ブロック型アルミ電解コンデンサの熱解析モデル Thermal modeling of snap-in type aluminum electrolytic capacitors

○正 小泉 雄大 (コーセル)

正 石塚 勝 (富山県立大学)

正 中川 慎二 (富山県立大学)

Katsuhiro KOIZUMI Cosel Co., Ltd., 1-6-43 Kamiakae-machi, Toyama 930-0816

Masaru ISHIZUKA, Shinji NAKAGAWA Toyama Prefectural University, 5180 Kurokawa Imizu-shi Toyama 939-0816

The electrolytic capacitor is one of the most important components for the thermal analysis of electronic equipment. To predict component and system temperatures, the thermal flow simulation technique has been applied to thermal design of electronic equipment. In this study, we examined a compact modeling method for electrolytic capacitors in order to simulate thermal flow based on the computational fluid dynamics (CFD) code. To obtain fundamental data for the thermal modeling method, first, we conducted experiments to identify the major thermal path of electrolytic capacitors in actual electronic equipment by using a switch mode power supply unit. Next, to verify the validity of the thermal model, a benchmark experiment was conducted to obtain actual measurement data of the temperature rise of electrolytic capacitors under various operating conditions. The thermal model of the electrolytic capacitor was presented based on the CFD code. In this paper, we describe in particular the snap-in type electrolytic capacitor.

Key Words: Electrolytic capacitor, Thermal simulation, Electronic equipment, Thermal management

1. はじめに

アルミ電解コンデンサ (図 1) は電子機器に欠かすことができない構成部品の一つである。このアルミ電解コンデンサが寿命となり、初期の特性または期待する性能を満足できなくなった場合、機器としても寿命に至ることになる。アルミ電解コンデンサの寿命までの時間はアレニウス則に従い、温度が 10℃上がると寿命はおおむね半分になる (10℃2 倍則)。よって、電子機器の信頼性設計を行う上で電解コンデンサ温度は重要な要素の一つであり、機器の熱設計においては主要な検討対象となっている。

Fig. 1 External view of electrolytic capacitor

電子機器の熱設計においては熱解析ソフトの利用が近年広く普及している。このような解析ツールによる熱解析を実行するためには、解析対象の「モデル化」が必要となる。ここで課題となるのが、いかにコンパクトで精度の高いモデル化を行うことが出来るかに解析結果の品質が左右されるという点である。アルミ電解コンデンサの外観は単純な円筒形であるが、内部は詳細をモデル化するには複雑すぎる構造である。これまで、アルミ電解コンデンサ単体として熱設計の知見を与える実験、研究結果の報告は行われているが、熱シミュレーションのためのモデル化手法について述べた文献は少ない。そこで本研究では、熱モデル化手法検討のための基礎データとすることをねらいとして、実機サンプルを用いてプリント基板上のアルミ電解コンデンサの温度上昇に影響する主要伝熱経路の確認実験を行った。続いて、熱モデル化手法の妥当性検証のための比較用実測

温度データを取得するため、テストサンプルを用いたベンチマーク実験を行った。そして、これらのデータを用いて、装置レベルのシミュレーションを想定したアルミ電解コンデンサの熱モデルについて、実測データとの比較を行いその妥当性の確認を行った。本稿では、これら一連の実験、検討結果を報告する。

2. アルミ電解コンデンサの温度上昇に影響する主要伝熱経路の確認実験

本実験では、図 2 に示すスイッチング電源を実機サンプルとして用いて実験を行った。実験は、コンデンサを実機から取り外して実験基板に実装することで、スイッチング電源を通常動作させた状態で行う。表 1 に、本実験で設定した各要因の実験水準を示す。各実験要因と水準を L₈ 直交表に割り付けを行い、8 通りの実験条件を設定した。温度測定結果の分散分析結果を表 2 に示す。

Fig. 2 Experimental set up

Table 1 Factors and levels

No.	Factor	Level 1	Level 2
1 A: PCB	(Copper coverage of PCB)	10%	70%
2 B: Power loss	(Load factor of power supply)	0%	100%
3 C: Conduction	(PCB temperature)	50 degC	70 degC
4 D: Convection	(Location of Electrolytic capacitor relative to heat sink)	Downside	Upside
5 E: Radiation	(Radiation of heatsink)	0.1	0.9

Table 2 Experimental layout

Factor	Variation	Degrees of freedom	Variance	Fo	Test	Degrees of contribution [%]
A (PCB)	21.1	1	21.1	18.8	*	6.7
B (Power loss)	10.1	1	10.1	9.0		3.0
C (Conduction)	190.1	1	190.1	169.0	**	63.0
D (Convection)	66.1	1	66.1	58.8	*	21.7
E (Radiation)	10.1	1	10.1	9.0		3.0
Error	2.3	2	1.1	-		2.6

この分散分析の結果から、アルミ電解コンデンサの温度上昇に影響する主要伝熱経路としては、要因 C（伝導）、すなわちプリント基板からの伝熱による影響が大きいことが分かる（寄与率 63%）。熱モデルに基板からの熱伝導経路の考慮が必要となること、およびシミュレーション結果については基板からの熱伝導影響の検証が必要となること、この結果から知見として示される。

3. 熱モデル化手法の妥当性検証のための比較用実測温度データの取得（テストサンプルを用いたベンチマーク実験）

前項では、実機を用いて主要伝熱経路の確認実験を行ったが、この結果はシミュレーション結果の比較用実験データとして用いるには実験条件の複雑さのため不向きである。そこで、シミュレーションモデル検証のための比較データとすることを目的として、実験データ（ベンチマークデータ）の取得を行う。図 3 に実験用モデルを示す。本実験では、表 3 の実験要因と水準を L₈ 直交表に割り付けを行い 8 条件の実験条件を設定して実測データの取得を行った。

Fig. 3 Experimental model

Table 3 Benchmark experiment condition

Experimental factor	Experimental condition	
	1	2
1 Arrangement	Horizontal 	Vertical
2 Emissivity of heat sink	Metal surface ($\epsilon \approx 0.15$)	High-emissivity coating ($\epsilon \approx 0.94$)
3 Temperature of chip resistor	Not heated	ΔT 50 deg.
4 Self heat of capacitor	Not heated	ΔT 5 deg.
5 Cooling method	Natural convection	Forced convection (1m/sec)

4. ベンチマーク実験結果とシミュレーション熱モデル

図 4 にシミュレーションモデル構造を示す。プリント基板は熱伝導率 0.35W/mK の等方性熱伝導率を設定し、表面放射率を 0.9 に設定した。ヒートシンクの熱伝導率は 240W/mK とし、表面放射率は実験条件に合わせて設定した（0.15 または 0.94）。パワー半導体は熱抵抗ネットワークでモデル化し、ジャンクションー放熱側フランジ間熱抵抗を 0.8°C/W、ジャンクションー印字面側パッケージ間熱抵抗を 50°C/W の 2 抵抗モデルとした。チップ抵抗は厚みの

ない二次元の発熱体要素でモデル化した。電解コンデンサは外装ケース、エレメント、および封口ゴム部の 3 要素で構成した。また、外装ケースとエレメント間には空気層（熱伝導率 0.024W/mK）を設定した。外装ケースは空気層を構成するオブジェクトの表面物性として厚み 0.52mm の熱伝導率 205W/mK を設定することで等価的にモデル化し、表面放射率を 0.9 に設定した。エレメントは実物寸法から直径 21.6mm、高さ 25mm の形状でモデル化した。エレメントは電極アルミ箔と電解紙を合わせて同心円状に巻き回した構造となっているため、熱伝導率の異方性を考慮し、高さ方向 81.5W/mK、面方向 0.34W/mK の熱伝導率を設定した。封口ゴム部は実際の電解コンデンサはベークライト板とゴム板で構成されているが、これらを合わせて熱伝導率 0.2W/mK の単一ブロックに簡易化してモデル化した。また、実際の電解コンデンサには外装ケースの表面に PET 製スリーブが取り付けられているが、本シミュレーションモデルではスリーブを無視してモデル化していない。

Fig. 4 Simulation model

図 5 にエレメント中心温度の温度上昇のベンチマーク実験実測データとシミュレーション結果の比較を示す。エレメント中心においておよそ 2°C 以内の誤差でシミュレーション結果を得ることができる。

Fig. 5 Comparison of measured and simulation (Temperature rise of center of an element)

5. まとめ

基板自立型アルミ電解コンデンサの熱解析モデル化手法の提案と妥当性検証を目的として、実機を用いた電解コンデンサの温度上昇についての主要伝熱経路の確認実験、およびベンチマーク実験モデルを用いた実測温度データの収集とこれに対応するシミュレーション結果の比較を行った。この結果、本稿で示したモデル化手法は実用的に十分な精度で電解コンデンサ温度の予測が可能であることを確認した。