出力電力 200～500 W の小型汎用 DC-DC コンバータが国内各社から多数発売されている。しかし、過酷な環境条件下で使用する場合は、海外メーカーの特定の製品に頼らざるをえない。また、RoHS 指令^(注1)（電気・電子機器中の特定有害物質の使用制限に関する指令）に対応するため、高信頼性が要求される機器でも、今後は鉛はんだの使用が制限される。

このような状況を踏まえて、過酷な環境条件と RoHS 指令に対応した、小型で高効率の 400 W の DC-DC コンバータを開発した。試作品の評価により、海外メーカーの製品と同等以上の性能であることを確認し、製品化に向けて耐環境性や高信頼性にかかわる要素技術を確認した。

Ordinary DC-to-DC converters with a range of 200-500 W can be easily procured on the domestic Japanese market. However, to satisfy the requirements for heavier environmental conditions, there has been no choice but to depend on specific overseas manufacturers. Moreover, the Restriction of Hazardous Substances (RoHS) Directive of the European Union prohibits lead soldering even in highly reliable devices, thus requiring the development of lead-free soldering techniques.

Toshiba has developed a small-sized but highly power-efficient 400 W DC-to-DC converter that conforms with the RoHS Directive and is suitable for severe environmental conditions. Evaluation of a prototype converter confirmed that its performance values are equal to or higher than those of equivalent overseas models. We are therefore ready to begin commercialization of this converter based on reliability assurance and proven environmental resistance.

1 まえがき

1 kW 以上の電力を消費する大型システムの制御装置では、所要の電力及び電圧に応じて複数の DC-DC コンバータ（直流電源変換器）を組み合わせ、カスタムに電源装置を設計している。厳しい環境条件下での使用に耐え、高い信頼性が要求される電源装置においては、キーコンポーネントである DC-DC コンバータへの要求も厳しくなり、通常の市販品では対応が困難なため、従来、特定の海外製品に頼ってきた。

しかし、システムごとの要求事項の多様化や RoHS 指令への対応のため、今後、海外製品への依存にも制約が生じることが予想される。このため、今回、耐環境性を備え RoHS 指令にも対応した、“小型・高効率・高信頼性”の DC-DC コンバータを開発した。ここでは、その概要と特長について述べる。

2 開発品の概要

DC-DC コンバータの試作品を図 1 に、目標仕様を表 1 に示す。小型化を実現するため、部品点数を抑え、表面実装

(注1) EU（欧州連合）が 2006 年 7 月 1 日に施行した規制で、電気・電子機器への特定有害物質の含有を禁止するもの。規制対象は、鉛、カドミウム、6 価クロム、水銀、ポリブロモビフェニル、ポリブロモジフェニルエーテルの 6 物質である。

部品を高密度に配置している。形状及び寸法は、DC-DC コンバータとして標準的に使用されている、フルブリックサイズと呼ばれるものに合わせた。入力電圧及び出力電圧は、

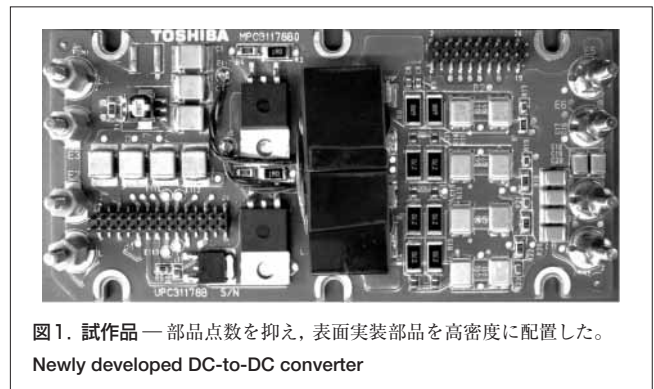


図 1. 試作品 — 部品点数を抑え、表面実装部品を高密度に配置した。
Newly developed DC-to-DC converter

表 1. DC-DC コンバータの目標仕様

Target specifications

項目	仕様
寸法	120 × 60 × 13 mm
入力電圧範囲	180～350 V
出力電圧	5 V
最大出力電力	400 W
効率	85 % 以上
リップルノイズ電圧	100 mV _{p-p} 以下

もっとも多く使用される値に設定し、出力電力、効率、及びリップルノイズ電圧は海外製品と同等の性能に設定した。

3 開発品の特長

今回のDC-DCコンバータの開発には三つの主要な開発要素があり、これらが製品の特長となっている。すなわち、小型化や高信頼性など目標仕様の実現に適した回路方式の開発、小型高出力化に伴う発熱対策のための厚銅箔(はく)アルミニウム(以下、アルミと略記)ベース基板の開発、及び高信頼性とRoHS指令対応を両立させるための低ボイド(空洞)鉛フリーはんだの開発である。以下に、それぞれの開発内容について述べる。

3.1 回路方式の開発

回路方式の検討にあたっては、小型化及び高効率への適合性を総合的に評価し、新しい回路方式(降々圧方式)を採用することにした。

回路方式のトレードオフ結果を表2に示す。回路方式としては、ハードスイッチング方式とソフトスイッチング方式に大別できる。ハードスイッチング方式は、直流入力電源をスイッチング素子で単純にON/OFF動作させるが、スイッチングに伴う電力損失が大きい。電力損失低減のためスイッチング周波数を下げることになり、結果としてトランスやチョークコイルが大型化するため小型化には適さない。

表2. 回路方式のトレードオフ

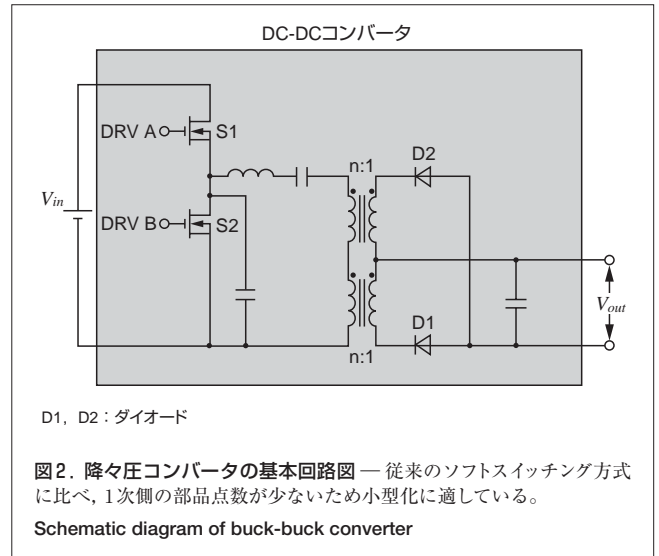
Trade-offs among converter topologies

回路方式	ハードスイッチング方式	ソフトスイッチング方式		
		アクティブクランプ方式	フェーズシフト方式	降々圧方式
小型化	×	△	△	○
効率	×	○	○	○
総合	×	△	△	○

一方、ソフトスイッチング方式は、スイッチング時の電圧と電流の重なりをなくすようにスイッチングさせるものであり、電力損失の低減が可能になる。この代表例として、アクティブクランプ方式とフェーズシフト方式があり、近年、製品化され始めた。

これらのソフトスイッチング方式では部品点数が多くなるため、今回の形状寸法に収めることが難しく、小型化と低損失を両立できる新しい回路方式を開発した。

新しい回路方式の基本回路図を図2に示す。1次側スイッチ素子S1及びS2は、一定期間のデッドタイム以外は必ずどちらかがONとなるように、S1, S2のドライブ信号DRV AとDRV Bにより、デューティ(時比率)制御される。デッドタイム期間中に、トランスの配線インダクタンス及びスイッチ素子の



寄生容量成分によって共振させることにより、ソフトスイッチングを実現する。

この回路は、部品点数が少なく小型化に適しており、また、1次側のスイッチング素子が入力電圧に直接接続されているため、入力サージ電圧にも強い回路構成となっている。

一般的なコンバータの出力電圧 V_{out} と入力電圧 V_{in} の関係は、次のようになる。

$$V_{out} = nDV_{in} \quad (1)$$

n : トランスの巻数比

D : オン時間/スイッチング周期

一方、このコンバータの V_{out} と V_{in} の関係は次のようになり、一般的なコンバータの式と異なっている。

$$V_{out} = nD(1 - D)V_{in} \quad (2)$$

(2)式は(1)式に(1-D)を乗算した式であり、 V_{out} が同じであれば、一般的なコンバータに比べ巻数比を小さくできるため巻線構造が簡単となり、小型化に有利な高周波数化にも適している。

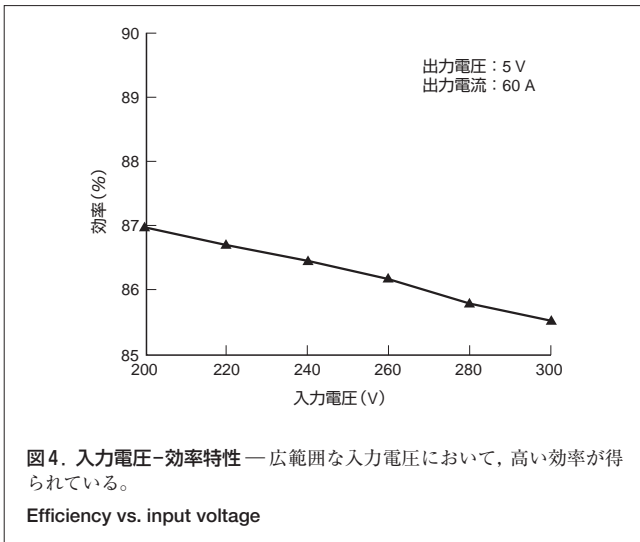
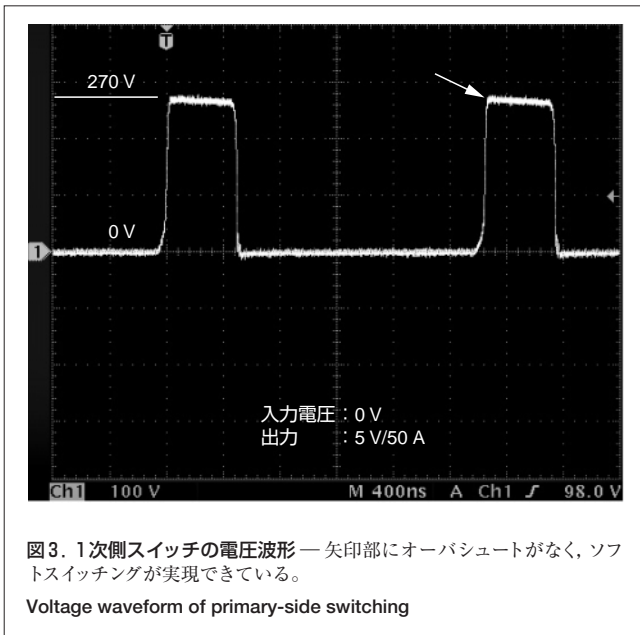
1次側スイッチの電圧波形を図3に示す。

これを見ると、サージ電圧がなくソフトスイッチングを実現していることが確認できる。入力電圧-効率の特性を図4に示す。

3.2 厚銅箔アルミベース基板の開発

低背化のため、電界効果トランジスタ(FET)やコンデンサなどの大型部品を表面実装部品にする必要がある。FETなどは発熱部品であり、その放熱のためにプリント基板にアルミ板を接着させたアルミベース基板を採用した。熱は、アルミ板を介してヒートシンクなどに伝導させる。

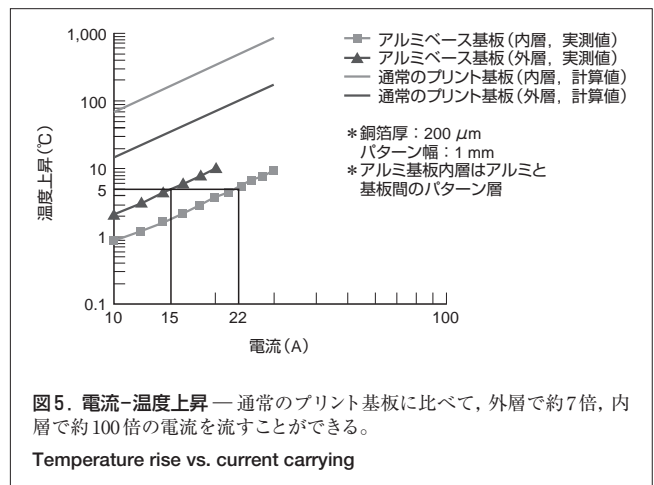
アルミベース基板で問題となるのが、アルミ板の線膨張率(23 ppm/°C)とプリント基板の線膨張率(17 ppm/°C)の差に



としては非常に大きな問題となる。そこで今回は、高热伝導率で低弾性率の接着シートを使用することにより、 $-40^{\circ}\text{C} \leftrightarrow +125^{\circ}\text{C}$ の温度サイクルで2,000サイクルを目標とし、現在評価中である。

また、80 Aという大電流を流せるように、プリント基板の銅箔を一般的な厚み(35 μm)より厚くし、高周波数による抵抗増加分も考慮して200 μm とした。アルミベース基板構造による放熱効果もあいまって、通常のプリント基板に比べて、外層で約7倍、内層で約100倍の電流を流せることが確認できた。実測の結果を図5に示す。

開発した厚銅箔アルミベース基板の冷却性能は、ヒートシンクの形状や風速をパラメータとして、シミュレーションにより解析した。解析結果を図6に示す。この結果から、フィンの長さ17 mm、フィン数30、風速3 m/sの条件で、実装部品の温度を規定値(+100 $^{\circ}\text{C}$ 以下)に抑えられることがわかった。これらの条件は一般的な放熱設計で実現できるレベルであり、DC-DCコンバータとして必要な冷却性能を持つことが確認できた。



よる、部品にかかる熱応力である。この膨張率の違いによる応力ひずみは、プリント基板上的実装部品に繰返し応力として加わり、はんだ接合部にクラックが発生しやすい。

熱応力 S は、一般的に次式で表される。

$$S = K \cdot E \cdot (a_{al} - a_{pcb}) \cdot \Delta T \quad (3)$$

K : 定数

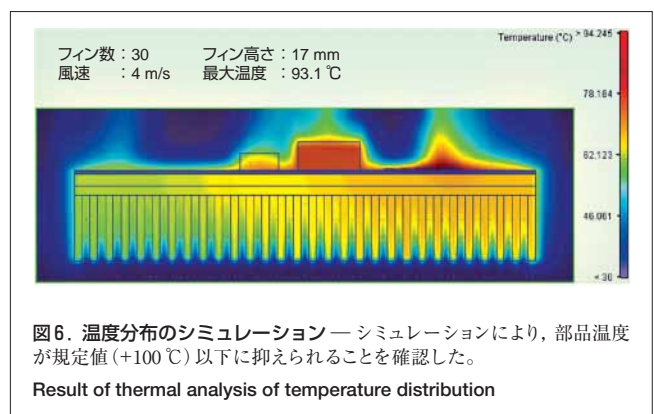
E : 接着シートの弾性率

a_{al} : アルミの線膨張率

a_{pcb} : プリント基板の線膨張率

ΔT : 温度変化幅

一般的なアルミベース基板上的の3.2 \times 1.6 mmサイズのチップ抵抗は、 $-40^{\circ}\text{C} \leftrightarrow +125^{\circ}\text{C}$ の温度サイクルで500サイクル程度しかもたず、大型の部品を使用するDC-DCコンバータに



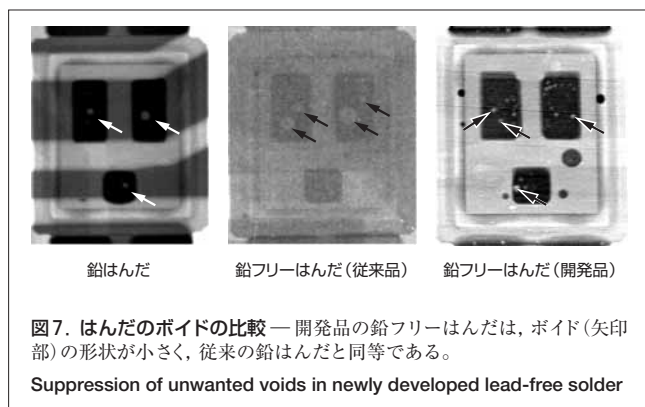
3.3 低ボイド鉛フリーはんだの開発

環境問題への配慮のため、RoHS指令への対応が必須であり、電源もその例外ではないが、高発熱で大電流という特

殊な条件が加わるため、一般的な組成の鉛フリーはんだ (Sn (すず)-3 wt%Ag (銀)-0.5 wt%Cu (銅)) では対応することが難しい。

FET などの高発熱、大電流の表面実装部品では、はんだに大電流を流すとともに、放熱のためのヒートパスの役目も担わせている。はんだの中に大きなボイドが存在すると、熱抵抗の増加、損失上昇、温度上昇の悪循環となり、加速度的に部品劣化が進行する。

このため、はんだのボイド発生が少なく、ぬれ性 (はじけないうで広がる性質) が良い鉛フリーはんだ (Sn-Ag-Cu-In (インジウム)-(Co (コバルト), Ti (チタン)) の開発を行った⁽¹⁾。部品を実装し、実装状態ではんだのボイドを確認した結果、開発した鉛フリーはんだは従来の鉛はんだに近い状態であることが確認できた。X線写真によるはんだのボイドの比較を図7に示す。この開発により、課題の高信頼性とRoHS指令への対応が可能になった。



4 あとがき

今回、小型化のための新回路方式、“高放熱・大電流・耐環境性”に対応するための厚銅箔アルミベース基板、及び環境調和や高信頼性のための低ボイド鉛フリーはんだ、という

三つの主要な要素技術の開発を行い、環境調和型で耐環境性及び高信頼性を持つ400 W、フルブリックサイズのDC-DCコンバータを製品化するめどが得られた。今後は、信頼性の評価を継続するとともに、ロバスト(頑健性)設計により更なる改善を進める。また、開発した要素技術が他の多くの製品にも活用されることを期待したい。

文献

- (1) タントロンロン, ほか. 実装性に優れた鉛フリーはんだ. 東芝レビュー. 61, 11, 2006, p.36-39.



野村 富二夫 NOMURA Fujio

社会システム社 小向工場 技術開発担当主務。
電源の開発に従事。電子情報通信学会会員。
Komukai Operations



青木 善郎 AOKI Yoshio

社会システム社 小向工場 技術開発担当主査。
航空機搭載電子機器、電波応用機器の開発に従事。
Komukai Operations



タン トロン ロン THAN TRONG Long, D. Eng.

電力システム社 電力・社会システム技術開発センター 高機能・絶縁材料開発部主幹, 工博。環境・機能材料の開発に従事。
Power and Industrial Systems Research and Development Center