

電子機器の熱設計に関する研究

(第31報)

～トロイダルコイルの熱解析モデル～

中部エレクトロニクス振興会

名古屋市工業研究所

平成29年2月

【技術委員会】

委員長	株式会社豊田自動織機	三輪 誠
副委員長	萩原電気株式会社	加藤 澄夫
副委員長	北川工業株式会社	大橋 良紀
顧問	名古屋工業大学	池田 哲夫

【第3分科会】

リーダー	株式会社豊田自動織機	壁谷 真人
サブリーダー	オムロンオートモーティブエレクトロニクス株式会社	齊藤 幸弘
委員	アイシン精機 株式会社	岡田 裕治
委員	株式会社 アドバンスドナレッジ研究所	大串 哲朗
委員	オムロンオートモーティブエレクトロニクス株式会社	高橋 健志
委員	オムロンオートモーティブエレクトロニクス株式会社	塩澤 宏章
委員	株式会社構造計画研究所	森 光寛
委員	株式会社構造計画研究所	大川 瑞葉
委員	株式会社構造計画研究所	飯嶋 保男
委員	株式会社ジェイテクト	桑原 史郎
委員	株式会社ソフトウエアクレイドル	栗林 真一
委員	株式会社ソフトウエアクレイドル	衛藤 潤
委員	株式会社デンソー	篠田 卓也
委員	株式会社デンソー	松井 啓仁
委員	株式会社豊田自動織機	小澤 孝充
委員	富士高分子工業株式会社	服部 真和
委員	富士通テン株式会社	渡辺 保幸
委員	名古屋市工業研究所	高橋 文明
委員	名古屋市工業研究所	梶田 欣
委員	名古屋市工業研究所	近藤 光一郎
委員	名古屋市工業研究所	岩間 由希
委員	名古屋市工業研究所	間瀬 剛

(敬称略)

目 次

	頁
1. はじめに	
1.1 本研究の背景	1
1.2 これまでの活動	1
1.3 本研究（第4次活動）の目的	2
2. 従来モデルの課題	
2.1 コイルのモデル化手法の現状	4
2.2 コイル単体での放熱特性評価	4
2.3 円筒ブロックモデルの評価	6
3. トロイダルコイルの簡易モデル構築	
3.1 熱回路計算	9
3.2 FEM 解析との比較・検証	15
3.3 簡易モデルの構築	19
4. 直流（DC）発熱での評価	
4.1 実験	27
4.2 詳細モデル解析	31
4.3 簡易モデル解析	36
5. 交流（AC）発熱での評価	
5.1 実験	39
5.2 コイルの損失計算と詳細モデル解析	44
5.3 簡易モデル評価	53
6. 電界コンデンサへの熱影響評価	
6.1 実験	56
6.2 損失計算	61
6.3 詳細及び簡易モデル解析	71
7. CFD ソフト違いによる評価	
7.1 FLoEFD による簡易モデルの解析結果	78
7.2 熱設計 PACによる簡易モデルの解析結果	82

8. 結論と今後の取り組み	
8.1 結論	86
8.2 今後の取り組み	87
参考文献	88

1. はじめに

1.1 本研究の背景

電子機器の小型・高機能化の進展に伴って、電子機器の発熱密度増大と高密度実装化が進み、信頼性を確保した設計が難しくなっている。一方で、グローバルな競争の下、新製品を低コストで市場へタイムリーに投入する必要があり、設計工数の低減と開発期間の短縮が求められている。

従来は、「設計→試作→評価→設計変更」を繰り返して設計仕様を満足させてきたが、この手順では設計が一旦完了した後に、「評価→設計変更→試作」を繰り返すために、設計期間・設計工数がかかる上、対策費用が高つくという問題があった。

この対策として、試作レスで評価可能なシミュレーション技術の活用が広がっている。シミュレーションによる性能予測が可能であれば、バーチャルで「設計→評価→設計変更」のサイクルを繰り返した後に、設計確認の意味で試作、評価を行うことができ、設計期間短縮と設計工数低減ができる。加えて、設計のフロントローディング化（設計不具合の前出し）を実現できるため、結果として、設計自由度が高い初期段階から対策を折り込んだ、競争力のある製品開発が可能になる。

シミュレーションは、ソフトを購入して、使い方を学べば結果を出すところまではできるが、設計に用いるためには結果の確からしさを担保する必要がある。そのためには、実測との比較を通して、解析手法、解析範囲や境界条件などシミュレーションの設定が実現象と合っているか検証しなければならない。特に電子部品は、複雑な形状のまま解析することはできないので簡略化すると誤差が大きくなる可能性があるため注意が必要である。しかしながら、設計・開発に熱流体シミュレーションが活用されてきたのは10数年前くらいからであり、部品のモデル化に関する情報が足りないという課題がある。

1.2 これまでの活動

(1) 第1次活動（2001年7月～2004年11月）¹⁾

平板の自然対流熱伝達率の計算式について検討した。

伝熱の教科書に載っている式^{2),3)}でも10%以内の精度で予測できること、密閉筐体の温度分布も平板の熱伝達計算式の組み合わせで概ね予測できることを明らかにした。その上で、新たに上下に発熱分布がある平板の熱伝達予測式を考案した。

また、設計者が構想段階で実用的かつ短時間で計算できるように、平板温度の予測式を用いた熱回路網法プログラムを開発し、その有効性を示した。

(2) 第2次活動（2004年12月～2008年3月）⁴⁾

熱流体シミュレーション用の部品のモデル化手法をテーマとし、基板と、基板上の部品で最も発熱が大きい半導体（TO-220型、SOP型）のモデル化手法を研究した。

試行した簡易モデルの解析精度を、サーモグラフィーによる温度分布と比較して評価し、目標精度に応じたモデリング指針を作成した。

(3) 第3次活動 (2008年4月～2011年5月)⁵⁾

第2次活動では1つの部品が実装された基板単体の評価であったが、基板を筐体内に入れた実製品に近い状態での検討を行った。

発熱部品同士の間隔や基板内の配置が違う9種類の基板を作成し、それぞれの温度を用途に応じた3段階の簡易モデルで解析し、相対比較が正しくできるかを評価した。その上で、部品や基板のモデル化の注意点をまとめた。

1.3 本研究 (第4次活動) の目的

第2次、第3次に引き続き、部品のモデル化手法をテーマとした。ここでは、総発熱に占める割合がパワー半導体に次いで大きいトランス、コイルのうち、発熱計算・評価が比較的単純なコイルを対象とした。

想定機器は、これまでと同じく自然空冷の電源とし、基板に実装されたときの温度、近隣に実装される熱に弱い電界コンデンサへの熱影響を評価した。

本報告書は8章構成になっており、概要を以下に述べる。

第2章では、従来のコイルのモデル化手法を評価し、その課題を明らかにする。

第3章では、トロイダルコイルの熱回路モデルを、巻線内、巻線-巻線間、巻線-コア間、コア内の4つの経路の熱抵抗を組み合わせる。そして、詳細モデルによる熱伝導解析の温度結果と比較し、巻線径や巻数を変えても精度良く予測できるかを評価する。

第4章では、基板に実装されたコイルに直流電流を流した時の温度上昇を評価する。配線パターンの大きさ、コイルの大きさが違う4種類のケースについて、実測と詳細モデル解析が一致することを確認した後、コイルや基板のモデルを簡易化して、解析精度への影響をみる。

第5章では、昇圧チョップ回路の一部としてコイルに交流電流を流し、巻線だけでなく、コアも発熱する条件で簡易モデルの精度評価を行う。

第6章では、コイルの近くに配置されるが、熱に弱く、熱設計では注意すべき部品であるコンデンサへの熱影響を評価する。コイル単体でなく、製品と同じく回路部品を一枚の基板に実装し、筐体に組みつけた状態で確認する。

第7章では、第六章まで使用してきた ANSYS Icepak 以外の熱流体解析ソフトを用いた場合でも、考案した簡易モデルが使えることを確認する。

第8章では、本研究の結論と今後の取組について述べる。

2. 従来モデルの課題

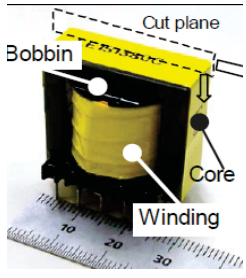
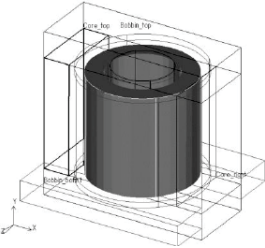

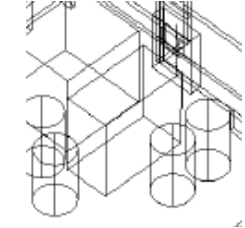
本章では、従来のコイルのモデル化手法を評価し、課題を示す。トロイダルコイルを外径サイズだけ合わせた円筒形状に置き換えるのは、コイル表面からの自然対流や放射伝熱が支配的な場合は問題ない。しかし、リードから熱が逃げる割合が大きい場合は、大きな誤差が生じる。

2.1 コイルのモデル化手法の現状

大電流が流れ、発熱が大きいチョークコイルのモデル化は、実務ではデータや理論による裏づけがないが、コイルを適当な熱伝導率の円筒ブロックに置き換えてモデル化することが多い。

過去の研究では、小泉が層巻き型、トロイダル型に分けて熱解析モデルを提案している⁶⁾。層巻き型コイルは、巻線を異方性熱伝導率の円筒ブロックに置き換えて簡易化するモデルを、また、トロイダル型は等価物性への置き換えによる簡易化が困難なため、実験から求めた熱抵抗式から算出する手法を提案しているが、製品適用時の誤差が34%と大きいことが課題となっている（表2.1.1）。

表 2.1.1 コイルの熱モデリング手法

	実形状	解析モデル	モデル化内容
層巻き型			巻線を異方性熱伝導率の円筒でモデル化
トロイダル型			同じ外形サイズの直方体でモデル化 (熱抵抗の実験式から温度を計算)

2.2 コイル単体での放熱特性評価

まず、小泉と同じ実験内容になるが、大小4種類のコイルに直流電流を流して温度上昇を測定した。

(1) 測定内容

- ・ 密に巻かれた大小4種類のコイル（図2.2.1）の平均温度上昇が $\Delta T=25K$ 、 $\Delta T=60K$ に

なるときの直流電源の出力を電圧はデジタルマルチメータ、電流はテスターで測定。

($\Delta T=60K$ の場合については、コイルサイズ最大、最小の A, D のみ)

- コイル温度は、上部と下部に付けた熱電対で測定。確認のため、サーモビューアでコイルの温度分布も測定 (図 2. 2. 2)。

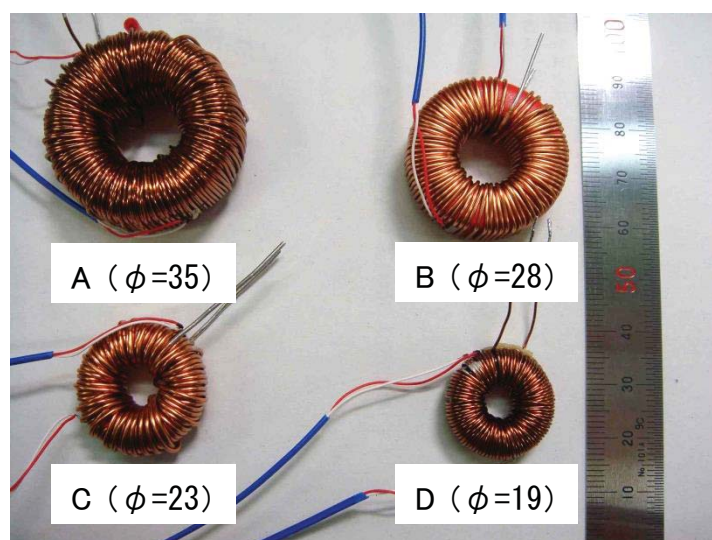


図 2. 2. 1 試験コイル

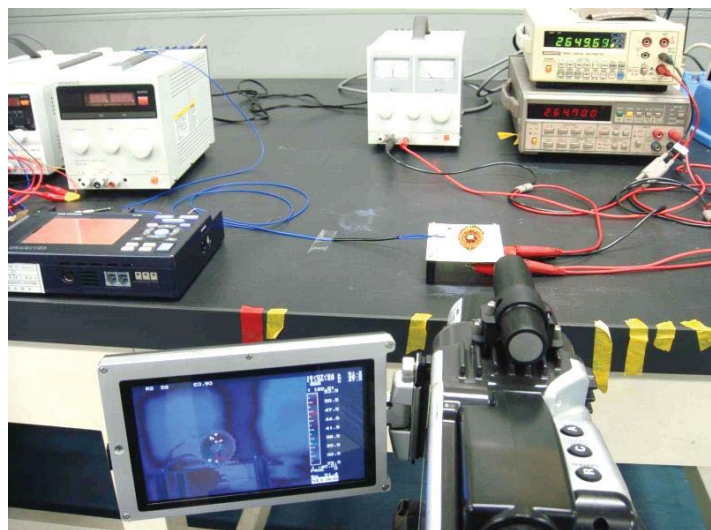


図 2. 2. 2 実験風景

(2) 実験結果

測定条件と温度結果を表 2. 2. 1 に、小泉による測定結果との比較を図 2. 2. 3 に示す。測定結果は、小泉の実験結果とほぼ一致した。