

令和 3 年 6 月 15 日現在

機関番号：53901

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2020

課題番号：18K04120

研究課題名(和文) 材料構造の3Dプリンティング異方性制御による直流絶縁破壊メカニズムの解明

研究課題名(英文) Study relation between DC electrical breakdown and anisotropy control of insulating materials fabricated by 3D printing

研究代表者

光本 真一 (Mitsumoto, Shinichi)

豊田工業高等専門学校・電気・電子システム工学科・准教授

研究者番号：40321492

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：多くの3Dプリンタでは材料を積層して部材を成形するため、材料内部に積層界面を生じる。光造形3Dプリンタを用いて、積層方向の異なるアクリルエラストマーシートを作製し、これらの直流電気特性および空間電荷分布について調査した。エラストマー各試料の導電率は、電界が5kV/mmまでは、ほぼ一定の値を示したが、5kV/mmを超えると上昇することが分かった。また印加電界と積層界面が垂直な場合は、積層界面に正極性の空間電荷が形成されやすい可能性が考えられた。さらに、印加電界方向と積層界面が平行に位置する場合は、空間電荷形成に大きな影響を与えない可能性も考えられた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

電力を使用するうえで、電気絶縁部は不可欠な存在である。電気絶縁部の多くは、固体高分子が使用されている。しかし直流電圧使用時に電気絶縁部に空間電荷と呼ばれる電荷が電気絶縁部に蓄積し、それが欠陥となり、本来であれば耐えられる電圧に対して耐えられず絶縁破壊を生じてしまう可能性がある。電気絶縁部は複雑な形状をしているため、3Dプリンタで電気絶縁部を作成することは有効な作成手段となるが、3Dプリンタで作成される電気絶縁部には積層界面が存在する。本研究では、この積層界面の数や方向を3Dプリンタによって制御した電気絶縁部試料を作製し、積層界面が電気絶縁性能に与える影響について調査したものである。

研究成果の概要(英文)：The DC conduction current and space charge characteristics of laminate elastomer sheets with different laminating directions is investigated. Samples (N,V,H) were prepared as 3 types of the laminate elastomer sheets with different laminating directions using a stereolithographic 3D printer. Sample N has no lamination. Sample V has vertical laminating directions against sample surface. Sample H has horizontal laminating direction against sample surface. The sample thickness was around 0.5 mm and the laminating pitch was 0.05mm. The DC conduction current was measured by using a current integration meter. Space charge distribution was measured using the pulsed electro-acoustic system. The experiments were carried out at 27 °C. The accumulated positive charge amount near the anode in sample H was found to be larger than that in V and N. The conductivity scarcely changes up to around 5kV/mm, but rises with increase of electric field above 5kV/mm irrespective of differences among samples.

研究分野：電気絶縁工学

キーワード：直流電気絶縁性能 空間電荷 3Dプリンタ 積層界面 HDVC

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

太陽光発電を大量導入した再生可能エネルギー社会の実現および電力需要の増加に対応するため、電力ケーブルをはじめとする電力機器の大容量化および高信頼化が進められている。また現在主流となっている交流電力送電を HVDC 送電に置き換えることができれば、充電電流等による損失が払拭され、エネルギー損失を小さくすることが可能になる。しかし電力機器に使用される固体絶縁材料では、HVDC 印加時に空間電荷が材料界面等の欠陥に蓄積し局所電界が集中する箇所が弱点になる可能性があるため、空間電荷蓄積と絶縁破壊の強さは密接な関連があると考えられている。HVDC 送電システムの安定動作のために、固体絶縁材料の空間電荷特性や絶縁破壊特性などの直流電気絶縁特性を定量的に検証することが必要である。本研究では上記の背景を鑑みて、材料界面の数や方向を 3D プリンタによって制御した絶縁材料を作製し、これら構造異方性が直流絶縁破壊に影響を及ぼすメカニズムを明らかにすることを目的とする。

### 2. 研究の目的

本研究においては、3D プリンタを用いて材料構造の異方性を制御した絶縁材料を作製し、これら異方性が空間電荷蓄積および直流絶縁破壊に影響を及ぼすメカニズムを明らかにすることを目的とする。特に、材料積層界面が電気絶縁特性に与える影響を検証する。具体的には 3D プリンタを用いて絶縁シートを成形し、基礎的な電気絶縁特性(空間電荷特性、電気伝導特性)を調査していくことを目的としている。

### 3. 研究の方法

光造形式 3D プリンタを利用して、積層方向が異なる試料を作成した。試料の材料は、アクリルエラストマーであり、試料厚さはおよそ 0.5 mm であり、積層した 1 層の高さは 0.05 mm である。積層方向は、シート面に対して  $0^\circ$ 、 $90^\circ$  (以降それぞれ、H、V とよぶ) と制御することにより成形された。これらの積層方向が異なる 2 種類の試料および積層界面が存在しない試料 (以降 N とよぶ) を実験試料として用いた。N、H、V の 3 種類の試料の模式図を図 1 に示す。

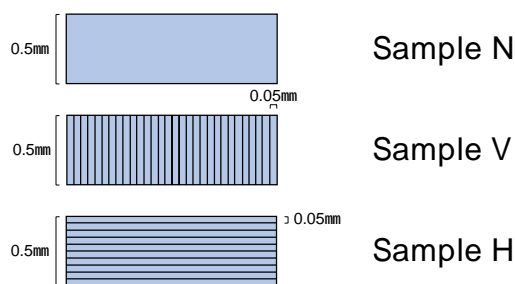


図 1. N、H、V の 3 種類の試料の模式図

#### (1) 電流積分電荷法による $Q(t)$ 測定

図 2 のような電流積分電荷法を利用した実験回路を用いて、所定の電圧を N、H、V の 3 種類の試料に対して 60 秒間印加し積分コンデンサの電圧  $V_{int}$  の測定を行った。印加電圧は、印加電界が  $0.2 \text{ kV/mm}$  から  $11 \text{ kV/mm}$  となるように調整し、積分コンデンサ  $C_{int}$  は、 $10 \mu\text{F}$  の容量を用いた。すべての実験は室温で行った。

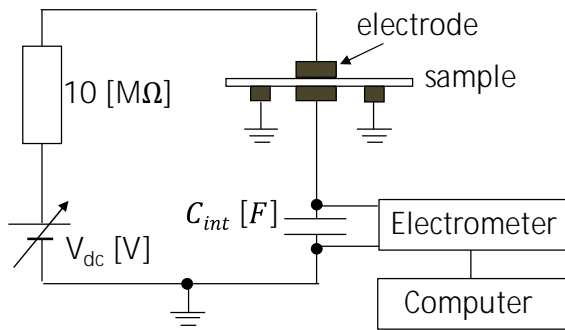


図 2. 電流積分電荷法を利用した実験回路

#### (2) パルス静電応力法による空間電荷測定

N、H、V の 3 種類の試料に対して、2kV/mm から 10kV/mm の電界をそれぞれ 5 分間印加した。電界印加 5 分後にパルス静電応力 (PEA) 法により発生された空間電荷信号を、デジタルオシロスコープによって観測した。実験回路図を図 3 に示す。空間電荷分布測定に用いたパルス電圧は 750V、平均化回数は 200 回である。すべての実験は室温で行った。

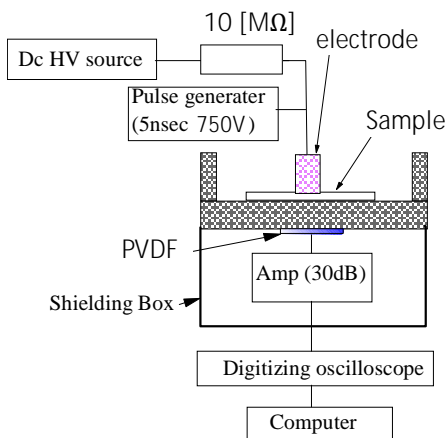


図 3. 空間電荷分布測定回路

#### 4. 研究成果

図 4 に試料 N の  $Q(t)$  波形を示す。 $Q(t)$  は次式から求められている。

$$Q = C_{int} \times V_{int} \quad (1)$$

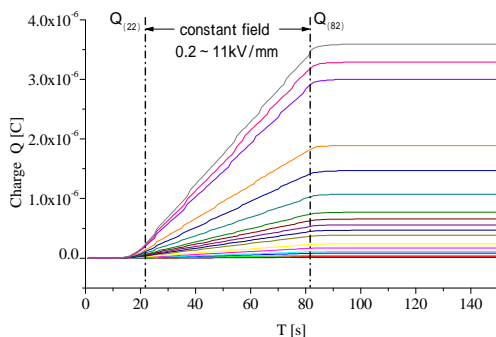


図 4. 試料 N の  $Q(t)$  波形

また、図中の  $Q(22)$  から  $Q(82)$  の間の時間に、一定電界が印加されている。この一定電界が印

加されている領域から次式を用いて試料に流れる電流を求めた。

$$I = (Q(82) - Q(22)) / 60 \quad (\text{A}) \quad (2)$$

N、H、V 試料における電流値の電界依存性を図 5 に示す。

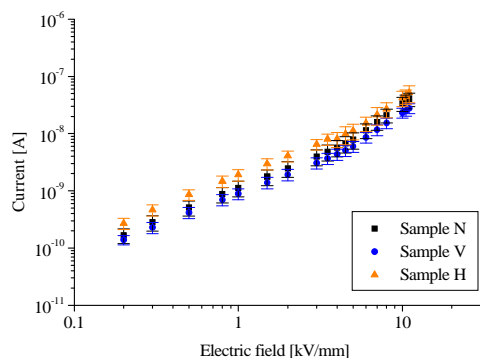


図 5. N、H、V 試料における電流値の電界依存性

さらに電極面積を考慮して N、H、V 試料における導電率の電界依存性を求めた結果を図 6 に示す。

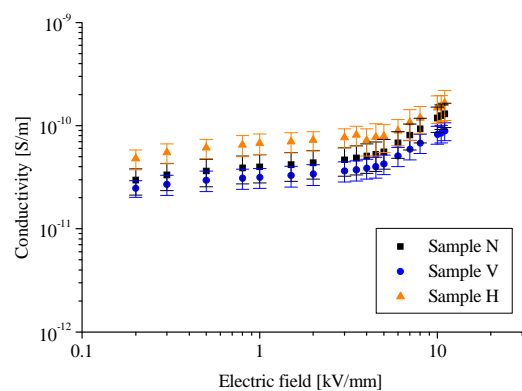


図 6. N、H、V 試料における導電率の電界依存性

図 6 から、各試料の導電率の大きさには顕著な差は認められなかった。しかし電界が 5kV/mm までは導電率は、ほぼ一定の値を示しているが、5kV/mm を超えると上昇していることがわかる。

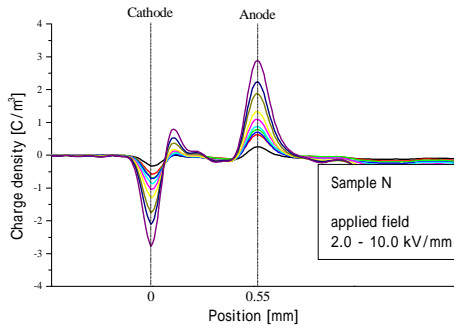


図 7. 試料 N における空間電荷分布

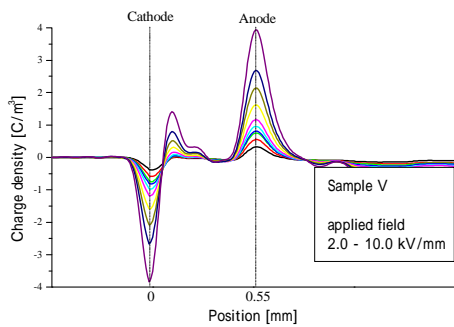


図 8. 試料 V における空間電荷分布

図 7 に、試料 N における空間電荷分布を示す。この図から、印加電界が大きくなるにしたがって、陰極付近に形成される正極性の空間電荷密度が大きくなっていることが確認できる。

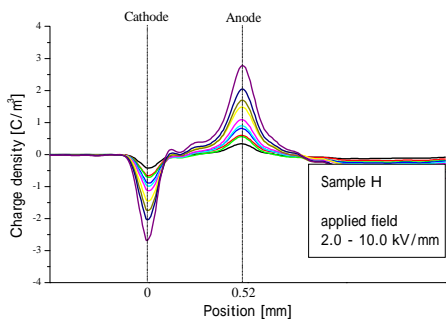


図 9. 試料 H における空間電荷分布

試料 V における空間電荷分布を図 8 に示す。この図からも電界印加状態において陰極付近に正極性の空間電荷が蓄積することが確認できる。図 7 と図 8 の結果から、試料 N と試料 V の正極性の空間電荷の形成過程に顕著な違いは見られなかった。図 9 に試料 H における空間電荷分布を示す。この図から、電界印加中に正極性の空間電荷の形成は見られるものの、それらは陽極側に多く分布していることがわかる。図 9 の試料 H のみ印加電界方向に対して垂直に積層界面が存在している。このことから印加電界と積層界面が垂直な場合は、積層界面に正極性の空間電荷が形成されやすい可能性が考えられる。また図 7 と 8 の結果を比較することで、印加電界方向と積層界面が平行に位置する場合は、空間電荷形成に大きな影響を与えない可能性も考えられた。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件 / うち国際共著 1件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 S.Mitsumoto, M.Kurimoto, M.Fujii, M.Fukuma, L.A.Dissado	4. 巻 140
2. 論文標題 Space Charge and Conduction Current in Laminate Elastomer Sheets with Different Laminating Directions	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 IEEJ Trans. FM	6. 最初と最後の頁 506-507
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 光本真一、栗本宗明、福間眞澄、藤井雅之	4. 巻 45
2. 論文標題 低密度ポリエチレンの低電界電気伝導に及ぼす密度の影響 - 電流積分電荷法による調査 -	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 静電気学会誌	6. 最初と最後の頁 69-74
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計13件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 5件）

1. 発表者名 S.Mitsumoto, M.Kurimoto, M.Fujii, M.Fukuma, L.A.Dissado
2. 発表標題 Effect of Laminating Direction on Space Charge and Conduction Current in Laminate Elastomer Sheets
3. 学会等名 International Symposium on Electrical Insulating Materials(ISEIM 2020) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 M. Kurimoto
2. 発表標題 Topology Optimization and 3D Printing: Toward a Functionally Graded Solid Insulator
3. 学会等名 International Symposium on Electrical Insulating Materials (ISEIM 2020) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 竹本綾華、光本真一、栗本宗明
2. 発表標題 10kV/mm以下のエラストマーの空間電荷特性に及ぼす積層方向の影響
3. 学会等名 電気関係学会 東海支部連合大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 光本真一、藤井雅之、福間眞澄、栗本宗明、芳原新也
2. 発表標題 低電界領域における原子炉照射LDPEの充電電荷計測
3. 学会等名 電気学会全国大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 横田、光本、清水、矢田、斎藤、栗本
2. 発表標題 積層方向の異なるエラストマーの直流電気伝導
3. 学会等名 令和元年度電気・電子・情報関係学会東海支部連合大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 T. Hatano, T. Sawada, M. Imanaka, S. Sugimoto, T. Kato, M. Kurimoto, Y. Manabe, Y. Suzuoki
2. 発表標題 Influence of Laminate Interfaces on AC Breakdown Strength
3. 学会等名 International Council on Electrical Engineering (ICEE) Conference 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 T. Hatano, R. Seo, M. Imanaka, S. Sugimoto, T. Kato, M. Kurimoto, Y. Manabe, Y. Suzuoki
2. 発表標題 Influence of Lamination Direction on AC Breakdown Characteristics of Insulation Materials
3. 学会等名 International Conference on Materials and Systems For Sustainability (ICMaSS) 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 S. Mitsumoto, M. Kurimoto, M. Fukuma, M. Fujii
2. 発表標題 Space Charge observation of Laminate Elastomer Sheets with Different Laminating Directions
3. 学会等名 International Conference on Materials and Systems For Sustainability (ICMaSS) 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 横田奈菜花, 及川未来, 光本真一, 栗本宗明
2. 発表標題 積層方向の異なるエラストマーシートの空間電荷特性
3. 学会等名 平成30年度電気・電子・情報関係学会東海支部連合大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 畑野太郎, 栗本宗明, 今中政輝, 杉本重幸, 加藤丈佳, 真鍋祐矢, 鈴置保雄
2. 発表標題 3Dプリンタで成形したアクリル絶縁材料の積層界面の形態観察
3. 学会等名 平成30年度電気・電子・情報関係学会東海支部連合大会
4. 発表年 2018年



1. 発表者名 光本真一, 栗本宗明, 福間眞澄, 藤井雅之
2. 発表標題 積層方向の異なるエラストマーシートの空間電荷特性
3. 学会等名 平成30年電気学会基礎・材料・共通部門大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 畑野太郎, 栗本宗明, 加藤丈佳, 鈴置保雄, 真鍋祐矢, 宮島和久
2. 発表標題 積層方向が異なるエラストマーシートの交流絶縁破壊の強さ
3. 学会等名 平成30年電気学会基礎・材料・共通部門大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 畑野太郎, 澤田亨, 今中政輝, 杉本重幸, 加藤丈佳, 栗本宗明, 真鍋祐矢, 鈴置保雄
2. 発表標題 3Dプリンタで積層成形したエラストマーの交流絶縁破壊の強さに積層界面が与える影響
3. 学会等名 誘電・絶縁材料/放電・プラズマ・パルスパワー/高電圧合同研究会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	栗本 宗明  (Kurimoto Muneaki)  (70580546)	名古屋大学・未来材料・システム研究所・特任准教授    (13901)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------