

報告番号	甲 第 13602 号
------	-------------

主 論 文 の 要 旨

論文題目 トンネル状ピットを有したアルミ電解コンデンサのインピーダンス計算に関する研究
(A Study on Impedance Simulation of Aluminum Electrolytic Capacitors with Tunnel Pits)

氏 名 向山 大索

論 文 内 容 の 要 旨

本研究では、パワーエレクトロニクスにおいて重要な受動部品であるアルミ電解コンデンサのインピーダンスモデルについて論じている。

近年、製品開発やシステム開発のプロセスにおいて、その初期工程に重点を置き初期段階で問題点を洗い出し、できる限り後工程での仕様変更や設計変更が生じないようにすることで、開発費用と工数削減を図るフロントローディングという考え方が導入されている。

パワーエレクトロニクスは、電力用半導体素子を用いた電力変換に関する技術であり、現在、様々なシステムの根幹をなしている。従って、パワーエレクトロニクス関連製品やそれを含むシステムの開発設計において、どのようにフロントローディングを実現するのが重要な課題となっている。一方、パワーエレクトロニクスにおいて必要不可欠なアルミ電解コンデンサであるが、電解液を使用しているためインピーダンス特性の温度変化が大きく、また、有限寿命という欠点を有している。そのため、設計者にとって扱い難い電子部品となり、パワーエレクトロニクス製品の開発において、アルミ電解コンデンサに関わる問題が最終段階の実機評価で洗い出されることが多い。

近年の WBG(Wide Band Gap)半導体の技術進展により、スイッチング素子の高周波駆動や高速スイッチング(高速遷移)によるパワーエレクトロニクス機器の小型化や高効率化が進んでいる。アルミ電解コンデンサは、陽極箔の拡面化処理によって形成された細かいピット孔内部と陰極箔を電解液によって電氣的に接続している。そのため、ピット孔奥の部分が半導体デバイスの遷移に 응답できないという問題があり、遷移時間に合わせたピット形状の最

適化設計が試みられている。

このような状況を鑑み、本研究では、アルミ電解コンデンサのインピーダンス特性をより物理的なモデルで記述すべく、誘電体である陽極酸化被膜に対しては実時間応答関数モデルで記述し、エッチングピット部に対してはピット径の統計的情報とピット開口部付近の電流集中による抵抗増大効果を反映した詳細なモデル計算を提案している。

この新しい計算モデルにより、広い温度周波数範囲（ $-40^{\circ}\text{C}\sim 105^{\circ}\text{C}$ ， $20\text{ Hz}\sim 1\text{ MHz}$ ）において実測値を再現するインピーダンスの計算結果を得ており、先に示したパワーエレクトロニクスにおけるアルミ電解コンデンサの設計に関する諸問題を、システム開発の初期段階で洗い出すことが可能となる。また、アルミ電解コンデンサの開発ステップにおいても、エッチング箔デザインの源流まで遡ることができ、パワーエレクトロニクスシステム設計と電極箔デザインを繋げることが可能となる。以下、本研究における要点と成果について各章ごとにその要旨を述べる。

第1章では、研究の背景、研究の目的、研究の対象範囲について述べ、研究方針を示している。研究の背景では、パワーエレクトロニクスにおけるアルミ電解コンデンサの使用用途及び今後の需要展望、アルミ電解コンデンサにまつわる諸問題について解説している。さらに、昨今の開発ステップにおけるフロントローディングデザイン、WBG半導体によるパワーエレクトロニクス機器の高周波数化・高速スイッチングというトレンドに、これら諸問題がどのように関わるのかを示し、アルミ電解コンデンサの精密かつ物理法則に基づいたインピーダンスモデルの重要性について説明している。

第2章では、アルミ電解コンデンサの基本構造と電気的特性について解説している。アルミ電解コンデンサのインピーダンス特性とコンデンサ素子材料特性が、どのように関わっているのかを中心に説明し、アルミ電解コンデンサの等価回路として良く用いられているL, C, Rを直列接続する3素子モデルの理論的背景について解説している。

第3章では、先行研究に対する本研究の新規性について解説している。3.1節では、コンデンサ回路の基礎となる分布定数回路モデルを電磁界に対するMaxwell方程式から導出している。誘電体モデルについて応答関数による表式を用い、第4章の酸化被膜の誘電特性と繋がる電信方程式を導き、最後にコンデンサの交流インピーダンスを分布定数回路モデルでインピーダンス式を与えている。3.2節では、この分布定数回路のインピーダンスモデルをエッチングピット部に適用した先行研究をあげ、これら先行研究では何れもエッチングピット形状は固定されたものであることを示している。3.3節では、陽極酸化被膜の誘電体特性に関する先行研究の解説を行っている。不均質誘電体の緩和現象に関する一般論についての先行研究、陽極酸化被膜の誘電特性に関する先行研究について紹介している。これらは、第4章で展開する本研究の柱の一つである時間軸の誘電応答関数モデルと理論的整合性を比較すべき先行研究である。3.4節では、本研究の新規性について解説し次の4項目を挙げている。

- i) 時間軸の応答関数によって記述される誘電体モデル

- ii) モンテカルロ計算によるエッチングピット径分布を考慮した計算手法
- iii) エッチングピット開口部付近の電流集中を加味したモデル計算
- iv) 電解液の誘電特性を考慮（複素誘電率での記述）

第4章では、本研究で提案した時間軸での誘電体応答関数モデルとその複素誘電率について解説している。4.1節では、本研究の誘電体応答関数モデル（時間軸での記述）の提示、その複素誘電率の導出、試料コンデンサ実験値から誘電体応答関数モデルのパラメータを推定するための数式等を導出し、インピーダンスの測定結果よりこれらパラメータの算出をしている。さらに、これらパラメータの物理的な解釈を Gevers のアモルファス誘電体材料に関する理論に基づいて与え、これらパラメータが誘電緩和現象を誘起する双極子（界面分極を生じさせるイオン）の活性化エネルギーの上限値とそのエネルギー分布に関連していることを示している。また、第3章の先行理論との整合性について論じ本研究の誘電体モデルの問題点について解説した。4.2節では、誘電体余効現象（再起電圧現象）について取り上げ、実験値よりこの現象に対する活性化エネルギーを求め、4.1節のインピーダンス測定によるものと比較している。

第5章では、トンネルピットのピット径分布、ピット開口部付近の電流集中の効果をコンデンサのインピーダンス特性に反映させるための計算モデルについて解説している。5.1節では、基本単位構造というエッチングピット一個当たりコンデンサ構造を分割するというコンセプトについて説明している。このコンセプトを導入することで、ピット径分布とピット開口部付近の電流集中の効果をインピーダンス計算に反映できることが示されている。5.2節では、陽極箔のインピーダンス計算について解説している。エッチングピット径の分布が正規対数分布と考えて良いデータを示すとともに、基本単位構造を導入することで陽極箔の単位面積当たりの静電容量値（規格値や計測値）と幾何学的に矛盾させずに、正規対数分布（正規分布でも対可能）に従うピット径分布の平均値、標準偏差、ピット数密度を決める方法を解説している。また、モンテカルロ計算による平均化を用いた陽極箔インピーダンス計算方法を説明している。尚、Appendix I にて、本研究で用いた対数関分布に従う乱数列の作成方法の解説を行っている。5.3節では、エッチングピット開口部周辺の電流集中による電解紙部の有効抵抗増大に対する計算モデルを解説している。基本単位構造の電解紙部を3個の抵抗でモデル化した理由について、また、これらの抵抗値を求めるための境界条件（ポアソン方程式に対する）について説明している。ポアソン方程式の解法について Appendix II として載せているが、この計算方法自体も新規性があると考えられる。5.4節では、電解液と電解紙部のモデルについて解説している。従来、アルミ電解コンデンサのインピーダンス計算において駆動用電解液は単純な抵抗体として扱われてきたが、本研究では実際に電解液の誘電特性について計測し複素抵抗体として与えている。5.5～5.7節では、アルミ電解コンデンサのインピーダンス計算式を導出し、その計算を行うための計算フローについて解説している。5.8節では、試料コンデンサの-40℃の静電容量の測定データから、エッチングピットの平均値と標準偏差を最適化計算によって決定した結果を示している。

5.9 節では、インピーダンス特性（静電容量, ESR, $|Z|$ ）について、計測値（ $-40\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 105\text{ }^{\circ}\text{C}$, $20\text{ Hz}\sim 1\text{ MHz}$ ）と本モデルの結果との比較を行っている。 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ といった極低温の高周波（ $10\text{ kHz}\sim$ ）の領域で実測値と計算値でのズレが大きくなる傾向が見られたが、それ以外の領域では、本研究の計算モデルは実測値と一致している。尚、このズレが、電解液が含浸された電解紙部のインピーダンスに起因し、先行研究を参照すると電解紙部のコロイド粒子的な緩和現象に拠るものと推測される。また、最適化計算で得られたエッチングピット分布は、SEM 画像から実際の陽極箔のピット径分布に近いものと予想され、このような正確な分布を得るためには、ピット開口部付近の電流集中効果を加味することが不可欠であると結論付けている。

最後に第 6 章では、本研究の全体の総括をするとともに、本研究の展開や応用について説明を行った。