



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	相変化材料(PCM)を用いたモバイルデバイスの熱および強度信頼性に関する研究 [論文内容及び審査の要旨]
Author(s)	富沢, 祐介
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(工学)
Dissertation Number	甲第13206号
Issue Date	2018-03-22
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/69938
Rights(URL)	https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/
Type	doctoral thesis
File Information	Yusuke_Tomizawa_abstract.pdf, 論文内容の要旨



学 位 論 文 内 容 の 要 旨

博士の専攻分野の名称 博士（工学） 氏名 富沢 祐介

学 位 論 文 題 名

相変化材料 (PCM) を用いたモバイルデバイスの熱および強度信頼性に関する研究
(Study on Thermal and Strength Reliability of Mobile Devices Using Phase Change Material (PCM))

スマートフォンやタブレット PC 等のモバイルデバイスは小型でありながら、高機能化、高性能化が進んでおり、発熱密度が著しく増加している。発熱密度の増加により、熱暴走やはんだの熱サイクル疲労の加速を招く危険性が高まっており、モバイルデバイスの信頼性向上のために、熱対策およびはんだ接続部の強度信頼性評価の両方の観点から対処していくことが求められている。

電子機器の冷却方法として、近年、相変化材料を用いた受動的冷却が注目を集めている。相変化材料は Phase Change Material を略して PCM と呼ばれる。PCM は融解潜熱により、温度をほとんど変化させることなく熱を吸収することができるため、温度上昇にかかる時間を遅らせる効果、いわゆる遅延効果が得られる。大型のヒートシンクに PCM を適用する研究が盛んに行われているが、小型のモバイルデバイスに対して PCM を適用した研究例はほとんどない。モバイルデバイスに PCM を用いる場合、融解して液体となった PCM が漏れ出ないようにし、また、薄型化を妨げずに十分な PCM の潜熱量を確保する必要がある。これらの課題を解決する方策の 1 つとして、構造部材に用いられている樹脂材料をマイクロカプセル PCM(MPCM) と樹脂の複合材料に置き換える方法が考えられる。これを実現するためには、MPCM/樹脂複合材料の遅延効果を最大限に引き出す最適な使用条件や、MPCM/樹脂複合材料の強度特性を明らかにする必要がある。

モバイルデバイスの発熱密度の増加による急激な温度変化や最高温度の上昇が原因となり、はんだの熱サイクル疲労が加速する可能性がある。よって、はんだ接続部の強度信頼性のさらなる向上が求められている。近年、電子機器の強度信頼性向上を目的とした加速試験として、HALT (Highly Accelerated Limit Test) が着目されている。HALT とは電子機器に急激な温度サイクル負荷と振動負荷の複合負荷を与えることにより、製品を短時間で破壊し、製品の潜在的な弱点や稼働限界、破壊限界を明らかにし、設計へのフィードバックや強度信頼性の評価に繋げるための試験である。しかしながら、HALT のような温度サイクル負荷と振動負荷の複合負荷環境でははんだの変形挙動は明らかになっていないという問題がある。はんだ接続部に温度サイクル負荷が与えられると二軸ラチェット変形を生じることがわかっているが、そこに振動負荷を重畳した場合の影響については不明である。はんだ接続部の強度信頼性の向上のためには、これを正確に把握する必要がある。はんだ接続部の強度設計には、有限要素法 (FEM) による数値シミュレーションと材料試験による疲労強度データを組み合わせた、低サイクル疲労寿命予測手法が必要であるが、このためには、はんだの繰返し非弾性変形挙動を正確に記述できる構成モデルが必要となる。

本研究では、PCM を用いた熱対策に関して、モバイルデバイスに PCM を適用する場合の使用条件の影響を実験的に明らかにした。さらに、シミュレーションにより PCM の最適な使用条件を求められる可能性を示した。また、MPCM とポリエチレン (PE) の複合材料 (PCM/PE 複合材料) の引張試験およびマイクロスケールシミュレーションを行い、強度特性を明らかにした。はんだ接続部の強度信頼性評価に関して、Sn-3Ag-0.5Cu はんだを用いて温度・振動複合負荷環境を模擬した

二軸ラチェット試験を行い、振動負荷がはんだの二軸ラチェット変形特性に与える影響について考察を行った。また、FEM シミュレーションに用いる構成モデルの改良を行い、二軸ラチェット変形および疲労寿命予測への適用可能性の検討を行った。

本論文は全 6 章から成り、各章の内容および得られた結果は以下のように要約される。

第 1 章では、モバイルデバイスの信頼性を向上させるため、PCM による熱対策とはんだ接続部の強度信頼性評価の抱える問題点を示し、本論文の目的を明確にした。

第 2 章では、PCM/PE 複合材料を用いたシート (PCM シート) を模擬スマートフォンに適用して温度測定実験を行った。さらに、PCM/PE 複合材料の熱物性値を複合則で推定し、実験の再現シミュレーションを行った。その結果、PCM シートの底面積よりも板厚を大きくしたほうが遅延効果を大きくすることができ、また、面積の大きい高熱伝導シートとともに使用することで最高温度の低下と遅延効果の増大の両立ができる可能性があることを明らかにした。さらに、PCM/PE 複合材料の熱物性値推定に体積分率を用いた複合則および Bruggeman の式を用いることは有効であることを示し、母材の樹脂を変更した場合の予測や、PCM シートの使用条件の最適化をシミュレーションによって行うことができる可能性があることを明らかにした。

第 3 章では、PCM/PE 複合材料の強度特性を引張試験およびマイクロスケールシミュレーションによって調べた。その結果、温度が上昇すると PCM/PE 複合材料の強度は低下するが、これは PE の温度依存性による影響が大きく、PCM が液体になることによる影響は小さいことを示し、また、炭素繊維等の補強材を混合することが必要であることを明らかにした。さらに、PCM/PE 複合材料作製時の段階で MPCM と PE の界面は接着界面とはく離界面が混在し、ひずみ 2% 以上の領域では次第にはく離界面が増加することを示し、MPCM と PE の界面強度の低さを明らかにした。

第 4 章では、HALT を模擬した二軸ラチェット試験を実施し、温度・振動複合負荷環境下での Sn-3Ag-0.5Cu はんだの二軸ラチェット変形挙動および二軸ラチェット疲労について考察を行った。その結果、軸方向に重畳した繰返し負荷によってはんだは硬化することが明らかになり、振動負荷を重畳すると硬化する可能性を示した。また、二軸ラチェットひずみが軸方向に重畳した繰返し負荷によって増加する結果が得られ、これは HALT 環境ではんだ接続部が早く破断する現象を裏付けるものである。さらに、疲労寿命は軸方向に重畳した繰返し負荷の有無に関わらず、二軸ラチェットひずみ速度や非弾性ひずみエネルギー密度と強い相関があり、単純なべき乗則によって疲労寿命を予測できることがわかった。

第 5 章では、従来の弾塑性クリープ分離型構成モデルでは、遅いひずみ速度域において Sn-3Ag-0.5Cu はんだの応力-ひずみ関係を精度良く表現することができないという問題点を示した。そして、Ramberg-Osgood 則の参照応力 $D(0.02\%$ 耐力を表す) をひずみ速度に依存すると仮定することにより、塑性ひずみに遷移クリープひずみも含むように構成モデルの改良を行った。改良した弾塑性クリープ分離型構成モデルを用いて二軸ラチェットシミュレーションを行ったところ、平均重畳応力の影響は表現できたが、重畳繰返し負荷の影響は表現できないことが明らかになった。そのため、非比例負荷による硬化をモデル化し、構成モデルに組み入れることにより、重畳繰返し負荷の影響を表現可能であることを示した。さらに、非比例負荷による硬化を考慮した弾粘塑性クリープ分離型構成モデルによるシミュレーション結果は二軸ラチェット疲労寿命の予測に十分な精度を有していることを示した。

第 6 章では、全体の総括と本研究より得られた結論について述べ、今後の展望を示した。