
第 6 章

まとめ

6.1 本研究により得られた知見

本研究は、新しい固体絶縁材料として、ポリマーナノコンポジットとして新たな創製技術を開発し次世代の固体絶縁技術の確立を実証することを目的とした。本研究では、ポリマー系ナノコンポジット材料として、電気機器絶縁に用いられているエポキシ樹脂を主体に分散し易いと期待されるシリカナノフィラーを添加するエポキシ/シリカナノコンポジットを選択した。これまでに無い材料なので、独自に材料創製技術を開発し、創製したナノコンポジットの絶縁性能を評価した。創製したナノコンポジットの物理的良否は、フィラー粒子とエポキシ樹脂との界面状態を電子顕微鏡 (SEM/TEM) 観察で評価した。絶縁特性は耐電界性に注目し、耐トリーイング性および耐部分放電性の評価研究を行った。耐電界性評価では、適切な時間で評価するため電圧加速試験および周波数加速試験を行ない、ポリマーのナノコンポジット化が絶縁特性の大幅な向上を可能とすることを明らかにした。この成果をベースに本技術は近い将来、実用化できる可能性があることを立証した。

以下に、本研究により得られた知見を各章ごとに要約して示す。

第 1 章は序論であり、本研究の背景と電力機器として固体絶縁が有効な手段であることを述べ、より高電圧・高電界で使用可能な劣化耐性の高い熱硬化性樹脂の開発が必要であり、ポリマー系ナノコンポジット材料が有望であることを述べた。ポリマー系ナノコンポジットの特徴を紹介し、本研究における絶縁材料としてのポリマー系ナノコンポジット開発が今後の電力機器を向上させる可能性があることを示した。

第 2 章では、汎用性が高くポリマー中での均一な分散性や親和性が良いと考えられる球状のナノシリカフィラーを用い、ベースポリマーとしてはエポキシ樹脂を用いたポリマーナノコンポジット材料の絶縁特性の向上方法を明確にすることを目標とした。そこでまず、これまでに行われていなかった試料創製方法の最適化を目指して、1) ベースとなるエポキシ樹脂の流動性・粘度の調整、2) フィラー粒子混合時における均一分散状態の確保、3)

試料成型時における試料内部のボイドレス化、の代表3項目について独自技術を開発し、試料創製を行なったことを述べ、ナノコンポジット化するにあたり、ナノフィラー粒子の均一な分散が必要であることを見出し、エポキシ樹脂とフィラー粒子との界面状態を良好にすることが必須であることを示した。

第3章では、ナノコンポジット技術によるトリーイング破壊特性の向上について述べている。エポキシ樹脂（ニート試料）にナノフィラーを添加してナノコンポジットにした材料の絶縁特性（特に耐電界性）に与えるナノフィラーの影響を評価した。耐電界性評価のため、トリーイング破壊特性を評価したナノコンポジット化するにあたり、ナノフィラー粒子の粒径による違いと試料作製方法の違いによる評価をそれぞれ検討し、評価を行なった。ナノフィラー粒径を12, 40, 90, 300 nmとした結果、絶縁破壊間までに最も長時間となったものは粒径が12nm試料のものであることが分かり、印加電圧10 kV_{rms}時には、ニート試料（1937 minで破壊に至った）ものに対し、7倍強の破壊時間（14880 min）となった。40, 90, 300 nm試料でも同様にナノフィラーを添加することでニート試料に対し1.2~3.6倍もの破壊時間の長寿命化を得ることが分かった。さらにカップリング剤を付与することで全ての試料において2倍程度の付与効果が得られ、ナノフィラー添加による効果を証明した。SEM/TEMによりフィラー粒子とポリマーマトリックス間における界面状態により評価を行なった結果、フィラー粒子の分散状態・界面状態についてカップリング剤付与による試料において界面の改善が得られていることが分かった。トリー伸展における構造は、カップリング剤を付与していないものではトリーチャンネルは単純なトリー孔による構造であったものが、カップリング剤付与により、界面結合が強化されることで複雑なトリーチャンネル構造となることが判明した。なお、トリーチャンネルの伸展過程においてはPD現象による侵食が考えられた。

第4章では、高熱伝導性を意図したエポキシコンポジットの絶縁特性の向上について評価を行なった。評価方法ではトリーの発生時における部分放電信号を検出し、トリー発生時間のV-t特性とした。トリー開始は部分放電の電荷量140 pCで検出し、マイクロコンポジットベースの試料に対し、ナノフィラーを添加することで絶縁特性が大幅に向上することを明らかにした。ナノコンポジット化による絶縁特性が向上した結果から、マイクロコンポジットにナノフィラーを添加することで、絶縁特性の大幅な改善が得られた。さらに、トリーイング破壊V-t特性と同様にフィラーとポリマーマトリックス間の界面をカップリング剤により界面結合を良好な状態とすることで、絶縁特性が向上することも分かった。トリーイング開始V-t特性によるニート試料とナノ試料の評価では、6 kV_{rms}印加時ではニート試料では170時間に対しナノコンポジット試料では66倍（約470日）のトリー開始時間となり、前章におけるトリーイング全路破壊V-t特性と同様の傾向にあることを確認した。ナノ(5 wt%) - マイクロ(40 wt%)コンポジットのトリー発生時

間は、6 kV_{rms}印加条件では、マイクロ(40 wt%)コンポジットに比べ300倍程度(4時間が1260時間)に増大することが判明した。これはナノファイラーがマイクロファイラーとポリマーマトリックス間の界面を改善する役割をしていると考えられる。トリーイング開始におけるカップリング効果は印加電圧が低いほど顕著であることも分かった。さらに、トリー痕跡のSEM観察から、カップリング剤付与の有無により内部構造が異なることが分かり、ファイラー粒子の析出についてはトリーチャンネルの径に依存しているものと考えられた。これは、トリー開始時においては、ナノファイラーに誘電率、界面力やクーロン力などを受け、エポキシ樹脂中にトリーが発生しているが、トリー空隙に発生する部分放電がトリーチャンネル内部壁面を侵食し、トリー径を大きくするため、径方向のナノファイラーを含むトリー径に成長していると考えられた。トリー形状のSEM観察からナノファイラーがトリー内に析出し、トリー進展を抑制していることを明らかにした。

第5章では、ナノコンポジット技術によるRod電極を用いた気中放電試験による耐部分放電特性の向上について評価を行なった。前章(第4章)においてトリーチャンネルの伸展過程にはPD現象による侵食が考えられたため、PD試験を行ない、ナノコンポジット化による絶縁特性の解明とした。結果より、トリーイングV-t特性と同様にファイラー粒子を添加することで表面劣化深さを抑制する効果があることが分かり、これがトリーチャンネルの伸展を抑制する一因であると考えられた。顕著な結果として、印加電圧4 kV_{rms}を480時間印加した場合、ニート試料では劣化深さが146 μmの表面深さであったものが、ナノコンポジット化とすることで20 μm程度に抑制できることが分かった。また、用いるファイラーの種類によっても影響があり、前述のナノ試料(3 wt%)に対し、同様の耐部分放電性をマイクロコンポジット試料で得るには65 wt%ものファイラー充填が必要であることが判明した。異なった樹脂としてコンデンサー用絶縁シートに使用されているポリプロピレン樹脂の評価を行ったが、ナノコンポジット化の効果があることを確認し、エポキシ樹脂ばかりでなくナノコンポジット化による技術が他のポリマー絶縁材料にも広く適用できる可能性があることが示唆された。

第6章、つまり本章では統括として本研究で得られた知見をまとめると共に、本研究により明確化された今後の課題を示した。本研究で得られた知見は、ナノコンポジット絶縁材料の有効性を実証するものであり、今後のナノコンポジット絶縁材料の実用化に向けたものとなることを確信している。

6.2 実用化に向けた取り組みと今後の課題

本研究では、ナノコンポジット絶縁材料技術の開発と評価を行ない、絶縁材料として優れた特性を有している知見を得た。表 6.1 には、ナノコンポジットの実用化へ向けた取り組みの例を示し、本研究の成果が、主にベースポリマーとしてエポキシを用いた回転機巻線絶縁、開閉器絶縁、電子基板などのコンパクト化や低価格化へと繋がっているものと考えられた。さらに、フィラー添加効果の成果としてもモータ巻き線のサージ電圧対策や高電圧直流に用いられている XLPE ケーブル等のコンパクト化などが実用化されていることが分かる。さらなる高性能の電子機器・電力機器への適用拡大と実現を図るために以下の課題についての取り組みが必要と考えられる。

1) 本研究において、エポキシ樹脂にナノフィラーを少量添加することで、高電界下における絶縁劣化を抑制できることを実証したが、その理論的メカニズムを完全に解明するには至っていない。電力機器の絶縁材料には、高電界下での長期間に渡る信頼性の確保が必要不可欠であるため、高電界絶縁劣化現象の解明と長期信頼性のさらなる明確化が必要である。

2) 本研究では、研究室レベルでのナノコンポジット材料創製技術の確立を検討した。ナノコンポジット化により電界特性として優れた特性を有している知見を得た。今後はナノコンポジット絶縁材料の実用化に向けた量産化技術の開発が必要である。

表 6.1 ナノコンポジットの実用化動向

Table 6.1 Practical use trend of polymer nanocomposite.

Application	Polymer	Nano-filler	Enhancement characteristic	Objective purpose
Insulation of rotor winding	Epoxy	Al ₂ O ₃	Enhancement in PD resistance	Compact under-development
Insulated switchgear	Epoxy	LS	Improved Voltage endurance	Compact under-development
Electronic substrate	Epoxy	SiO ₂	Voltage endurance Thermal conductivity Heat resistance	Low cost under-development
Motor winding (Magnet wire)	Polyester Polyamide	SiO ₂	Enhancement in PD resistance	Countermeasure of surge voltage Practical use
High voltage AC XLPE cable	Cross-linked Polyethylene	SiO ₂	Improved Voltage endurance	Compact Practical use
High voltage DC XLPE cable	Cross-linked Polyethylene	MgO	Reduction in Space Charge	Enhanced characteristic of DC Practical use
Condenser	Polypropylene	SiO ₂	Improved Voltage endurance	Compact under-development
Polymer insulator	Silicone rubber	SiO ₂	Improved Tracking resistance	Low cost under-development