

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 5 月 18 日現在

機関番号：13904

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2010～2011

課題番号：22860031

研究課題名（和文）

ナノコンポジット絶縁材料による直流電力機器の高性能化に関する研究

研究課題名（英文）

Technical advantage of nanocomposite insulator for DC power equipment

研究代表者

栗本 宗明 (KURIMOTO MUNEAKI)

豊橋技術科学大学・大学院工学研究科・助教

研究者番号：70580546

研究成果の概要（和文）：

本研究では、ナノサイズの充填剤を混入させた高分子絶縁材料(ナノコンポジット絶縁材料)の直流電力機器への実用可能性を明らかにするため、一連の電気物性を明らかにするとともに、直流絶縁破壊メカニズムについて検討を行った。MgO ナノフィラーを LDPE に添加したナノコンポジット絶縁材料は、高電界下においても無添加 LDPE より電気伝導性が低いことに加えて、高い直流絶縁破壊の強さを有する良好な直流絶縁材料であることを明らかにした。さらに、直流高電界下で MgO ナノフィラーにトラップされた同極性(ホモ)空間電荷が伝導電流の上昇を抑制し、絶縁破壊の強さを上昇させるメカニズムを明らかにした。さらなる効果的なナノサイズ構造探索のため、ナノサイズ空孔構造に着目し、アルミナ/エポキシコンポジットにナノサイズ空孔構造を導入することより低誘電性を持つ絶縁材料が実現できることを明らかにした。

研究成果の概要（英文）：

In order to clarify the applicability of nanocomposite to DC electrical insulating material, various electrical characteristics and DC dielectric breakdown mechanisms were investigated. It was revealed that MgO/LDPE nanocomposite was a superior DC electrical insulating material, even under the high electric field, which had a lower electrical conduction current and higher DC breakdown strength. It was indicated that a role of MgO nanofillers on the DC breakdown mechanism was a trapping effect of homo space-charge, which could reduce the conduction current and enhance the DC breakdown endurance. Furthermore, an effective nanostructure to electrical insulating material was investigated. It was revealed that introduction of nano-porous structure to alumina/epoxy composite could lead the lower permittivity insulating material.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010 年度	1,260,000	378,000	1,638,000
2011 年度	960,000	288,000	1,248,000
年度			
年度			
年度			
総計	2,220,000	666,000	2,886,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電力工学・電力変換・電気機器

キーワード：ナノコンポジット絶縁材料，直流電気物性の解明，電力機器の小型化

1. 研究開始当初の背景

太陽電池や風力発電などを導入した再生可能エネルギー社会において、直流電力の流通コストを低減するために、直流電力機器の小型化が必要である。これに伴い、機器内部で用いられる高分子材料の絶縁耐力を高めなければならない。高分子絶縁材料の改質のため各種充填剤が添加されるが、充填剤が一定の体積分率で均一に分散した状態を考えると、これまで用いられてきたマイクロサイズの充填剤（マイクロフィラー）に比べ、ナノサイズの充填剤（ナノフィラー）を用いた方がフィラー全体の表面積が大きくなる。ナノフィラーではこの界面表面積の増大により直流電気絶縁特性が向上する可能性が示されているが、その絶縁破壊メカニズムはほとんど未解明である。

2. 研究の目的

本研究では、ナノサイズの充填剤を混入させた高分子絶縁材料（ナノコンポジット絶縁材料）の一連の絶縁破壊メカニズムを検討することによって、その直流絶縁物性を解明し、有力な直流電気絶縁材料の一つとしてその実用化に対する基本的指針を明らかにすることを目的とした。

3. 研究の方法

ナノコンポジット絶縁材料として、酸化マグネシウム (MgO) ナノフィラーを低密度ポリエチレン (LDPE) に添加した MgO/LDPE ナノコンポジットを用いて、以下電気的特性を評価し、絶縁破壊メカニズムを検討した。

- (1) 電気伝導性の測定
- (2) 絶縁破壊の強さの測定
- (3) 絶縁破壊に至るまでの空間電荷測定

さらに、上記得られた知見を踏まえ、効果的なナノサイズ構造を持つコンポジット絶縁材料の探索(4)を行った。最後に、まとめと今後の展望について述べる(5)。

4. 研究成果

(1) 電気伝導性

図1に直流高電界下の伝導電流特性を示す。同図における phr (parts per hundred parts of resin) は、MgO ナノフィラーの LDPE への添加量を示している。200kV/mm の直流高電界下において、ナノフィラーを添加することにより、伝導電流が抑制されていることがわかった。これより、高電界下においても MgO/LDPE ナノコンポジットは無添加 LDPE より電気伝導性が低い良好な絶縁材料であることがわかった。

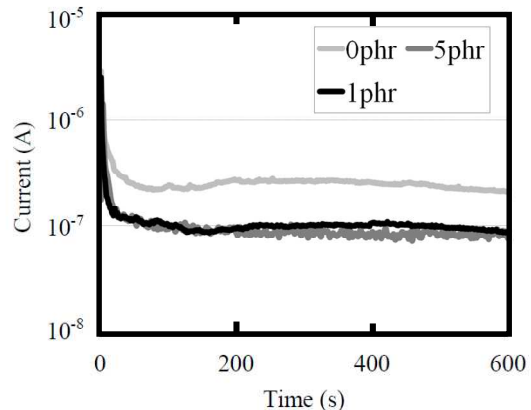


図1. 一定電界(200kV/mm)下における伝導電流特性(0phr^(*):無添加 LDPE, 1phr, 5phr:MgO/LDPE ナノコンポジット)(*):phr: parts per hundred parts of resin

(2) 絶縁破壊の強さの測定

一般的に、直流電気絶縁破壊現象は、空間電荷の蓄積を経て絶縁破壊に至るプロセスを有する。そのため、図2に示すようなプレストレス(前課電)を加えることにより、試料内部に空間電荷を蓄積させ、それが絶縁破壊特性に与える影響を調査した。

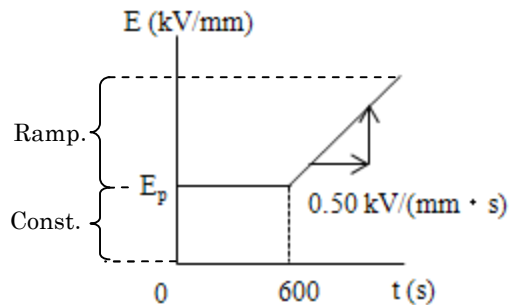


図2. 直流絶縁破壊試験に用いた直流プレストレス(前課電)による印加電界の時間変化 (Const.:一定電界, Ramp.:上昇電界)

図3に直流絶縁破壊の強さを示す。プレストレス電圧なしの場合において、MgO/LDPE ナノコンポジットは無添加 LDPE より高い直流絶縁破壊の強さを有することがわかった。さらに、プレストレス電圧の増加と共に、無添加 LDPE の絶縁破壊の強さは低下する一方で、ナノコンポジットの絶縁破壊の強さは上昇することがわかった。これは、プレストレス中に形成される空間電荷分布が、無添加 LDPE と MgO/LDPE ナノコンポジットにおいて全く異なることが考えられた。そこで、絶縁破壊に至るまでの空間電荷分布の測定結果を次節に示す。

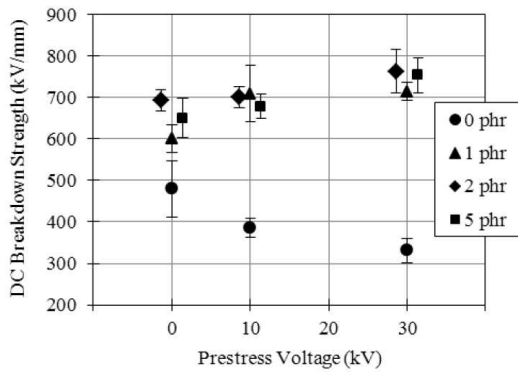


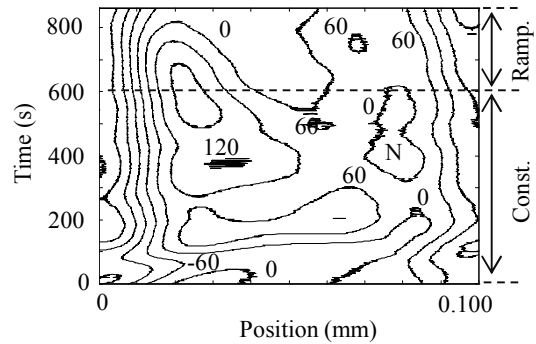
図3. MgO/LDPE ナノコンポジットの直流絶縁破壊の強さに与える直流前課電の影響 (0phr^(*):無添加 LDPE, 1phr, 5phr:MgO/LDPE ナノコンポジット) (*):phr: parts per hundred parts of resin

(3) 絶縁破壊に至るまでの空間電荷測定

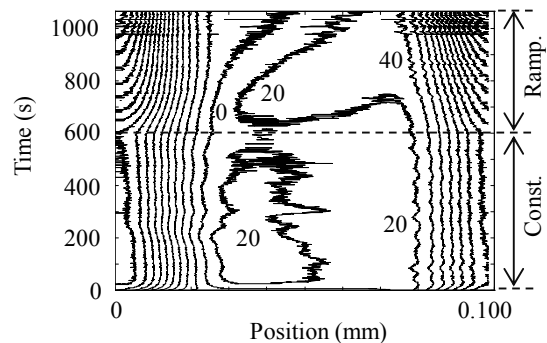
真空蒸着により、試料の両面に直径 10 mm の金電極を作製した。金電極の片面に半導電層と鉄球を設置し、それぞれの電極をエポキシ樹脂で固定した。この電極系に直流絶縁破壊試験とほぼ同様な電界を印加し、パルス静電応力法にて絶縁破壊に至るまでの空間電荷分布を 1 秒おきに測定した。前課電有りの場合の前課電電界は $E_p=200$ kV/mm とした。

図 4~6 に空間電荷分布の測定結果を示す。図 4 は空間電荷分布の等高線図であり、図 5 は二次元における空間電荷分布である。さらに、図 6 に示す電界増加量は、空間電荷分布から求めた試料内の局所最大電界から平均印加電界を引くことにより求めた。

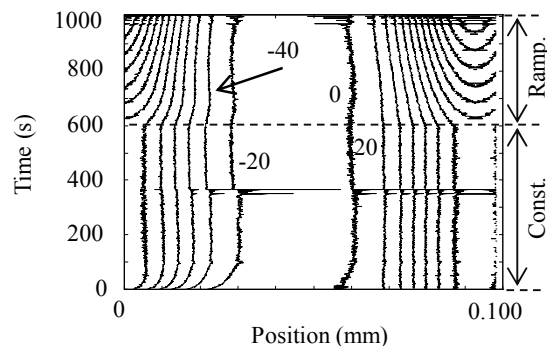
図 4(a) および図 5(a) は無添加 LDPE 試料の直流前課電有りにおける結果であるが、直流前課電中に空間電荷塊の発生およびその移動、いわゆるパケット電荷が確認された。印加電界が直流ランプ電界になった場合、試料内の空間電荷は徐々に減少した。MgO 無添加試料の電界増加量は図 6 のように直流前課電中のパケット電荷の存在によって電界増加が増減した後、直流ランプ電圧下においては単調に減少した。図 4(a) および図 5(a) において観測されたパケット電荷の存在は、電荷が塊となって電極間を移動するため、試料内のあらゆる場所の局所電界を高くし、解離キャリア等を発生させやすくと考えられる。また、筆者らはパケット電荷が発生するような高電界を経験した後のエチレン酢酸ビニル共重合体フィルムの変位度は高電界を経験する前のそれに比べ増加することを報告している。したがって、直流前課電中に発生したパケット電荷により、絶縁体がより conductive な状態となったため、直流ランプ電圧下において電界増加量が減少したと考えられる。



(a) 無添加 LDPE (0phr) における空間電荷分布の等高線図

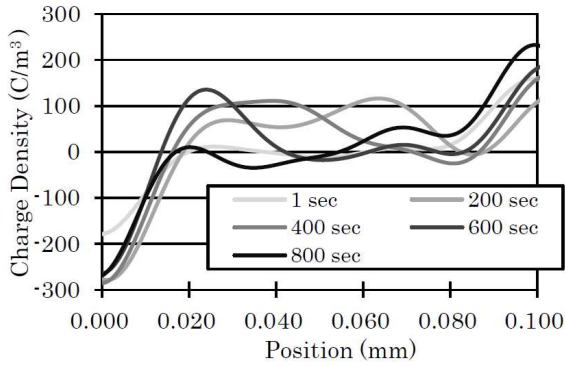


(b) MgO/LDPE ナノコンポジット (1phr) における空間電荷分布の等高線図

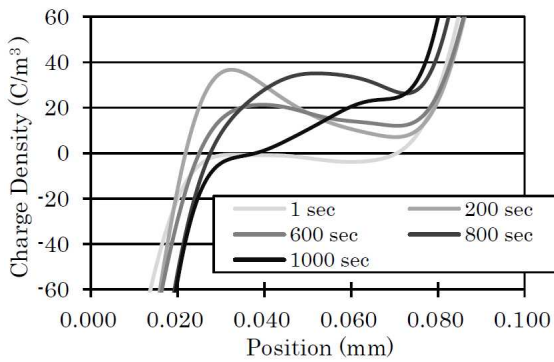


(c) MgO/LDPE ナノコンポジット (5phr) における空間電荷分布の等高線図

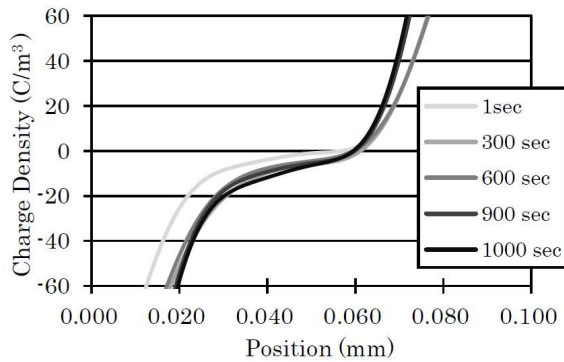
図 4. MgO/LDPE ナノコンポジットのプレストレス電界下における空間電荷分布の等高線図 (Const.:一定電界, Ramp.:上昇電界)



(a) 無添加 LDPE (0phr) における空間電荷分布の二次元分布



(b) MgO/LDPE ナノコンポジット (1phr) における空間電荷分布の二次元分布



(c) MgO/LDPE ナノコンポジット (5phr) における空間電荷分布の二次元分布

図 5. MgO/LDPE ナノコンポジットのプレストレス電界下における空間電荷分布の二次元分布 (Const.: 一定電界, Ramp.: 上昇電界)

1 phr 試料においては直流前課電中に正電荷形成が確認された。MgO 無添加試料においては直流前課電中にパケット電荷が形成されたが、1 phr 試料においては空間電荷の形成が劇的に抑制された。直流ランプ電圧下においては直流前課電無しの場合と同様に形成された正電荷量が一旦増加し、更なる平均電界の増加に伴って正電荷量が減少した。これらの傾向は同図 6 に示した電界増加量によく表れている。このことから、正電荷の形成に伴う陰極からの負電荷の注入が示唆される。

5 phr 試料においては空間電荷形成がほとんどなかったため、電界増加量もほとんど変化しなかったと考えられる。

上記の空間電荷蓄積過程の測定結果を踏まえると、プレストレス中に MgO ナノファイラーにトラップされた同極性(ホモ)空間電荷が伝導電流の上昇を抑制するため、絶縁破壊の強さを上昇させたことが示唆される。

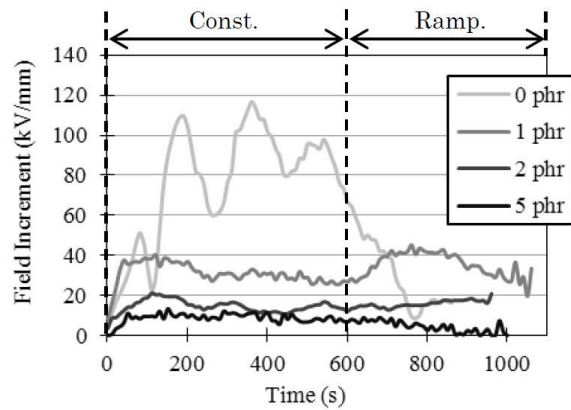


図 6. プレストレス電界下における絶縁破壊に至るまでの電界増加量(0phr^(*): 無添加 LDPE, 1phr, 5phr: MgO/LDPE ナノコンポジット) (*): phr: parts per hundred parts of resin

(4) 効果的なナノサイズ構造を持つナノコンポジットの探索

効果的なナノサイズ構造の探索を行った。中でもナノサイズ空孔(ポーラス)構造を有するアルミナ/エポキシコンポジットを用いて、ナノサイズ空孔構造が誘電特性に与える影響を調査した。図 7 に誘電率測定結果を示す。ナノサイズ空孔構造を持つアルミナ/エポキシコンポジットは、通常のアルミナ/エポキシコンポジットよりも低誘電特性化することがわかった。

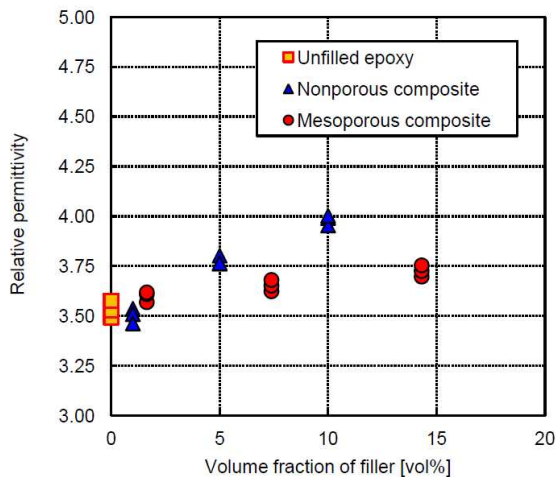


図7. ナノサイズ空孔構造を持つコンポジットにおける誘電率の粒子充填量依存性 (Unfilled epoxy:無充填エポキシ, Nonporous composite:多孔質でないアルミナ/エポキシコンポジット, Mesoporous composite: ナノサイズ空孔構造を持つアルミナ/エポキシコンポジット)

(5)まとめと今後の展望

直流高電下におけるナノコンポジット絶縁材料の電気伝導性, 絶縁破壊特性, 空間電荷特性を取得した結果, 特に MgO/LDPE ナノコンポジットは, 直流電気絶縁特性に優れていることが一連の直流絶縁メカニズムの観点からも明らかにすることができた. さらに, ナノサイズ空孔構造をナノコンポジットに導入することにより, 通常のコモジットよりも低誘電性を持つ絶縁材料になることがわかった.

当該研究のようにナノコンポジット絶縁材料の一連の絶縁破壊プロセスの評価を行う研究は申請者が知る限りない. 電力機器の開発(小型化)は絶縁材料の開発といっても過言ではなく, ナノコンポジット絶縁材料の適用は, 更なる電力機器の小型化および高信頼性を可能にする数少ない方法の一つである. 特に, 太陽電池や風力発電などの再生可能エネルギーの電力網への導入が進む中, 直流電力機器の有望な電気絶縁材料としてもナノコンポジット絶縁材料は今後の発展が大いに期待されるものである.

5. 主な発表論文等

(研究代表者, 研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計2件)

- ① 栗本宗明, 村上義信, 長尾雅行, ”メソポーラスアルミナ/エポキシコンポジットの粒子空孔による低誘電率特性”, 電気学会論文誌 A, Vol.132, No.2,

pp.136-141(2011), 査読有

- ② Y. Murakami, S. Imazawa, M. Kurimoto, M. Nagao, Y. Inoue, C. C. Reddy and Y. Murata, ”DC Breakdown Characteristic on LDPE/MgO Nanocomposite Influenced by DC Prestress”, 2011 Annual Report. IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, Vol.1, pp.334-337 (2011), 査読有

[学会発表] (計6件)

- ① 高村規之, 村上義信, 栗本宗明, 長尾雅行, 関口洋逸, C. C. Reddy, 村田義直, ”LDPE / MgO ナノコンポジットの直流絶縁破壊特性に及ぼす直流前課電の影響”, 電気学会 誘電・絶縁材料研究会 (テーマ:国際会議報告 学際分野 絶縁一般), No. DEI-12-068, pp.41-46 (2012.3.14 at 名古屋駅イノベーションパブ(名古屋))
- ② 栗本宗明, 川島朋裕, 村上義信, 長尾雅行, ”メソポーラスアルミナ/エポキシコンポジット材料の作製と比誘電率特性”, 電気学会 誘電・絶縁材料研究会 (電気学会 誘電・絶縁材料研究会 (テーマ:空間電荷・ナノコンポジット)), No. DEI-11-091, pp.83-88 (2011.12.13 at 電気学会本部(東京))
- ③ M. Kurimoto, D. Kusaba, H. Suzuki, Y. Murakami, M. Nagao, ”DC Dielectric Breakdown Characteristics of Mesoporous-Alumina/Epoxy Composite”, Proceedings of 2011 International Symposium on Electrical Insulating Materials, pp.165-168 (2011.9.9 at 同志社大学(京都)), 査読有
- ④ N. Takamura, Y. Murakami, M. Kurimoto, M. Nagao, Y. Inoue, C. C. Reddy and Y. Murata, ”Space Charge Formation and Conduction Current in LDPE/MgO Nanocomposite under DC Ramp Field”, Proceedings of 2011 International Symposium on Electrical Insulating Materials, pp.334-337 (2011.9.8 at 同志社大学(京都)), 査読有
- ⑤ 高村規之, 村上義信, 栗本宗明, 長尾雅行, 関口洋逸, C. C. Reddy, 村田義直, ”LDPE / MgO ナノコンポジットの直流絶縁破壊特性に及ぼす直流前課電の影響”, 電気学会 全国大会, pp.90 (2011.3.16)
- ⑥ 栗本宗明, 村上義信, 長尾雅行, ”メソポーラスアルミナ/エポキシコンポジットの作製と比誘電率の粒子空孔率を用いた推定”, 第41回電気電子絶縁材料システムシンポジウム, No.E-4, pp.167-170 (2010.11.15 at 秋田市民交流プラザ)

[その他]

ホームページ等

<http://www.tut.ac.jp/teach/main.php?mode=detail&article=662>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

栗本 宗明 (Muneaki Kurimoto)

豊橋技術科学大学・大学院工学研究科

・助教

研究者番号：70580546