

# 論文審査報告書

氏名	いし い まさ とし 石井 雅俊
学位の種類	博士(工学)
学位記番号	博機第46号
学位授与日	令和4年3月19日
論文題目	電子機器の電気と熱の連成解析のための 相変化材料の SPICE モデルに関する研究
論文審査委員	(主査) 富山県立大学 准教授 畠山 友行 教授 坂村 芳孝 教授 中川 慎二 教授 真田 和昭 熊本大学 元教授 富村 寿夫

## 内容の要旨

サーバー、パーソナルコンピュータ(PC)およびスマートフォン等の電子機器において、ソフトウェアの高機能化や画素数の増加等により、搭載される Central Processing Unit(CPU)には高い計算処理能力が求められている。CPUの高速化のため、動作クロック周波数の増加とゲートサイズの微細化が進められてきた。しかし、ゲート幅が 100 nm 以下になったことで、トンネル効果によってトランジスタのリーク電流が増加してしまい、ゲート当たりの消費電力が増加している。近年では、動作クロック周波数の上昇が難しくなっており、マルチコア化によって性能を向上する手法がとられている。マルチコア化は、搭載されるトランジスタ数が増加することを意味しており、CPUの消費電力は増加しつつある。CPUの消費電力の増大により、発熱量も増加傾向にある。CPUは許容温度を超えて動作すると、誤作動や故障を引き起こす可能性があるため、温度を適切に管理する必要がある。

近年のCPUは、温度により処理能力が動的に制御される。一般的にCPUは動作クロック周波数が高いほど計算性能が高くなる反面、消費電力は大きくなる。そのため、CPU温度が低い場合には、CPUの熱容量による非定常な温度上昇を考慮し、冷却性能を超えない範囲で一時的にクロック周波数を高くする。これにより、総合的に高い計算性能を実現するようになっている。その結果、CPUの発熱量は秒単位で急激に増減する。冷却面を考えると、常に最大発熱を想定した冷却を行った場合、CPUの発熱量が少ない状態では過剰な冷却となってしまう。冷却をするためには、ファンなどを動作させるための電力が必要となる場合が多く、過剰な冷却は過剰な電力消費となってしまう。そのため、時々刻々と変化するCPUの発熱量に対応した冷却が求められる。

CPUの冷却手法として空冷を用いた場合は、冷却ファンの回転数を電子機器の内部温度に応じて制御することが行われている。冷却ファンの消費電力はファンの回転数の3乗に比例するため、消費電力の観点ではできる限り冷却ファン回転数を抑えたほうが良い。発熱量の急激な変動に対して、発熱量が増加した際に熱を蓄積し、発熱量が減少した際に熱を放出することができれば、サーバー内部の温度上昇に時間遅れを発生させ、温度上昇を抑えることができるため、冷却ファンの回転数の上昇を抑えることができる。このようなことを実現させる手法として、冷却システムへの相変化材料(Phase Change material)の導入が考えられる。冷却システムへ相変化材料を導入することで、短時間の高発熱の際の熱の一部を相変化材料の潜熱により吸収し、発熱量が低下した際に吸収していた熱を放出できれば、高効率な温度制御が期待できる。

しかし、実際の電子機器に相変化材料を適用するためには、装置ごとに相変化材料の配置位置やその搭載量等を検討する必要がある。さらに、相変化材料は、材料により融点や潜熱量が異なるため、材料選択も設計要素となり、数多くのパラメータを最適化する必要がある。相変化による潜熱の吸収や放出は非定常現象であるため、相変化材料を機器の冷却に適用するための設計手法として数値解析を用いた場合、数多くのパラメータを考慮した伝熱の過渡応答解析が不可欠である。

伝熱解析においては、数値流体力学(Computational Fluid Dynamics: CFD)解析の発展により、実際の製品の定常状態のCFD解析が広く用いられるようになってきている。しかし、CFD解析による過渡応答等の非定常状態の計算には、非常に時間がかかる。そのため、熱回路網法を用いた非定常熱解析が提案されている。熱回路網法は、熱と電気の相似性を用いて伝熱を回路で表現することで、熱の流れや温度を解析する手法である。熱回路網法では次元数やモデル化手法を工夫することにより、求められる温度推定精度や計算速度に合わせた解析が可能である。従って、適切な熱回路網法のモデルを構築することで、CFD解析に比べて推定精度と高速性を兼ね備えた解析が可能である。

さらに、CPU等のデバイスでは、消費電力が温度に依存する。CPUの発熱要因のひとつにリーク電流があるが、リーク電流は大きな温度依存性を持ち、デバイス温度の上昇によりリーク電流がさらに増加する傾向がある。そのため、より正確な冷却手法の検討には、電気特性と熱特性の連成解析が求められる。

一般的な電子機器の回路の動作検証には、SPICE(Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis)が用いられる。熱回路網法は熱と電気の相似性を用いて熱解析を行う手法であるため、SPICEを用いて熱回路を解析することができる。つまり、熱回路を電気回路と同じ回路内に配置してSPICEで解析することで、電気と熱の連成解析を容易に行うことができる。そのため、相変化材料による潜熱の吸収や放出をSPICE上で解析することができれば、温度によって変化する消費電力の増減、つまり発熱量の増減を考慮した上で、相変化材料を用いた高効率冷却システムの設計が可能となる。以上のことから、電気回路と熱回路の連成解析を行うための相変化材料のSPICEモデル構築が必要であると考えられる。

本研究は、電子機器の電気と熱の連成解析のため、相変化材料のSPICEモデルの構築に関するものである。高効率な温度制御のため、相変化材料を用いた電子機器の熱設計に適用可能な相変化材料のSPICEモデルの確立を目的としている。

本論文は6つの章で構成される。

第1章では、相変化材料のSPICEモデルの必要性について述べた。

第2章では、伝熱現象と電気回路との類似性を用いて熱回路網を構築する方法について示した。

第3章では、相変化材料の SPICE モデル構築について検討した。相変化材料の潜熱、融点のばらつきモデル化が必要であることを示した。

潜熱は、熱抵抗と熱容量の熱モデルに潜熱を蓄積するためのキャパシタを追加しモデル化した。潜熱を模擬するためには、相変化材料が固相、混相、液相のどの相状態であるか判定する方法が必要であるため、相変化材料温度と上述の潜熱量を保存するためのキャパシタに蓄えられた電荷量により検出する方法を検討した。潜熱による吸熱および発熱による温度が融点近傍に維持される現象をモデル化するにあたり、電圧制御スイッチとビヘイビア電流源による制御方法について検討した。電圧制御スイッチを用いた制御では、温度上昇時の蓄熱は再現することができるものの、それを温度降下時の発熱を含めたモデルに拡張するためには、温度変化の傾きやキャパシタに蓄積された熱量を放出するための昇圧回路など多くの付加回路が必要であり、電圧制御スイッチを用いたモデル化が難しいことが分かった。可能な限り単純化されたモデルを構築するため、電圧制御型ではなく電流制御を行うためのビヘイビア電流源を用いた潜熱モデルについて検討した。その結果、相変化材料に流入する全ての熱流量の和を、ビヘイビア電流源により上述の潜熱量を保存するキャパシタに蓄積/放出するモデルを考案した。このモデルは相変化材料内部の熱時定数の遅れを利用した制御であるため、制御間隔を一定時間以下にする必要がある。制御間隔が小さすぎると計算速度の低下を引き起こすため、本論文では最大制御間隔について検討を行い、相変化材料の熱抵抗と熱容量に基づく熱時定数の 1/100 程度の時間間隔以下が適切であるとの結論を得た。以上の検討から、簡単な等価回路モデルを用いて相変化材料の SPICE モデルの動作検証を行った。この結果、ビヘイビア電流源による相変化材料モデルは、電圧制御スイッチによる温度上昇時と同じ挙動を示すことが確認された。さらに、温度降下時の潜熱による発熱も再現することが確認された。また、熱回路で融点のばらつきを表現するために、異なる3つ融点を設定し、それぞれの融点で異なる潜熱量を持たせる手法を提案した。

第4章では、第3章で構築した相変化材料の SPICE モデルに関して、実際のサンプルを作製し、実測結果と熱回路の解析結果との比較を行った。本章で扱った解析では、相変化材料に加えて、アルミケース、ラバーヒータ、断熱材もモデル化し、外気自然対流による冷却も考慮した。アルミケースの上面温度および下面温度の実測値と解析結果の比較を行ったところ、実測値と解析値の差は $\pm 4$  °C であることが確認でき、精度の良い温度予測を行えることが示された。構築した解析モデルは、温度だけでなく、蓄積した潜熱量も可視化できることから、相変化材料を含む電子機器の設計において有用であると考えられる。

第5章では、構築した相変化材料モデルを用いて、設計最適化に向けた冷却性能の向上検討のためのツールとして適用可能かどうかを検討した。最適化のための設計パラメータ決定部と、設計パラメータに基づいて伝熱解析結果を出力する解析部を構築し、2つを連携して解析を行う系を構築した。このシステムを用いて、第4章で検証したアルミケースの外観形状を維持したまま、デバイス温度に相当するアルミケース下部温度が室温から 80 °C になるまでの保持時間が最も長くするための検討を行った。保持時間を改善するため、相変化材料内部にアルミのピンを挿入してその効果を検証した。直径 3mm のピンを下部から 25 本挿入した結果、熱時定数が低減され、保持時間を 10%長くできることが分かった。解析と同じサンプルを試作して検証した結果、 $\pm 4$  °C の差で一致した結果が得られた。このことから構築したモデルは電子機器冷却の設計ツールとして有用であることが確認された。

第6章では検討結果を総括して結論および今後の課題を述べた。

## 審査の結果の要旨

サーバー等の電子機器において、CPU(Central Processing Unit)には高い計算処理能力が求められている。CPUの計算処理能力を高めるため、トランジスタの微細化による信号処理の高速化と高集積化、さらにはマルチコア化が進んでおり、CPUの発熱量は増加傾向にある。CPUは熱に弱く、許容温度を超えての使用は、故障や誤作動の原因となる。そのため、CPUの熱対策が急務の課題となっている。

近年では、CPUの熱対策として、温度によって処理能力を動的に制御される技術が利用されており、CPUの発熱量は時間とともに増減する。つまり、CPUの温度が低い場合は、一時的にCPUの処理能力を高くし、CPUの温度が高くなった場合は、CPUは処理能力を落とす。処理能力が高い状態をできるだけ長く保つことが望まれるが、処理能力が高い状態では消費電力も大きくなり、発熱量が増える。CPUの処理能力の高い時間を長くするための工夫として、相変化材料の潜熱吸収を用いて温度上昇の時間遅れを発生させ、ピーク温度を抑える冷却手法が考えられる。相変化材料とは、電子機器の動作温度の範囲に融点を持つ固体を表し、材料が固体から液体に変化する際に吸収される潜熱を利用して、温度の変動を抑えるものである。つまり、相変化材料を用いることで、CPUの発熱量が大きくなるときに、相変化材料の潜熱の吸収により温度の上昇を緩やかにし、CPUの処理能力が高い時間を長くすることが可能となる。一方で、発熱量が小さくなったときには吸収された潜熱を放出するが、CPUからの発熱量が小さい状態であるため、CPUの温度は緩やかに低下することとなり、相変化材料からの潜熱の放出が問題になることはない。このような相変化材料を実際の電子機器に適用するためには、材料の融点や潜熱量、機器内部の設置場所、設置量など多くのパラメータを最適化する必要がある。多くのパラメータを実験によって最適化することは多大なる時間を要するため、数値解析を用いた最適化が望まれる。潜熱の吸収や放出は非定常現象であるため、時間変化を考えた非定常解析が必要となる。しかし、電子機器の熱設計で広く用いられている数値流体力学解析では、長い解析時間が必要となり、多くのパラメータを検討することが困難となる。そのため、高速な解析による最適化設計手法が必要となり、高速な熱解析手法である熱回路網法が有力となる。さらに、精度の高い温度予測のためには、CPUの消費電力の温度依存性を考慮する必要があり、熱と電気の連成解析が必要となる。そのため、電子回路の動作検証に広く用いられているSPICE (Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis)を利用して、電気回路と熱回路を同時に解析することが望ましい。

本論文は、相変化材料を用いた電子機器冷却システムにおいて熱と電気を連成した設計を実現することを目的とし、相変化材料で生じる潜熱吸収を解析可能なSPICEモデルを構築するものである。

本論文は6つの章で構成されており、各章で議論されている内容は以下の通りである。

第1章では、相変化材料のSPICEモデルの必要性について述べている。

第2章では、伝熱現象と電気回路との類似性を用いて熱回路網を構築する方法について、詳細を説明している。

第3章では、相変化材料の SPICE モデル構築について検討している。具体的には、潜熱の吸収と放出を表現できるモデルとして、ビヘイビア電流源を用いたモデルを提案しており、他の方法を用いたモデルとの比較を行い、提案したモデルの優位性を示している。また、相変化材料の熱抵抗と熱容量に基づく熱時定数の 1/100 程度の時間刻みでの解析を行うことにより、解析が安定することを示している。さらに、実際の相変化材料は融点にばらつきを有しており、融点のばらつきを与えるモデル化手法も提案している。

第4章では、第3章で構築した相変化材料の SPICE モデルに関して、実際のサンプルを作製し、その実測結果とシミュレーション結果との比較による検証を行った結果を示している。本章のシミュレーションでは、実験装置を表現するために、相変化材料に加えて、相変化材料を封入するためのアルミケース、発熱を与えるためのラバーヒータ、冷却部以外への熱漏れを防ぐための断熱材もモデル化し、冷却部では自然対流による外気への熱移動も考慮している。アルミケースの上面温度および下面温度の実測値とシミュレーション結果の比較では、測定値と解析値の差は $\pm 4$  °C であることを確認し、提案した相変化材料の SPICE モデルが非常に精度良く相変化現象を解析できるモデルであることを示している。また、解析結果から多くの情報を得ることができ、潜熱の吸収や放出の詳細を検証している。これらのことから、提案した SPICE モデルは、相変化材料を含む電子機器の伝熱解析において有用であると考えられる。

第5章では、構築した相変化材料 SPICE モデルを用いた冷却性能の最適化設計の検討を行っている。具体的には、Python と SPICE を連携することで、最適化のため設計パラメータ決定部と、その設計パラメータに基づいて伝熱解析結果を出力する解析部からなる、多数のパラメータを一括で検討できるシステムを提案している。また、このシステムを用いて、第4章で検証したアルミケースの外観形状を維持したまま、アルミケース下部温度が室温から決められた温度になるまでの保持時間を最も長くするための手法の検討や、相変化材料内部に熱伝導性を高めるためにアルミ製ピンを挿入する効果の検討を行っている。その結果、アルミケースの構造の工夫により、決められた温度になるまでの保持時間を最大 10% 長くすることに成功している。本章では、第4章で行った実験よりも複雑な構造のアルミケースを用いた実験を行っているが、本章でも実験結果と解析結果の差は $\pm 4$  °C であり、提案した相変化材料の SPICE モデルが、電子機器の熱設計ツールとして有用であることが確認されるとともに、提案した Python と SPICE の連携システムにより設計の最適化が可能であることが示唆されている。

第6章では検討結果を総括して結論および今後の課題を述べている。

本論文に関連する発表として、申請者が筆頭著者である論文 2 件が学術論文誌に掲載されている。

令和 4 年 1 月 25 日に博士論文の審査及び最終試験を実施し、申請者は当該分野及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、博士（工学）の学位論文として合格であると認められた。