

# 論文審査報告書

氏名	あるが よしのり 有賀 善紀
学位の種類	博士(工学)
学位記番号	博機第44号
学位授与日	令和2年3月20日
論文題目	小型チップ部品を搭載したプリント基板の熱設計手法に関する研究
論文審査委員	(主査) 富山県立大学 教授 中川 慎二 教授 坂村 芳孝 教授 真田 和昭 准教授 畠山 友行 熊本大学 元教授 富村 寿夫

## 内容の要旨

本論文は、プリント基板及び基板上に実装された小型表面実装部品（小型チップ部品）を対象とし、その発熱と温度上昇及び放熱の様態に関する調査・解析により、小型チップ部品における基板を介した放熱メカニズムの解明、および、基板設計段階における熱設計の効率向上に資する熱抵抗推定式の提案を目的とする。

近年の電子機器においては、小型化・高性能化の進展に伴ってその放熱の形態が大きく変化している。電子機器の小型化に伴う筐体内の空間の減少は、旧来主体であった筐体内への送風による対流熱伝達とその換気による放熱を難しくしている。これに代わる放熱手法として、ヒートパイプなどの熱輸送デバイスと並んで重要視されているのが、プリント基板を介した熱伝導による放熱（基板放熱）の活用である。小型電子機器で多用されている多層配線基板は熱伝導が良好なため、基板をヒートスプレッドのように利用することで均熱化と放熱の促進が可能となる。

電子機器の小型化は、主要電子部品である CPU やパワー半導体の小型化に支えられてきたが、それに伴って周辺で用いられる個別チップ半導体（ダイオードやトランジスタの単独素子）及びチップタイプの L, C, R 素子などの受動部品における小型化・高電力化もまた急速に進展している。特に小型チップ抵抗器では定格電力アップが顕著で、 $2.0\text{mm} \times 1.2\text{mm}$  の外形を持つ製品では、定格電力がこの 20 年で 2 倍以上となっている。更に、同サイズの高電力対応製品では、熱流束が  $20\text{W}/\text{cm}^2$  にも達している物もあり、これは 2000 年当時の CPU の熱流束を凌駕している。小型チップ部品は表面積が小さく、部品表面からの対流・放射による放熱が僅かであるため、その放熱の 9 割は基板を経由して行われる。言い換えれば、基板放熱が不十分な場合、チップ部品は過剰な温度上昇を生じるリスクがあるため、基板

放熱はなおさら重要である。

電子機器及び電子部品を対象とした熱設計に関する研究はこれまで数多く行われてきたが、そこで議論される発熱部品は CPU やパワー半導体などの高発熱部品が主であり、発熱量が 1W 以下程度の小型チップを対象とした研究は例が少ない。一般的な認識として、1W 以下程度の低発熱の部品は温度上昇リスクが低いと考えられており、優先度が低かったためである。しかしながら、小型チップ部品では前述の通り近年の小型化による熱流束の大幅な増大により、基板放熱の不足による過剰な温度上昇のリスクが増大している。小型チップ部品はその使用数が多いこともリスク増大の無視できない要因である。

小型チップ部品における基板放熱対策は主として銅箔パターンの配置や部品レイアウトの調整であり、その実施においては回路もしくは基板設計者のスキルに頼る部分が多い。しかし、回路・基板設計者の多くは熱設計の専門家ではないことから、実質的な熱対策は、既存機種的设计情報からの類推などといった過去の実績に頼ることが多く、大きな設計変更や全くの新規設計などのケースでトラブルを生じやすいという問題がある。こうした現状に対して、設計者のスキルや過去の設計情報に頼らずシステムチックに銅箔パターンや部品の実装間隔などの基板設計条件を決定する手法が必要とされている。また、対象となる小型チップ部品は多数使用されるため、これらに対して網羅的に適用可能な簡便な手法であることも同時に求められる。

このような課題認識に基づき、本論文では 7 つの章に分けて検討を行った。まず、第 1 章では、本研究の背景と構成について示し、個別の検討に用いる解析手法について説明する。基板上に実装された部品の放熱の状況と各部の温度を解析するために、熱回路網によるモデル化を行う。熱回路網上で用いられる各部熱抵抗については、基板設計条件との関係から熱抵抗推定式の導出を行う。基板上の各部熱抵抗を求めるには、各部の温度と熱流を詳細に把握する必要があるため、数値シミュレーションを主として用い、その確認として実験を行う。第 2 章から 6 章に具体的な課題に対する検討結果を示す。

第 2 章では、まず基板及び部品周辺の熱回路網シミュレーションモデルの作成、および、シミュレーション結果から得られる各部熱抵抗と基板設計条件の整理手法についての基礎的な検討を行った。その具体的なケースとして、基板上で単独使用される小型部品とその周辺の放熱特性について基板表面からの熱伝達を境界条件とする熱伝導主体のシミュレーションによる解析を行った。解析結果の整理から部品周辺部における熱流の縮流・拡大の影響を含む熱抵抗は、放熱パッド（放熱のために配置する銅箔パターン）径と基板基材の熱伝導率との積にほぼ反比例の関係として整理されることが示された。また、こうした関係が成立する具体的な放熱パッド径及び基板基材の熱伝導率の範囲が示された。

第 2 章で得られた関係が成立するのは、放熱パッド部からの放熱が主に熱伝導で行われている場合に限られる。より一般的な基板形状を議論するためには、放熱パッド部やその周囲からの熱伝達による放熱が大きい場合に適用可能な熱回路網モデルを新たに決めなければならない。第 3 章では、モデルの検討に先立ち、このような熱伝達を主体とする放熱モデルにとって影響度の高い基板設計パラメータを把握するために、基板モデルに類似したシンプルなモデルとして 1 次元軸対称の円盤状フィンを選定し、次元解析を用いて放熱特性と基板設計条件との関係を明らかにした。基板放熱特性を示す無次元数であるフィン効率と、基板設計条件の組み合わせから得られる無次元数（設計無次元数）を用いることで、放熱特性との関係が簡潔に整理できることが示された。また、設計無次元数を実際の基板設計で取りうる範囲に限定してフィン効率との関係を調べると、フィン効率は設計無次元数の累乗に反比例するようなシンプルな形で記述可能であることが示された。

第 4 章では、第 3 章の検討から得られた知見を基に、より一般的な基板形状に適用可能な放熱モデル

として、密集実装されたチップ部品を対象とした検討を行った。熱回路網モデルにはパッド表面からの対流・ふく射を含む熱伝達による熱抵抗、及びパッド内部の熱伝導を示す熱抵抗が新たに追加された。シミュレーションには熱流体解析 (CFD) を用い、基板上にチップ部品を格子状に配置したモデルについて、各種基板設計パラメータ条件 (部品実装間隔, 実装数, 基材の熱伝導率, 基板厚み, 等) について詳細な CFD 解析を実施し、解析結果の基板各部の温度上昇と熱流を基に各部熱抵抗を算出した。各部の熱抵抗と設計パラメータの関係の整理から、パッド部から外部の基板を介した放熱を示す熱抵抗、パッド部表裏面からの熱伝達を示す熱抵抗、パッド内部の温度分布を示す熱抵抗を基板設計パラメータによって算出する推定式が得られた。こうして求められた熱抵抗の簡易推定式による温度上昇の推定値は、CFD 解析結果を概ね再現することが示された。第 4 章の検討により、熱回路網モデルを基にした密集実装時の基板の各部温度上昇の算出式が提示され、算出式に用いる各部熱抵抗について、設計パラメータを基にした熱抵抗推定式が与えられた。

第 5 章では、第 4 章の CFD 解析結果から得られた各部熱抵抗の推定式について、実験結果との比較から妥当性の確認を行った。第 4 章で得られた推定式による温度上昇の推定値は、実験結果に対して概ね一致するが、最大 30% 程度の実験値との差を持つ。そこで、熱抵抗推定式のパッド形状への依存性を利用して、パッド面積とパッド周長の比が一定となる実験結果から推定式の係数を補正する手法について確認した。また、実験結果と推定式の差異の要因について考察し、基板形状及び、CFD における熱伝達係数の過大見積りの影響を受けることが示唆された。このような推定値と実験結果との差異の程度を把握することで、第 4 章で得られた各部温度上昇及び熱抵抗の推定式を熱対策の方針決定のためのツールとして活用することができる。

第 4 章で提示された熱抵抗推定式は、第 5 章でその妥当性が確認されたが、これらは、多くのシミュレーション及び実験の結果と基板設計条件の関係の整理によって得られており、物理的な健全性には疑問がある。例えばパッド部から外部の基板を介した熱抵抗の推定式では、熱抵抗はパッド周長の累乗に反比例する関係が得られるが、その指数部分は推定式の導出に用いるシミュレーション条件によっても変化し、累乗部分の係数の次元もそれに伴って変化してしまうことから、推定式の次元の健全性には疑問を持たれる余地がある。また、具体的な基板形状において解析を行い、その結果を整理するという手法は、確認された範囲を逸脱した条件での成立性が保証されないという点に注意が必要となる。

第 6 章では、第 4 章及び第 5 章で議論された基板放熱モデルに類似した 2 次元軸対称円盤モデルについて次元解析を行い、基板放熱特性を示す無次元数であるフィン効率について、基板設計条件を組み合わせ得られる 3 つの設計無次元数を用いて関係を簡便に整理できることが示された。さらに、基板設計条件を第 4 章及び第 5 章の基板設計パラメータの範囲に限定することで、フィン効率は設計無次元数の累乗で表現することができることが示された。フィン効率と熱抵抗の関係から、パッド部から外側の基板を介した熱抵抗は、設計無次元数の累乗を用いて表現されることが示された。この関係から、熱抵抗は本質的には設計無次元数の累乗に比例し、指数の大小によって推定式の係数の次元は変化しないため、熱抵抗推定式は次元的に健全であることが示された。第 4 章の CFD 解析結果についても同様の無次元数を用いた整理が可能で、2 次元軸対称モデルの議論と同様、熱抵抗推定式の次元的な健全性は保たれていることが推察される。こうした無次元数を用いた整理により、放熱現象の定性的かつ原理的な理解が深まった。

第 7 章では、すべての章での検討をまとめ、結論を述べている。工学的に広く応用するための指針や、残された課題などが示された。

## 審査の結果の要旨

本論文は、プリント基板及び基板上に実装された小型表面実装部品（小型チップ部品）を対象とし、その放熱の様態に関する調査・解析により、小型チップ部品における基板を介した放熱メカニズムの解明、および、基板設計段階における熱設計の効率向上に資する熱抵抗推定式の提案を目的とする。全7章で構成されている。

第1章では、背景と目的を述べている。近年の電子機器においては、小型化・高性能化の進展に伴ってその放熱の形態が大きく変化している。従来はリスクが低いと考えられてきた小型チップ部品においても、小型化による熱流束の大幅な増大により、基板放熱の不足による過剰な温度上昇のリスクが増大している。設計者のスキルや過去の設計情報に頼らずシステムチックに銅箔パターンや部品の実装間隔などの基板設計条件を決定する手法が必要とされていることを指摘している。

第2章では、基板及び部品周辺の熱回路網シミュレーションモデルの作成、および、シミュレーション結果から得られる各部熱抵抗と基板設計条件の整理手法についての基礎的な検討を行った。具体的なケースとして、基板上で単独使用される小型部品とその周辺の放熱特性を取り上げ、基板表面からの熱伝達を境界条件とする熱伝導主体のシミュレーションによる解析が行われた。部品周辺部における熱流の縮流・拡大の影響を含む熱抵抗は、放熱パッド（放熱のために配置する銅箔パターン）径と基板基材の熱伝導率との積に反比例することが示された。この関係が成立する具体的な放熱パッド径及び基板基材の熱伝導率の範囲が示されている。

第3章では、熱伝達を主体とする放熱モデルにとって影響度の高い基板設計パラメータを把握するために、基板モデルに類似したシンプルなモデルとして1次元軸対称の円盤状フィンを選定し、次元解析を用いて放熱特性と基板設計条件との関係を明らかにした。基板放熱特性を示す無次元数であるフィン効率と、基板設計条件の組み合わせから得られる無次元数（設計無次元数）を用いることで、放熱特性との関係が簡潔に整理できることが示された。

第4章では、より一般的な基板形状に適用可能な放熱モデルとして、密集実装されたチップ部品を対象として、放熱機構とそのモデル化が議論されている。熱回路網モデルにはパッド表面からの対流・ふく射を含む熱伝達による熱抵抗、及びパッド内部の熱伝達を示す熱抵抗が新たに追加された。熱流体（CFD）解析を実施し、各種基板設計パラメータ条件（部品実装間隔、実装数、基材の熱伝導率、基板厚み、等）について詳細な解析結果を取得し、解析結果の基板各部の温度上昇と熱流を基に各部熱抵抗を算出した。各部の熱抵抗と設計パラメータの関係の整理から、(1)パッド部から外部の基板を介した放熱を示す熱抵抗、(2)パッド部表裏面からの熱伝達を示す熱抵抗、および、(3)パッド内部の温度分布を示す熱抵抗を、基板設計パラメータによって算出する推定式が得られた。さらに、熱回路網モデルを基にした密集実装時の基板の各部温度上昇の算出式が提示された。

第5章では、前章で得られた各部熱抵抗の推定式について、実験結果との比較から妥当性が確認された。温度上昇の推定値は実験結果に対して概ね一致するが、最大30%程度の差を持つ。この要因について検討するとともに、パッド面積とパッド周長の比が一定となる実験結果から推定式の係数を補正する手法が示された。推定値と実験結果との差異の程度を把握することで、提案した推定式を熱対策の方針決定のためのツールとして活用することができる。

第6章では、ここまで提案した式の正当性を検証するため、2次元軸対称円盤モデルについて次元解析を行っている。基板放熱特性を示す無次元数であるフィン効率について、基板設計条件を組み合わせ

せて得られる3つの設計無次元数を用いて関係を簡便に整理できることが示された。無次元数を用いた整理により、提案式が持つ物理的な意味が議論された。

第7章では、すべての章での検討をまとめ、結論を述べている。基板放熱を主体とする小型チップ部品の放熱メカニズムが明らかとなり、基板上の温度の簡易推定のための基盤となる技術が構築されたことを要約している。工学的に広く応用するための指針や、残された課題などが示された。

以上の研究成果は、密集実装されたチップ部品を搭載したプリント基板に対して、回路もしくは基板設計者による熱設計技術を大きく向上させるものである。電子機器の設計初期からの熱設計に役立つものであり、工学的観点から重要な知見が得られていると評価できる。

令和2年1月31日に博士論文の審査及び最終試験を実施し、申請者は当該分野および周辺分野に関して博士としての十分な全般的知識を持ち、学術研究にふさわしい討論ができ、独立して研究を遂行する能力を有するものと判定し、本論文は博士（工学）の学位論文として合格であると認められた。