

報告番号	※ 甲 第 11050 号
------	---------------

主 論 文 の 要 旨

論文題目 樹脂の粘弾性を考慮したパワー半導体製品の信頼性評価
手法に関する研究

氏 名 佐々木 康二

論 文 内 容 の 要 旨

家電製品からハイブリッド電気自動車，電力産業機器，太陽光，風力発電設備などの幅広い製品分野において，省エネに対する社会的な要請などを追い風に，パワー半導体製品の普及が急速に進んでいる。これらのパワー半導体製品においては，小型化，高効率化が進んでおり，パワー半導体デバイスの動作温度の高温化やハイブリッド電気自動車向けパワー半導体製品のエンジンルーム内の実装の必要性などの影響を受け，動作温度の高温化，耐振動信頼性基準の過酷化が進んでいる。これらの結果から，パワー半導体製品の信頼性要求基準はますます高まっている。特に，ワンチップインバータ IC の封止に用いられている硬質樹脂や，IGBT モジュールのケースに用いられるガラス繊維強化プラスチック (GFRP)，IGBT モジュールの封止に用いられるシリコンゲルなど，粘弾性特性や異方性粘弾性特性を有する樹脂部品の信頼性評価及び信頼性確保の重要性が高まっている。特に，樹脂などの粘弾性材料において，ガラス転移温度 (T_g) を上回る高温での応力-ひずみ関係の変化を考慮した残留応力評価技術や，FRP などの異方性粘弾性材料において，ガラス転移温度を上回る高温での応力-ひずみ関係の変化と負荷方向依存性を考慮した残留応力解析技術，さらに粘弾性特性が振動減衰に及ぼす影響を考慮した振動応力評価技術などの必要性が高まっている。

本研究では，パワー半導体製品に用いられる樹脂部品の信頼性評価技術を確立することを目的とし，樹脂材料の特性を簡便にモデル化する近似方法の提案と，これに基づく熱残留応力解析技術を開発した。また，ランダム振動試験時の信頼性に樹脂材料の粘弾性特性が与える影響を評価し，ランダム振動試験時の寿命推定技術を開発した。本研究により得られた主な結果は，以下のようにまとめられる。

第 2 章では，硬質樹脂の 1 種であるエポキシ樹脂の粘弾性特性が，樹脂モールド時の冷却によって発生する残留応力の発生に与える影響を評価するため，エポキシ樹脂の粘弾性特性を表す緩和弾性率を測定した。さらに，樹脂の粘弾性特性における，弾性率の時間依存性，すなわち緩和弾性率を 4 つの材料パラメータで簡便に精度良く記述することのできる指数関数型実験式を提案した。指数関数型実験式による緩和弾性率の近似精度は，項数を

増やして多くの材料定数を用いたプロニー級数のような従来手法にはやや劣るが、実用上十分な近似精度が得られると考えられる。また、樹脂の粘弾性特性の温度依存性である時間-温度移動因子は、Arrhenius式に基づいて整理した。粘弾性特性を考慮して3次元構造体の残留応力解析を実施するため、指数関数型実験式を有限要素法に適用するための定式化手法を開発した。有限要素法の定式化においては、樹脂の緩和弾性率からクリープコンプライアンスを求め、これをクリープ有限要素法に基づく定式化に当てはめた。また、安定な応力解析を可能とするため、相当応力関数を用いて陰解法による収束計算を実施し、解析精度向上を図った。本手法により、エポキシ-金属の複合試験片の冷却時の反り変形量の解析を実施し、実測の結果と比較した。本手法によるエポキシ樹脂と金属の複合試験片の反り変形量の予測は、実測値と良好に一致した。これにより、本手法によって樹脂の残留応力解析が可能であることを示した。

第3章では、GFRPの1種であるプリプレグモールド絶縁層の異方性粘弾性挙動に着目し、プリプレグモールド絶縁層の切出し試験片による、絶縁層面内引張クリープ試験、面外圧縮クリープ試験、及び面外せん断クリープ試験を実施し、ガラス配向方向の弾性率はほとんど時間に依存した変化が無いのに対し、面外方向の弾性率とせん断弾性率は時間に依存して緩和する、異方性粘弾性特性があることを明らかにした。第2章で開発した指数関数型実験式による粘弾性特性のモデル化手法にHillの異方性パラメータを追加した異方性粘弾性材料モデルを構築し、粘弾性特性を表す指数関数型実験式の4パラメータと、Hillの異方性パラメータ6個を決定することにより、プリプレグモールド絶縁層の異方性粘弾性特性を記述した。さらに有限要素法による定式化を実施し、プリプレグモールドコイルの冷却時残留応力解析を実施した。この応力解析結果から、コイルの冷却速度が、残留応力に大きな影響を与えることを明らかにした。また、この応力解析結果の精度検証のため、プリプレグモールドコイルの絶縁層の残留応力を、切出し法により測定した。従来手法である異方性弾性解析による応力推定結果が実測値と大きく異なっていたのに対し、第3章で開発した異方性粘弾性解析手法による応力推定結果は、実測値と良好に一致し、本解析手法の妥当性が確認できた。

第4章では、自動車に搭載される電子部品の信頼性基準として要求される、ランダム振動試験において、アルミワイヤの信頼性に与えるシリコンゲルの影響を評価した。動的粘弾性試験によりシリコンゲルの粘弾性特性を測定し、シリコンゲルの粘弾性特性を考慮した振動解析を実施して、ランダム振動試験時にアルミワイヤに発生するひずみの二乗平均値を求め、アルミワイヤはシリコンゲルの形状がアルミワイヤの信頼性に与える影響を明らかにした。さらに、応答ひずみのパワースペクトル密度からアルミワイヤの疲労寿命を推定する手法を開発した。本手法においては、高速フーリエ逆変換を実施して応答ひずみのパワースペクトル密度からアルミワイヤに発生するひずみの時刻歴波形を求め、この波形からレインフロー法を用いてひずみの振幅と発生回数を求めた。最後に、修正Miner則によりワイヤの累積損傷を求め、その逆数からアルミワイヤの疲労寿命を推定した。寿命推定の結果は、室温に統一した条件下では、ワイヤのひずみの二乗平均値と強い相関が見られたが、試験温度を変更した場合、特に低温において、ワイヤの寿命が、ワイヤのひずみの二乗平均値から推定される寿命よりも短い傾向があった。これは、樹脂の温度が低下することによって樹脂の剛性が高まり、固有振動数が上昇することが原因である。従って、

ゲル中のワイヤの疲労信頼性を検討するうえでも、樹脂の温度の影響を考慮することが非常に重要であることが分かった。

以上の結果から、パワー半導体製品に多く使用される樹脂の粘弾性特性や異方性粘弾性特性を考慮することにより、パワー半導体製品の信頼性評価の高精度評価が可能であることを実証することができた。本研究では樹脂モールド後の冷却時に発生する熱残留応力に着目した研究を行ったが、パワー半導体製品の動作温度の高温化や装置の小型化、パワー密度の増大や設置環境の過酷化に伴い、樹脂製品の使用温度も上昇し、ガラス転移温度に近づく、あるいは上回ることが考えられるため、今後粘弾性を考慮した信頼性評価が不可欠になると考えられる。また、特に車載パワー半導体製品において今後さらに耐振動信頼性が求められると考えられ、本研究の成果に基づいた耐振動信頼性評価の重要性が増すものと予想される。

本研究で残された課題としては、樹脂の硬化収縮が変形や応力に与える影響の評価が挙げられる。樹脂の硬化収縮が発生するときには、樹脂の剛性が非常に低いため、残留応力に与える影響はほとんど無いと推定されるが、複雑形状物など、体積変化が拘束されるような条件においては無視できない応力が発生する可能性がある。また、他の課題として、ランダム振動試験環境下でのアルミワイヤ疲労寿命予測技術の実機検証が挙げられる。種々のランダム振動試験条件で、アルミワイヤ疲労寿命予測の精度検証が必要である。