

氏 名	にし こうじ 西 剛 伺
学 位 の 種 類	博士 (工学)
学 位 記 番 号	博機第 36 号
学 位 授 与 日	平成 2 7 年 3 月 2 1 日
論 文 題 目	マイクロプロセッサの非定常動作を考慮した 小型電子機器の熱設計に関する研究
論文審査委員	(主査) 富山県立大学 准 教 授 中 川 慎 二 教 授 坂 村 芳 孝 教 授 川 上 崇 教 授 森 孝 男 講 師 畠 山 友 行 富山大学 教 授 平 澤 良 男

内 容 の 要 旨

本論文は、小型電子機器を対象として、実用的な精度でのマイクロプロセッサのシリコンダイホットスポット温度やユーザが直接手に触れる筐体表面温度の非定常予測手法を確立し、マイクロプロセッサの非定常動作を考慮した熱設計に関する知見を獲得することを目的とする。ノートブック型 PC (Personal Computer) やタブレットデバイス及びそれらと同等の性能を有するマイクロプロセッサを採用する電子機器を小型電子機器として扱う。

小型電子機器の熱設計に関する研究としては、1990 年代後半に各企業においてノートブック型 PC を対象として研究開発が活発に行われ、その方法論が確立された。その頃から製品開発の一環として、3 次元熱流体シミュレーションや熱回路網法といった数値解法による定常解析が実施されるようになった。その後、マイクロプロセッサの性能向上とともに消費電力が増大していくが、2000 年代前半にはヒートパイプ、水冷モジュールといった放熱機構の研究開発が進み、2000 年代後半には熱設計用の消費電力指標である TDP (Thermal Design Power) をほぼ固定したマイクロプロセッサの製品ラインナップが半導体メーカーによって組まれるようになり、PC メーカーでは同一の熱設計を複数世代のマイクロプロセッサに渡って使用できるようになっていった。2000 年代後半以降、半導体製造プロセスは微細化が進み、その微細化スピードが鈍化するとともに、リーク電流が顕著に増えるようになり、その低減及び対策が半導体設計において重大な課題となった。リーク電流とは、本来、半導体回路が動作するのに必要な経路以外に漏れてしまう電流のことで、回路動作に関係なく消費される電力損失である。リーク電流の増大は消費電力の増大を意味し、半導体製造プロセスのみに頼った製品開発では、消費電力を抑えつつ高性能化を達成することが難しくなった。消費電力の増大は、熱設計においては発熱量の増大を意

味する大きな問題であるが、消費電力を抑えつつ性能を向上させる方法論として、この頃からマイクロプロセッサのマルチコア化に加えて、マイクロプロセッサの消費電力制御技術も同様に進展し、近年では、シリコンダイ温度や実行中のプログラムの負荷や消費電力の状態によってマイクロプロセッサ自体が動的に電力制御を行うようになった。このような変化に対応した熱設計技術の開発が求められており、本論文はそれに応えるものである。

本論文は5つの章で構成され、第1章では本研究の背景および目的、第2章ではマイクロプロセッサの発熱のモデル化と消費電力推定式の提案、第3章では小型電子機器のための実用的な非定常温度予測手法の確立を目指した熱回路網法の提案と検証、第4章ではマイクロプロセッサの非定常動作を考慮したシステムレベルの非定常熱設計についての検証と考察、第5章ではすべての章を総括するとともに今後の電子機器冷却技術への展望を記載した。

第2章では、発熱源であるマイクロプロセッサのモデル化について検討した。実用的な精度で温度予測を行うには、マイクロプロセッサにおける発熱及び伝熱経路の適切なモデル化が必要となる。マイクロプロセッサの発熱現象については、熱・電気連成解析やリーク電流等の厳密なモデル式を取り込んだツールの開発が報告されているが、これらはデバイス内の局所的な発熱に関する解析を目的としており、定性的な議論もしくはマイクロ秒以下の非定常挙動をターゲットとすることが多い。一方、電子機器の熱設計では、電子機器全体の伝熱経路を解析、検証するため、ミリ秒から秒単位での温度変化を対象としており、時間スケールが大きく異なる。また、従来の電子機器の冷却に関する研究では、一般的にマイクロプロセッサの消費電力を固定値として取り扱っているが、それらはリーク電流による消費電力の温度依存性を加味していないため、特に非定常温度予測において予測温度を過小もしくは過大評価してしまう可能性がある。そこで、近年の半導体物性の研究で得られたリーク電流の電圧依存性および温度依存性のモデル式から、小型電子機器の熱設計に適用しやすい消費電力推定式を導出し、それを適用した3次元非定常熱伝導シミュレーション結果と実測結果との比較を通じて、その有効性を検証した。本消費電力推定式は、従来の手法とは異なり、定常状態における消費電力の実測結果から消費電力算出に必要な係数を求めるため、半導体物性やパラメータが非公開である場合にも用いることができるという利点があり、多くの設計現場での活用が期待できる。さらに、これまで十分な議論がなされていなかった、熱解析を実施する上で適用すべき消費電力値更新の時間周期について考察し、100 マイクロ秒以下の時間ステップで消費電力を更新すれば十分な精度で非定常温度予測が可能であることを確認した。最後に、マイクロプロセッサシステムの非定常温度予測を実施し、消費電力推定式を十分に短い時間ステップごとに適用することで、実用的な精度の温度予測が可能であることを示した。

第3章では、小型電子機器のための実用的な非定常温度予測手法の確立を目的として、平均温度をノードとする熱回路網を導入した。そして、定常状態及び非定常状態における熱抵抗の変動について検証、考察した後、そこで得られた知見を基にモデルを構築し、熱回路網による温度予測を実施した。はじめに、定常状態における伝熱経路の適切なモデル化と熱回路網の構築を行い、既存の熱回路網法の熱流方向1次元構成で発生する温度予測誤差を防ぐために、部材端面の平均温度をノードとする新たな熱回路網を導出した。本熱回路網は、部材の熱抵抗、拡大熱抵抗、局所熱抵抗から構成される。局所熱抵抗は本研究で新たに導入した概念であり、特にシリコンダイにおけるホットスポットの温度上昇を評価するのに有効である。次に、境界条件によって値が変動する拡大熱抵抗、局所熱抵抗について、マイクロプロセッサパッケージモデルを用いて、その変動について定量的に検証した。その結果、マイクロプロセッサパッケージの上下面における境界の状態やシリコンダイ底面における発熱分布が変化すると、パッ

ケースサブストレート上面における拡大熱抵抗及びシリコンダイ底面における局所熱抵抗の値が変動することが明らかとなった。特にシリコンダイ底面の回路面における発熱が均一の場合には、パッケージサブストレート上面に拡大熱抵抗は上方の伝熱経路の影響は軽微であるのに対して、均一発熱でない場合には、上方、下方の伝熱経路の双方から影響を受け値が変動する。つまり、均一発熱の場合に成立する前提が不均一発熱でも有効とは限らず、注意が必要であることを示した。また、シリコンダイ底面における発熱に偏りが生じるほど、パッケージサブストレート上面における拡大熱抵抗は小さな値を採り、シリコンダイ底面における局所熱抵抗は大きな値を採ることが分かった。さらに、熱流体シミュレーションソフトウェアを用いない新たな温度予測手法として、この熱回路網を用いた小型電子機器筐体内の定常温度予測を実施するため、フーリエ級数による解析解の繰り返し計算により各熱抵抗を算出する手法を提案した。本手法では、第3種境界条件を用いて各部材境界を近似し、繰り返し計算により近似する際に必要となる見かけ上の熱伝達率を算出することで解析解を用いて熱抵抗値を求めた。マイクロプロセッサシステムの温度予測では、本手法による結果は有限体積法による3次元定常熱伝導シミュレーション結果と良く一致し、高い精度で定常温度予測が可能であることを確認した。また、非定常予測に必要な拡大熱抵抗および局所熱抵抗の非定常挙動について検証した。マイクロプロセッサの発熱量が急激に変化した場合、拡大熱抵抗は数秒間にわたって非定常挙動を示すことが判明した。そのため、拡大熱抵抗の非定常モデルを熱回路網として提案し、その精度について論じた。局所熱抵抗については、その非定常挙動が1秒以内に完了することを確認した。これまでの検討結果を基に、熱回路網を非定常解析向けに拡張し、マイクロプロセッサのシリコンダイ温度の非定常温度予測を実施した。本熱回路網は少ないノード数で構成できるため、3次元熱流体シミュレーションで問題となる計算時間を短く抑えることができ、ほぼ実時間で、実測との差がほぼ3°C以内でマイクロプロセッサのシリコンダイ温度を予測可能であることを確認した。

第4章では、システムレベルの非定常熱制御について論じた。限られたスペースに高性能なマイクロプロセッサを搭載するためには、マイクロプロセッサの動的な消費電力管理機能や機器筐体の温度遷移を考慮した非定常熱設計手法へのパラダイムシフトが必要となってきた。そこで、システムレベルの非定常熱制御として、様々な部材の集合体としての伝熱経路、マイクロプロセッサの非定常動作を含む動的な状態変化、さらに、筐体表面温度での管理を含めた対象を検討した。マイクロプロセッサ内蔵の消費電力制限機能を用いた非定常温度制御について3次元非定常熱伝導シミュレーションを実施し、消費電力制限中の温度変化の傾向は消費電力値及びその開始時刻によって決まり、消費電力制限の継続時間が変化しても、実用的な時間範囲では温度変化の傾向は変化しないことを示した。さらに、近年急速に普及しているスレート型電子機器を対象とし、非定常熱制御を考慮に入れた熱設計に関わる技術要素として、伝熱経路の詳細検討を行った。その際、3次元詳細シミュレーション結果を熱回路網として表現することで、マイクロプロセッサから筐体表面への伝熱経路と各部での熱抵抗を明らかにした。機器内部での非定常伝熱特性を調べ、筐体内の空隙によって、マイクロプロセッサが高負荷状態へと以降した時の筐体表面温度上昇の遅れが発生することを示した。

第5章では、結論を述べている。