

固体高分子複合絶縁系の電気絶縁特性に及ぼす
部分放電と帯電の影響

(Electrical Insulation Characteristics of Polymeric
Insulating Composite System Influenced by Partial
Discharge and Charging)

2017 年 7 月

博士（工学）

川 島 朋 裕

豊橋技術科学大学

Date of Submission:

平成 29 年 8 月 30 日

Department: 電気・電子情報工科学専攻			
Applicant's name 氏名	川 島 朋 裕	Contact faculty 紹介教員	滝 川 浩 史

Abstract
論文内容の要旨（博士）

Title of Thesis 博士学位論文名	固体高分子複合系の電気絶縁特性に及ぼす部分放電と帯電の影響 (Electrical Insulation Characteristics of Polymeric Insulating Composite System Influenced by Partial Discharge and Charging)
----------------------------	--

(Approx. 800 words)

(要旨 1,200 字程度)

2011 年の東日本大震災以降、電気エネルギーの送電の低損失化、またその利用の高効率化の要求は高まっている。送電の低損失化として電力ケーブルを用いた直流送電、利用の高効率化としてハイブリッド/電気自動車に広く用いられているモータの高効率化が解決策として注目されている。これらの電力機器は従来の交流電界と異なり直流電界もしくは高周波数で駆動するため、絶縁体表面もしくは内部帯電が残存し易く、機器内部電界が設計電界よりも高電界化し、部分放電の発生が容易になる可能性がある。本研究では、電気エネルギーの送電、利用の高効率化に資するために電気絶縁の観点から問題となる部分放電と帯電が複合絶縁系に与える影響を明らかにした。

1. 高粘度絶縁油中における部分放電と表面帯電

従来の低粘度絶縁油に比べて高粘度絶縁油を用いた場合、帯電電荷の移動が抑制されることを明らかにした。電力潮流制御による電圧の極性反転が少ないもしくは無い場合においては、帯電電荷によって局所電界が緩和されるため部分放電が生じ難くなり絶縁性能が向上する可能性が示唆された。一方で極性反転がある場合においては、帯電電荷によって局所電界が強調されるため部分放電が生じ易くなり絶縁性能が低下する可能性が示唆された。CIGRE(国際大電力システム会議)や IEC(国際電気標準会議)においては直流電力ケーブルにおける部分放電測定の推奨はないが、本研究の成果は直流においても部分放電の測定が重要であることを示した。

2. 絶縁紙-液体窒素複合系の部分放電を介した絶縁破壊と内部帯電

直流超電導ケーブルの電気絶縁構成として絶縁紙-液体窒素複合系を用いた場合、絶縁紙内部へ部分放電によって負電荷が侵入し、絶縁破壊の強さを低下することを明らかにした。絶縁紙の密度を増加することによって絶縁紙内部への負電荷侵入の抑制が期待でき、従来の電圧階級に合わせて十分な絶縁破壊の強さを持つ絶縁紙を選定する方法ではなく、電荷侵入メカニズムを考慮して絶縁紙を選定・開発することによって超電導ケーブルの信頼性が更に向上するものと考えられる。

3. 絶縁体-空気ギャップ複合絶縁系における部分放電と表面電荷

ハイブリッド/電気自動車用モータ巻線の被覆に使用されるポリイミドの部分放電特性に与える帯電の影響を調査し、除電による部分放電開始電圧の測定ばらつきの低減と帯電によって部分放電開始電圧が増減することを明らかにした。帯電分布を加味すれば、表面電位を考慮した電位差のみで部分放電開始電圧が決定されることを明らかにした。

4. 電力機器の新たなオンライン絶縁劣化診断手法の提案に向けた基礎検討

部分放電に伴って流れる回路電流からの放射電磁波を検出することで部分放電特性が検討できることを明らかにした。この方法はあらかじめアンテナを機器内部に設置する必要がないため既存の電力機器・ケーブルの診断にも貢献できる。また、交流損失電流波形の非線形性と位相差を用いて微小量の空間電荷侵入量を検討できることを明らかにした。

本論文で述べた帯電電荷挙動による絶縁性能低下メカニズムは、実機の絶縁設計と評価手法の改善・向上に貢献できると考える。

Date of Submission:

平成 29年 8月 30日

Department: Department of Electrical and Electronic Information Engineering			
Applicant's name 氏名	Tomohiro Kawashima	Contact faculty 紹介教員	Hirofumi Takikawa

Abstract
論文内容の要旨 (博士)

Title of Thesis 博士学位論文名	固体高分子複合系の電気絶縁特性に及ぼす部分放電と帯電の影響 (Electrical Insulation Characteristics of Polymeric Insulating Composite System Influenced by Partial Discharge and Charging)
----------------------------	--

(Approx. 800 words)

(要旨 1,200 字程度)

Since the Great East Japan Earthquake of March 11, 2011, the demands of high efficiency and low loss of electrical energy is more increasing. DC power transmission by cable or hybrid/electric vehicle is one of the candidates for solving these problems. The surface or inside of the insulation part in these electrical equipment is easily charged due to being driven by DC or high frequency. The electrical field is distorted by the surface or inside charge of the insulator and the field became higher than the designed field of these electrical equipment. Consequently, the partial discharge occur easily, and it may lead to dielectric degradation and finally breakdown of the insulation. In this study, it is clarified the influence of the charge behavior on the partial discharge for actual insulating systems.

1. Influence of surface charge behavior on partial discharge in insulating paper-high viscosity insulating oil system

The surface charge movement in the high viscosity insulating oil is more suppressed than that in low viscosity insulating oil. In general, the insulation performance with small number of polarity reverse or without polarity reverse is maintained because the field is relaxed by the surface charge. In addition, the insulation performance with polarity reverse is lower due to the field enhancement by the surface charge. The tests recommended by CIGRE or IEC does not contain the partial discharge measurement, but this result suggests that the partial discharge measurement plays an important role in diagnosing the condition of the DC power cable with high viscosity insulating oil.

2. Influence of space charge behavior on breakdown strength in insulating paper-liquid nitrogen system

When the insulating paper-liquid nitrogen system is applied to the insulation of DC high temperature superconducting cable, the insulation performance is decreased because of the charge injection into the insulating paper. It is clarified that the breakdown strength of the insulating paper became lower due to negative charge injection. By using the high density insulating paper, the decrease of the breakdown strength by negative charge injection is small. From the results, it is suggested that the reliability of the DC high temperature superconducting cable is improved by changing the insulating paper according to the mechanism of the charge injection.

3. Influence of surface charge behavior on partial discharge inception voltage in insulating sheet-air gap system

Polyimide is mainly used in the insulating material in motors of hybrid/electric vehicle. It is suggested that the measurement scatters of partial discharge inception voltage can be reduced by controlling the surface charge on the insulating sheet. In addition, it is clarified that the partial discharge inception voltage became higher or lower in accordance to the surface charge amount.

4. Fundamental study of new method for onsite test in diagnosis of insulating degradation

In general, the radiation of electromagnetic waves generated from partial discharge source can detect by antennas. It is clarified that the partial discharge characteristics can also be investigated by the radiation of electromagnetic waves generated from the circuit current of the partial discharge. This new detection method can contribute to the diagnosis of the existing electrical equipment since it is not necessary to install antennas at the design stage of the electrical equipment. Furthermore, from the investigation of the relationship between the nonlinearity of dissipation current waveform and the space charge behavior, it is suggested that a small amount of space charge can be estimated by using the phase shift of the dissipation current waveform.

From above results, the degradation mechanism of insulation performance from the aspect of the charge behavior can contribute to the insulation design of actual equipment and diagnosis methods.

固体高分子複合絶縁系の電気絶縁特性に及ぼす

部分放電と帯電の影響

Electrical Insulation Characteristics of Polymeric Insulating Composite System Influenced by Partial Discharge and Charging

第1章 序論	1
1.1 電力システムを取り巻く現在の状況	1
1.2 研究背景	2
1.2 研究目的	5
1.3 本論文の概要	6
参考文献	7
第2章 本研究に関連するこれまでの研究	8
2.1 まえがき	8
2.2 気体中の部分放電現象と固体絶縁物	9
2.2.1 部分放電現象	9
2.2.2 パッシェンの法則	10
2.2.3 沿面放電	11
2.2.4 ボイド放電	13
2.3 帯電現象とその計測	14
2.4 絶縁紙-絶縁油複合系における部分放電現象と帯電現象	17
2.4.1 電気絶縁油の概説	17
2.4.2 絶縁油の絶縁性能の低下因子	19
2.4.3 複合絶縁系における絶縁性能	22
2.4.4 流動帯電	24
2.5 絶縁紙-液体窒素複合系における部分放電現象と帯電現象	25
2.5.1 極低温絶縁の概説	25
2.5.2 極低温絶縁材料の電気的特性	25
2.5.2.1 導電・誘電特性	25
2.5.2.2 流体絶縁材料	26
2.5.2.3 固体絶縁材料	29
2.5.3 絶縁破壊特性	32
2.5.3.1 気体	32
2.5.3.2 液体絶縁体	33

2.5.3.3 固体絶縁材料.....	35
2.5.3.4 複合絶縁材料.....	37
2.6 絶縁劣化診断手法.....	39
参考文献	41
第3章 本研究に用いた高分子電気絶縁材料の概要.....	45
3.1 クラフト紙の概要.....	45
3.2 絶縁紙の叩解度.....	45
3.3 絶縁紙の電気伝導.....	47
3.3.1 O`Sullivan の考え方	47
3.3.2 Hearle の考え方	48
3.3.3 Muphy の考え方	50
3.4 PPLP の概要	51
3.5 ポリイミド	53
参考文献	54
第4章 高粘度絶縁油(ソリッドオイル)中における部分放電と表面帯電	55
4.1 まえがき	55
4.2 部分放電測定システム.....	56
4.3 試料および電極系.....	56
4.4 ソリッドオイル中における KP の直流 PDIV 特性	58
4.4.1 実験方法	58
4.4.1 実験結果および考察.....	59
4.5 ソリッドオイル中における KP の直流部分放電発生頻度特性(直流ランプ電圧)	62
4.5.1 実験方法	62
4.5.2 実験結果および考察.....	62
4.6 体積抵抗および表面抵抗.....	65
4.6.1 伝導電流測定システム.....	65
4.6.2 実験結果および考察.....	66
4.7 ソリッドオイル中における KP の直流部分放電発生頻度特性(直流一定電圧)	67
4.7.1 実験方法	67
4.7.2 実験結果および考察.....	67
4.8 まとめ	69
参考文献	70
第5章 絶縁紙-液体窒素複合系の部分放電を介した絶縁破壊と内部帯電.....	71
5.1 まえがき	71
5.2 KP、PP フィルム、PPLP の直流・インパルス絶縁破壊特性	72
5.2.1 絶縁破壊試験回路および実験方法.....	72

5.2.2	試料および電極系.....	73
5.2.3	実験結果および考察.....	74
5.3	液体窒素中における KP-PP 二層試料の絶縁破壊特性.....	76
5.3.1	KP-PP 二層試料.....	76
5.3.2	実験結果および考察.....	77
5.4	直流プレストレス試験による負電荷侵入の検討.....	78
5.4.1	直流プレストレス試験.....	78
5.4.2	直流プレストレス印加時間の決定.....	80
5.4.3	KP、PP フィルム、PPLP のインパルス絶縁破壊に及ぼす電荷侵入の影響.....	81
5.5	KP 内部への負電荷侵入抑制効果の検討.....	87
5.5.1	検討方法.....	87
5.5.2	絶縁紙の絶縁破壊特性に与える透気抵抗度依存性.....	87
5.5.2.1	試料および実験方法.....	87
5.5.2.2	実験結果および考察.....	88
5.5.3	絶縁紙-氷複合系による電荷侵入抑制効果.....	89
5.5.3.1	試料.....	89
5.5.3.2	電極系.....	89
5.5.3.3	絶縁破壊および部分放電測定システム.....	90
5.5.3.4	実験結果および考察.....	90
5.6	まとめ.....	93
	参考文献.....	94
第 6 章	絶縁体-空気ギャップ複合絶縁系における部分放電と表面帯電.....	96
6.1	まえがき.....	96
6.2	実験方法.....	96
6.3	表面帯電が PDIV 測定値のばらつきに与える影響.....	98
6.4	試料表面の帯電分布が直流 PDIV に与える影響.....	99
6.4.1	部分放電による表面電位分布.....	99
6.4.2	表面電位分布による 2 回目の部分放電発生位置の検討.....	101
6.4.3	帯電を考慮した PDIV.....	104
6.5	試料表面の均一な帯電分布が直流 PDIV に与える影響.....	107
6.6	試料表面の帯電が交流 PDIV に与える影響.....	108
6.7	まとめ.....	110
	参考文献.....	111
第 7 章	電力機器のオンライン絶縁劣化診断技術の提案へ向けた基礎検討.....	112
7.1	はじめに.....	112
7.2	アンテナを用いた新たな部分放電検出手法の提案.....	112

7.2.1 アンテナ	112
7.2.2 パッチアンテナによる部分放電に起因した放射電磁波強度に与える線路容量の影響	115
7.2.2.1 実験方法.....	115
7.2.2.2 PD 発生個所および回路電流からの放射電磁波.....	117
7.2.2.3 PD 発生個所付近の線路容量が PD 発生個所からの放射電磁波強度に与える影響	118
7.2.2.4 PD 発生個所付近の線路容量が PD 発生個所からの放射電磁波強度に与える影響	119
7.2.3 ディスコーンアンテナによる部分放電に起因した放射電磁波強度に与える線路容量の影響	120
7.2.3.1 実験方法.....	120
7.2.3.2 PD 発生個所および回路電流からの放射電磁波の周波数スペクトル	122
7.2.3.3 PD 発生個所付近の線路容量が PD 発生個所および回路電流からの放射電磁波の周波数スペクトルに与える影響.....	123
7.2.3.4 ギャップ放電における PD 発生個所および回路電流からの放射電磁波の周波数スペクトル.....	124
7.2.3.5 PD 発生個所および回路電流からの放射電磁波周波数スペクトルの電圧依存性および部分放電電荷量との関係.....	125
7.2.4 まとめ	127
7.3 高電界交流損失電流の非線形性と空間電荷.....	128
7.3.1 交流損失電流波形計測.....	128
7.3.2 試料および電極系.....	129
7.3.3 実験結果および考察.....	129
7.3.3.1 交流損失電流波形による交流空間電荷侵入の検討	129
7.3.3.2 交流損失電流波形の印加電界に対する位相差を用いた空間電荷侵入量の検討	132
7.3.3.3 交流損失電流波形の電圧上昇率依存性.....	133
7.3.3.4 交流損失電流波形の周波数依存性.....	136
7.3.4 まとめ	138
参考文献	139
第 8 章 総括	140
8.1 本研究によって得られた知見.....	140
8.2 工学的応用	141
8.3 今後の課題と問題点.....	145
参考文献	147

謝辭	148
研究業績	149

第1章 序論

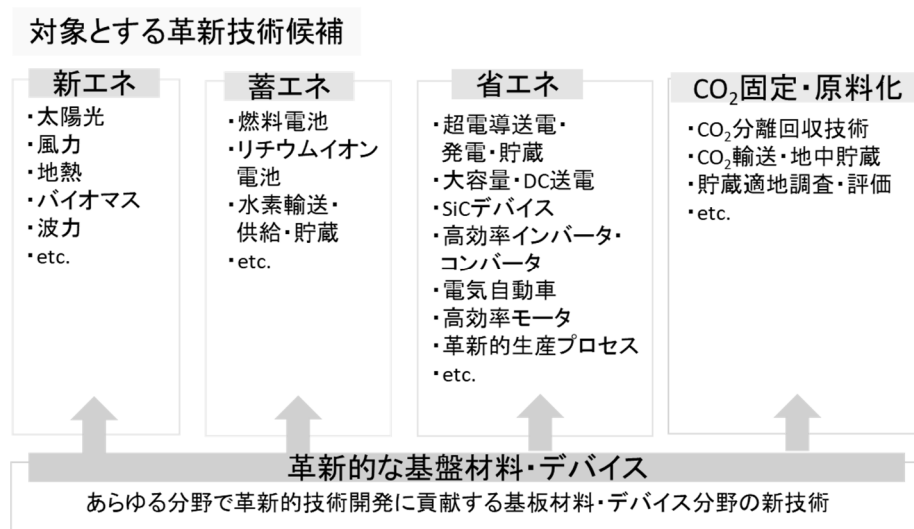
1.1 電力システムを取り巻く現在の状況

2011年3月11に発生した東日本大震災により、原子力発電の安全神話は打ち砕かれ、東西の周波数変換設備や地域連携線の容量不足といった系統の問題も顕在化した。

2002年6月にエネルギー基本法が制定され、およそ3年に一度の頻度で内容が検討されている「エネルギー基本計画」は、2016年4月11日に第3回改訂がなされた。その中では原子力発電への依存度低下と共に省エネルギー・再生可能エネルギーの導入、系統の強靱化に資する研究開発を促進すること等が記載されている⁽¹⁾。特に、洋上風力発電への期待は高く、2011年度に始まった福島沖での浮体式洋上風力発電に関する実証試験により安全性・信頼性が実証されれば、再生可能エネルギーが系統内で活躍することも予想される。

2015年に開催されたCOP21では、温室効果ガス排出の大幅な削減を目指し、2020年以降の新たな国際的な枠組みであるパリ協定が締結された。これを受けて、国内でもエネルギー・環境分野における中長期的な研究開発を促進していくために「エネルギー・環境イノベーション戦略」が閣議決定された。エネルギー・環境分野の技術を表1の通り、発電、送電、利用の観点から整理し、温室効果ガス排出削減技術を個別に開発・導入するだけではなく、エネルギー関連の装置や設備をネットワーク化すること、また個別の機器・設備等をそれぞれ制御するだけではなく、エネルギー・システムとして統括的に捉え、システム全体の最適化を図るとしている⁽²⁾。

表1 エネルギー・環境イノベーション戦略にてまとめられた対象とする革新的技術分野⁽²⁾



1.2 研究背景

2011 年の東日本大震災以降、国民の省エネルギーに関する関心は高まっているが、2014 年における電力化率(最終エネルギー消費量に占める電力消費量の割合)は 25.3%⁽³⁾であり、依然として社会インフラにおける電気エネルギーが重要な役割を担っていることは言を俟たない。電気エネルギーの発電・送電・利用を制御する電力システム(図 1.1)は、発電機、変圧器、開閉装置や遮断器等の電力機器と架空送電線や電力ケーブル等の送電線から主に構成されている⁽⁴⁾。電気エネルギーを省エネルギーに活用するためには、その発電・送電・利用の全てにおいて電力機器の低損失・高効率化と共に高信頼性が要求される。近年、これらの要求を満たすために高電圧直流(HVDC)送電やパワーエレクトロニクス技術が注目されている。

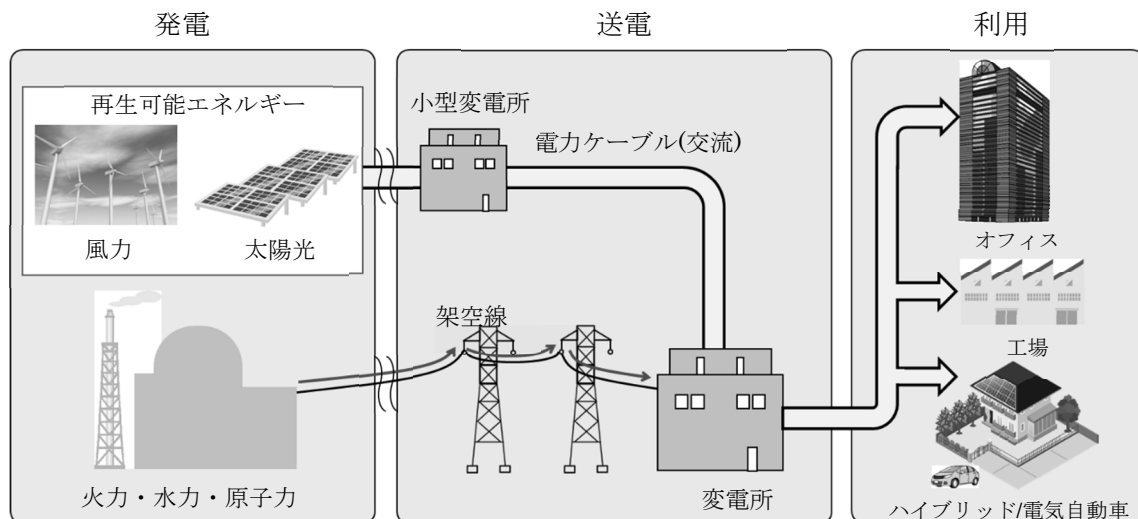


図 1.1 電力システムの構成例⁽⁴⁾

①HVDC 送電

交流送電は変圧および遮断の容易さ等から主流であり、工場の発電機等は交流で運転されている場合が多い。一方で、一般家庭内の家電製品の多くは交流を直流に変換して使用している。さらに、近年導入が盛んな再生可能エネルギーによる分散型電源は直流の電力を発電する。直流送電の利点は、① 誘電損失が無い場合送電損失が低い、② 充電電流が無い場合長距離送電が可能であること等が挙げられる。通常の高圧交流送電と比較して、送電距離が長いほど(架空線の場合は数百 km 以上、ケーブルの場合は数十 km 以上)最適な送電方式となるため⁽⁵⁾、低損失および長距離大容量送電が可能となる。しかしながら、絶縁体を直流にて長期間使用した場合、絶縁体内部もしくは表面に帯電が残存し易くなる。直流送電においては、潮流方向を変えるために電圧の極性を反転する場合がある。電圧の極性反転を伴う場合、絶縁体内部もしくは表面の帯電が電界強調を引き起こし、局所電界が設計電界よりも

高電界化する可能性がある。一般に電力機器内部の高電界化は部分放電の発生を容易にし、その持続的な発生は絶縁体の劣化ひいては絶縁破壊を引き起こす。したがって、直流においては帯電が部分放電の発生を助長し絶縁性能を低下させる要因になることが考えられる。ところが、CIGRE(国際大電力システム会議)や IEC(国際電気標準会議)において決定されている電力ケーブルの規格試験項目(表 1.1)⁽⁶⁾には直流における部分放電測定の記載はない。しかしながら前述のとおり、極性反転を伴う直流電力ケーブルにおいて部分放電の測定は重要なものと考えられる。

表 1.1 各種電力ケーブルに推奨される電気試験⁽⁶⁾

Cable Type	1	2	3	4	5
Rated Voltage	33kV(AC)	150 kV (AC)	420 kV (AC)	150kV(DC)	450kV(DC)
Insulation	XLPE	XLPE	Paper/Oil	Polymer	Mass-impregnated
Mechanical tests	Electra 171 ⁴				
Electrical type test	Electra 189a with reference to IEC60840	IEC60840	IEC62067	CIGRE technical Brochure TB219	Electra 189b
Test Sequence	TB PD tanδ HC PD LI AC (PD) (same as in IEC 60502)	TB PD tanδ HC PD LI AC (PD)	TB PD tanδ HC PD SI(for Um ≥ 300 kV) LI AC (PD)	TB LC SI LI&DC DC	TB LC PR LI SI

TB: Tensile bending test, PD: Partial discharge test, HC: Heating cycle voltage test, LI: Lightning impulse test, SI: Switching impulse test, LC: Load cycle test, PR: Polarity reversal test, DC: High voltage test with DC, AC: High voltage test with AC

②パワーエレクトロニクス技術

近年のハイブリッドおよび電気自動車の普及により、インバータ駆動モータの高効率化・小型化の要求は高まっており、今後も益々その利用は拡大すると考えられる。電気自動車は

一見すると電気絶縁技術と無縁であるが、高効率・小型化は機器内部の高電界下を引き起こすため、従来よりも絶縁体の使用環境は厳しさを増している。インバータ駆動モータの電気絶縁において、接続ケーブルを含めた電源とモータのインピーダンス不整合に伴うインバータサージが問題になることは広く知られており⁽⁷⁾。インバータサージによる絶縁破壊メカニズムは部分放電が主要因であることが報告されている⁽⁸⁾⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾。また、部分放電の予期せぬ発生要因の一つとして帯電が懸念されている⁽¹¹⁾。

図 1.2 のようにインバータサージは印加時間間隔が短く極性反転も生じるため前の部分放電による帯電の影響が次の部分放電に影響し易い。一般的には、モータ巻線を模擬したツイストペアサンプル(図 1.3)⁽¹¹⁾を用いて IEC61934TS に準拠した繰り返しインパルスにおける部分放電開始電圧(RPDIV)を評価する。しかし、ツイストペアサンプルは巻線間に部分放電発生個所を多数有しているため、帯電と部分放電の関係を十分に検討できていないと考えられる。

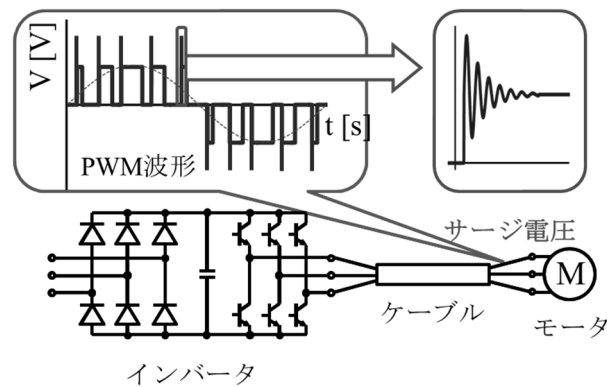


図 1.2 インバータサージ波形

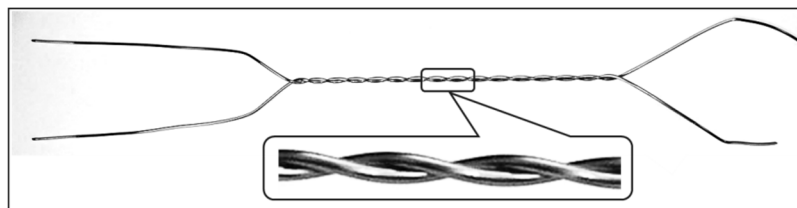


図 1.3 ツイストペアサンプル⁽¹¹⁾

1.2 研究目的

絶縁体は固体・液体・気体と様々であるが、一般に電力機器等に用いられる場合には単体での使用は稀であり、その多くは液体-固体もしくは気体-固体の複合絶縁である。従来の帯電を考慮した部分放電発生メカニズムの解析モデルには、Whitehead モデル⁽¹²⁾が広く適用されてきた。このモデルは図 1.4 に示す通り絶縁体内部のボイドで発生する部分放電の発生メカニズムを次の通り説明している。ボイド内の分担電圧が部分放電開始電圧に達したときに放電が発生し、その後ボイド内の残留電圧(帯電電位)とボイド内の分担電圧が再度部分放電開始電圧に達するときに次の部分放電が発生すると考えている。しかしながら、このモデルを直流に適用した場合、直流電圧は一定電圧であるため一度部分放電が発生すると帯電電位と分担電圧の電位差が再度部分放電開始電圧に達成することは無い。したがって、再度部分放電が発生するためには帯電電位の減衰を考慮する必要がある。このような、直流電界下における帯電電荷の挙動が部分放電特性もしくは絶縁破壊特性に与える影響を詳細に検討した例は少ない。また、帯電電位の減衰を決定するボイド内の内部抵抗や表面抵抗は湿度・温度といった環境条件や電界によって大きく変化すると共にそれらに対して非線形性を示すと考えられるため、実験による半定量的な評価が不可欠である。本論文では、電力機器・ケーブルで主に採用されている複合絶縁系において帯電電荷の挙動と部分放電特性が絶縁性能に与える影響を明らかにした。

一方で、実際に電力機器の敷設後には劣化診断によって故障を未然に防止することも重要である。部分放電の継続的な発生が絶縁劣化ひいては絶縁破壊を生じるため、部分放電を検出することで絶縁破壊を未然に防ぐ技術の確立が望まれる。本論文では、電力機器のオンライン絶縁劣化診断に資する新たな診断技術の提案に向けた基礎検討として、アンテナを用いた部分放電の新たな検出手法の提案と交流損失電流の非線形性による絶縁体内部への微小量の空間電荷侵入量の検討方法の提案も行った。

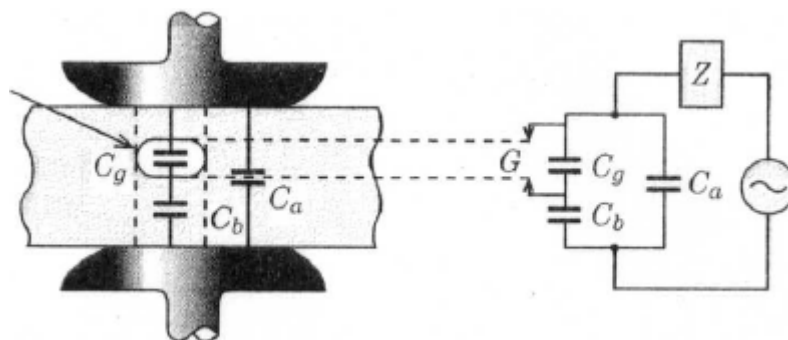


図 1.4 Whitehead モデル⁽¹²⁾

1.3 本論文の概要

本論文は全8章から構成される。以下に各章の概要を述べる。

第1章では、序論として電力システムを取り巻く現在の状況と本研究の背景、目的および本論文の概要を述べている。

第2章では、本研究に関連するこれまでの研究を概説している。

第3章では、本研究で用いた材料についてまとめている。

第4章では、長距離海底直流ソリッドケーブルの絶縁紙・高粘度絶縁油複合系の部分放電特性に与える帯電電荷の影響に関して述べている。部分放電発生頻度特性および電気伝導特性から高粘度絶縁油を用いることによって、電荷が移動し難くなり、電位差が生じ難くなるため部分放電が抑制されることを示した。

第5章では、直流超電導ケーブルの絶縁紙・液体窒素複合系の部分放電を介した絶縁破壊現象と内部帯電の関係を述べている。直流プレストレス試験の結果から電荷侵入モデルを提案し、絶縁紙内部への負電荷侵入が絶縁性能低下を引き起こすことを示した。さらに、絶縁紙内部への電荷侵入は部分放電によって生じると考え、高密度絶縁紙を用いることによって部分放電による負電荷が抑制されることを示した。絶縁紙内部を氷で満たした絶縁紙・氷複合系を直流超電導ケーブルの電気絶縁構成に適用することを提案し、絶縁紙内部が氷で満たされることによって、部分放電の侵入空間が減少し負電荷侵入が抑制されることを示した。

第6章では、電気自動車用モータ巻き線の被覆に採用されているポリイミドの部分放電特性に与える帯電の影響に関して述べている。帯電による部分放電開始電圧のばらつきを示すと共に除電によってばらつきが低減されることを示した。さらに、絶縁体表面の帯電によって部分放電開始電圧は増減し、帯電の大きさと分布を考慮することによって部分放電開始電圧がギャップの電位差のみで決定されることを示した。

第7章では、電力機器のオンライン絶縁劣化診断技術に貢献するための基礎検討として、アンテナによる部分放電の新たな検出方法と交流損失電流計測による内部帯電電荷の観測について述べている。部分放電に起因した回路電流からの放射電磁波の強度とその周波数スペクトルを用いた放電特性の解析を行い、沿面放電とギャップ放電の放射電磁波の周波数スペクトルの違いを示した。交流損失電流波形の非線形性および位相差が空間電荷の侵入に起因していることを示し、位相差を用いて微小量の空間電荷侵入量を推測する方法を示した。

第8章では、本論文の総括を述べ、さらに得られた知見を用いた工学的応用と今後の課題と問題点について述べている。

参考文献

- (1) 経済産業省エネルギー資源庁：「エネルギー基本計画」，2016 年 4 月
- (2) 内閣府：「エネルギー・環境イノベーション戦略(案)」，2016 年 3 月 24 日版
- (3) 経済産業省エネルギー資源庁：「エネルギー白書 2016」，第 2 部第 1 章，p.144，2016.
- (4) 大久保：電力システム工学(新インターユニバーシティ)，オーム社，p.2，1998.
- (5) 新井，他：「HVDC 用高電圧・大容量マルチレベル変換器」，東芝レビュー，Vol.69, No.4, pp.16-19，2014.
- (6) Thomas Worzyk："Submarine Power Cables Design, Insulation, Repair Environmental Aspects"，Springer, p.139, 2009.
- (7) 菊池，他：「繰り返しインパルス電圧における部分放電開始電圧の湿度特性と前課電効果」，電気学会論文誌 A，Vol.135, No.3，pp.168-174，2015.
- (8) M. Kaufhoid, et al.："Endurance of the winding insulation applying frequency converters"，8th International Symposium on High Voltage Engineering, paper 64.02, 1993.
- (9) M. Kaufhoid, et al.："Failure Mechanism of the Internal Insulation of Low Voltage Electric Machines Fed by Pulse Controlled Inverters"，IEEE EI Magazine, Vol.12, No.5, pp.9-16, 1996.
- (10) M. Kaufhoid, et al.："Electrical stress and failure mechanism of the winding insulation in PWM-Inverter-fed low voltage induction motors"，IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol.2, No.2, pp.396-402, 2000.
- (11) 木村：「インバータサージと国際規格」，電気学会論文誌，Vol.126, No.7，pp.419-422，2006.
- (12) T. Tanaka, et al.："A Method of Evaluating Resistance of Insulating Materials Against Internal Partial Discharges"，CIGRE Report for the 1996 Session of TF 15.06.01, Electra No.164, 1996.

第2章 本研究に関連するこれまでの研究

2.1 まえがき

電力機器や電力ケーブルは単一材料による絶縁ではなく複合絶縁が施されている場合が多い。変圧器や油浸紙ケーブルの歴史は古く、その絶縁方式として主に採用されている絶縁紙-絶縁油複合系は最も馴染みの深い複合絶縁系であり、現在も多くの電力機器の絶縁構成として活躍している。一方、近年の超電導技術の進歩によって従来の電力機器に比べて大容量・低損失が実現可能となったため、超電導を用いた変圧器、回転機、電力ケーブルの研究・開発も盛んに行われている。これらの超電導機器は、冷媒として液体ヘリウムや液体窒素を用いており、その冷却方式には浸漬冷却と間接冷却の2種類がある。浸漬冷却である絶縁紙-液体窒素複合系は、従来の絶縁紙-絶縁油複合系の知見を活かすことができるため、主として高温超電導ケーブルに採用されている。

電気絶縁技術の要求は電力機器や電力ケーブルといった高電圧機器のみではなく、コンパクト化・高出力化を背景にパワーエレクトロニクス機器にも及んでいる。その最たる例は、インバータ技術を用いたハイブリッド/電気自動車内のモータである。モータの巻線間には微小な空気ギャップが存在するため、コンパクト化・高出力化による機器内部の高電界下は、部分放電の発生を容易にする。モータの被覆として用いられるポリイミドを含めた空気中における部分放電特性の解明が望まれる。以上の観点から、本研究では3つの複合絶縁系に着目した。

- ① 絶縁紙-絶縁油複合系
- ② 絶縁紙-液体窒素複合系
- ③ 絶縁体-空気複合系

本章では、本研究に関連する基礎事項と従来研究で得られている各種複合絶縁系における絶縁特性について述べる。さらに、電力分野においては、運転中の電力機器の状態をモニタリングすることで異常を検知し、故障を未然に防止すると共に寿命を判断することによって機器交換の時期を見極める必要もある。本章では部分放電を主とする絶縁劣化診断技術に関する現在の動向についても述べる。

2.2 気体中の部分放電現象と固体絶縁物

2.2.1 部分放電現象

部分放電は、絶縁体を貫通する全路破壊現象ではなく、局所的な絶縁破壊現象である。部分放電によって絶縁体は直ちに絶縁破壊に至る訳ではないが、有機絶縁材料における部分放電の持続的な発生は、部分放電の熱、荷電粒子の衝突による分子鎖の切断等⁽¹⁾によって、変質・劣化を招くため注意が必要である。

図 2.1 の複合絶縁系における各層の分担電圧(E_1 、 E_2)は以下の式⁽¹⁾の通りである。

$$E_1 = \frac{\sigma_2}{\sigma_1 d_2 + \sigma_2 d_1} V + \left(\frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1 d_2 + \varepsilon_2 d_1} - \frac{\sigma_2}{\sigma_1 d_2 + \sigma_2 d_1} \right) V \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right)$$

$$E_2 = \frac{\sigma_1}{\sigma_1 d_2 + \sigma_2 d_1} V + \left(\frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_1 d_2 + \varepsilon_2 d_1} - \frac{\sigma_1}{\sigma_1 d_2 + \sigma_2 d_1} \right) V \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right)$$

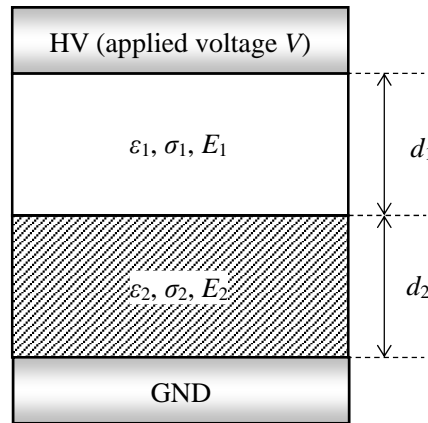


図 2.1 複合絶縁系モデル

ここで、 σ_1 、 ε_1 、 d_1 、 σ_2 、 ε_2 、 d_2 、は各層の導電率、比誘電率、厚さをそれぞれ示している。 τ は合成時定数 $(\varepsilon_1 d_2 + \varepsilon_2 d_1) / (\sigma_1 d_2 + \sigma_2 d_1)$ である。例えば、この系においてインパルス電圧が印加された場合の分担電圧は誘電率によって決定される⁽¹⁾。気体と液体の誘電率は固体に比べて低く、絶縁破壊電圧も固体に比べてはるかに低い。したがって、気体-固体もしくは液体-固体複合絶縁系においては、気体もしくは液体に電界が集中し、部分放電の発生を容易にする。

部分放電はその発生部位によって①ギャップ放電、②沿面放電、③ボイド放電に大別できる。実際の電力機器・電力ケーブルにおいては、3つの部分放電が複合的に関与し絶縁破壊機構をより複雑にしている。その他、部分放電による固体絶縁体表面の帯電、絶縁体中への空間電荷の注入が複合絶縁系の電界分布を変歪し、部分放電特性に影響を与える可能性がある。次節以降にその詳細を述べる。

2.2.2 パッシェンの法則

一般に空気中では宇宙線や放射線によって電離した電子とイオンが存在している。このような気体に電圧を印加すると電流は図 2.2 の通り、最初は電圧に比例して増加する。この領域では、イオン密度はほぼ一定であり、イオンのドリフト速度に制限された電流がオームの法則に従って流れる。電極間で生成されたイオンが全て電極に到達するようになると電流は飽和する。この領域では電流はイオンの生成速度に律速される。さらに電圧が上昇すれば、電界によって加速された電子が中性分子と衝突することによって電離が起こる。電離によって生成された新たな電子は、さらなる電離を生じさせるため電荷は指数関数的に増倍していく。この現象が電子なだれであり、衝突電離による電子の増倍作用を α 作用と呼ぶ。

ここで、電子なだれによって電流は増大するが、電子なだれの出発電子(初期電子)の生成が宇宙線や放射線といった確率的な要因に依存している限りは単発的な部分放電の発生のみである。したがって持続的な放電発生のためには γ 作用が不可欠である。 γ 作用は衝突電離によって生成された正イオンが陰極に衝突した結果として生じる光電子効果による 2 次電子放出係数であり、電極金属の種類によっても変化する。以上のような α 作用、 γ 作用を考えた放電形式をタウンゼント放電と呼ぶ⁽²⁾。

気体中のギャップの火花電圧は圧力 p とギャップ長 d の積の関数となる。これはパッシェンの法則としてよく知られており、火花電圧はある pd で最小値を持つ。図 2.3 にパッシェン曲線を示す。空気の火花放電電圧の最小値(パッシェンミニマム)は $5.67 \mu\text{m}$ 、 $330 \text{ V}^{(3)}$ である。パッシェンミニマムの右側では、圧力 p が小さくなると気体分子間の距離が長くなり電子の平均自由行程は大きくなる。電離に必要なエネルギーを得易くなるため火花電圧は低下する。一方で、パッシェンミニマムの左側では、圧力 p が小さくなると衝突に必要な気体分子の数が減少し、衝突電離が生じ難くなるため火花電圧は上昇する。ここで注意すべきは、パッシェンミニマムは火花電圧の最小値であって、電界の最小値ではないことである。パッシェンミニマムにおける電界を算出すると 58.2 kV/mm ($330 \text{ V}/5.67 \mu\text{m}$) となり、極めて高くなる。これに対して、 1 cm の火花電圧は約 30 kV であるため、電界は 3 kV/mm となりパッシェンミニマムに比べてはるかに低くなる⁽²⁾。

パッシェンの法則の適用範囲の検討も多数なされている。平等電界で pd が小さい範囲では放電はタウンゼント理論で説明でき、火花電圧はパッシェンの法則に従うことが分かっている⁽²⁾。しかしながら、 pd が大きくなると、例えば大気中で数 cm 以上の電極間の放電は空間電荷効果を考慮する必要がある、タウンゼント理論では説明が困難である。このような領域の火花電圧を説明するために、イギリスの J.M.Meek によって代表的なストリーマ理論が提唱せられている⁽⁴⁾。

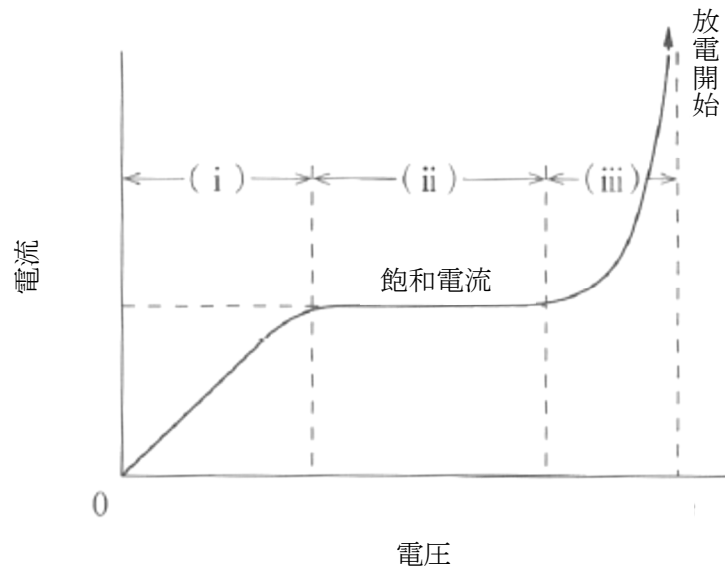


図 2.2 電圧-電流特性⁽²⁾

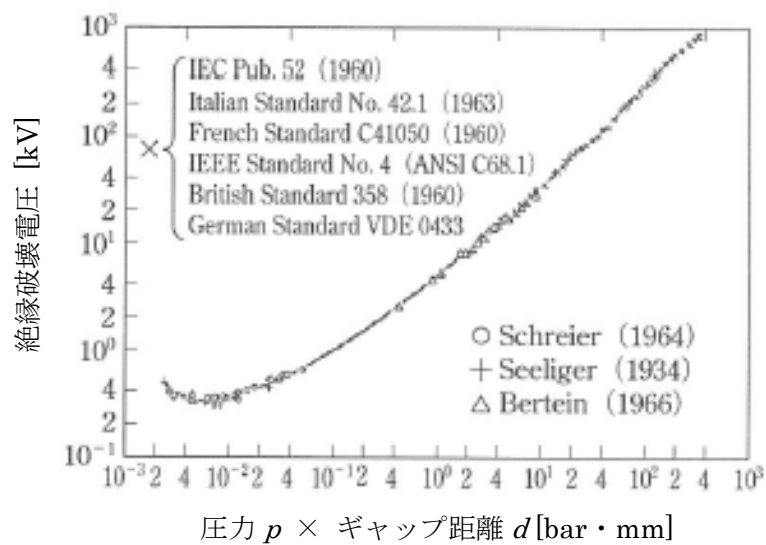


図 2.3 空気のパッシェン曲線⁽²⁾

2.2.3 沿面放電

沿面放電は図 2.4 の通り、電気力線が固体絶縁体表面に対して垂直になるような構成と、平行になるような構成に大別される。沿面放電は必ずしも高電圧側の電極から開始する訳ではなく、接地側電極近傍の電界が強ければ接地電極側からも放電が開始する。沿面放電が電極間を短絡すると閃光を伴った沿面フラッシュオーバーとなる。放電は、絶縁体と電極の接触

部(トリプルジャンクション)や絶縁体表面に付着した傷や金属片等による電界歪の大きな点から開始する。また、部分放電による帯電・蓄積電荷が沿面放電進展特性に影響を与えることも報告されている⁽⁵⁾⁽⁶⁾。

沿面放電の進展モデルを図 2.5 に示す。放電の最先端は盛んに電離している領域であり、その後方にプラズマ状態の幹が存在する。この両者を合わせて沿面ストリーマという。沿面放電の特徴は固体絶縁体に接しながら進展することである。このとき、背後電極がある場合においては、固有容量が増加するため、放電の先端の電位降下が小さくなる。したがって、背後電極がある系のフラッシュオーバー電圧は低下するため絶縁設計上の問題になる場合が多い。絶縁体を厚くすることによって固有容量を低下させることがフラッシュオーバー電圧低下を抑制する上で有効であることもわかる。しかしながら、機器のコンパクト化等から絶縁層の厚さに限界がある場合も多い。鶴水氏等は、絶縁物沿面の放電は「くぼみ電極」を設けることによって、帯電・蓄積電荷の特性が変化し、電界の強調が生じ難くなる場合においては、蓄積放電電荷量と放電発生数が低下することを報告している⁽⁷⁾。

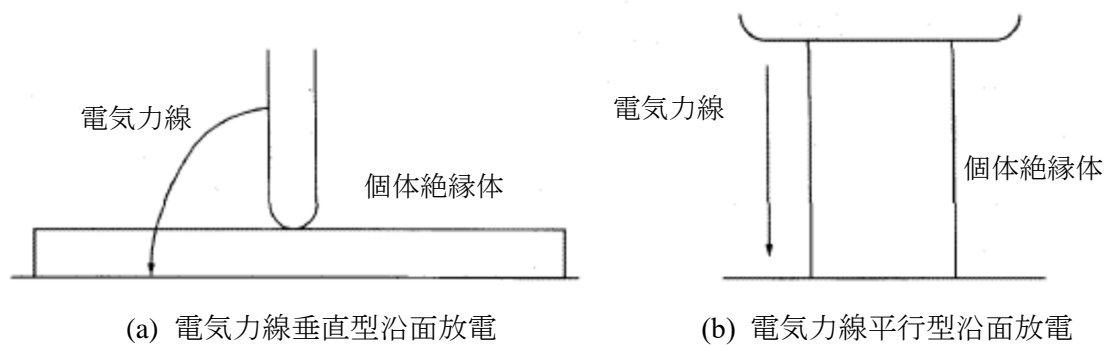


図 2.4 沿面放電の典型的な電極構成⁽⁵⁾

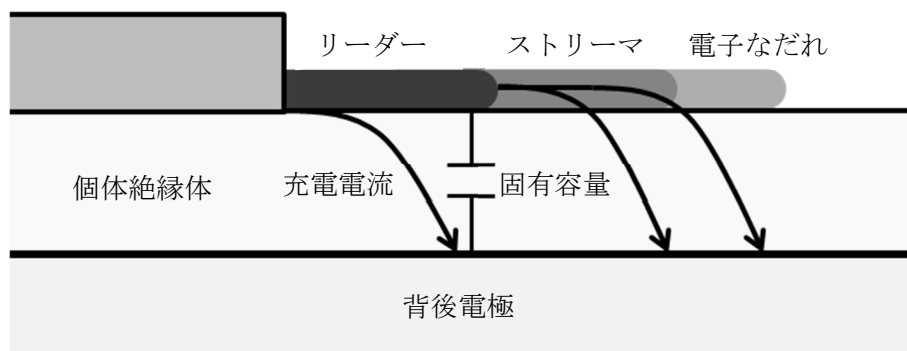


図 2.5 沿面放電進展時の機構⁽⁵⁾

2.2.4 ボイド放電

固体に比べて気体の絶縁破壊電圧ははるかに低いため、固体内部への気泡の混入は十分に排除すべきである。しかしながら、実際の電力機器・電力ケーブルの固体絶縁体内部において、機械応力や熱履歴によってクラックが生じる場合がしばしばある。このような背景の下、固体絶縁体内部のボイド放電の振る舞いに関する研究は盛んに行われている。図 2.6 に固体絶縁体内部の単一ボイドの等価回路モデルを示す。このモデルは **Whitehead** モデルとして広く知られている⁽⁸⁾。ここで、 C_a はボイドと並列な絶縁体の静電容量、 C_b はボイドと直列な絶縁体の静電容量、 C_g はボイド自身の静電容量である。

図 2.7 に示すように、電極間に $V(t)$ の正弦波電圧が印加されているとき、ボイドにはその分担電圧 $V_g(t)$ が現れる。 $V_g(t)$ が放電開始電圧 v_s に到達すると放電は開始し、 C_g は放電されて $V_g(t)$ は残留電圧(帯電電位) v_r まで低下する。 $V(t)$ がさらに上昇すると $V_g(t)$ も上昇し、再度ボイド内の電位差が放電開始電圧 v_s に到達すると放電が生じる。この過程が繰り返されるのがボイド放電である。ボイド放電において物理的に重要なポイントは、放電が生じるとボイド表面には逆極性の放電電荷が帯電し、この電荷により発生した逆電界が印加電圧によりボイドに加わる外部電界をキャンセルすることで $V_g(t)$ を低下させることである。このことから、外部印加電圧とボイド内分担電圧の大小関係は必ずしも一致しない。したがって、内部部分放電が数多く発生している場合においては、印加電圧の最大値ではなく電圧の瞬時変化率の一番大きいゼロクロス付近において放電が最も多く発生することがわかる。この等価回路モデルはボイド放電を理解するために広く用いられてきた。ボイド放電発生メカニズムを簡易なモデルで理解する場合には十分であるが、実際の電力機器・電力ケーブルの場合にはボイド放電をコンデンサに置き換えたモデルで考えることは困難である。このような観点から固体内のボイド放電を物理現象から理論的に説明を試みた物理モデルも提唱されている⁽²⁾⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾。

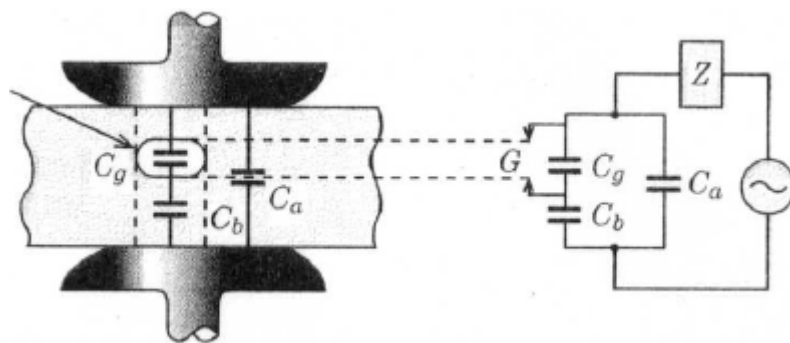
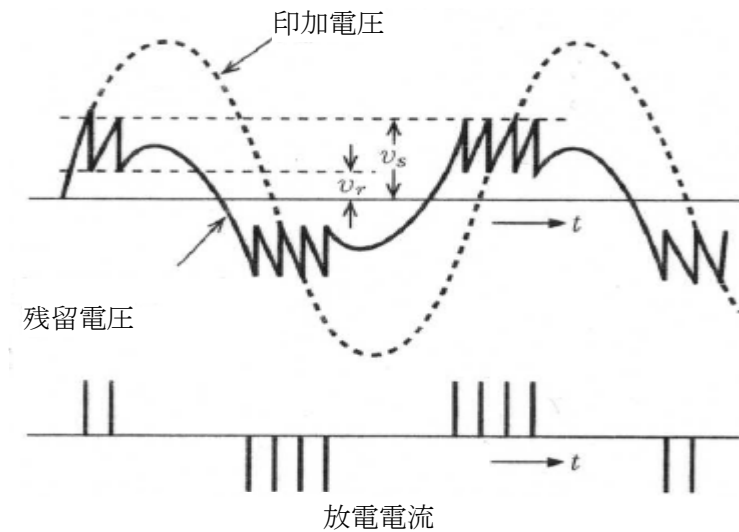


図 2.6 ボイド放電における等価回路モデル(Whitehead のモデル)⁽⁸⁾

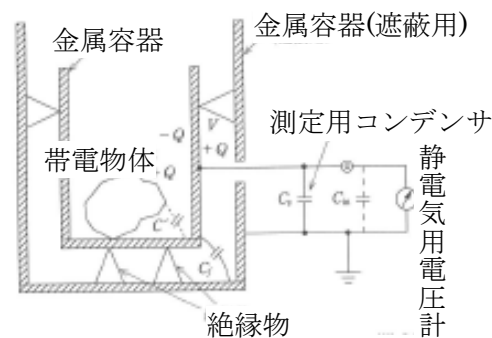
図 2.7 ボイド放電の発生位相パターン⁽⁸⁾

2.3 帯電現象とその計測

産業上で帯電現象を有効に活用した技術としてコピー機や塗装等是有名である。一方で、化学プラント等では粉体の帯電による放電が粉塵爆発・火災を招く等の事故を発生するため、その対策が問題となっている⁽¹²⁾。また、電力機器等においても帯電は電界設計に関わる重要な因子である。したがって、絶縁物の帯電現象を定量的に評価することが重要である。ここでは、帯電の評価方法の例を述べる。

(1) ファラデーゲージ法⁽²⁾

ファラデーゲージ(図 2.8)は、導体に囲まれた籠もしくは箱であり、帯電した絶縁体の電荷と逆極性の電荷が導体に静電誘導される特性を活かし、外部に接続されたコンデンサの電位を計測することによって絶縁体の総電荷量を計測することができる。このとき、接続した静電容量 C が既知であり十分に大きければ、総電荷量 $Q = CV$ となる。

図 2.8 ファラデーゲージ⁽²⁾

(2) 電荷図法(Dust Figure 法)⁽²⁾

帯電した固体絶縁体表面に帯電した粉体を散布し、表面帯電分布を可視化する方法であり、コピー機用トナーを用いることによって極性と帯電量を色と付着量によって視覚的に判断することもできる。簡便であり帯電の全体像を把握し易いといった特徴がある一方で、定量化は困難である。図 2.9 に測定例を示す。

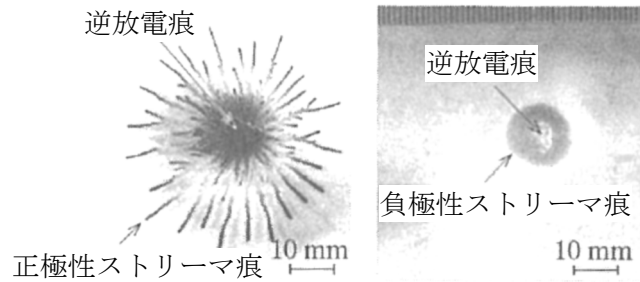


図 2.9 PMMA 上の沿面放電による帯電電荷図⁽²⁾

(2) プローブ法⁽²⁾

プローブ法は図 2.10 に示すようにプローブを絶縁体の間に一定距離を設けて挿入することによって、絶縁体表面の帯電による表面電位を容量結合により測定する方法である。この場合、位置分解能にも関係するが、測定される電位は絶縁体表面の正電荷と負電荷の総和になる。分解能はプローブの形状と配置によって大きく変化する。ガード電極(内半径 r 、外半径 R)、検出電極(半径 r_d)、ギャップ長 d とした場合、測定系の分解能は以下の通りになる。

① ガード電極の大きさ：ガード電極の外形 $2R$ を $2R = 2r \sim 20r$ とした場合、入力伝達関数は比較的低い空間周波数において外形の大きさの影響を受けるが、重要な高い空間周波数においてはほとんど影響を受けず、外形は分解能への影響が小さい。

② 検出電極の大きさ：検出電極の大きさは容量結合で表面電位を測定している原理上、結合検出電極の外形の増加は結合コンデンサの増加と等しいため、測定される信号が大きくなり、S/N が向上する。ただし、検出電極が大きくなりすぎると、位置分解能は悪くなる。

③ ギャップ長およびノイズレベルと分解能の関係：ギャップ長 d を $0.4r \sim 5r$ に変化させた場合、絶縁体の厚さが $t = 10r$ における測定時の分解能は入力伝達に関する数値計算を行った結果、ギャップ長 d が短く、測定値に重畳するノイズレベルを下げるに従って分解能は向上するが、ノイズレベルを 0.2 % まで下げ、ギャップ長を $d = 0.4r$ まで近づけても分解能は r 以下にはならないことが示されている。

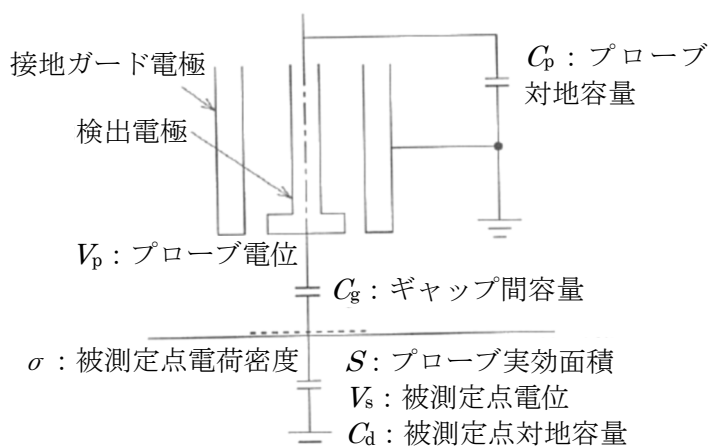


図 2.10 プローブ法による測定原理⁽²⁾

(3) 電気光学効果を用いた方法⁽²⁾⁽¹³⁾⁽¹⁴⁾

物質に電界が印加されると、その物質内を透過する光の屈折率が変化することを電気光学効果と呼ぶ。電気光学効果には屈折率が印加電界に比例して変化するポッケルス効果と電界の二乗に比例するカー効果があり、主に前者は固体、後者は液体で現れる。計測に光を用いるため、①応答速度が速く時間分解能が極めていい、②電氣的雑音の影響が無い等が特徴として挙げられる。電気光学効果の測定原理を図 2.11 に示す。測定系は通常レーザー等の光源、偏光子、検光子で構成されている。

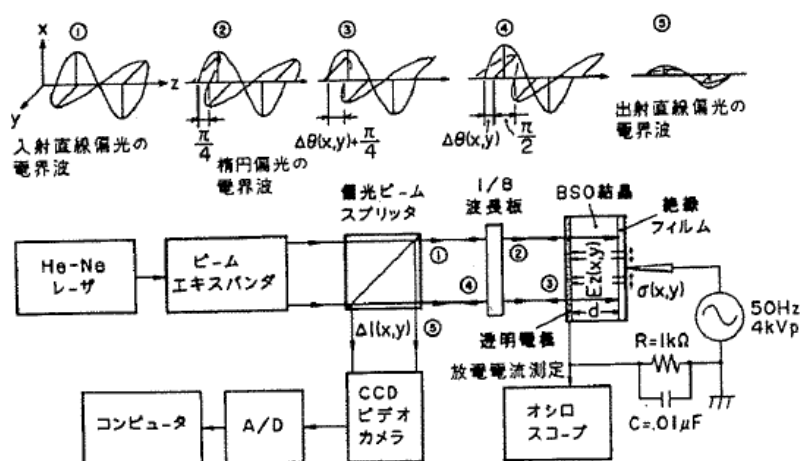


図 2.11 電気光学効果の測定原理⁽¹⁴⁾

2.4 絶縁紙-絶縁油複合系における部分放電現象と帯電現象

2.4.1 電気絶縁油の概説

電気絶縁油は、変圧器、コンデンサ、遮断器、ケーブル等の電気機器において、電気絶縁、発生熱の除去、冷却等を目的として用いられる。従来は、石油系鉱油が使用されてきたが、近年はアルキルベンゼン系、ポリブテン系、アルキルナフタレン系、アルキルジフェニルエタン系、シリコン油系等の合成品も用いられるようになった。さらに最近では、環境に配慮した植物由来の大豆油やパームヤシ油を適用するための検討もなされている⁽¹⁵⁾⁽¹⁶⁾。これらの絶縁油のうち、最も広く用いられているのは石油系製品であり、JISによる1種の1号は油入コンデンサ、油入ケーブル等、2号は主として油入変圧器、油入遮断器等、3号は主として厳寒地以外での油入変圧器、油入遮断器等に、それぞれ用いられる⁽¹⁷⁾。JIS規格において、絶縁油はその主成分によって表2.1のように大きく7種類に分類されている。JIS1種油はパラフィン、ナフテン、芳香族炭化水素を主成分とする鉱油であり、芳香族炭化水素に比べてパラフィンとナフテンの含有量が多いことが特徴である。JIS2種油はアルキルベンゼン、JIS3種油はポリブテン、JIS4種油はアルキルナフタレン、JIS5種油はアルキルジフェニルアルカン、JIS6種油はシリコン油からなるいずれも合成油である。JIS7種油はJIS1種油と同様の鉱油に、芳香族炭化水素であるアルキルベンゼンが混合されている。上述したアルキルベンゼンについて、一般的には、JIS2種油にはモノアルキルベンゼンが、JIS7種油にはジアルキルベンゼンが使用されていることが多い。

表 2.1. 絶縁油の種類と特徴⁽¹⁷⁾

種類		主成分			主な用途	
1 種	1 号	鉱油			油入コンデンサ、油入ケーブル	
	2 号				油入変圧器、油入遮断器	
	3 号				厳寒地以外の場所で用いる油入変圧器、 油入遮断機	
	4 号				高電圧大容量油入変圧器	
2 種	1 号	アル キル ベン ゼン	分岐	低粘度	油入コンデンサ、油入ケーブル	
	2 号		鎖形	高粘度		
	3 号		直鎖形	低粘度		
	4 号			高粘度		
3 種	1 号	ポリブテン		低粘度	油入コンデンサ、油入ケーブル	
	2 号			中粘度		
	3 号			高粘度		
4 種	1 号	アルキル			低粘度	油入コンデンサ
	2 号	ナフタレン			高粘度	
5 種	1 号	アルキルジ フェニル アルカン		低粘度	油入コンデンサ	
	2 号			高粘度		
6 種		シリコーン油			油入変圧器	
7 種	1 号	鉱油、アルキルベンゼン			油入コンデンサ、油入ケーブル	
	2 号				油入変圧器、油入遮断器	
	3 号				厳寒地以外の場所で用いる油入変圧器、 油入遮断機	
	4 号				高電圧大容量油入変圧器	

2.4.2 絶縁油の絶縁性能の低下因子

液体絶縁体の絶縁破壊機構は、電子の衝突電離による電子的破壊過程と気泡や浮遊粒子を介した絶縁破壊過程が考えられている。絶縁油は様々な電力機器の絶縁構成の一部として採用されているため、古くから多くの検討がなされている。その結果、絶縁油の絶縁破壊特性、電気伝導特性、 $\tan\delta$ が、絶縁油中の水分や浮遊粒子、絶縁油の粘度等によって大きく変化することが分かっている。これらは、絶縁油中の部分放電による副生成物によっても影響を受ける。本節では、上記の因子が絶縁油の絶縁性能に与える影響に関して検討した先行研究の例を述べる。

① 溶存水分の影響

絶縁油の水分は乾燥処理を施すことによって大部分が除去されるが、空気中からの吸湿による混入、絶縁油の酸化劣化によって生成されるため絶縁油中に残存する。岸田氏等は、ジオクチルニレートを用いて溶存水に自由水とクラスタ水、および非対称的水素結合水の3種類が存在することを赤外吸収スペクトルに波形分離を施すことによって明らかにしている。さらに、その内の自由水とクラスタ水が高電界電気伝導と絶縁破壊に関与していることを報告している。図 2.12 の溶存水分量と絶縁破壊電圧の関係から、低水分領域においてはクラスタ水の崩壊量が少なく、高水分領域においてはクラスタ水の崩壊による自由水の急増が電気伝導の増大と絶縁破壊電圧の急激な現象を引き起こしていることを報告している⁽¹⁸⁾。

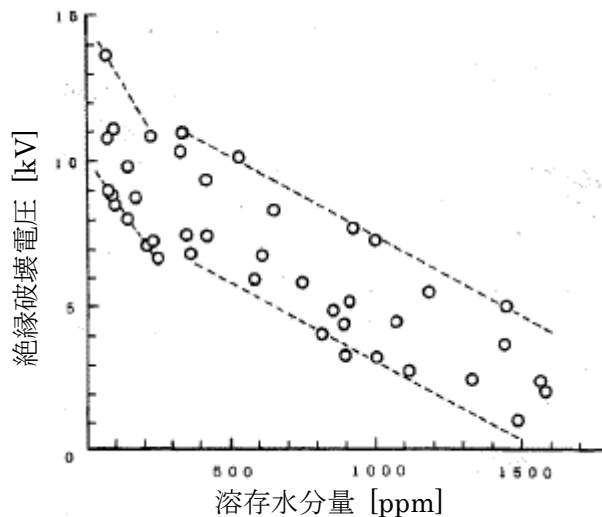


図 2.12 溶存水分量と絶縁破壊電圧の関係⁽¹⁸⁾

また、石井氏等は絶縁油中の水分が各温度領域において絶縁破壊電圧に与える影響を検討しており、図 2.13 および図 2.14 の通り、2 号油、アルキルベンゼン油のいずれも、交流破壊電圧は油中水分が比較的多い領域では油中水分が過飽和状態となって油が白濁し始め

る温度で最小値を示し、油中水分がある値よりも少なくなると油中水分量に関係なく油の粘度が 100～200 センチポアズになる温度付近で最小値を持つことを示した。さらに、絶縁破壊電圧が温度の上昇と共に上昇している領域における絶縁破壊電圧と水分ならびに温度の関係は、水分飽和度を用いれば簡単に表すことが可能であること等を明らかにしている⁽¹⁹⁾。絶縁体中の水分量の測定にはカールフィッシャー法、水分の構造測定には赤外吸収スペクトルが用いられている。

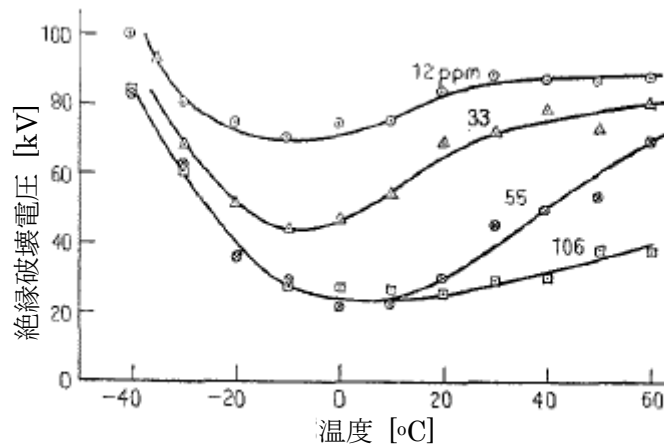


図 2.13 2 号油の温度-交流破壊電圧特性に及ぼす油中水分の影響⁽¹⁹⁾

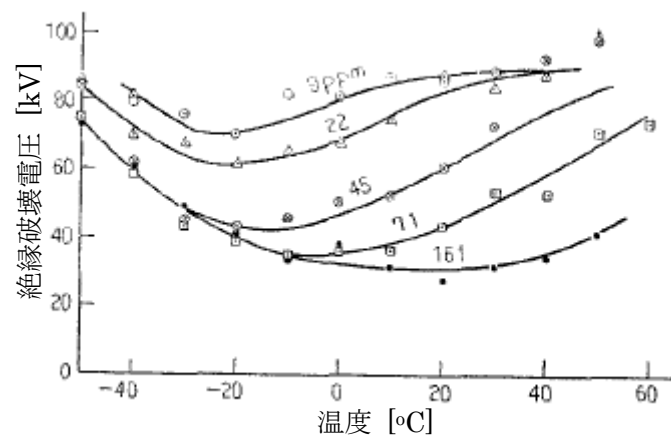


図 2.14 アルキルベンゼンの温度-交流破壊電圧特性に及ぼす油中水分の影響⁽¹⁹⁾

② 溶存ガスの影響

溶存ガスは、部分放電による絶縁油の熱分解ガスと複合絶縁系で広く用いられる絶縁紙(クラフト紙やプレスボード)の熱劣化および部分放電劣化による分解ガスがある。桑原氏等は、シリコーン油および鉱油中の部分放電による平均電荷量とガス発生量を調査した結果、

シリコーン油はガス発生量が直線的に増加するが、鉱油は平均電荷量がある値以上になると急増することを示している。さらに、発生ガスの成分が異なることも示しており、この傾向が油中アークにおいても変化しないことも報告している⁽²⁰⁾。

溶存ガスは絶縁紙等からも発生することから絶縁油中の溶存ガスの成分を分析することによって絶縁紙の劣化診断も行われている。絶縁紙が劣化するとアルコール、アルデヒド、カルボン酸等の成分が生成する。これらの内、フルフラールと絶縁紙の劣化特性の関係が検討されている⁽²¹⁾⁽²²⁾。難波氏等は、油中フルフラール量を用いた変圧器絶縁寿命診断への適用を検討しており、①油中フルフラール量、②フルフラール発生速度の温度依存性、③変圧器の最高温度部の絶縁紙量、最高温度と油温の温度差および油量と全絶縁紙量、④フルフラール発生量と絶縁紙重合度の関係、⑤重合度の限界値またはその重合度で発生する絶縁紙 1 g あたりのフルフラール量の 5 つのデータの取得によってフルフラール量と重合度の関係(図 2.15)から求めた重合度、運転年数、それらと重合度の限界値から寿命を推定することを提案している⁽²²⁾。

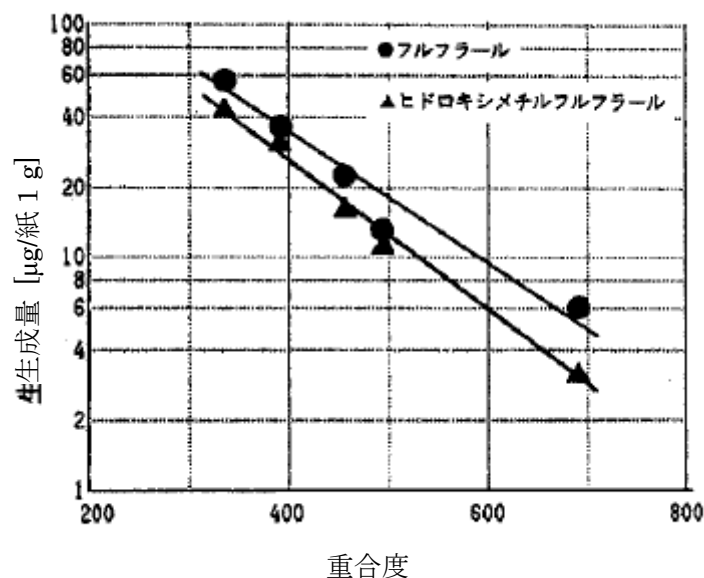


図 2.15 フルフラール量と重合度との関係⁽²²⁾

③ 浮遊粒子の影響

絶縁油は、工業的に可能な限り精製処理される。電力機器の組み立ての段階においても、粉塵・異物管理はなされるが、それでも固形粒子の混入が避けられない。例えば、25～50 µm の粒子が 100 ml 中に数 10～数 1000 個浮遊していることが知られている⁽²³⁾。絶縁油中の絶縁破壊特性の体積効果、V-t 特性あるいはばらつきを伴う確率的絶縁破壊はこれらの絶縁油中の浮遊粒子の挙動が関係していると考えられている⁽²⁴⁾。池田氏等は、浮遊粒子の除去効果の検討においてろ過循環が交流絶縁破壊電圧に与える影響を検討しており、ろ過循環が 3 回までは絶縁破壊電圧が上昇するが、5 回で飽和すること(図 2.16)を報告している。さらに、絶縁破壊電圧に及ぼす油中粒子数の影響について考察し、通常の絶縁設計で期待されてい

る油中粒子数の範囲を示した⁽²⁵⁾。

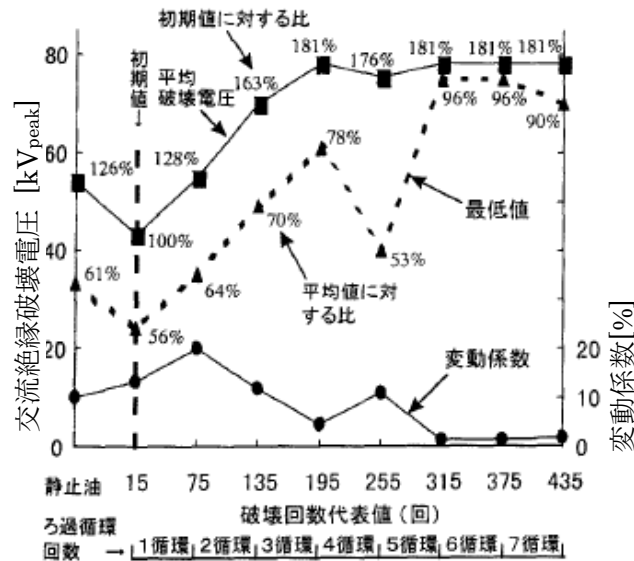


図 2.16 絶縁油の絶縁破壊のろ過循環回数依存性⁽²⁵⁾

2.4.3 複合絶縁系における絶縁性能

絶縁油は、単体でも優れた絶縁性を示すが、電力機器・電力ケーブルの絶縁構成においては高分子フィルムもしくは絶縁紙との複合絶縁系である。したがって、複合絶縁系における絶縁性能の把握が重要である。

月岡氏等の検討により、油浸プラスチックのインパルス絶縁破壊は絶縁油の絶縁破壊が直ちにフィルムの絶縁破壊を引き起こさないことが示されている。また、絶縁油の絶縁破壊がストリーマ状となって進展することが報告されていることから、ストリーマの阻止効果について検討し、フィルムによって耐ストリーマ性が異なること(図 2.17)を明らかにしている⁽²⁶⁾。村田氏等も、油浸クラフト紙内部をストリーマが分散し、その先端電界が緩和されるため、クラフト紙が高い耐ストリーマ性を有することを報告している。絶縁油中の複合絶縁紙(PPLP：3章にて詳細を示す)のストリーマの特性と空間電荷層の形成モデル(図 2.18)を考慮して絶縁破壊特性を議論している⁽²⁷⁾。

交直変換用変圧器や直流送電用の直流フィルターとしての用途もあるため、交流・インパルス等の検討以外に直流・直流重畳インパルスに対しての検討もなされている。高橋氏等は、絶縁油中のプレスボードは直流電圧の極性反転によって反転前の電圧が高いほど反転後の電圧が低くても界面電荷の空間電荷効果によって沿面フラッシュオーバーが起こること(図 2.19)を報告している⁽²⁸⁾。西松氏等は直流重畳インパルス試験によって油浸紙、紙・フィルムコンデンサ等は、直流に対するインパルスの極性(順極性、逆極性)、比率に関わらず、直流電界とインパルス電界の代数和が一定の値に達する条件において絶縁破壊が生じること(図 2.20)を示している。これは、コンデンサに使用される誘電体の厚さが極端に薄く内部の空間

電荷分布が比較的均一であるため、電界の歪が生じ難いためと考えている⁽²⁹⁾。

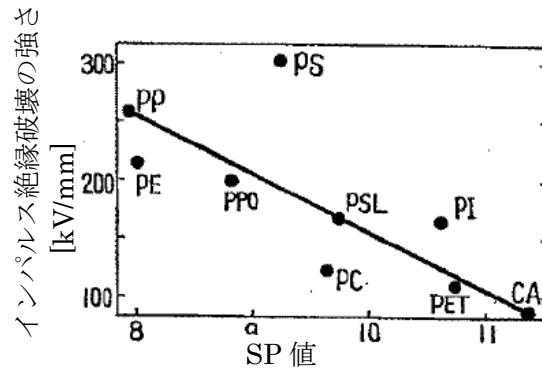


図 2.17 各種プラスチックフィルムの SP 値と油中インパルス破壊の強さ⁽²⁶⁾

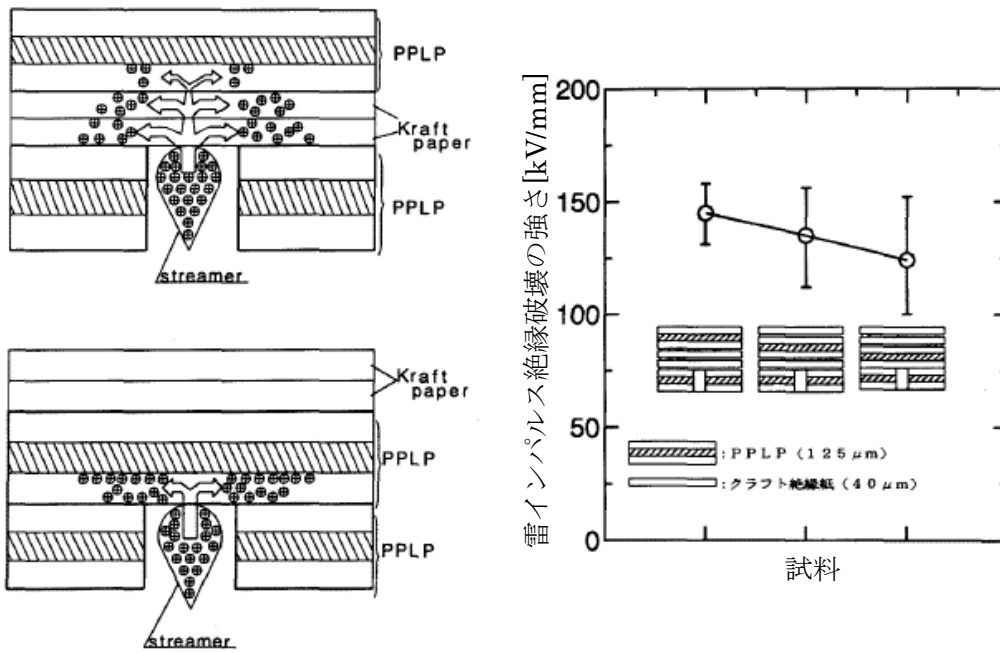
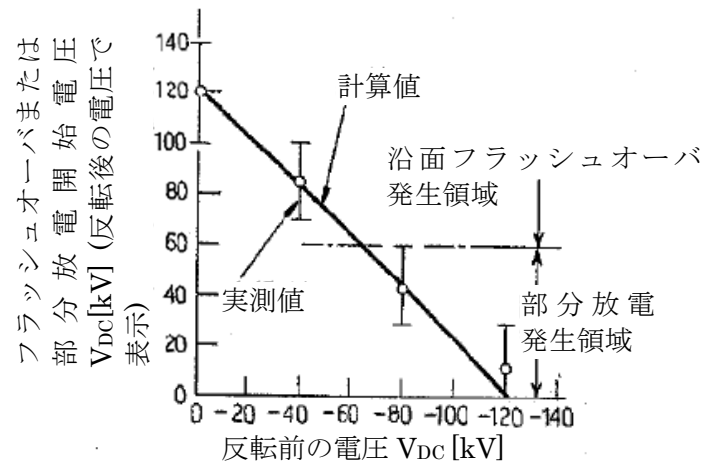
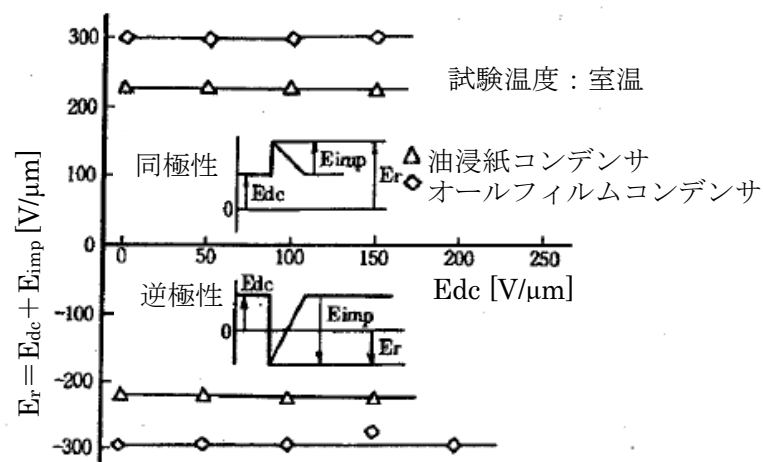


図 2.18 PPLP の空間電荷層の形成モデルとインパルス絶縁破壊特性⁽²⁷⁾

図 2.19 極性反転による沿面フラッシュオーバー特性⁽²⁸⁾図 2.20 極性反転による沿面フラッシュオーバー特性⁽²⁹⁾

2.4.4 流動帯電

1972年に運転を開始した500kV変圧器で冷却のために循環する絶縁油と絶縁物の流動帯電を発端とする絶縁破壊事故の教訓が現在の変圧器・OFケーブルの開発に大きく貢献している⁽³⁰⁾。

気体や液体が流動するときに、固体絶縁体との流動摩擦により帯電する現象が流動帯電現象である。帯電が発生し速やかに緩和もしくは漏えいが生じる場合においては顕在化しない。流動帯電現象は、帯電に関わる電荷の量が少ないにも関わらず、静電容量が小さいために非常に高い電位となって表れることが多い。液体の流動帯電量と導電率の関係はKlinkenberg⁽³¹⁾, Leonard⁽³²⁾および Hampel⁽³³⁾氏等によるものがよく知られており、流動液体中に生じる電荷量が液体の導電率でピークを示すことを明らかにしている。

流動帯電特性の決定因子の一つとして、渡辺氏等は流動帯電における帯電量と水分の関係を調査し、帯電電荷量および導電率は蒸留水の濃度の増加に従って増加することを明らかにしている。さらに、試料中に界面活性剤を混入した場合、試料中の水分によってパイプ壁面に吸着される界面活性剤の極性が変化し、帯電極性が決定されることを報告している⁽³⁴⁾。伊藤氏等は、油タンクへの送油パイプの長さ、パイプ中の液体流速および液温の変化によって顕著に流動帯電特性が変化することを示しており、具体的には①液体流速および液温を一定に保った場合、タンクへの送油パイプの長さを増すと流動電流は減少する、②パイプの長さおよび液温を一定に保った場合、パイプ中の液体流速の増加が流動電流の増加を招く、③液体流速およびパイプの長さを一定に保った場合、液温を上昇させると流動電流が減少することを報告している⁽³⁵⁾。

2.5 絶縁紙-液体窒素複合系における部分放電現象と帯電現象

2.5.1 極低温絶縁の概説

電力技術の新しい方向として、超電導を中心にした極低温の応用が幅広く開発されつつあり、21世紀の重要な新技術の1つと考えられている。その応用範囲は、核融合・MHD発電への応用をはじめとする超電導マグネット、エネルギー貯蔵、回転機・変圧器等の電気機器、極低温ケーブル、磁気浮上鉄道等多岐にわたっている。

これらの新技術を支える共通の基盤として極低温電気絶縁技術がある。極低温電気絶縁技術は、極低温における誘電・放電現象、絶縁材料の電氣的ならびに機械的特性を基盤として共通点が多く、本来同じ基盤の上に立って研究開発が行われることが望ましい。本説では、極低温電気絶縁に関連する先行研究の例を述べる。

2.5.2 極低温絶縁材料の電氣的特性

2.5.2.1 導電・誘電特性

極低温機器で用いられる絶縁材料は、通常の実温で動作する機器と同様、固体、液体、気体、さらには真空があるが、極低温という特殊条件のため様々な問題が生じる。一般に、気体、液体等の液体絶縁体、固体絶縁体は共に極低温においてキャリアの励起、注入が減少し、キャリア密度が極端に小さくなるため抵抗が大きくなる。また双極子等の運動も凍結されるため、導電特性、誘電特性の面では絶縁材料として好ましいことになる。しかしながら、極低温下においてはジュール損が減少するため、比較的低い導電率、誘電損でもその影響が大きくなり、絶縁破壊の決定的な要因にもなり得る。そのため、極低温絶縁材料の導電特性、誘電特性は重要な課題である。

固体絶縁材料は低温脆性と冷却による熱膨張、収縮率の差、電磁力等による大きな機械的応力がかかる場合も多いため、機械的ストレス下での特性も考慮する必要がある。この機械特性の改善のためには単一材料ではなく複合材料として用いることによって改善する場

合が多いため、それらの特性も把握する必要がある。

2.5.2.2 流体絶縁材料

① 誘電特性

極低温で利用される液体は、主として He、N₂、H₂ である。また液化天然ガス(LNG:Liquefied Natural Gas)では、主として液化炭化水素が対象となる。

He、N₂、H₂ の誘電率は小さく、その純度が高く、電界が高くない場合は、誘電損も非常に小さい($\leq 10^{-6}$)。したがって、実際には He の比誘電率が 1 に極めて近く小さいことから、複合誘電体の構成要素の 1 つとして He を用いる場合、パルス電圧、交流電圧を印加した場合、絶縁破壊電圧の低い He に多くの電圧が分担されるため注意が必要である。表 2.2 に液化気体の物理定数を常温における水、変圧器油、気体の空気と比較して示す⁽³⁶⁾。

物質の誘電率、誘電体損等は電子分極、原子分極、双極子分極(配向分極)、空間電荷分極等で決まるが、純度の高い He、N₂、H₂ 等は電子分極、原子分極のみの寄与であり、極低温ではキャリア密度が低く、導電率も極めて小さいため、誘電率、誘電損が小さくなる。その分散周波数は極めて高いが、不純物が存在する場合には事情が異なる。

図 2.21 に LN₂ の $\tan\delta$ の電界強度依存性を示す。電界と共に急激に増大することが分かる⁽³⁷⁾。図 2.22 に液体 N₂、H₂、He の $\tan\delta$ の周波数依存性を示す⁽³⁸⁾。

表 2.2 液化気体の物理定数⁽³⁶⁾

液化気体	温度 [K] [°C]	誘電率 ϵ	密度 [g/cm ³]	粘度 [cP]	熱伝導率 $\times 10^4$ [cal/cm ² deg ⁻¹ s]	比熱 [cal/g]	蒸発潜熱 [cal/g]
ヘリウム	4.21 -269	1.0469	0.1251	31	0.64(3.6K)	1.08	6
	2.24	1.0563	0.1471	18		0.715	
	2.19	"	0.1472	17.5		4.6 以上†	
	2.15	1.0565	0.1471	*		2.26	
	1.83	1.0562	0.1465	*		0.64	
水素	20.4 -253	1.231	0.0712	142	2.83	2.34	1.08
	14.0	1.259	0.0772	234(15K)	2.6(16K)	1.75	
窒素	77.3 -196	1.431	0.881	1,600	3.35	0.48	47.6
	63.1	1.467	0.870	2,900	3.85(est)	"	
水	273 0	88	0.9998	17,980	13.5	0.9985	596
	293 20	80	0.998	1,020	14.3	1.0074	585
変圧器油	273 0	2.22	0.900	450,000	3.24	0.425	—
	370 100	2.12	0.835	110,000	3.04	(30°C)	
空気 760 mmHg	273 0		0.001293	171	0.563	0.24	—
	293 20	1.00059	0.001025	184			

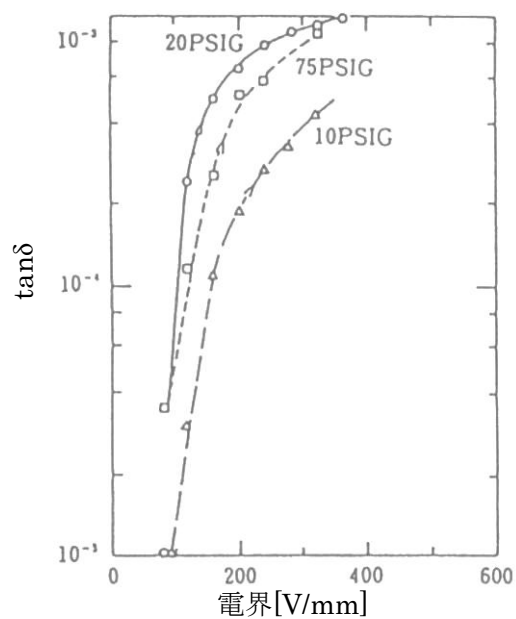


図 2.21 液体 $N_2(77K)$ の $\tan\delta$ の電界依存性⁽³⁷⁾

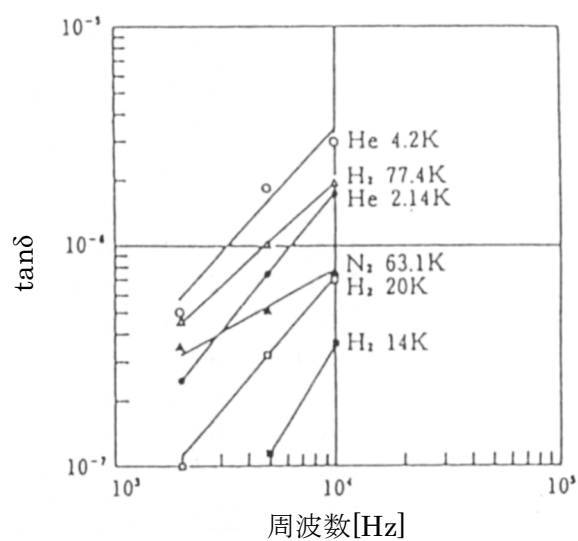


図2.22 液体He, H_2 , N_2 の $\tan\delta$ の周波数依存性 (測定値は絶対値でない)⁽³⁸⁾

② 導電特性

極低温においては、バルク内の熱的なキャリア生成が極めて少ないため、導電率そのものは非常に低い。しかしながら、電極からの注入、放射線照射等の下では、その効果が大きく現れる場合がある。特に、絶縁破壊前駆現象は、それらが支配的因子になることがあり、液体の気化を伴う等、複雑な過程を経る場合がある。また、電荷の移動、電極面での電荷の交換は空間電荷の問題に関連している。

電極からの極低温液体への電子の注入は古くから研究が行われており⁽³⁹⁾、電子状態、電子移動度等の電荷輸送過程についての知見は多い。特に液体 He、N₂、H₂ 中での電子過程は、同じ液体ガスである液体 Ar、Kr、Xe 等と比較して多く検討されている。

表 2.3 に示すように、液体 Ar、Xe、Kr、等に比べて液体 He、N₂、H₂ 等の電子移動度は極めて小さいことが分かる⁽⁴⁰⁾。

表 2.3 各極低温液体の移動度と V_0 値⁽⁴⁰⁾

液体	温度 (K)	移動度 ($\text{cm}^2/\text{V}^{-1}\text{s}$)		V_0 (eV)
		μ_e	μ	
LHe	3.9	3×10^{-2}	5.5×10^{-2}	1.05
LH ₂	20.4	1.46×10^{-2}	7×10^{-3}	2.0
LD ₂	23	6.7×10^{-3}		
LNe	27.1	1.5×10^{-3}	1.95×10^{-3}	0.67
LN ₂	77.3	1.5×10^{-3}	1.2×10^{-3}	0.05
LCO	81.7	1.5×10^{-3}	1.2×10^{-3}	
LO ₂	90.2	1.5×10^{-3}	1.45×10^{-3}	
LAr	84	475	6×10^{-4}	-0.20
LKr	116	1,800		-0.40
LXe	161	2,200		-0.67

液体 He、H₂、N₂ 中において電子がどのような状態に局在しているかについても詳しく検討されており、特に He、H₂ は、電子が電子バルブを形成し、その中に局在しながらバブルと共に移動すると考えられている。これは理論的にも支持され、パウリの反発力、液体分子の分極率、表面張力等のバランスでバブルを形成するかが決定される⁽⁴¹⁾。He や H₂ のように核外電子の数が少ない場合は、バブルが形成され易い。実験的には液体の伝導帯の底のエネルギー V_0 が真空準位とどのような関係にあるかで決定されるが、実際には電極から真空中もしくは液体中への光電子放出電流のスペクトル差から V_0 値が評価される。 V_0 値が正で大きい場合は、真空中において電子が安定であることを意味し、まわりの液体を押しわけバブルを形成する。

2.5.2.3 固体絶縁材料

① 誘電特性

高分子はその分子構造が多様であり、どのような原子からできているか、その結合様式はどうか等が最も重要な因子である。その複雑な構造を反映して、分子運動としてさまざまな自由度や形式があり、その緩和特性が誘電特性に大きな影響を与える。

一般的に、ポリエチレン(PE)、ポリプロピレン(PP)、ポリテトラフルオトエチレン(PTFE)等の無極性高分子と、ポリエチレンテレフタレート(PET)、ポリアミド(Kapton®)等をはじめとする有極性高分子の特性は異なる。前者は永久双極子を持たないため、誘電率、 $\tan\delta$ 共に比較的小さい。図 2.23 に各種高分子フィルムの比誘電率の温度依存性を示す。無極性高分子は誘電率が小さく、かつ、僅かに負の温度依存性を示す⁽⁴²⁾。無極性高分子は電子分極、原子分極の寄与が主体であるため、このような温度範囲に分散が現れない。また高温領域における誘電率の低下は密度の変化を考えれば、クラジウス-モソッティの関係式から説明できる。これに対して、有極性高分子の誘電率は少し大きく、また、温度依存性も著しいことが分かる。

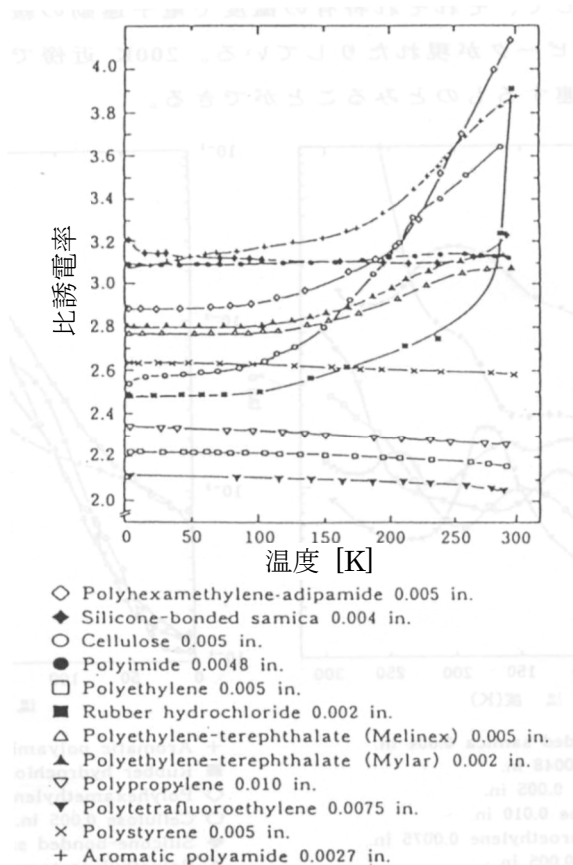


図 2.23 各種高分子の比誘電率の温度依存性(75Hz)⁽⁴²⁾

図 2.24 に $\tan\delta$ の温度依存性を示す⁽⁴²⁾。無極性高分子である PE の $\tan\delta$ が小さいことが分かる。超電導ケーブルのように誘電損を問題とする場合は、無極性高分子を使う必要があることは明らかである。無極性高分子、有極性高分子とも極低温で $\tan\delta$ が減少するのは、 $\tan\delta$ の原因となる電荷の移動、分子運動が凍結されるためである。

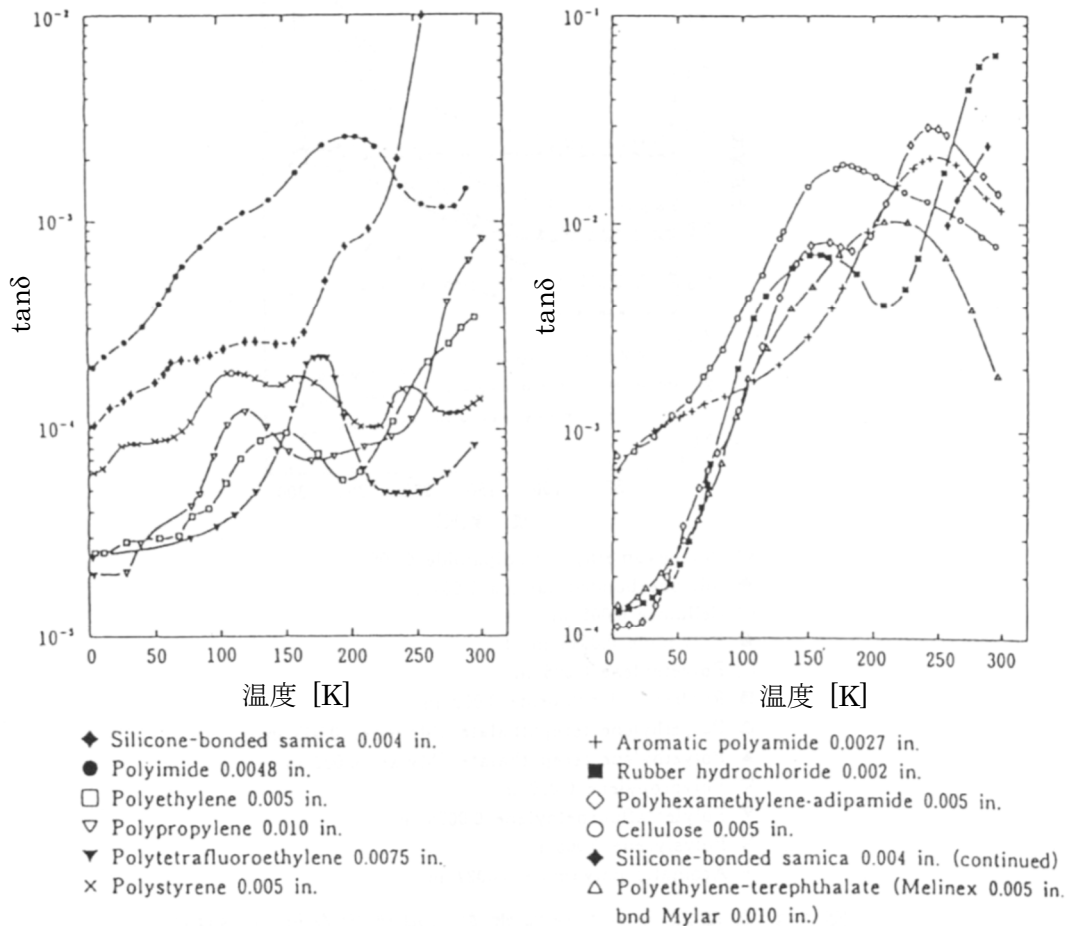
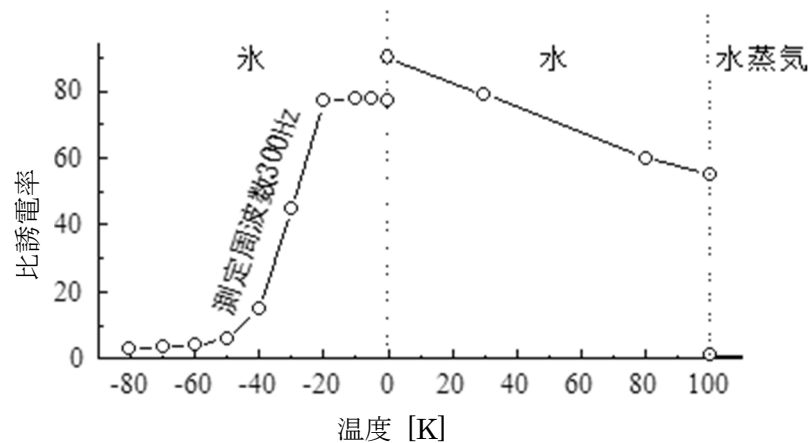


図 2.24 各種高分子の $\tan\delta$ 温度依存性(75 Hz)⁽⁴²⁾

図 2.25 に水と氷の比誘電率を示す。氷の誘電率⁽⁴³⁾はボイドやわずかな不純物の存在で大きく異なるため絶対値は測定者によって差はあるが、測定周波数が小さいときは-20～-30℃までは水と大きく変わらない。温度の低下に伴って徐々に比誘電率は低下し、やがて周波数に依存せず一定値に落ち着く。誘電損は誘電率が低下する温度領域でピークを持ち、やはり周波数によらない小さな値に落ち着く。液体窒素温度における商用周波数での $\tan\delta$ は 10^{-5} オーダである。水分は通常の電気絶縁において有害であるが、極低温絶縁ではほとんど害が無いとされているのもこのような理由によるものである。

図 2.25 水と氷の比誘電率⁽⁴³⁾

② 導電特性

多くの絶縁性高分子は室温以下、特にガラス転移点以下で電子性伝導が主体となるが、電子、正孔等の移動度は温度低下と共に小さくなる。しかしながら、極低温においては特有の問題が生じる。例えば、高電界になれば当然電極からの注入が増加するが、この注入された電荷がトラップで捕獲された場合、再びこのトラップから放出される確率は、熱エネルギーが小さいため非常に小さい。したがって、空間電荷の蓄積が室温領域に比べてはるかに著しいことになる。特に、極性反転のある場合は局所的な高電界の発生から絶縁破壊に至ることもある。

参考として、図 2.26 に氷の直流電気伝導と温度との関係を示す⁽⁴⁴⁾。図から氷の電気伝導度は、温度の低下と共に指数関数的に減少していることが分かる。

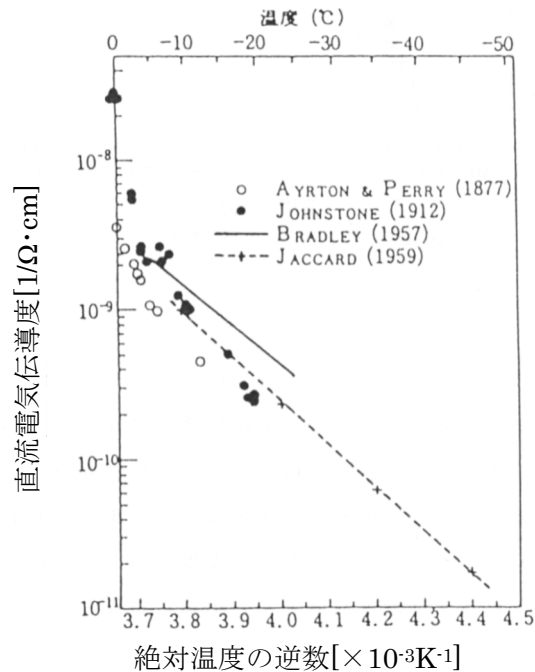


図 2.26 氷の直流電気伝導と温度の関係⁽⁴⁴⁾

2.5.3 絶縁破壊特性

2.5.3.1 気体

一般に平等電界における気体の絶縁破壊電圧は密度と電極間の距離によって決まる。図 2.27 は代表的な冷媒である窒素(N_2)とヘリウム(He)のパッシェン曲線である⁽⁴⁵⁾。直流及び交流(ピーク値)絶縁破壊電圧は、 N_2 においては 78 K 程度まで、 He においては 4.4 K 程度までパッシェンの法則に従う。これに対してインパルス電圧では、(密度×ギャップ長)が同じであっても、極低温の場合は初期電子の不足のために、室温の場合よりも絶縁破壊電圧が高くなる⁽⁴⁶⁾。

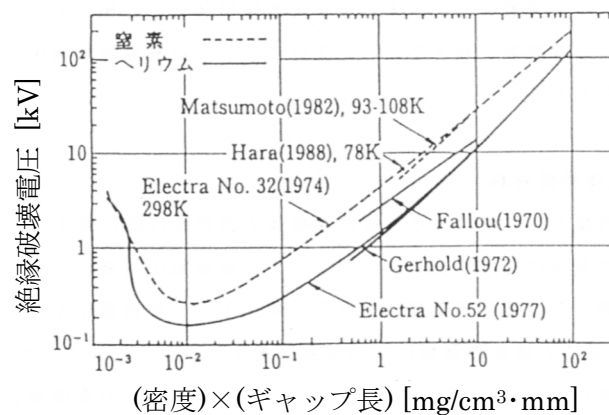


図 2.27 パッシェン曲線(気体ヘリウムと気体窒素)⁽⁴⁵⁾

2.5.3.2 液体絶縁体

液体の密度は気体に比べて高いため、一般的に絶縁破壊電圧も高くなる。種々の極低温液体の平等または準平等電界における大気圧下での破壊電圧を図 2.28 に示す。図 2.28 より、液体の種類による差異はあまり大きくないことが分かる。

多数の研究者による大気圧沸騰温度における LHe と LN₂ の直流及び交流の絶縁破壊電圧－ギャップ長依存性がまとめられている。図 2.29、図 2.30 にそれを示す⁽⁴⁷⁾。LHe と LN₂ は超電導機器の冷媒として重要であるが、その直流あるいは交流(ピーク値)絶縁破壊電圧 V_B の最低値は、ギャップ長を d [mm]として、

$$\text{LHe に対して } V_B = 21.5d^{0.8} \quad [\text{kV}]$$

$$\text{LN}_2 \text{ に対して } V_B = 29.0d^{0.8} \quad [\text{kV}]$$

で与えられる⁽⁴⁷⁾。ここで絶縁破壊電圧のギャップ長依存性が非線形になるのは、高電界を受ける体積が増えるほど絶縁破壊するための条件が整い易いことや、絶縁破壊のきっかけとなる弱点が存在する確率が増えること等が考えられている。

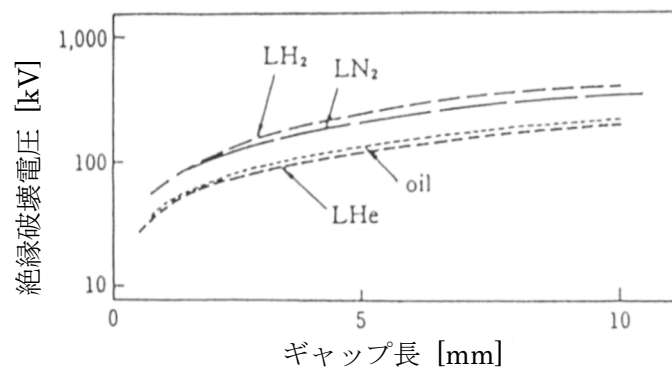
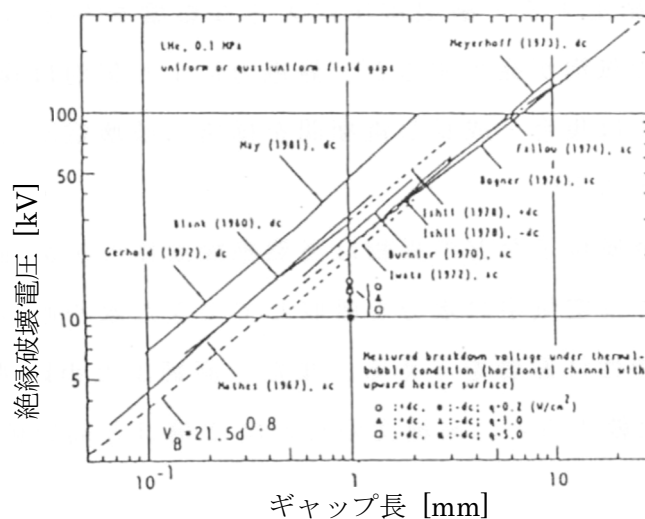
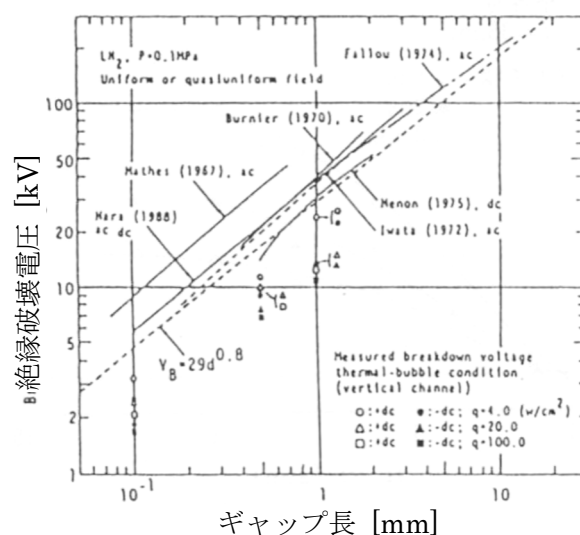


図 2.29 液体の絶縁破壊電圧とギャップ長の関係(大気圧下)⁽⁴⁷⁾



(a) LHe



(b) LN_2

図 2.30 大気圧飽和状態における LHe および LN₂ の V_B-d 特性(平等電界)⁽⁴⁷⁾

沸騰点近くの液体では微小な熱入力で気泡が発生し易い。気泡を満たす蒸気(気体)の絶縁破壊の強さは液体よりも低い。したがって、気泡内部の絶縁破壊は、液体の絶縁破壊の強さよりも低い電界で起きることになる。これを切っ掛けに液体全体の絶縁破壊が生じることもある。図 2.31 は LN_2 の絶縁破壊電圧の圧力依存性である⁽⁴⁸⁾。圧力が上昇すると、気泡の発生が抑制されるため絶縁破壊電圧は上昇する。電極面積効果は、電極面積を 10 倍にすると絶縁破壊電圧が 30 % も低下した例がある⁽⁴⁹⁾。

原氏等は、電極の発熱等により電界中で気泡が発生すると、静電力により気泡は複雑な

挙動を示すが、条件によっては集合・成長し電極間を橋絡し絶縁破壊電圧を著しく低下させることを報告している⁽⁴⁹⁾。また早川氏等は、超電導がクエンチした場合の気化に伴う絶縁破壊の強さの低下を、熱気泡を用いた動的絶縁破壊として検討している⁽⁵⁰⁾。

細かい繊維片や金属粒子等の異物も液体絶縁体の絶縁破壊の強さを低下させるが、極低温液体では空気中の水分の混入による氷や他の気体の固化物も絶縁破壊特性に影響を与える。また、高純度と市販純度の LHe や LN₂ の破壊強度を比較すると、高純度のものは2倍ほど高い値を示す⁽⁵¹⁾。

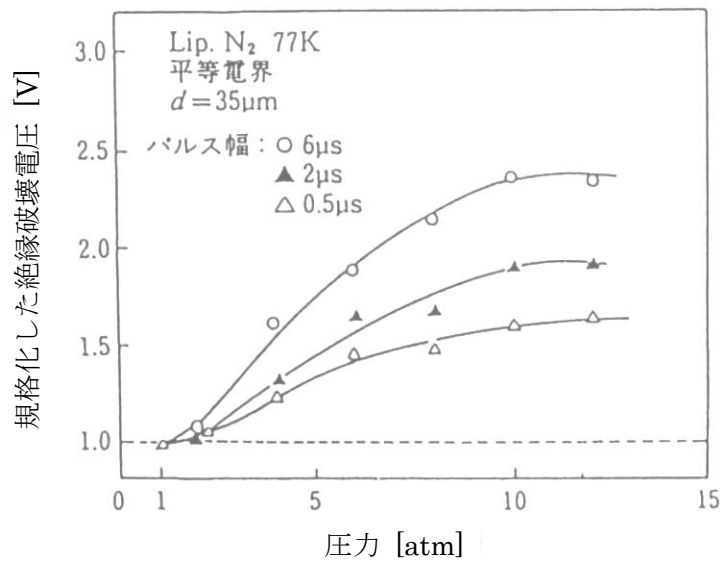


図 2.31 液体窒素の絶縁破壊電圧の圧力依存性(1 atm の値で規格化)⁽⁴⁸⁾

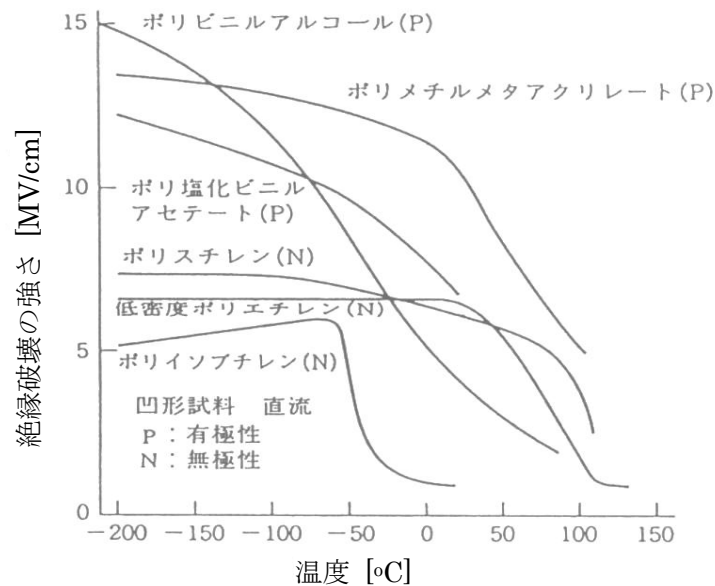
2.5.3.3 固体絶縁材料

① 高分子材料の絶縁破壊特性

液体以上に密度が高く、また液体のように気泡が発生することもない固体絶縁体は液体に比べて高い絶縁破壊の強さを持つが、熱応力によるクラック発生に注意が必要である。

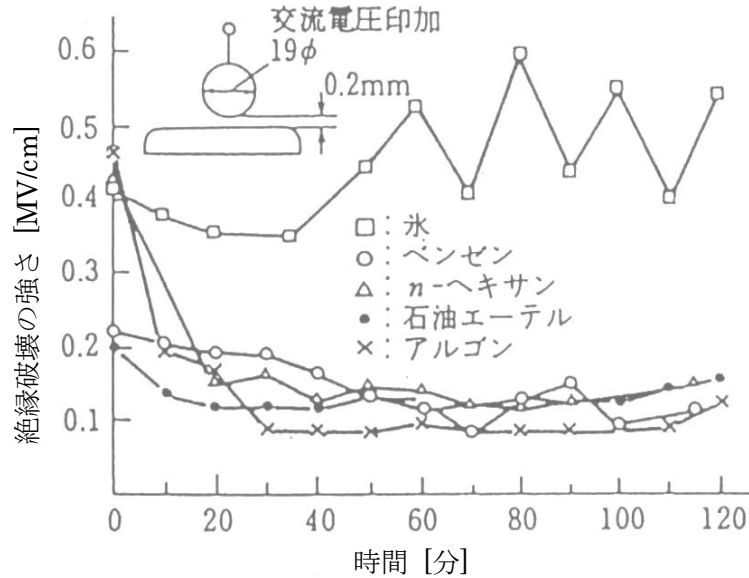
図 2.32 に各種高分子材料の絶縁破壊の強さの温度依存性を示す⁽⁵²⁾。低密度ポリエチレン(LDPE)等の無極性高分子の絶縁破壊は、室温から温度の低下に伴い若干絶縁破壊の強さは上昇するが、極低温領域ではほぼ一定の値を示す。厚さ依存性も負であることから⁽⁵³⁾、電子性の破壊が提唱されている。一方、有極性高分子では極低温領域においても上昇傾向を示すものが多い。ただし、有極性高分子でもインパルス電圧による絶縁破壊の強さには極低温で温度依存性が無い。この結果は、空間電荷効果によると説明されている。

誘電損失についても、極低温の方が良好である。これは極低温においては分子運動が凍結され、誘電損失の原因となる双極子の運動も凍結されるためと考えられている。

図 2.32 各種高分子材料の絶縁破壊の強さの温度依存性⁽⁵²⁾

② 固化流体の絶縁破壊

水やアルコール類、各種液体炭化水素あるいはアルゴン、炭酸ガス、 SF_6 、窒素等は常温において、液体や気体である材料を極低温まで冷却して固化させることにより、ブッシング等の基材(マトリックス材)としての適用も考えられている。この場合、冷却過程の気泡残留とクラックの発生を極力避けなければならないが、各種材料についてクラックの生じる程度を調べた結果によれば、4 塩化炭素を除いては多少のクラックは生じるようである⁽⁵⁴⁾。十分に除冷して作成した氷はクラックフリーとすることができる⁽⁵⁵⁾。図 2.33 示したように氷の絶縁破壊の強さ(Fb)は必ずしも高い値ではない。しかし、特徴的なのは絶縁破壊後の絶縁回復性であり、液化あるいは気化した絶縁破壊路が再固化することである。氷にシリカを充填して固化させたものは、機械的にコンクリートに匹敵する強さがあり、Fb も氷自身の 3 倍程度になる⁽⁵⁶⁾。

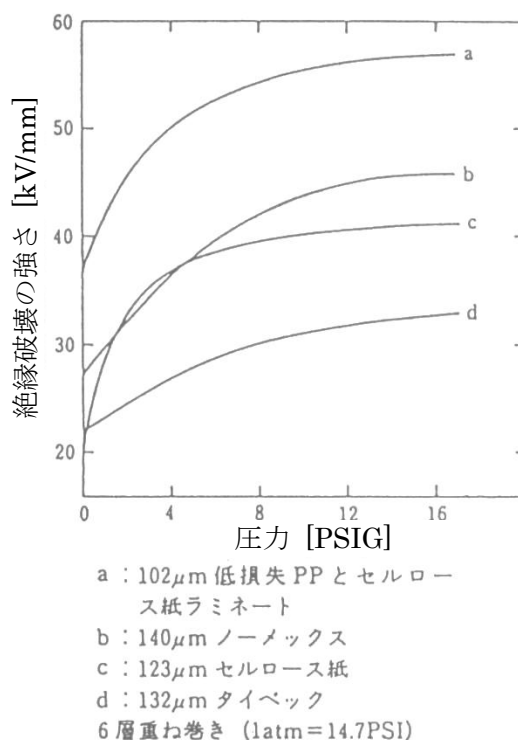
図 2.33 各種高分子材料の絶縁破壊の強さの時間依存性⁽⁵⁶⁾

2.5.3.4 複合絶縁材料

極低温領域においても電気絶縁構成が複合系になることが多い。ケーブル絶縁においては、高分子テープ材の重ね巻き構造に LHe や超臨界ヘリウム(SHe)、LN₂ を含浸させる構造が開発されている。一方で室温における OF ケーブル絶縁を低温、あるいは極低温領域で使用する試みもみられる。また、機械的特性改善のために、ガラス繊維にエポキシを含浸させた FRP や低温収縮を金属と整合させるために充填材を入れたエポキシ樹脂も広く用いられている。さらに、ブッシングやスペーサにおいては冷媒や真空層を介した沿面放電が生ずることになる。ここでは、高分子テープ等と冷媒の複合系を主体に述べる。

高分子テープあるいは合成紙等の積層構造に LHe や超臨界ヘリウム(SHe)、LN₂ を含浸させた複合系においては、絶縁破壊がモデルケーブルのバットギャップや人工ボイドに発生する部分放電を起点にして進展することが考えられる。したがって、インパルス電圧による Fb も固体の基本的な Fb に比べて低くなる。

LN₂ 含浸モデルケーブルの交流 Fb は図 2.34 のように圧力依存性が顕著に現れる場合と表れない場合がみられる⁽⁵⁷⁾。モデルケーブル中に占める LN₂ の体積が影響しており、繊維構造で浸透性のある材料では LN₂ の占積率が大きいいため圧力効果が顕著になると説明されている。タイベック等に代表される合成紙は LN₂ や LHe の放電ストリーマに対して耐部分放電性が劣ることが判明している。その点で非浸透性のフィルム材料の方が優れた結果を与えている。

図 2.34 液体窒素含浸モデルケーブルの交流絶縁破壊の強さ⁽⁵⁷⁾

冷媒含浸テープ複合系では通常テープを積層させて絶縁体力の向上を図る。積層効果は印加電圧の種類や大きさにより逆転することがある。図 2.35 は、 LN_2 中の LDPE フィルム試料の積層効果を調査した結果である⁽⁵⁸⁾。インパルス破壊電圧と長時間交流破壊電圧に対しては積層数が多いほど絶縁破壊電圧が上昇するが、交流上昇試験においては積層間の LN_2 内で部分放電が発生するため、積層数が少ない方が有利である。

OF ケーブル絶縁は、より高い電圧階級の絶縁方式として高い信頼性を確立しているが、これらクラフト紙や合成紙にドデシルベンゼン(DDB)等のケーブル油を含浸させた系を液体窒素温度や⁽⁵⁹⁾、あるいは DDB の固化しない低温(約 -60°C)⁽⁶⁰⁾で用いる試みが提案されている。前者は単純であるが、DDB が固化するときにクラック等が入る恐れがある。後者においては、導体内部に液体窒素を流す直接冷却方式があるため低温における優れた絶縁特性を十分に活用できる。

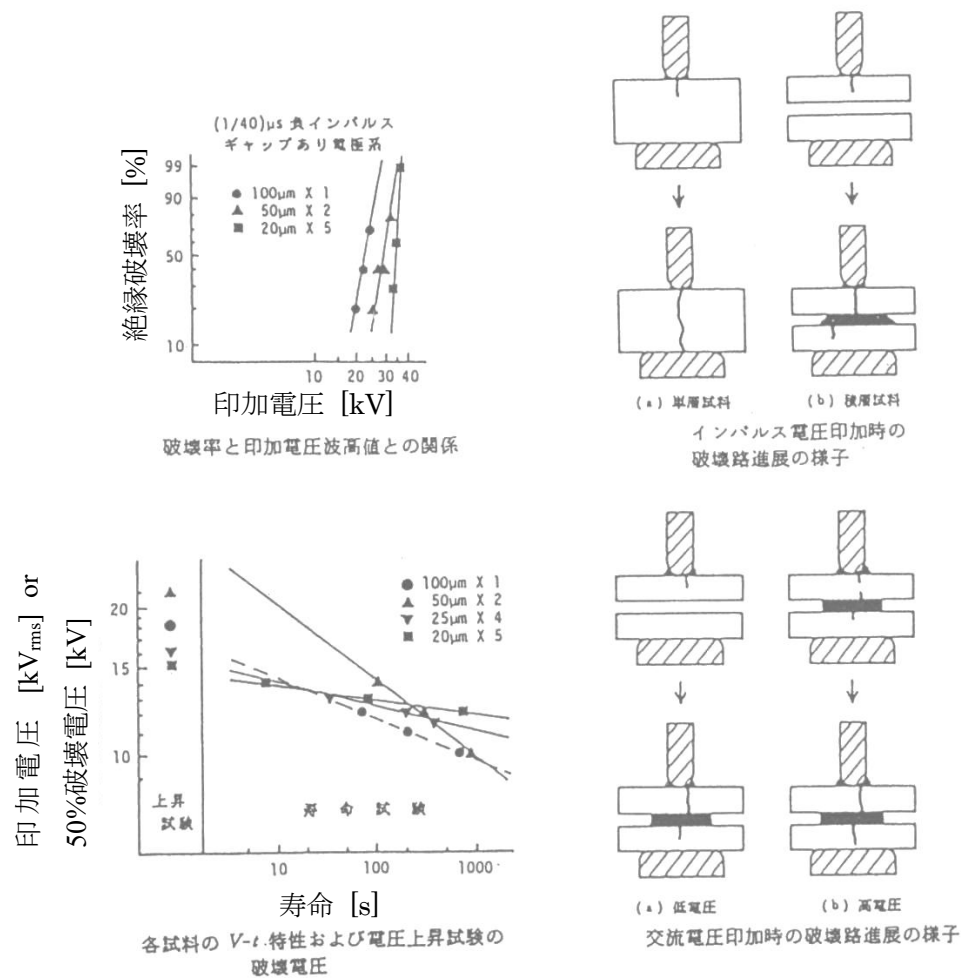


図 2.35 LN₂ 中のポリエチレンフィルムの絶縁破壊における積層効果⁽⁵⁸⁾

2.6 絶縁劣化診断手法

電力機器・ケーブルは電力の安定・安全供給に絶縁材料の長期信頼性の保証は必要不可欠である。機器の寿命が約 30 年と言われており、絶縁材料の診断技術が重要とされている。本節では、直流漏れ電流測定、 $\tan\delta$ 測定、損失電流法、部分放電測定について述べる。

① 直流漏れ電流測定⁽⁶¹⁾

絶縁材料に直流電圧を印加し、流れる電流から絶縁抵抗の低下度合を確認する試験であり、漏れ電流を担う電荷は、イオンが主体であることが多い。経年による絶縁材料の劣化や表面の汚損等に起因することから劣化指標として利用される。直流電圧を漏れ電流で除した値を絶縁抵抗と定義する。絶縁抵抗の測定は簡便であるが、絶縁抵抗計を用いて絶縁抵抗の低下が確認された段階で既に絶縁材料は不良となっている場合が多いため、異常の有無

の確認として位置付けられている。

② $\tan\delta$ 測定⁽⁶¹⁾

$\tan\delta$ は誘電正接と呼び、絶縁材料固有の値である。絶縁材料は経年に伴い、表面汚損、水トリー劣化、熱劣化、材料表面・内部での部分放電が発生すると $\tan\delta$ の急増が確認できるため、劣化指標の1つとされている。

③ 損失電流法⁽⁶¹⁾

損失電流法は電力ケーブルを流れる電流の損失電流成分に含まれる高周波成分を用いてトリー劣化診断を行う、オンライン診断法の1つである。水トリー劣化に伴って第3次高調波成分が増加するため、第3次高調波を指標として用いられている。

④ 部分放電測定⁽⁶¹⁾

部分放電は絶縁劣化を考える上で最も広く用いられている。部分放電の継続的な発生によって劣化が生じ、最終的には絶縁破壊に至るため、多数の測定方法が提案されている。以下に、具体的な方法を示す。

(a) 検出インピーダンス法

検出インピーダンス法は、試料と並列に結合コンデンサを接続し、試料の接地側もしくは結合コンデンサの接地側に検出インピーダンスを接続する。部分放電発生時には、部分放電によって試料が失った電荷量が結合コンデンサから供給され、検出インピーダンスの電圧を測定することによって部分放電を検出する。検出された電圧を抵抗値で除すことによって電流を算出し、電流を積分することで電荷量が分かる。注意すべき点は、供給された電荷量は見かけの放電電荷量であり、真の放電電荷量ではないことである。

(b) 高周波 CT 法

高周波 CT は端的に述べればコイルである。部分放電によって接地に電流が流れるため、コイルの誘導電流を用いて、それを検出する方法である。高周波 CT の周波数帯域を商用周波数より高く選定することによって試料の充電電流を除去できる。

(c) 電磁波による検出法

部分放電によって発生する電磁波をアンテナで検出する方法である。部分放電の大きさと発生位置を推定する手法も提案されている。試料が金属で覆われている場合、内部で発生した放電に伴う電磁波は外部には漏れてこない。そのため、ブッシングやスパーサ等の金属導体開口部から漏洩する電磁波を検出する、もしくは内部にアンテナを設置する必要がある。電磁波の強度は放電電流に比例して増加するが、電磁波の強度から電荷量を構成するこ

とが課題となっている。

(d) 音響的な測定方法

部分放電の発生に伴って、部分放電発生源からは弾性波(音波)が伝搬する。弾性波と電荷の間には線形の関係がある。圧電素子を用いて機械振動を電気振動に変換し、増幅器を用いて波形を観測する。周波数は超音波領域(20 kHz 以上)であることが多い。

参考文献

- (1) 小崎：高電圧・絶縁工学，オーム社，p.45，pp.49-50，1997.
- (2) 大久保：高電界現象論，オーム社，pp.85-94，2011.
- (3) 赤崎：基礎高電圧工学，昭晃堂，pp.27-28，1980.
- (4) J. M. MEEK and J. D. CRAGGS：Electrical Breakdown of Gases, Wiley, 1978.
- (5) 宇宙航空研究機構：「絶縁設計標準」，2012.
- (6) 山野，他：「絶縁性異物の付着による交流沿面絶縁耐力の低下」，電気学会論文誌 A，Vol.110，No.12，pp.839-845，1990.
- (7) 鶴水，他：「背後電極を持つ絶縁物表面で発生する交流沿面部分放電のくぼみ電極による低減」，電気学会論文誌 A，Vol.117，No.3，pp.324-330，1997.
- (8) T. Tanaka, et al.：“A Method of Evaluating Resistance of Insulating Materials Against Internal Partial Discharges”，CIGRE Report for the 1996 Session of TF 15.06.01, Electra No.164, 1996.
- (9) G.C.Crichton, et al.：“Partial Discharge in Ellipsoidal and Spheroidal Voids”，IEEE Transactions on Electrical Insulation, Vol.24, No.2, pp.335-342, 1989.
- (10) I.W.McAllister：“Partial Discharges in Spheroidal Voids-Void Orientation”，IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 4, No.4, pp.456-461, 1997.
- (11) Lutz Niemeyer：“A Generalized Approach to Partial Discharge Modeling”，IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 2, No.4, pp.510-528, 1995.
- (12) 大田：「化学プラントの静電危険性の評価と対策」，住友化学，pp.55-64，2004.
- (13) 藤原，他：「ポッケルス素子を用いた誘導電界の光学的測定」，電気学会論文誌 A，Vol.111，No.3，pp.237-242，1991.
- (14) 川崎，他：「ポッケルス素子を用いた絶縁フィルム上の交流沿面放電電荷分布の測定法」，電気学会論文誌 A，Vol.112，No.11，pp.938-944，1992.
- (15) 狩野：「パームヤシ油から作る電気絶縁油の特性とバイオディーゼルへの適用」，スマートプロセス学会誌，Vol.2，No.2，pp.67-71，2013.
- (16) 宮本，他：「植物油入り変圧器の実用化研究」，愛知電機技報，No.37，pp.13-18，2016.
- (17) 高橋，他：「加熱多層シリカゲルカラム/アルミナカラムを用いた電気絶縁油中の PCB 迅

- 速分析法」, 環境化学(Journal of Environmental Chemistry), Vol.20, No.4, pp.357-370, 2010.
- (18) 岸田, 他:「絶縁油中の高電界電気伝導と破壊に及ぼす溶存水の影響」, 電気学会論文誌 A, Vol.110, No.3, pp.190-196, 1990.
- (19) 石井, 他:「絶縁油の交流絶縁破壊に及ぼす水分の影響」, 電気学会論文誌 A, Vol.92, No.3, pp.44-48, 1972.
- (20) 桑原, 他:「シリコン油中の放電によるガス発生」, 電気学会論文誌 A, Vol.97, No.5, pp.45-51, 1977.
- (21) 張替, 他:「フルフラールによる輸入変圧器の経年劣化度診断の研究」, 電気学会論文誌 A, Vol.112, No.6, pp.589-595, 1992.
- (22) 難波, 他:「フルフラールの絶縁紙への吸着現象(変圧器寿命診断の基礎検討)」, 電気学会論文誌 A, Vol.112, No.2, pp.139-144, 1992.
- (23) S. Palmer, W.A. Sharpley: “Electric Strength of transformer Insulation”, Proceedings of the Institution of Electrical Engineers, Vol. 116, pp.2029-2037, 1969.
- (24) M. Murano, S. Menju, M. Ikeda, N. Hasegawa, and T. Inoue: “Experimental Extension of Volume Effect on Breakdown of Transformer Oil”, IEEE Winter Power Meeting, C74 236-6, 1974.
- (25) 池田, 他:「変圧器油中浮遊粒子数の測定結果と絶縁破壊への影響」, 電気学会論文誌 B, Vol.118, No.11, pp.1277-1283, 1998.
- (26) 月岡, 他:「油浸フィルム絶縁系の絶縁破壊」, 電気学会論文誌 A, Vol.98, No.2, pp.7-13, 1978.
- (27) 村田, 他:「油浸 PPLP のインパルス絶縁破壊に関する基礎的研究」, 電気学会論文誌 A, Vol.114, No.2, pp.173-178, 1994.
- (28) 高橋, 他:「油浸絶縁物の直流沿面フラッシュオーバー特性」, 電気学会論文誌 A, Vol.98, No.8, pp.1-8, 1978.
- (29) 西松, 他:「油浸コンデンサ誘電体の直流・インパルスおよび直流・交流重畳電圧破壊特性」 電気学会論文誌 A, Vol.112, No.6, pp.581-588, 1992.
- (30) 矢成:「電力用変圧器技術発展の系統化調査」, 国立科学博物館技術の系統化調査報告第4集, 2004.
- (31) A. Klinkenberg, J. L. van der Minne: Electrostatics in the Petroleum Industry, Elsevier Publishing Co., 1958.
- (32) J. T. Leonard, H. W. Carhart: “Effect of conductivity on charge generation in hydrocarbon fuels flowing through fiber glass filters”, Journal of Colloid and Interface Science, vol. 32, No. 3, pp.383-394, 1970.
- (33) B. Hampel, H. Luther: “Beeinflussung der elektrostatischen Aufladung strömender Kohlenwasserstoffe durch Fremdschubstanzen”, Vol.29, No.5, pp.323-329, 1957.
- (34) 渡辺, 他:「流動帯電における帯電電荷量と添加物の関係」, 電気学会論文誌 A, Vol.105, No.3, p.165, 1985.

- (35) 伊藤, 他:「流動帯電した絶縁性液体中の電荷密度と導電率について」電気学会論文誌 A, Vol.93, No.5, p.1-8, 1973.
- (36) 電気学会:超電導ハンドブック, オーム社, p.316, 1968.
- (37) M. J. Jefferies, K. N. Mathes: “Dielectric Loss and Voltage Breakdown in Liquid Nitrogen and Hydrogen”, IEEE Transactions on Electrical Insulation, Vol.5, No.3, pp.83-91, 1970.
- (38) K. N. Mathes: “Dielectric properties of cryogenic liquids”, IEEE Transactions on Electrical Insulation, Vol.2, No.1, pp.24-32, 1967.
- (39) B. Halpern, R. Gomer: “Field Emission in Liquid”, Journal of Chemical Physics, Vol.51, No.3, pp.1069-1070, 1965.
- (40) W. F. Schmidt: “Elementary Processes in the Development of the Electrical Breakdown of Liquids”, IEEE Transactions on Electrical Insulation, Vol.17, No.6, pp.478-483, 1978.
- (41) B. E. Springett, et al.: “Stability criterion for the localization of an excess electron in a nonpolar fluid”, Journal of Chemical Physics, Vol.48, pp.2720-2731, 1968.
- (42) M. J. Chant: “Dielectric properties of some insulating materials over the temperature range 4.2 ~300K”, Cryogenics, Vol.7, pp.351-354, 1967.
- (43) C. P. S. Smyth, C. S. Hitchcock: “Dipole Rotation in Crystalline Solids”, Journal of the American Chemical Society, Vol.54, pp.4631-4647, 1932.
- (44) 前野:「氷の化学」, 北海道大学図書刊行会, p94-98, 1981.
- (45) 原:「超電導機器における電気絶縁」, 低温工学, Vol.24, No.2, pp.72-81, 1989.
- (46) 河野, 他:「低温における窒素ガスのインパルスフラッシュオーバー特性と暗電流」, 電気学会論文誌 A, Vol.94, No.11, pp.469-476, 1974.
- (47) M. Hara, et al.: “Thermal-Bubble Initiated Breakdown Characteristics of Liquid Helium and Nitrogen at Atmospheric Pressure”, IEEE Transactions on Electrical Insulation, Vol.23, No.4, pp.769-778, 1988.
- (48) K. Yoshino, et al.: “Dependence of Polarity Effect of Dielectric Breakdown on Molecular Structure of Liquids”, Journal of Electrostatics 12, pp.323-332, 1982.
- (49) A. Kawashima: “Electrode area effect on the electric breakdown of liquid nitrogen”, Cryogenics, 14, No.4, pp.217-219, 1974.
- (50) M. Hara, et al.: “D.c. electrical breakdown of saturated liquid helium at 0.1 MPa in the presence of thermally induced bubbles”, Cryogenics, Vol.27, pp.567-576, 1987.
- (51) K. Yoshino, K. Ohseko, M. Shiraishi, M. Terauchi, & Y. Inuishi: “Dielectric Breakdown of Cryogenic Liquids in Terms of Pressure, Polarity, Pulse and Impurity”, Journal of Electrostatics 12, pp.305-314, 1982.
- (52) 小崎:高電圧・絶縁工学, オーム社, p40, 1997.
- (53) 宮入, 他:「低温領域におけるポリエチレンの絶縁破壊」, 電気学会雑誌, Vol.91, No.10, pp.1962-1968, 1971.

- (54) G. Bahder, et al. : “Bulk solid dielectric for cryogenic cables”, Cryogenics, Vol.23, pp.95-101, 1983.
- (55) 小崎, 他 : 「極低温領域における電気絶縁構成について」, 電学絶縁材料研資料, IM-74, p37-1～p37-10, 1974.
- (56) T. Kohno, et al. : “Electrical Breakdown of Ice at Cryogenic Temperature”, IEEE Transactions on Electrical Insulation, Vol.15, No.1, pp.27-32, 1980.
- (57) A. A. Hossam-Eldin, B. Salvage : “A Liquid Nitrogen Cooled High Voltage, Direct-Current Cable”, International Conference on High Voltage DC/AC Power Transmission IEE, pp.47-52, 1973.
- (58) 水野, 他 : 「液体窒素中の多層ポリエチレンフィルムの部分放電による絶縁破壊」, 電気学会論文誌 A, Vol.105, No.8, pp.413-419, 1985.
- (59) A. A. Hossam-Eldin, B. Salvage : “A Liquid Nitrogen Cooled High Voltage, Direct-Current Cable”, International Conference on High Voltage DC/AC Power Transmission IEE, pp.47-52, 1973.
- (60) Z. Iwata, et al. : “Cryogenic Cable insulated with Oil impregnated Paper”, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol.96, No.4, pp.1288-1295, 1977.

第3章 本研究に用いた高分子電気絶縁材料の概要

3.1 クラフト紙の概要

クラフト紙はパルプからできている。パルプは、主としてセルロースからなる集合体をいう。パルプの種類によってヘミセルロースやリグニン等も含まれている。針葉樹、広葉樹のほとんどあらゆる樹種がパルプ用材となる。製法により、機械パルプ(碎木パルプ)と化学パルプ、そして中間的なセミケミカルパルプに分類できる。機械パルプには水に不溶な木材成分が含まれており、低品質であるが、高速抄紙および高速印刷に適するため、新聞紙に用いられる。化学パルプは、化学薬品として NaOH-NaS を用いる硫酸鉛パルプ(クラフトパルプ)が、製紙用パルプの主流となっている。

電気絶縁分野において、クラフト紙は主に電力ケーブルやコンデンサの絶縁体として用いられている。しかし、クラフト紙は不純物の混入、ピンホール、または繊維の微視的な希薄部等の耐電圧弱点部を避けることが出来ない。この弱点を補うため、特に電力ケーブルや電力用コンデンサのような極めて広い絶縁面積を有するものに対しては、絶縁紙は鉱油やアルキルベンゼン等に含まれ、複数枚重ねて使用する。加えて、電力ケーブルに使用する際には、誘電特性も大きな問題となり、紙の繊維分が多いと $\tan\delta$ が大きくなるために繊維分を減らした低密度の絶縁紙が使用される。

3.2 絶縁紙の叩解度⁽¹⁾

製紙技術の基本は

- ①原料を煮る(パルプ化)
- ②パルプを水に分散し、叩解する
- ③紙をすく

の3つに分けられる。特に叩解は紙の本質を決める上で最も重要な役割を持つ。叩解されないパルプ(未叩解パルプ)から作られた紙はボソボソで弱く、吸い取り紙のようであり、字もよく書けない。一方、叩解が進んだパルプから作った紙はパリパリしており、平らで半透明となる。叩解の程度によって、まったく違った紙が生まれる。種類、用途によって、叩解の程度を変えて紙を製造する必要がある。パルプから紙までの概要図を図 3.1 に示す。ビーター(Beater)とはパルプを叩解するための機械で、叩解をビーティング(Beating)と呼ぶこともある。叩解の程度を知る物差しとして、フリーネスあるいはショッパリーグラウという値が使われる。前者は CSF [ml]、後者は $^{\circ}\text{SR}$ という数値で示し、SCR 値の大きいほどパルプの叩解は進んでおらず、 $^{\circ}\text{SR}$ 値はその逆で値が大きいほど叩解が進んでいる。

図 3.2 に叩解度と代表的な紙の性質の関係を示す。図には引張、耐折、引裂、破裂のパラ

メーターがあるが、これ以外に紙の密度・通気性(透気抵抗度)・吸液性・表面性・こわさ・透明性等、さまざまな性質が関係する。透気抵抗度とは 100 ml の空気が紙を厚さ方向に通過するのに要する時間で定義され、透気抵抗度が高いほど通気性が悪いことを示している。この透気抵抗度は絶縁破壊現象において重要なパラメーターであり、油浸絶縁紙においては叩解度⁰SR が高いほど透気抵抗度は低くなり、絶縁破壊の強さは低下することが知られている⁽²⁾。

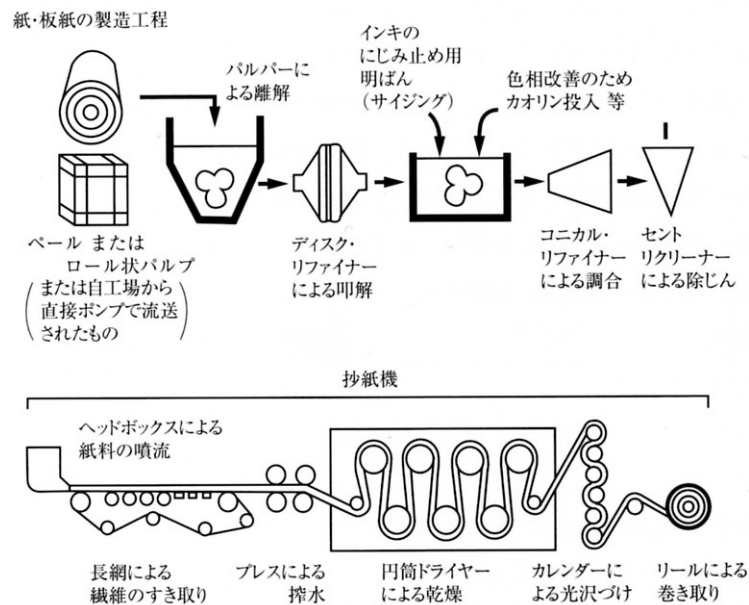


図 3.1 パルプから紙までの概要図⁽¹⁾

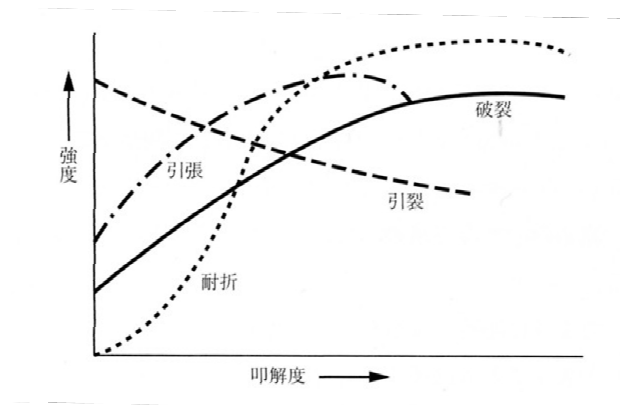


図 3.2 叩解度と紙の諸強度との関係⁽¹⁾

3.3 絶縁紙の電気伝導⁽³⁾

絶縁紙はセルロース繊維から構成されている。一般にセルロース繊維の電気伝導はイオン電導と言われており、イオン源や電導の機構については従来からいくつかの考え方が提案されている。その内容を簡単に述べる。

3.3.1 O`Sullivan の考え方

O`Sullivan 氏によると、セルロースの抵抗は湿度と圧力に敏感であり、紙、綿、布等は、湿潤状態では中庸の導体であるが、乾燥状態では良い絶縁体であることが見出されている。抵抗は電極間の圧力増加で減少し、印加電圧増加で増大する。紙や布では抵抗の逆数の対数は相対湿度に比例し、抵抗は電圧印加後 5 分以内で一定に達し、30 %RH では時間依存性はない。更に、一本の綿の繊維の測定で繊維方向の抵抗にも湿度に対して同様な変化をする。セルロース中の水分の役目として、電解作用が提案されているが、これはセルロースの水洗や湿度の影響実験の結果に立脚している。

O`Sullivan はセルロースが導電路の役目を果たしているためパラメーターとして抵抗よりも導電率を選んだ。彼は上記の電解作用に注目してセロファンに対する塩と湿気の効果を検討した結果、以下を発見した。

- ① 湿度一定の場合、伝導率は塩の量の増大と共に増加する。但し、絶対値は塩の種類によって多少異なる。
- ② 塩の量が一定の場合、伝導率は水分含有量の指数関数である。

この様に水との作用は電解作用の説を支持することになるが、更に Walker が綿布に数日間電圧を印加すると天然のアルカリ塩が負側に堆積しているのを見つけている。

次に問題となるのは電極とセルロース中のどこかで起こる電解作用で生成するイオンが電流に寄与するかである。塩の水溶液と同様に電極にイオンが集まり、化学作用による量と水溶液で運ばれる量は同程度であるが、電気量と電気化学効果による量の正確な量的相関性は得られなかった。しかし、電流が流れている間にイオンがセルロース、フィルムの繊維に沿って移動することは確かであり、伝導はイオンによると考えて良いとしている。

導電率の湿度に対する大きな依存性を説明する機構はいくつか考えられる。

- ① セルロースの毛細管中でイオン運動に対する粘性障害
- ② セルロースの塩イオンの吸着率
- ③ セルロースの水分子吸着率
- ④ 塩の分解を決める媒質の実効誘電率
- ⑤ セルロース中の連続した通路の数
- ⑥ 不連続導電路をつなぐ頻度

等である。50 %以上の含水量では①の機構が主で、10～20 %では⑥が主と考えられる。⑥の機構はイオンが伝導路の切れ目まで移動した際に水分子がこの切れ目を埋めるまでそこに留まっているとしたものである。

上記の推論は、導電率の湿度係数が含有塩の種類や量によらず、吸湿量のみの関数となっている実験結果に基づいている。50 %以上の吸湿量では、吸湿量の減少と共に湿度係数が急激に増大する。他の要因による寄与は無視することが出来るが、誘電率の影響を十分に考察しているとは言えない。

①の機構の内容を述べる。セルロースは結晶と無定形セルロースの入り混じったものであり、水分は天然セルロースの無定形領域にあり、再生セルロースの結晶領域にも多少浸透している。物質が膨潤するような高吸湿状態では、結晶間領域は水と無定形セルロースから成る毛細管路と見なすことができる。この管路は水、したがって水酸イオンの運動に対して粘性障害を起こす。この粘性障害は無定形セルロースがあると更に大きくなる。吸湿量が減少すると、管路の断面積と管路の数が減少するため、イオン運動に対しては、粘性障害が増大し導電率が減少する。吸湿量一定の場合には、粘性障害の温度係数は管路の断面積に依存しないと考えられるため、導電率の温度係数が塩の種類や量に関係なく一定である実験事実と一致する。

⑥の機構の内容を述べる。水分を除去した場合において、ほとんど全ての導電路が切断されると仮定すると、切れ目に水分子が来たときのみ導通状態となる。従って導電率は水分子による連絡の頻度に比例する。この頻度は周囲雰囲気との平衡温度によって決まるが、塩イオンの水分吸着力のために塩によって影響を受ける。

上記の二つの極限状態の間の吸湿量では、湿度係数が中間の値となり、吸湿量の減少と共に増大することが期待される。

3.3.2 Hearle の考え方

低吸湿量の場合にイオン伝導であるという明確な証拠はないが、吸湿量がある程度であれば、イオンによる伝導が確からしい。セルロースの電気伝導の特徴は主に、

- ① 湿度の影響が高い
- ② $\log R_s = A \log M + B$ (M ; 吸湿量)
- ③ 温度依存性が大きい
- ④ 抵抗に温度依存性がある
- ⑤ 蛋白質繊維の抵抗は非常に大きい
- ⑥ 2 価イオンの導電率は小さい
- ⑦ 電解質物質の量で抵抗が変化する
- ⑧ 分極と逆起電力が発生する

等であり、以上の特性を説明しなければならない。

吸湿量が 50 % 以上の場合には O'Sullivan の考え方と同様である。Hearle は比較的吸湿量が小さい場合には、O'Sullivan の考えは正しくないとしている。導電路の切断部で決まる伝導の理論では、もし抵抗が切断部の数に比例するならば、含有水分の抵抗への影響を説明出来るが、分極が起こりこの効果をマスクする結果となるため、この考えは正しいとは言えない。温度依存性は O'Sullivan が示したように、簡単な理論と良く一致している。

そこで重要になるのは、イオンの移動のし易さではなく、イオン数、すなわちイオンの解離による自由イオンの生成である。誘電率が少し増加するとイオン対の解離度が大きく増大し、その結果として伝導に寄与するイオン数は増大する。この状態は Debye-Huckel の理論が適用できない領域であるため、O'Sullivan の言うように温度効果が Debye-Huckel や Onsager の式に合わなくても、解離の考え方が誤りであることにはならない。King と Medley は Bjerrum の理論を適用して、実験結果と良い一致を得ている。誘電率が問題となるのは、測定周波数や繊維の方向によってその値が変化すること及び分子スケールでは誘電率が非常に非等方性を持つことである。この様に誘電率が曖昧なため、Bjerrum の複雑な理論結果の適用や改良は意味がないとしている。

1 価イオンの簡単な解離を考えると、解離度 α は

$$\alpha = \sqrt{\frac{A}{n_0}} \exp(-U_0 / 2\epsilon kT)$$

(U_0 : 真空中でイオンを解離させるエネルギー、 ϵ : 誘電率、 n_0 : 単位体積中の分子数、 A : 常数)となる。イオン数を n とすると

$$\log R = \frac{0.435U_0}{2\epsilon kT} + \log \frac{V \sqrt{n_0 / A}}{2vZe n_0}$$

となる。但し、 v : イオンの速度、 e : 電子電荷、 Z : 原子価、 V : 印加電圧である。10 kV ~ 1 MHz における巨視的な誘電率のみに注目して、抵抗と誘電率の関係を求めると非常に良く合致する。この理論では多価イオンはほとんど電気伝導に寄与しないことが分かる。

3.3.3 Muphy の考え方

Muphy は天然繊維の電気伝導に対する精力的な研究の結果、次の様な考え方に到達した。乾燥したセルロースの電気伝導は固体誘電率に対する理論式に従う。すなわち、

$$\sigma = \sigma_{01} \exp(-E_1 / kT) + \sigma_{02} \exp(-E_2 / kT)$$

ここで、 $\sigma_{01}=4.50 \times 10^2 \Omega^{-1} \text{cm}^{-1}$ 、 $\sigma_{02}=3.55 \times 10^{-10} \Omega^{-1} \text{cm}^{-1}$ 、 $E_1=30.7 \text{ kcal/mol}(=1.34 \text{ eV})$ 、 $E_2=10.6 \text{ kcal/mol}(=0.46 \text{ eV})$ 、 k はボルツマン常数、 T は絶対温度である。

キャリアの移動度の活性化エネルギーは 0.46 eV で $(1.34-0.46) \times 2 = 1.8 \text{ eV}$ はセルビオースからキャリア(この場合プロトン)を解離させるエネルギーと考えている。セルロースは数多くの内部表面を持っていて、そこに空気中からの水分が吸着されており、導電率はその吸着水量によって影響を受け、実験的に

$$\sigma = \sigma_s (\alpha / \alpha_0)^n$$

が成立する。 n は材料によって決定され、セルロースの場合は実験値で 9.3 である。但し、 σ_s : 飽和伝導率(セルロースの通常の状態で $10^{-4} \Omega^{-1} \text{cm}^{-1}$)、 α : 水分含有量(%), α_0 : 飽和水分含有量(%)である。

n は電解物質の量に無関係である。 n の解釈として次のモデルが考えられている。セルロース中の吸着場所は繰り返し単位の規則的なパターンを形成し、9つのサイトからなっている。その各々のサイトで吸着が独立の無秩序過程として起こる。これらの9つのサイトを同時に占める確率は $(\alpha/\alpha_0)^9$ に比例し、導電率はこの確率に比例する。セルビオースの単一セルに多くの吸着場所を考えるのは困難なため、2次元的構造によると考えられる。これはX線解析で得られた結果よりも長い繰り返し距離を持っている。セルロースの熱分解速度 k は

$$k = k_0 \exp(-W / kT)$$

($k_0=1.0 \times 10^{11} \text{ CO/1 モルのセルビオース/秒}$)、 $W=39.5 \text{ kcal/mol}(=1.72 \text{ eV})$ となる。この活性化エネルギーは電気伝導での解離エネルギー 1.8 eV と一致するものでプロトンの生成によるものである。したがって、天然セルロースの電気伝導は乾燥状態においてはプロトンとプロトン孔の伝導生成によるものであり、吸湿状態ではそれに吸着水が関与すると考えられるため、本質的にはイオン伝導であると考えられる。

移動に対する活性化エネルギー $10.6 \text{ kcal/mol}(=0.46 \text{ eV})$ は水素結合エネルギーの約2倍であることから、水素結合を同時に2個切るような共鳴トンネル効果を考えている。

イオン伝導であるとすれば Faraday 則に従うはずであるが、実際には収率が電流に依存するため Faraday 則から外れる。その理由は、電界放出や電極からのトンネル効果等が考えられる。電極面で注入された高エネルギー電子と誘電体の相互作用により生成される励起分子が分解反応を起こし、通常の Faraday 収率以上の収率が期待される。ところが、高エネルギー電子がイオンを生成するならば電流が増加するため、分子収率を上げることはなら

ない。また、ジュール熱あるいは誘電体が高エネルギー電子が衝突したときに発生する熱による熱分解が考えられるが、実際には導電率は理論に従い、電圧印加の場合と印加しない場合で生成ガスの種類が異なるため、その様にも考え難い。

絶縁紙の抵抗の吸湿量に対する依存性は Walker の結果より次のようになる。

$$M < 3\% \quad \log R = -AM + B_6)$$

$$3 < M < 10\% \quad \log R = -A' \log M + B'$$

$$10 < M < \text{飽和} \quad \log R = -A'' \log H + B''$$

M : 吸湿度、 H : 相対湿度、 A 、 A' 、 A'' 、 B 、 B' 、 B'' は材料の種類・形状及び測定温度で決まる定数である。

3.4 PPLP の概要⁽⁴⁾⁽⁵⁾

PPLP とは、Polypropylene Laminated Paper の略であり、図 3.3 に示すように、2 枚のクラフト紙の間にポリプロピレンを押し出し成形した、従来のクラフト紙に代わる新合成紙である。優れた電気特性を有する PPLP は、特性解析の面で不明な点がいくつかある。例えば、積層油浸 PPLP 系の絶縁破壊を例にとると、油浸クラフト紙ならびに油浸 PP 単独使用の場合からは到底推察しえない、PPLP 系特有の絶縁破壊現象が発生する。その主な理由は、PPLP がクラフト紙と PP フィルムの単なる積層物ではなく、PP のラミネート紙であること、すなわち、クラフト紙中の繊維間に PP が深く食い込み、クラフト紙と PP フィルムが密着構造を形成しているためである。

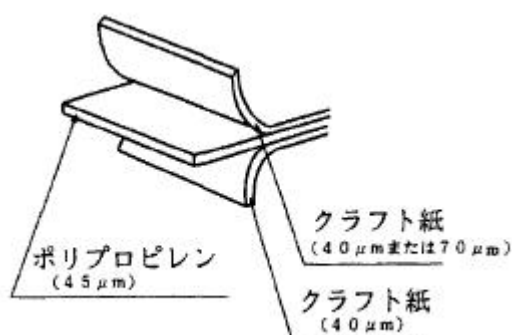


図 3.3 PPLP の構成⁽⁵⁾

PPLP 開発の主な流れを図 3.4 に示す。PPLP 開発への道のりは、まずパルプの改良から始まる。紙の繊維分は $\tan\delta$ の増加を引き起こすため、繊維分を減らした低密度の絶縁紙が作

られた。しかしながら、繊維分を減らすと、油浸紙の絶縁破壊強度は一般に低下する。そこで次に開発されたのが、パルプの叩解度を上げたものであるが、紙を抄く場合の濾水性が悪くなり、薄紙にならざるをえない⁽⁵⁾。薄紙にすると、機械的強度の面で問題を生じ、これらを何枚か重ね貼り合わせた紙が試作された。しかし、貼り合わせるための貼料に問題があり、貼料としてポリプロピレンを使用するという思想に基づいて開発されたのが PPLP である⁽⁶⁾。

表 3.1 は、クラフト紙とポリプロピレンについて誘電率 ϵ と誘電損失 $\tan\delta$ を示している。同表から分かるように、どちらも PPLP の方が優れている。PPLP では、誘電率×誘電体損失が従来のクラフト紙の 1/2～1/4 に低減でき、かつ耐電圧特性も数十 % 高くすることができる。このため、PPLP を用いるとケーブルを小型化することが可能となる。

表 3.1 クラフト紙と PPLP の比較(300 K)⁽⁵⁾

	比誘電率	$\tan\delta$
クラフト紙	3.4	0.175
PPLP	2.8	0.098
ポリプロピレン	2.1	0.03

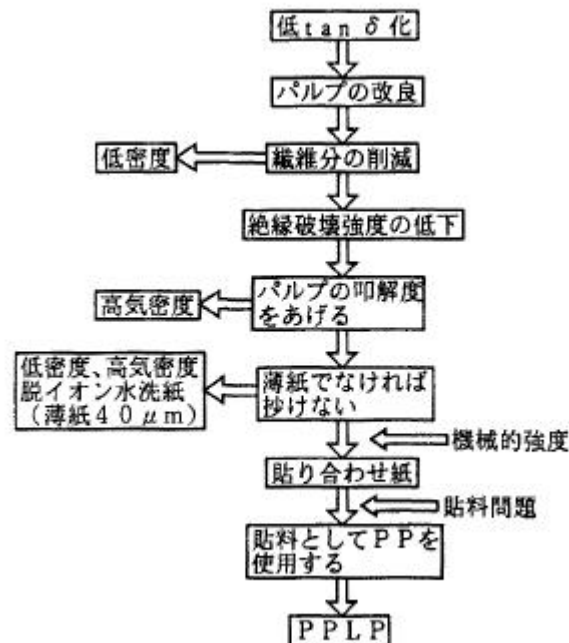


図 3.4 PPLP に至るクラフト紙改良の概略⁽⁵⁾

さて、半合成紙は一般に優れた誘電特性を有するものの、プラスチック材料を用いているため、(1)耐油性、(2)熱可塑性、(3)剥離強度、(4)透気性等の諸点に関する基礎的検討が不可欠である。多年にわたる検討の結果、PPLP は他の半合成紙には見られない優れた諸特性を有することが実証され、それゆえに、多くの場面で広く実用に至っている。

3.5 ポリイミド

ポリイミド(PI)はイミド官能基を有する高分子材料である。複数の芳香族がイミド結合を介して剛直な分子構造を持ち、またイミド環構造が強い分子間力を持つため、ポリマー中で最高レベルの熱的、機械的、化学的性質を示す。耐熱性と機械的特性に非常に優れるため、スーパーエンジニアリングプラスチックとも呼ばれており、電気・電子分野、超伝導分野、航空・宇宙分野、光学応用分野で広く使用されている⁽⁸⁾。図 3.5 にデュポン社で開発された Kapton[®] の分子構造を示す。PI の代表的な合成法はジアミンと酸二無水物からの 2 段階法である。すなわち、酸二無水物とジアミンからポリアミド酸を合成し、それを脱水イミド化することにより、PI を合成する。脱水イミド化には加熱による方法(熱的イミド化)と脱水剤による方法(化学的イミド化)がある⁽⁹⁾。表 2.1 に PI の代表的な特徴と用途⁽⁸⁾⁽¹⁰⁾を示す。

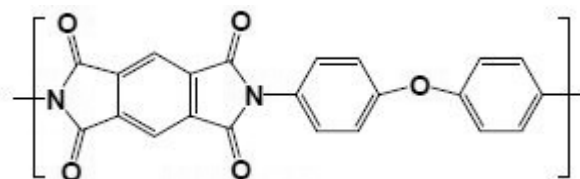


図 3.5 Kapton[®]の分子構造⁽⁸⁾

表 3.1 PI の代表的な特徴と用途⁽⁸⁾⁽¹⁰⁾

特徴	<p>(1) 耐熱性：耐熱温度は短期的には 500℃、長期的には 300℃ 程度である。</p> <p>(2) 機械的特性：温度による影響が小さく、高温でも高い強度を維持する。</p> <p>(3) 寸法安定性：成形収縮率は小さく、線膨張係数も小さい。</p> <p>(4) 難燃性：UL-94 規格で V-0 の難燃性を有する。</p> <p>(5) 耐薬品性：ほとんど全ての有機溶剤に対して強い。</p> <p>(6) 電気絶縁性：絶縁破壊電圧が高く、誘電正接が小さい。</p>
用途	<p>(1) 電気絶縁材：電動機絶縁、電線被覆、フレキシブルプリント配線板(FPC)</p> <p>(2) 半導体素子の表層保護膜</p> <p>(3) 極低温での超伝導応用</p> <p>(4) 航空・宇宙用途：人工衛星の温度制御膜、ソーラーセール</p> <p>(5) 耐熱性が要求される光学用途</p>

参考文献

- (1) 門屋，他：新しい紙の機能と工学，裳華房，pp.14-30，2001.
- (2) 村田，他：「電気絶縁紙の油中部分放電開始電圧に及ぼすパルプ叩解の効果」，電気学会論文誌 A，Vol.95，No.1，pp.9-16，1975.
- (3) 田中，他：「絶縁紙の電気伝導」，電力中央研究所研究報告，No.68081，pp.1-8，1969.
- (4) 村田：「油浸紙の絶縁破壊機構に関する研究」，電気学会・絶縁材料研究資料 DEI-91-94，pp.49-51，1991.
- (5) 村田，他：「油浸 PPLP のインパルス絶縁破壊に関する基礎的研究」，電気学会論文誌 A，Vol.114，No.2，pp.173-178，1990.
- (6) 村田，他：「電気絶縁紙の最適抄紙条件設定に関する基礎的研究」，電気学会論文誌 C，Vol.109，No.4，pp.262-269，1989.
- (7) 久保，他：「超高圧および超々高圧電力ケーブル用ポリプロピレンラミネート紙に関する研究」，電気学会論文誌 A，Vol.97，No.8，pp.403-410，1977.
- (8) 安藤：「ポリマー系耐熱・絶縁材料物性の基礎-ポリイミドを中心に-」，材料の科学と工学，Vol.49，No.5，pp.194-198，2012.
- (9) 吉田，他：高分子材料化学，三共出版，pp.88-105，2001.
- (10) 安田：エンジニアリングプラスチック活用ガイド，日刊工業新聞社，pp.188-203，1991.

第4章 高粘度絶縁油(ソリッドオイル)中における部分放電と表面帯電

4.1 まえがき

ヨーロッパにおいては高電圧直流送電による電力の国家間連携が行われている。従来の低粘度絶縁油を用いた油浸紙ケーブル(OF ケーブル)は長距離送電を行う場合、一定間隔に中間給油点が必要である。国家間連携用のケーブルは地中や海底を通るため、中間給油点の設置が困難な場合があり、圧力伝達距離に制限が生じる。したがって、ケーブルの湾曲部等のギャップ部分において、絶縁油の移動に伴う絶縁油枯渇現象が生じ易くなる。そこで、比較的高粘度の絶縁油を浸漬した非加圧・非給油型の長距離 DC ソリッドケーブルが実用化されている。絶縁構成は従来の OF ケーブル同様に絶縁紙-高粘度絶縁油複合系が採用されており、絶縁紙にはクラフト紙(KP)とポリプロピレンフィルム(PP フィルム)の積層紙である PPLP が用いられている。KP は OF ケーブルの経験から絶縁油の浸漬性に優れており、PP フィルムは誘電特性および絶縁破壊特性が優れる点から見て有望な高分子個体絶縁材料である。

ケーブルは、必ずしも直線で敷設される訳ではなく、湾曲点が存在する場合が多い。したがって、絶縁紙は巻き込みによる破損防止のためにバッドギャップ(図 4.1)という一定の間隔を設けて巻かれている。バッドギャップ内は基本的には絶縁油が存在するが、ケーブル内部に熱勾配ができた場合には、温度が高い部分の絶縁油の粘度が低下するため流動し易くなり、結果的にバッドギャップ中に気泡が発生する恐れがある。気泡は高粘度絶縁油よりもはるかに部分放電開始電圧が低いため、絶縁劣化の原因となることが予想される。ところが、CIGRE(国際大電力システム会議)や IEC(国際電気標準会議)において決定されている電力ケーブルの規格試験項目には直流における部分放電測定の記事はない⁽¹⁾。

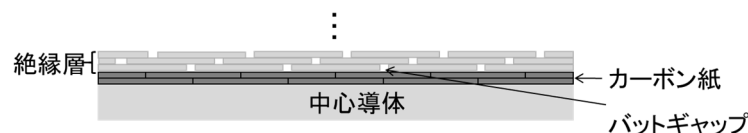


図 4.1 バッドギャップの模式図

さらに、絶縁油中のイオンの移動度が分子量に比例する⁽²⁾ことが知られている。したがって、高粘度絶縁油中においては帯電電荷が移動し難くなることが予想される。特にこのような条件下において電力潮流制御による極性反転を生じる場合は帯電電荷によって局所電界は設計電界よりも高電界化し、部分放電の発生を助長すると考えられる。部分放電の持続的な発生は絶縁体の劣化ひいては絶縁破壊を引き起こす。本章では高粘度絶縁油-絶縁紙複合絶縁系の直流部分放電特性に与える帯電挙動の影響を明らかにすると共に高粘度絶縁油を直流電力ケーブルの絶縁構成に適用する場合の部分放電測定的重要性に関して検討した。

4.2 部分放電測定システム

図 4.2 に部分放電(PD)測定システムを示す。試料にて PD が発生するとカップリングコンデンサから PD によって失われた電荷量が回路に供給される。測定前に既知の模擬的な放電電荷を試料に注入し、同調式部分放電検出器(CD-5)の出力電圧との関係を事前取得すれば、PD 時に回路に供給された電荷量を見かけの放電電荷量として CD-5 の出力電圧から換算することができる。本研究では CD-5 の出力電圧から求めた電荷量の換算値が 2 pC 以上になった最初の部分放電時の印加電圧を部分放電開始電圧と定義した。

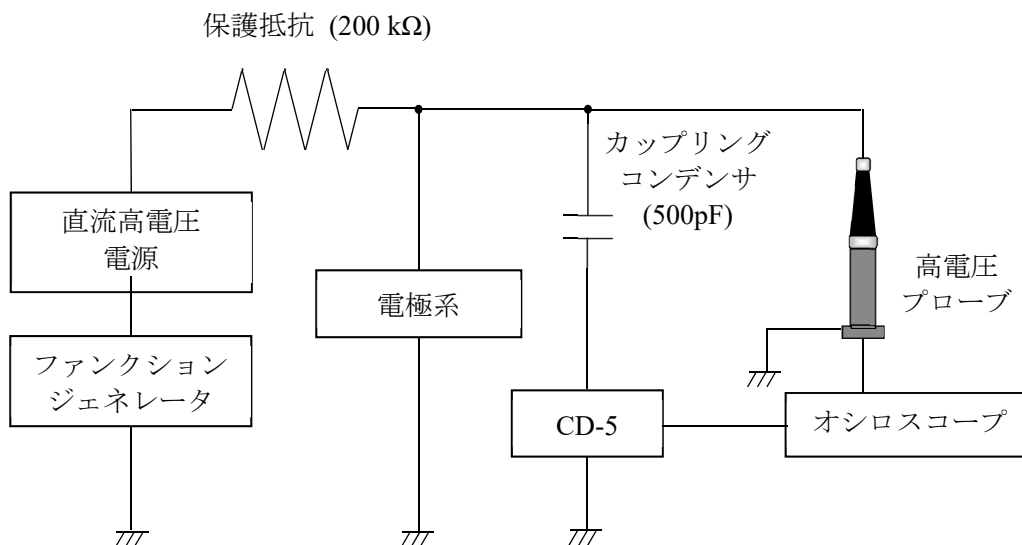


図 4.2 部分放電測定システム

4.3 試料および電極系

実際のケーブルに用いられる絶縁紙はバットギャップを設けて巻かれている。このバットギャップ中では部分放電が生じ易く、絶縁破壊の原因となり得る。この点を模擬するために、図 4.3(a)、(b)に示すようなギャップを設けた球-平板電極系を採用した。絶縁油として、

シリコンオイル(信越化学製, 動粘度 $1000 \text{ mm}^2/\text{s}$ (25°C), 比誘電率 2.34 (60 Hz), 吸水率およそ 0.2 wt%)もしくは高粘度絶縁油(ソリッドオイル)(ポリブテン系, 動粘度 $9500 \text{ mm}^2/\text{s}$ (40°C), 比誘電率 3.21 (60 Hz), 吸水率およそ 0.5 wt%)を用いた。

試料は厚さ 0.125 mm、直径 60 mm のクラフト紙(KP)を用いた。試料を下部電極に設置し、上部電極と試料間に 0.175 mm のギャップを設けた。実験は表 4.1 の 5 種類の試料条件にて行った。ここで表 4.1 において、Air/KP は空気ギャップ中において、絶縁油に浸漬していない KP を示している。Air/Silicone oil KP および Air/Solid oil KP は空気ギャップ中において、シリコンオイルもしくはソリッドオイルに浸漬した KP を用いた状態を示したものであり、絶縁油枯渇現象を模擬したモデルである。また、Silicone oil /Silicone oil KP はシリコンオイルギャップ中でシリコンオイルに浸漬した KP、Solid oil/Solid oil KP はソリッドオイルギャップ中においてソリッドオイルに浸漬した KP を示している。シリコンオイルもしくはソリッドオイルに浸漬する場合は、180 分間の真空脱気浸漬処理を施した。KP にシリコンオイルを浸漬する場合は、室温で 180 分間の真空脱気浸漬処理を施した。ソリッドオイルに関しては、粘度が極めて高いため、およそ 100°C のお湯で 30 分間湯煎を行い、粘度を下げてから室温で 180 分間の真空脱気処理を施した。なお、実験は大気圧開放状態で行い、実験中に絶縁油中への空気中の水分の侵入および埃等の微粒子の侵入を防止する等の処理は行っていない。

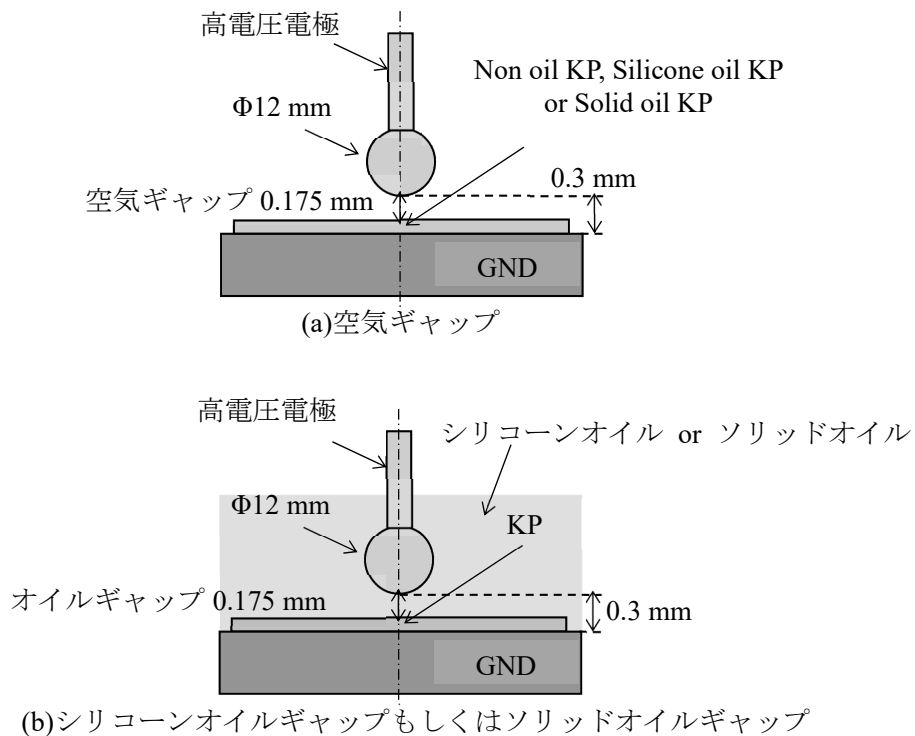


図 4.3 電極系

表 4.1 試料条件

		浸漬無	浸漬有	
			シリコンオイル (1000mm ² /s)	ソリッドオイル (9500mm ² /s)
周囲媒質	空気	Air/ KP	Air/Silicone oil KP	Air/Solid oil KP
	シリコン オイル		Silicone oil/ Silicone oil KP	
	ソリッド オイル			Solid oil /Solid oil KP

4.4 ソリッドオイル中における KP の直流 PDIV 特性

4.4.1 実験方法

図 4.2 の部分放電測定系を用いた。印加電圧は図 4.4 のような電圧上昇率 1 kV/min の直流ランプ電圧とした。

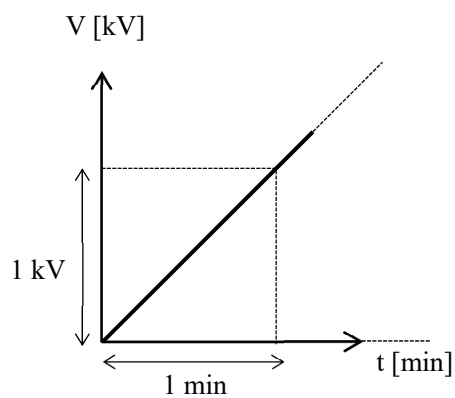
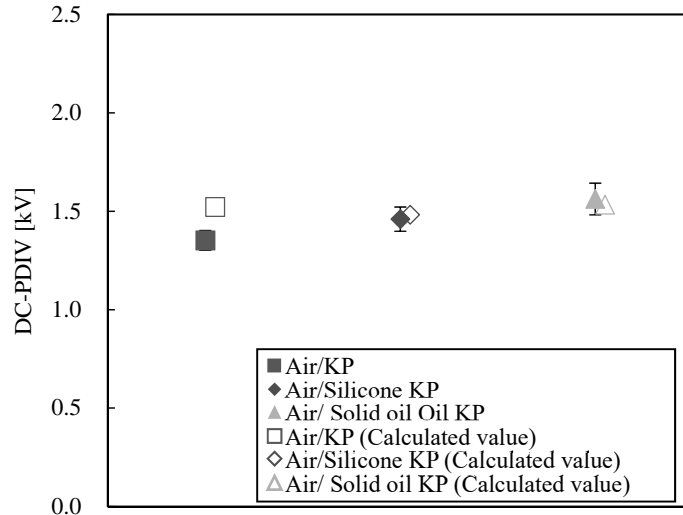


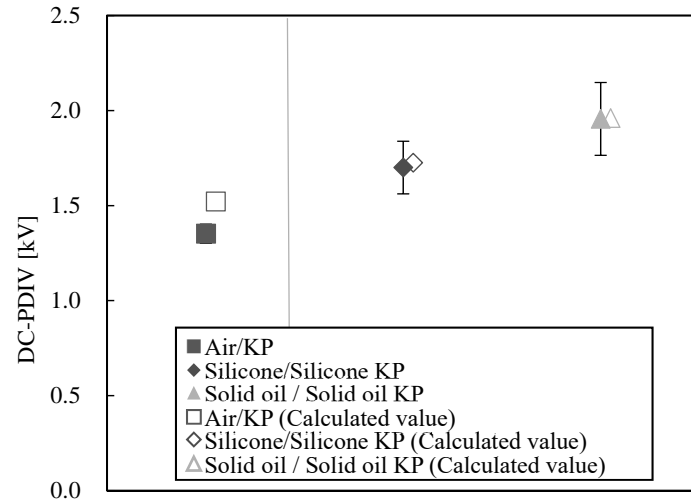
図 4.4 直流ランプ電圧

4.4.1 実験結果および考察

図 4.5(a)に空気ギャップ中の PDIV、図 4.5(b)に絶縁油ギャップ中の PDIV を示す。なお、図 4.5(b)における Air/KP の PDIV は空気ギャップであるため参考値(図 4.5(a)と同様)である。部分放電によって試料表面が炭化し測定値のばらつきの要因となる可能性があるため、測定は1つの試料で1回のみ行った。ただし、絶縁油は測定毎に取り換えてはいない。図中のプロットとエラーバーは、5回の測定の平均値と標準偏差をそれぞれ示している。



(a) 空気ギャップ



(b) 絶縁油ギャップ

図 4.5 空気および絶縁油ギャップにおける各条件の KP の DC-PDIV

ここで、本研究では球-平板電極系を採用しているため、PDIV は空気または絶縁油ギャップ中で発生すると考えられる。空気ギャップ(0.175 mm)の場合、PDIV 時にギャップにかか

る分担電圧は、パッシェン則⁽³⁾より 1.29 kV(7.37 kV/mm)であると考えられる。またギャップがシリコンオイルまたはソリッドオイルで満たされている場合、PDIV 時のギャップの分担電圧は、シリコンオイルおよびソリッドオイル単体の PDIV である。空気ギャップ同様に 0.175 mm にギャップ長を調整し、電圧上昇率 1 kV/min の直流電圧を印加して PDIV を測定した結果、シリコンオイルは 1.30 kV(7.43 kV/mm)、ソリッドオイルは 1.34 kV(7.66 kV/mm)であった。一般的に、絶縁油中の水分または微粒子の増加に伴い部分放電開始電界は減少することが報告されている⁽⁴⁾⁽⁵⁾。本研究では、実験前的高温真空脱気処理または実験中もフィルター等によって絶縁油中の水分および微粒子の除去を行っていないため、絶縁油単体の PDIV が減少したと考えられる。

図中の中抜きのプロットは、直流ランプ電圧下の PDIV が誘電率比による電圧分担⁽⁶⁾に基づくと仮定し図 4.6 の 2 層誘電体モデルに近似して計算した PDIV である。例えば、Air/KP の場合、 V_1 はパッシェン則より 1.29 kV(7.37 kV/mm)であるため、印加電圧を V とすれば、

$$V = ((\epsilon_{r1}d_2 + \epsilon_{r2}d_1) / \epsilon_{r2}d_1) \times 1.29 \text{ kV}$$

となる。表 4.2 に PDIV の計算に用いた各パラメーターをまとめた。

表 4.2 PDIV の計算に用いた各種パラメーター

	空気	シリコン オイル	ソリッド オイル	Air/KP	Silicone oil KP	Solid oil KP
比誘電率 (60Hz)	1	2.34	3.21	3.93	5.11	4.95
厚さ [mm]	0.175			0.125		

表 2 において、シリコンオイルの比誘電率はソリッドオイルに比べて小さいにも関わらず、KP に浸漬した場合、ソリッドオイルに浸漬した方が比誘電率は小さくなっている。これは、ソリッドオイル油の粘度が高いため KP 内部に気泡が残存しているためと考えられる。

図 4.5(a)、(b)より、ギャップが空気または絶縁油で満たされている場合、シリコンオイルもしくはソリッドオイル油を浸漬した KP は測定値と計算値がほぼ一致した。しかし、絶縁油を浸漬していない Air/KP の測定値は計算値より低くなった。図 4.7 に KP 断面の SEM 画像を示す。図 4.7 より KP 表面は凹凸が多いことが分かる。したがって、Air/KP の場合、球電極直下の KP 表面の凹凸に電界が集中したため測定値が計算値よりも低くなったと考えられる。一方、絶縁油を浸漬した場合には凹凸が絶縁油で埋まるため、局所的な電界集中が生じ難くなり、測定値と計算値がほぼ同等になったと考えられる。

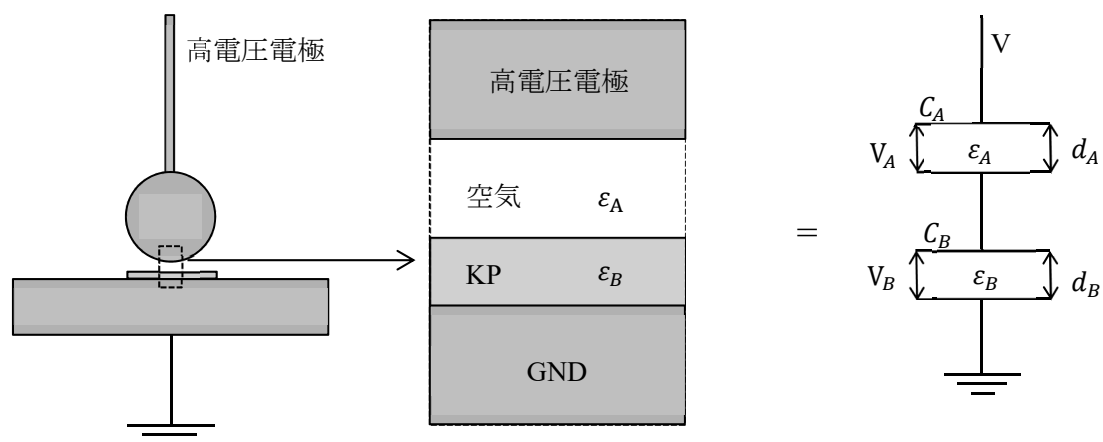
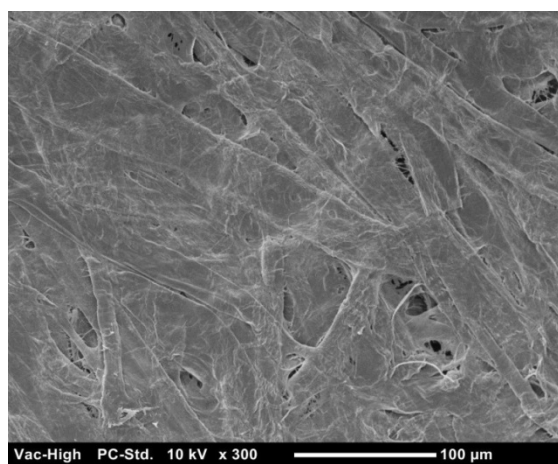
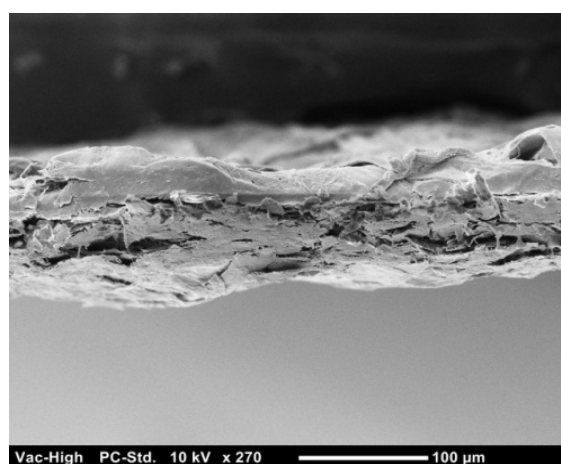


図 4.6 2層誘電体近似モデル



(a) KP 断面の SEM 画像



(b) KP 断面の SEM 画像

図 4.7 KP 断面の SEM 画像

4.5 ソリッドオイル中における KP の直流部分放電発生頻度特性 (直流ランプ電圧)

4.5.1 実験方法

図 4.2 の部分放電測定系を用いた。印加電圧は図 4.8 のような電圧上昇率 1 kV/min の直流ランプ電圧として、印加電圧が 8 kV まで昇圧する間に発生する部分放電の発生数および時間間隔を測定した。

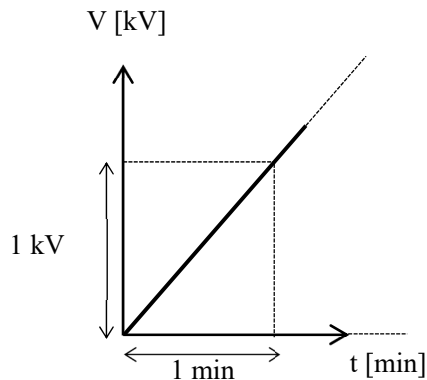


図 4.8 印加電圧パターン

4.5.2 実験結果および考察

図 4.9 に直流ランプ電圧下における空気ギャップおよび絶縁油ギャップ中の部分放電発生時の印加電圧と時間の関係を示す。また、図 4.10 に部分放電が発生した時の印加電圧と次に部分放電が発生した時の印加電圧の電圧差を ΔV として、それと発生時間の関係を示す。図 4.9 において、Solid Oil/Solid Oil KP を例とすれば、1 回目の部分放電発生電圧 V_1 は 2.10 kV 、2 回目の部分放電発生電圧 V_2 は 3.28 kV であるため ΔV は 1.18 kV となる。また、図 4.9 および図 4.10 において、時間 0 s は PDIV を表している。

図 4.9 より、絶縁油ギャップ中の部分放電の発生時間間隔は、空気ギャップ中に比べ長くなった。さらに、2 発目以降の部分放電に着目すると、部分放電の発生時間間隔は一定ではなく、徐々に短くなっている。ここで、試料表面は 1 発目の部分放電によって帯電する。図 4.11 に部分放電発生電圧と表面電位の関係を表したギャップ間の電位モデル図を示す。図 4.11 の実線が印加電圧、一点鎖線が表面電位を表している。例えば、1 発目の部分放電が 1 kV で発生し、試料表面が 1 kV に帯電したと仮定する。このとき、試料表面の帯電電荷が逃げ、表面電位が減衰しない場合、ギャップの分担電圧が 1 発目の部分放電発生電圧 1 kV と同等になったときに次の部分放電が発生すると考えられる。したがって、試料表面の帯電電荷が逃げない仮定の下では、次の部分放電は 2 kV で発生することになる。この仮定に基づけば、部分放電の発生時間間隔と ΔV は一定になる。しかし、図 4.9、4.10 より、部分放電

の発生時間間隔および ΔV は一定ではない。したがって、2発目以降の部分放電に関しては、試料の導電率に依存した帯電電荷の逃げも影響していると考えられる。一般的に材料の内部に比べ表面の電気伝導率が低いことから、絶縁紙-絶縁油複合系においては、KPを構成するセルロース繊維の表面電気伝導により、KP表面および内部へ帯電電荷が逃げると考えられる。そこで次節にて、各KPの体積抵抗率と表面抵抗率について検討した。

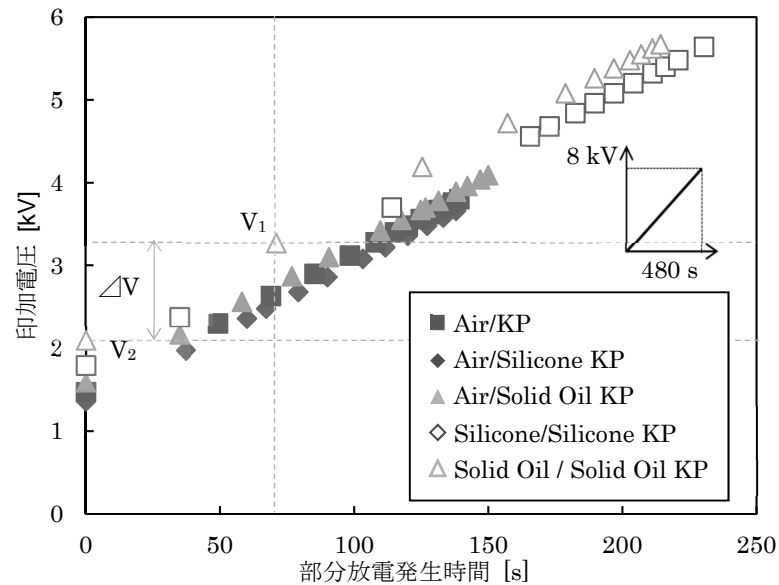


図 4.9 直流ランプ電圧下における直流部分放電の発生間隔

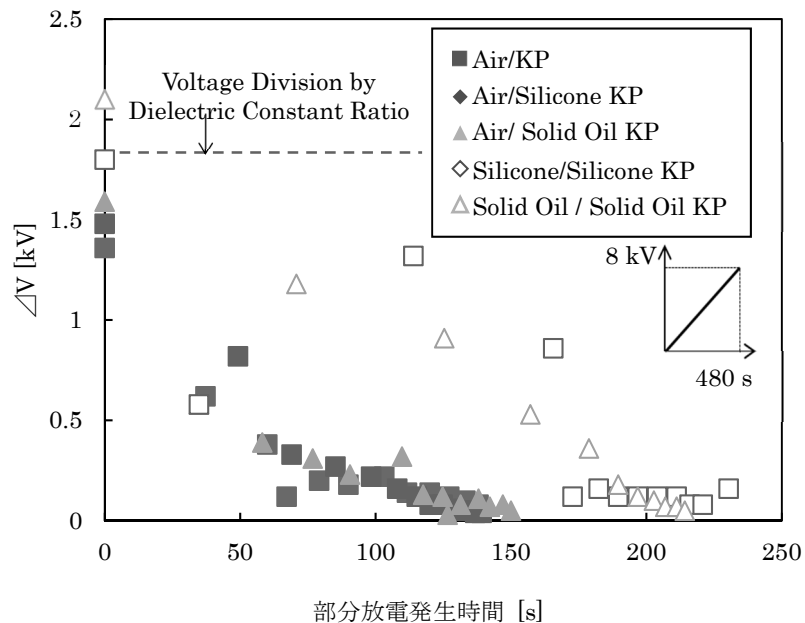
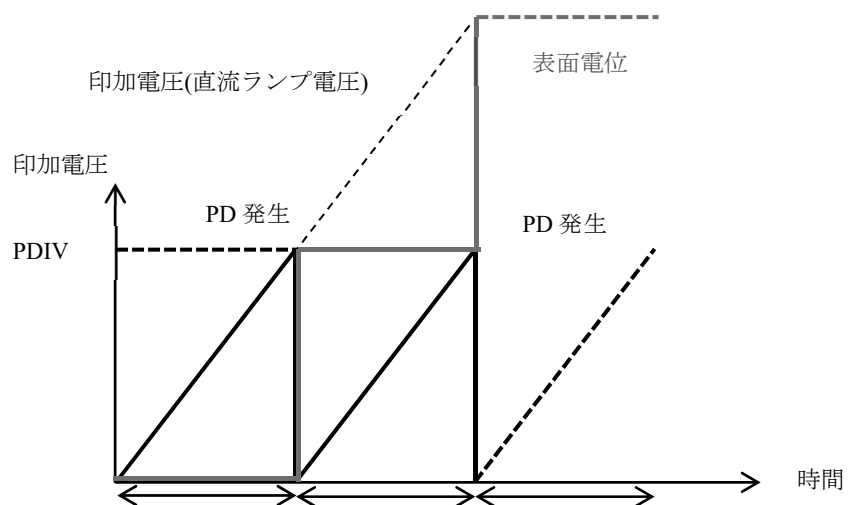
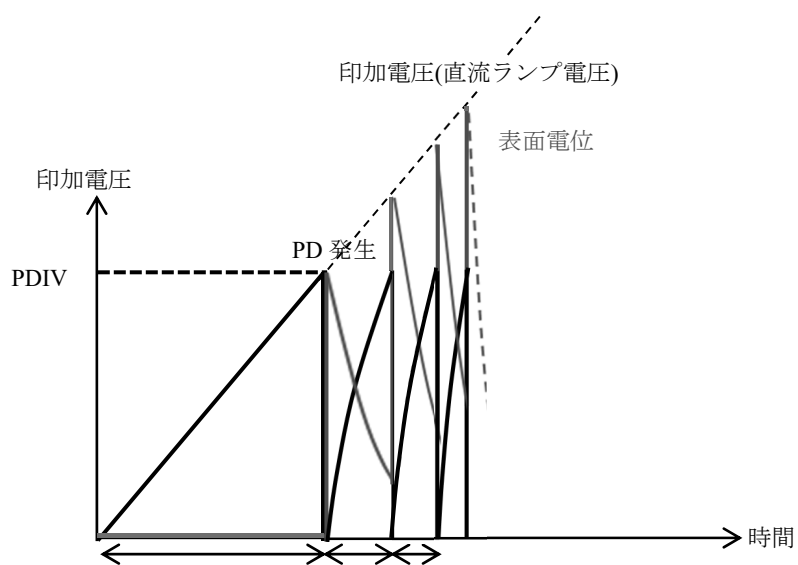


図 4.10 直流ランプ電圧下における直流部分放電の発生時間と発生電圧差



(a) 帯電電荷が逃げない場合



(b) 帯電電荷が逃げる場合

図 4.11 部分放電発生電圧と表面電位の関係を表したギャップ間の電位モデル図

4.6 体積抵抗および表面抵抗

4.6.1 伝導電流測定システム

図 4.12 に伝導電流測定試料、図 4.13 に伝導電流測定電極系を示す。KP の片面には直径 40 mm の Au 蒸着を施し、高電圧電極とした。他面には直径 28 mm の主電極、内径 32 mm および外径 40 mm のガード電極を同様に Au 蒸着にて施した。試料を電極系に挟み込み、図 4.14 の測定系を用いて、印加電圧 300 V の場合の伝導電流を測定した。また、図 4.15 の表面伝導電流測定電極系を用いて、同様に 300 V の場合の表面伝導電流を測定した。図 4.15 の表面伝導電流測定電極系は、電極として半導電シートを用いた。表面伝導電流測定の際には、試料に図 4.12 のような Au 蒸着を施さず、試料を半導電シートの上に置き、接触を良くするために上からアクリル板で挟み込んだ。

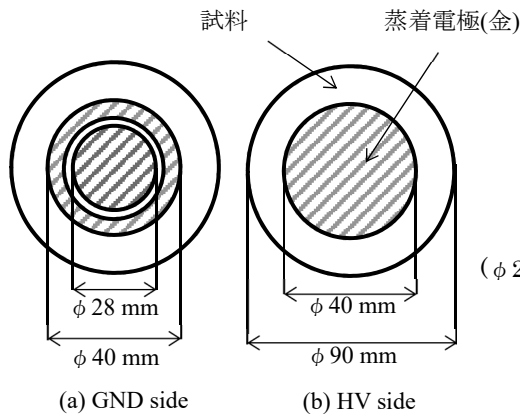


図 4.12 伝導電流測定試料

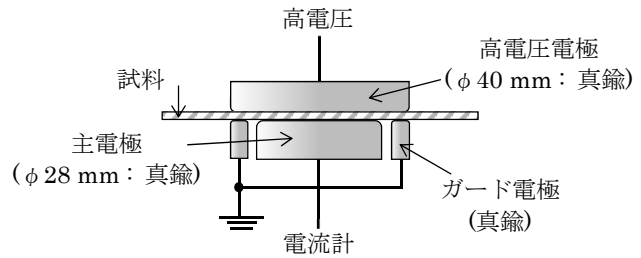


図 4.13 伝導電流測定電極系

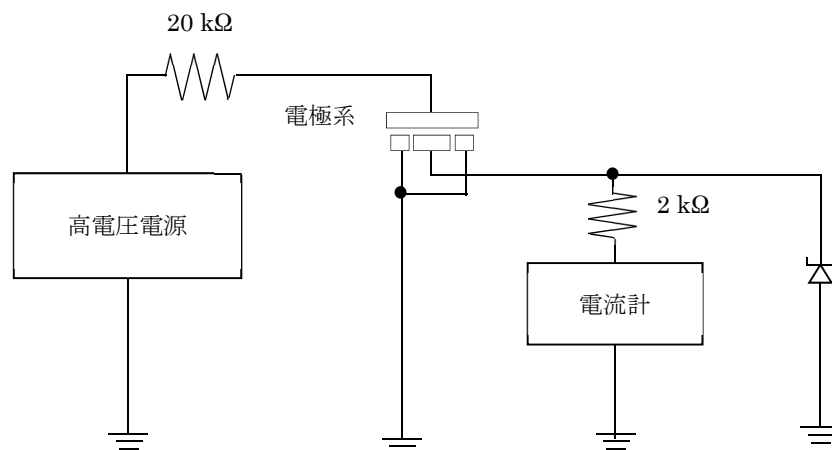


図 4.14 伝導電流測定システム

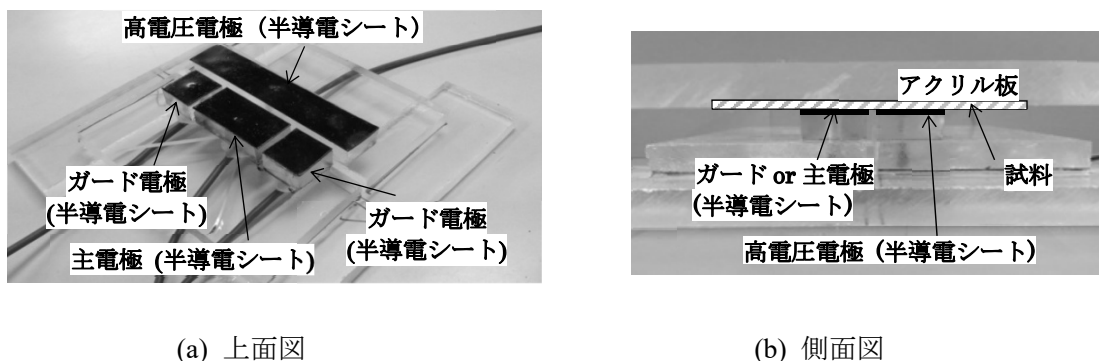


図 4.15 表面伝導電流測定電極系

4.6.2 実験結果および考察

図 4.16 に伝導電流測定結果から算出した体積抵抗率および表面抵抗率を示す。図 4.16 より、全ての条件において表面抵抗率は体積抵抗率より低くなった。

ここで、部分放電は球電極直下で生じ、KP の中心が部分放電によって帯電すると仮定する。この仮定に基づけば、各抵抗率と接地電極までの移動距離を考慮した場合、KP 内部の方が KP 表面より抵抗が小さくなる。したがって、部分放電による KP 表面の帯電電荷は KP 表面より KP 内部のセルロース繊維界面を逃がっている可能性が高いと考えられる。

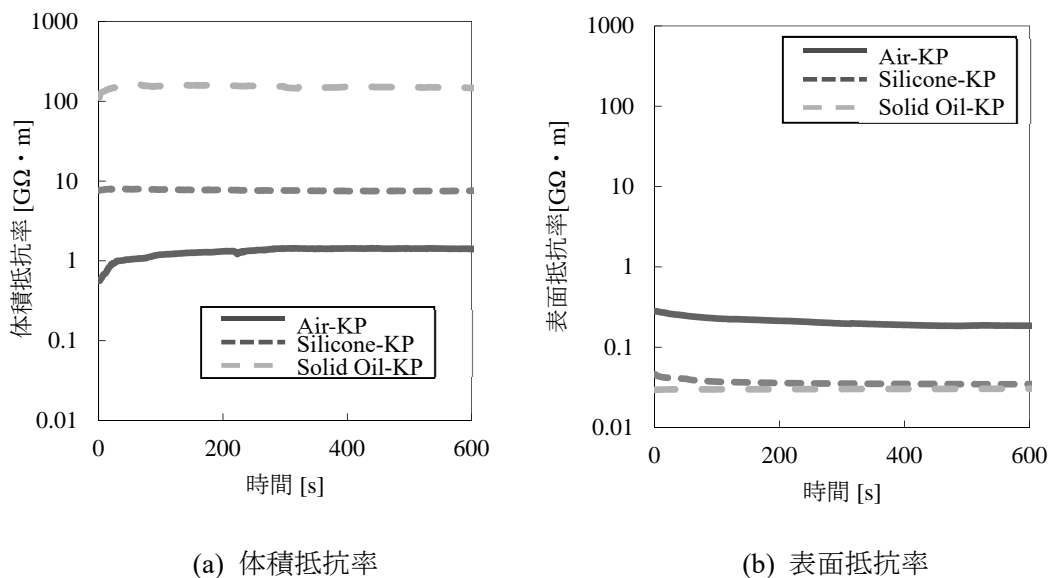


図 4.16 各 KP の体積および表面抵抗率

電荷の移動には電界の影響も考える必要があるが、4.5 節における直流ランプ電圧の検討は、時間ごとに電荷の移動のし易さが変化している。そこで、直流一定電圧下における部分放電発生頻度特性を取得し電荷の移動のし易さに関して詳細に検討した。次節にそれ述べる。

4.7 ソリッドオイル中における KP の直流部分放電発生頻度特性

(直流一定電圧)

4.7.1 実験方法

図 4.2 の部分放電測定系を用いた。印加電圧は図 4.17 のように PDIV の 2 倍まで電圧上昇率 1 kV/min で昇圧し、その後直流一定電圧で、600 s 間に発生する部分放電発生数および時間間隔を測定した。ここで、部分放電によって帯電した試料表面の電荷は、次の部分放電発生電圧に影響する。そのため、印加電圧値を PDIV の 2 倍に設定した。

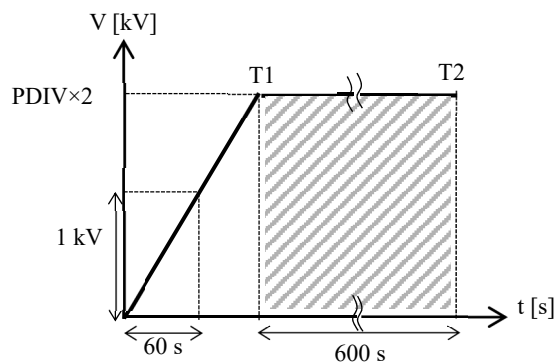


図 4.17 印加電圧パターン

4.7.2 実験結果および考察

図 4.18 に直流一定電圧下における空気ギャップおよび絶縁油ギャップ中の 600 s 間に発生した部分放電の発生時間推移を示す。

図 4.18 より、直流一定電圧を印加した場合、絶縁油を浸漬した KP は、浸漬していない場合に比べ部分放電発生の時間間隔が長くなった。これは直流ランプ電圧を印加した場合と同じ傾向である。さらに、絶縁油ギャップ中の結果に着目すれば、Solid Oil/Solid Oil KP は Silicone/Silicone KP よりも部分放電発生の時間間隔が長くなった。これは、シリコンオイルに比べ、高粘度絶縁油の粘度が高いため、帯電電荷の逃げが抑制されたことが原因と考えられる。ここで、図 4.18 より、Air/KP に着目すると、電圧印加後約 200 s 後に部分放電発生の時間間隔が徐々に間隔が長くなっている。この変化をより詳細に検討するために、空気ギャップ中において、部分放電が発生した時間と次に部分放電が発生した時間差を Δt とし、部分放電発生数との関係を図 4.19 の通りまとめた。図 4.17 における Air/KP を例にとれば、1 発目の部分放電を $t_1(6 \text{ s})$ とした場合、次の部分放電は電圧印加後 $t_2(21 \text{ s})$ 後に発生したため、 Δt は 15 s となる。図 4.19 より、Air/KP においてはおよそ電圧印加 200 s までは一定間隔で部分放電が発生し、それ以降の部分放電発生間隔はそれ以前よりも長くなった。4.6 節より、Air/KP の体積抵抗率は表面抵抗率より高いが、試料の沿面距離に比べて厚さ方向の

距離は非常に小さいことを勘案すれば、帯電電荷はセルローズ繊維表面を通して KP 内部を逃げると考えられる。したがって、はじめは KP 内部に電荷が存在しないため、セルローズ繊維表面を通して帯電電荷は KP 内部に逃げると考えられる。しかし、時間の経過と共に KP 内部に電荷は蓄積する。本研究では正極性直流電圧のみ印加しているため、KP 内部には正電荷が蓄積すると考えられる。したがって、KP 内部にある程度電荷が蓄積するとホモ空間電荷として作用し局所電界を緩和するため、KP 内部への帯電電荷の逃げは抑制されると考えられる。以上より、部分放電の発生時間間隔が変化したのは KP 内部への帯電電荷侵入の抑制に伴って、帯電電荷の逃げる経路が KP 表面に変化したためと考えられる。一方、絶縁油に浸漬した KP の場合においても、Air/KP 同様に部分放電の発生時間間隔が変化すると予想される。絶縁油の粘度に帯電電荷の逃げ易さに関係していると考えれば、高粘度絶縁油を用いた場合には、極めて長時間電圧が印加された際に部分放電発生時間間隔が変化すると考えられる。

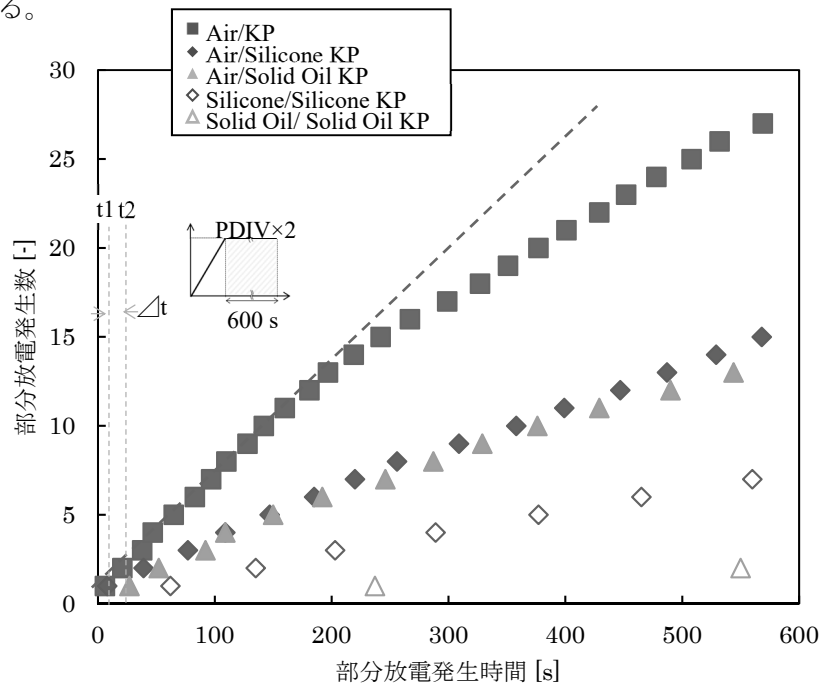


図 4.18 直流一定電圧下における直流部分放電発生頻度特性

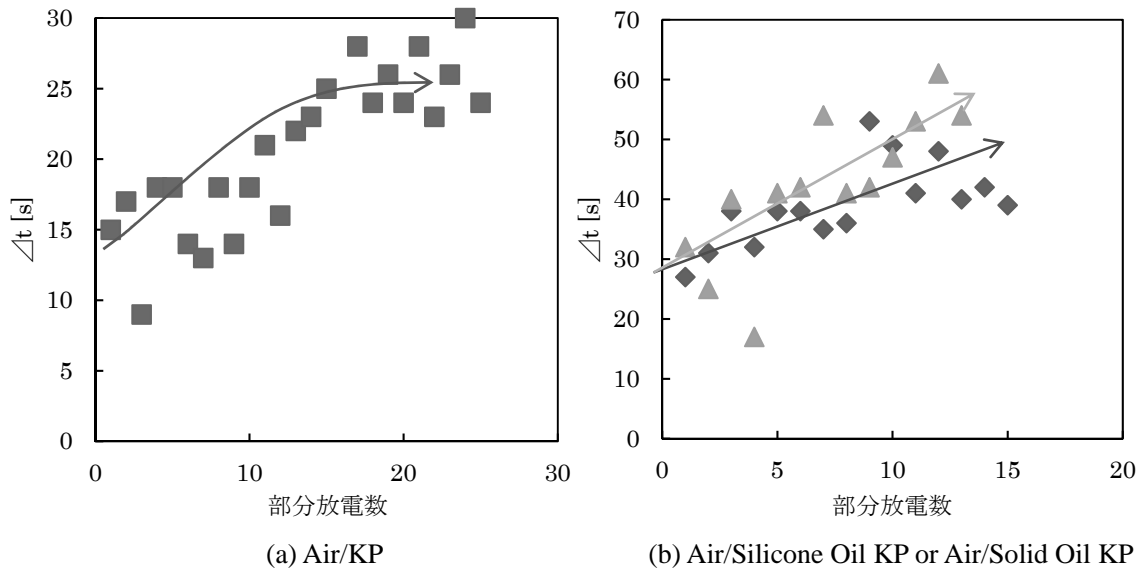


図 4.19 直流一定電圧下における直流部分放電の発生時間間隔

4.8 まとめ

非加圧・非給油型の長距離 DC ソリッドケーブルに採用されている絶縁紙-高粘度絶縁油複合系における部分放電特性と帯電挙動の関係を検討した結果、以下が明らかとなった。

- (1) 直流ランプ電圧下における PDIV は、Air/KP の場合、測定値と誘電率分担による計算値が一致しなかった。KP 表面は凹凸が多く、球電極直下の電界が局所的に集中したためと考えられる。一方、絶縁油を浸漬した KP は測定値が計算値とほぼ一致した。これは、KP 表面の凹凸が絶縁油で満たされたため、局所的な電界集中が生じ難くなったことが原因と考えられる。直流ランプ電圧下の PDIV は誘電率分担と仮定した場合、よく一致することがわかった。
- (2) 直流ランプ電圧を印加した場合の直流部分放電発生頻度測定の結果、部分放電発生時間間隔は一定でなく、電圧の上昇に伴って、徐々に短くなった。これは、はじめの部分放電により帯電した試料表面の帯電電荷の逃げ易さが、次の部分放電の発生に影響を与えているためと考えられる。
- (3) 直流一定電圧を印加した場合の直流部分放電発生頻度測定試験の結果、Air/KP は電圧印加後、放電発生時間間隔が変化し、徐々に時間間隔が長くなった。これは Air/KP の体積抵抗が表面抵抗よりも小さいため、はじめは帯電電荷が KP 内部を通して逃げるが、時間の経過と共に KP 内部に電荷が蓄積し、KP 内部への電荷の逃げが抑制され、表面を通して逃げるためと考えられる。また、絶縁油中においては 600 s 間の測定では、部分放電発生時間間隔の変化は確認できなかった。絶縁油中において電荷の移動が抑

制されると考えれば、高粘度絶縁油を用いた場合には長時間電圧が印加された際に、部分放電の発生時間間隔の変化が確認できると考えられる。

参考文献

- (1) Thomas Worzyk : “Submarine Power Cables Design, Insulation, Repair Environmental Aspects”, Springer, p.139, 2009.
- (2) 宮本, 土江 : 「電気絶縁油におけるイオン伝導」, 電気学会論文誌 A, Vol.98, No.1, pp.17-22, 1978.
- (3) 大久保 : 高電界現象論, オーム社, pp.85-94, 2011.
- (4) 電気学会 : 放電ハンドブック下巻, オーム社, p.91-92, 1998.
- (5) 岸田, 他 : 「絶縁油中の高電界電気伝導と破壊に及ぼす溶存水の影響究」, 電気学会雑誌 A, Vol.110, No.3, pp.190-196, 1990.
- (6) 小崎 : 高電圧・絶縁工学, オーム社, p.45, pp.49-50, 1997.

第 5 章 絶縁紙-液体窒素複合系の部分放電を介した 絶縁破壊と内部帯電

5.1 まえがき

国土が狭く、土木建設コストの高い我が国においては、既存の電力ケーブルを大容量超電導ケーブルに代替することにより、増大する都市部の電力需要に対処しようとする必要性が極めて高く、電力会社を中心とした高温超電導ケーブルの開発が進められている。このような背景から、21 世紀のコンパクト大容量地中送電として、超電導ケーブルの実用化が期待されている。超電導機器の最大のメリットは電気エネルギー輸送の低損失化、高密度・大容量化、機器サイズのコンパクト化にある⁽¹⁾。

2001 年～2002 年に超電導ケーブルシステムとしての実用性能検証及び課題の抽出を目的とした約 1 年間の長期試験 (66 kV - 1 kA - 114 MVA) が実施され、成功裏に終了したことが報告されている。また、この時用いられた 3 心一括超電導ケーブル技術を適用し、アメリカ Albany 市で 2006 年に世界で初めて実線経路形態での運用が実施された⁽²⁾⁽³⁾。この実証試験は 2008 年に終了しているが、ケーブルの設計から出荷、引き替え工事、さらにはメンテナンスや信頼性において良好に完了されたことが報告されている。日本においても 2007 年度からの 5 年計画で NEDO 技術開発機構の「高温超電導ケーブルの実証プロジェクト」が開始されており、実用化に必要な運用や保守・メンテナンス等を重視した実証試験が実系統に接続されて実施されている。

超電導ケーブル及びその他の超電導機器において、超電導導体の開発が重要であることは勿論であるが、機器の高信頼性を考慮した場合、電気絶縁が重要な技術課題となる。一方で、近い将来に石油代替の新しいエネルギー源は太陽光・風力等の再生可能エネルギーが想定される。このようなエネルギーを利用する場合、超電導技術を用いた直流送電は相性が極めてよい⁽⁴⁾⁽⁵⁾。高温超電導ケーブルの絶縁方式の一つとして、従来技術の延長である絶縁紙-液体窒素複合絶縁系がある。直流超電導ケーブルの絶縁方式には、安定性・信頼性の観点に加えて交流超電導ケーブルで数多くの実験例があることから絶縁紙-液体窒素複合系が有力候補として考えられる。この絶縁紙は、クラフト紙(KP)とポリプロピレンフィルム(PP フィルム)を積層した PPLP (Polypropylene laminated paper) であり、2006 年に世界で初めて行われた実系統での交流超電導ケーブルの実証試験に用いられたものである。しかしながら、PPLP を用いた油浸紙ケーブルを直流で用いた場合に絶縁紙内部への電荷注入がケーブルの絶縁性能を低下させる問題が発生しており⁽⁶⁾⁽⁷⁾、超電導ケーブルにおいても同様の問題が発生することが懸念される。PPLP を用いた 220 kV 級の直流超電導ケーブルの絶縁設計を行った報告⁽⁸⁾もあるが、交流に比べて直流絶縁性能が向上したことを実験的に示したのみで、

その絶縁破壊特性を電荷侵入メカニズムまで含めて検討した例は無い。本章では液体窒素環境下において KP、PP フィルム、PPLP の絶縁破壊に与える内部帯電の影響を明らかにすると共に、絶縁紙内部への電荷侵入メカニズムを示した。さらに、提案した電荷侵入メカニズムを基に電荷侵入を極力抑制した直流超電導ケーブルに最適な絶縁紙を提案した。

5.2 KP、PP フィルム、PPLP の直流・インパルス絶縁破壊特性

5.2.1 絶縁破壊試験回路および実験方法

図 5.1 に測定系を示す。直流絶縁破壊試験ではファンクションジェネレータの出力をアンプで増幅し試料に印加した。インパルス絶縁破壊試験では、インパルス発生装置で標準インパルス電圧($1.2\text{ }\mu\text{s}/50\text{ }\mu\text{s}$)を試料に印加した。各試料を電極の中心が一致するように電極間に挟み込み、大気圧沸騰状態の液体窒素に浸漬した。その後、試料の温度が定常状態になったことを確認してから上昇率 500 V/s の直流ランプ電圧もしくは立ち上がり $1.2\text{ }\mu\text{s}$ の標準インパルス電圧を課電し、絶縁破壊電圧を測定した。なお、インパルス絶縁破壊試験の際には、予想される絶縁破壊電圧よりも高いインパルス電圧を 1 発のみ印加することにより、インパルス電圧の波頭長内で絶縁破壊を生じさせた。得られた絶縁破壊電圧を試料の厚さで除して絶縁破壊の強さ(Fb)を算出した。

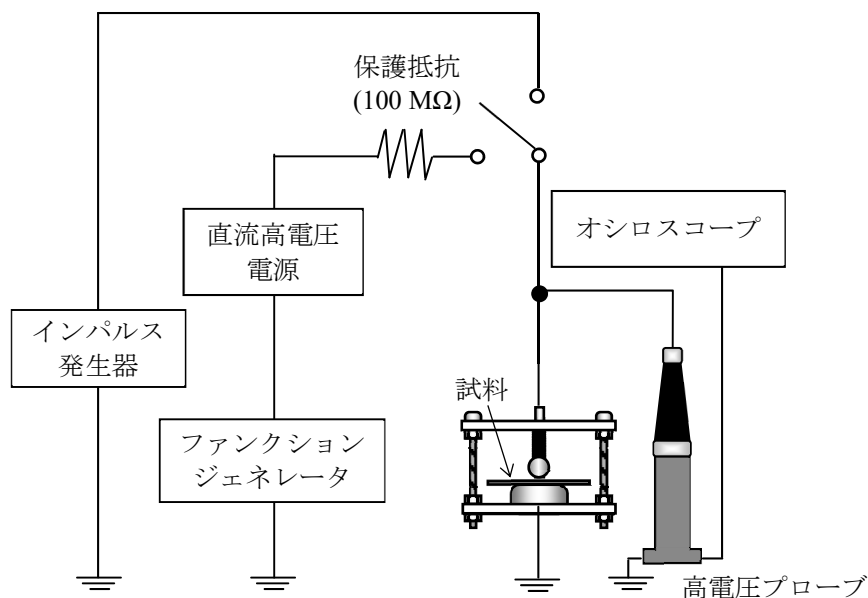


図 5.1 絶縁破壊試験回路

5.2.2 試料および電極系

試料として表 5.1 に示す KP、PP、PPLP を用いた。試料形状は直径 90 mm の円形 1 枚とした。図 5.2 に絶縁破壊試験に用いた電極系を示す。電極系は球 - 平板電極系とした。球電極は、SUS 製で直径 12 mm のものを用いた。平板電極は、SUS 製で直径 30 mm、端部曲率 2 mm のものを用いた。また、試料と電極を均一に接触させる目的で電極と電極支持板の間にバネを挿入した。

球 - 平板電極系では球電極と試料の間の放電を介して絶縁破壊が発生する。超電導ケーブルにおいても、4 章で検討した油浸漬ケーブル同様に絶縁紙の破損防止のためにバッドギャップを設けて絶縁紙を巻くため、バッドギャップ中の部分放電を介した絶縁破壊特性の理解が必要なものと考えられる。バッドギャップ中の部分放電を介した絶縁破壊を模擬するために、球 - 平板電極系を採用した。

表 5.1 試料の物性値

試料	紙密度 [g/cm ³]	厚さ [mm]	PP 比
KP	0.72	0.125	-
PP フィルム	-	0.069	1
PPLP	0.75	0.125	0.42

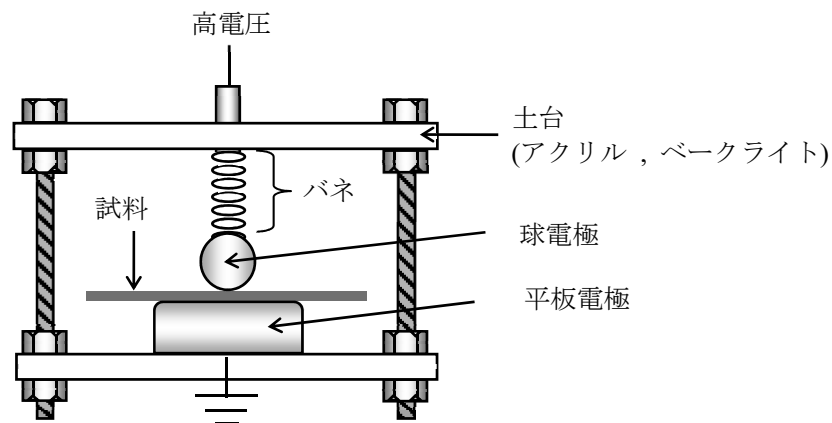


図 5.2 電極系

5.2.3 実験結果および考察

図 5.3 に液体窒素中における KP、PP フィルム、PPLP の直流絶縁破壊特性、図 5.4 にインパルス絶縁破壊特性を示す。図中のプロットおよびエラーバーは、約 10 点の測定値に対する平均値および標準偏差をそれぞれ示している。

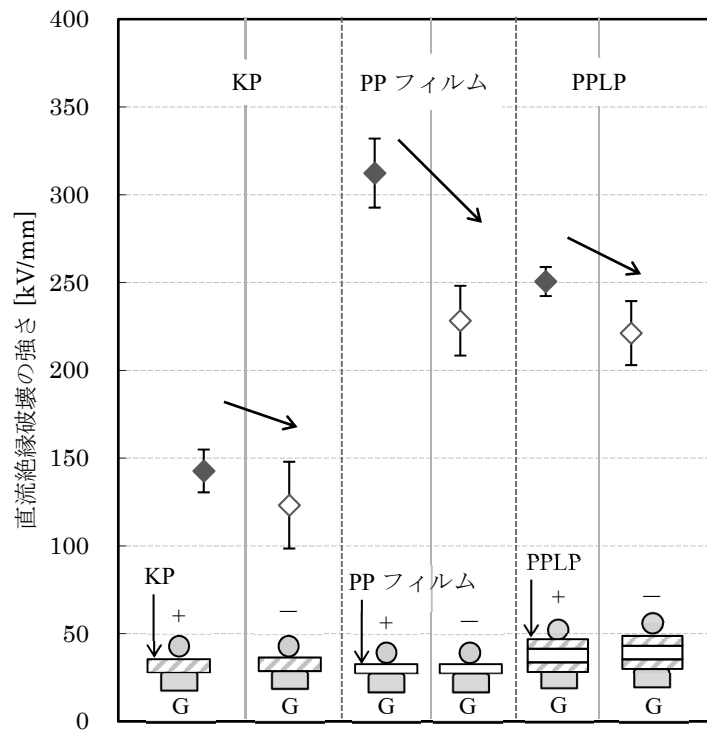


図 5.3 液体窒素中における KP、PP フィルム、PPLP の直流絶縁破壊特性

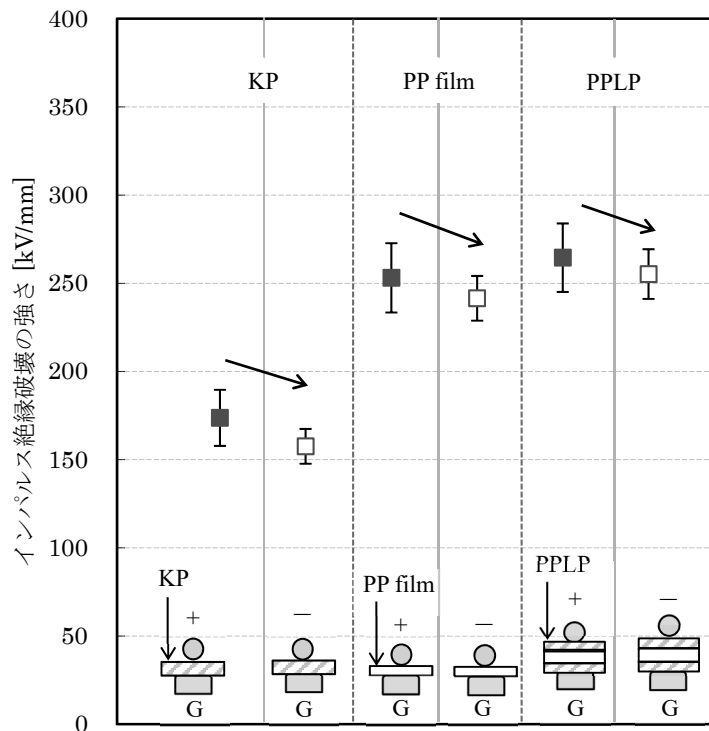


図 5.4 液体窒素中における KP、PP フィルム、PPLP のインパルス絶縁破壊特性

図 5.3、図 5.4 より、直流、インパルスともに PP フィルムの Fb が KP の Fb に比べて大きいことがわかる。KP はセルロース繊維が折り重なった構造のため、その構造は非常に疎であり弱点を多く含んだ材料である。一方、PP フィルムは高分子であるため、その構造は密であることから弱点が少ない材料と言える。したがって、PP フィルムの Fb が KP の Fb よりも大きくなった要因の一つとして、材料の構造の違いが考えられる。また、PPLP の Fb は PP フィルムの Fb に近い値になっている。PPLP は、Fb の低い KP 層を有していても、PP 層の高い Fb により、高い絶縁破壊の強さが保たれていると考えられる。

極性差に着目すると直流、インパルス共に、正極性に比べ負極性の Fb が減少していることがわかる。この極性効果はどの試料においても確認できる。また、直流の方がインパルスに比べて絶縁破壊の極性差が大きいことがわかった。これは、直流で大きな問題となる電荷侵入が影響していると考えられる。直流はインパルスに比べて印加時間が長いことから、絶縁破壊寸前には電荷侵入が進行していると考えられる。したがって、直流の方がインパルスに比べて極性差が大きくなったと考えられる。直流における PP フィルムの極性差が KP、PPLP よりも大きくなったのは、KP と PP フィルムの持つ以下の特性のためと考えられる。KP においてはストリーマが繊維間の微細な間隙を通して分散することにより、先端電界が緩和される。しかし PP フィルムはストリーマを分散させ、先端電界を緩和させるという現

象がほとんど見られず、ストリーマ侵食によって PP フィルム表面の弱点部が破壊され始めると、全路破壊につながる確率が高い⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾。この耐ストリーマ性の違いが直流における PP フィルムと KP、PPLP の極性差に影響していると考えられる。

図 5.5 に印加電圧極性によるストリーマの進展の違いを示す。

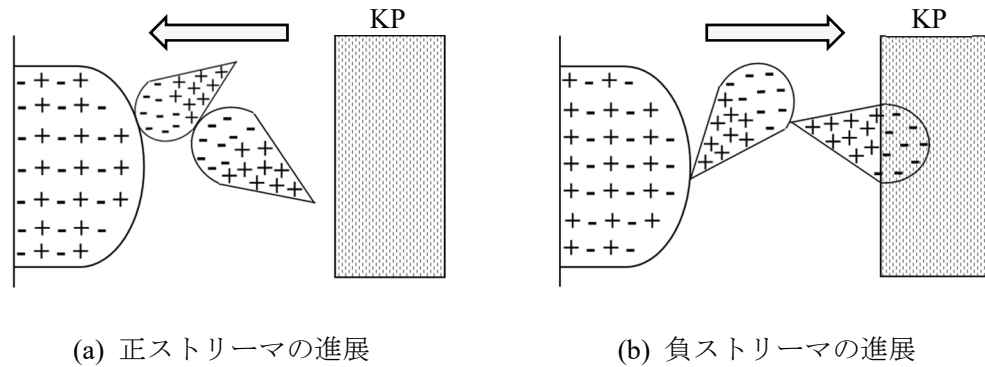


図 5.5 印加電圧極性によるストリーマの進展の違い

正極性インパルス印加時には正ストリーマが発生する。正ストリーマは、絶縁体もしくは周囲の媒質中から負電荷を引き寄せながら進展していく。そのため先端電界が高く、エネルギー密度も高くなる。一方で、負極性インパルス印加時には負ストリーマが発生する。負ストリーマは、電極から負電荷を放出しながら進展していくため放電は分散すると考えられる。これらのストリーマの進展特性の違いも極性差に影響していると考えられる。以上より、ストリーマの進展特性の極性効果と材料の耐ストリーマ性の組み合わせによって絶縁破壊の極性効果が変わる可能性がある。これについて、次項にて再度検討した。

5.3 液体窒素中における KP-PP 二層試料の絶縁破壊特性

5.3.1 KP-PP 二層試料

PPLP は KP-PP-KP の 3 層対象構造である。そのため、PPLP を電極系に挟み込み電圧を印加した場合、電荷の侵入する方向・種類を絶縁破壊の強さから判断することは難しい。そこで、PPLP から片面の KP 層を剥いだ試料である KP-PP 二層試料(図 5.6)を用いた。この KP-PP 二層試料の向きと印加電圧の極性を変化・組み合わせることにより電荷の侵入する方向・種類を制御した。KP-PP 二層試料の厚さは 0.097 mm であり、PP 比は 0.59 である。試料形状は直径 90 mm の円形 1 枚とした。電極系および絶縁破壊試験回路は 5.2 節と同様である。

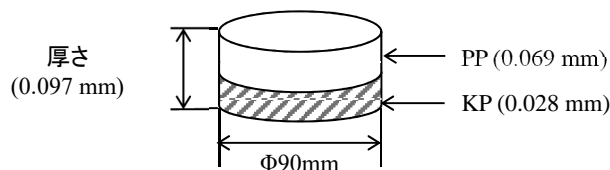


図 5.6 KP-PP 二層試料

5.3.2 実験結果および考察

図 5.7 に液体窒素中における KP-PP 二層試料の直流およびインパルス絶縁破壊特性を示す。図中のプロットおよびエラーバーは、約 10 点の測定値に対する平均値および標準偏差をそれぞれ示している。

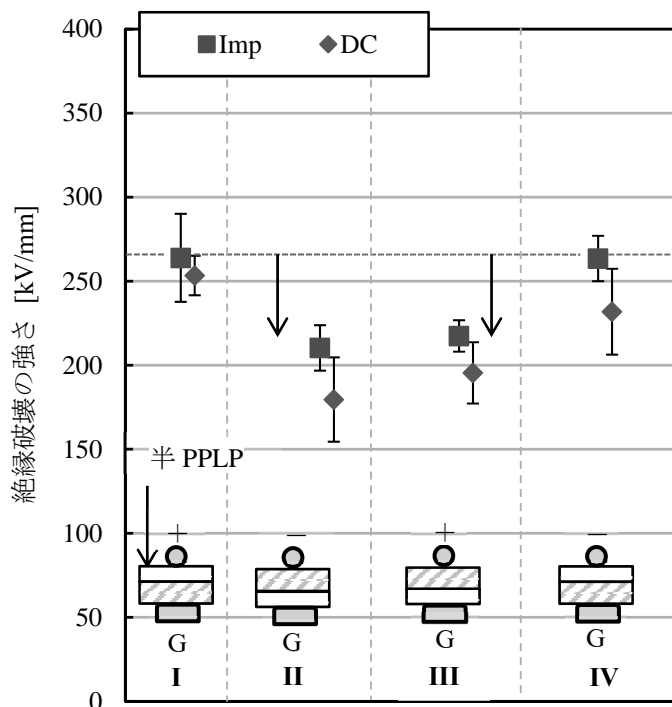


図 5.7 KP-PP 二層試料の直流およびインパルス絶縁破壊特性

図 5.7 より高圧電極側に KP がある構成(構成 I、II)ではインパルスと直流どちらも負極性印加時の方が正極性印加時より F_b が低下している。一方、高圧電極側に PP がある構成(構成 III、IV)ではインパルスと直流どちらも正極性印加時の方が負極性印加時より F_b が低下している。これらの結果を統一的に考えると、高圧側の極性に関らず KP が陰極側にある時の構成 II、III は、KP が陽極側である時の構成 I、IV に比べて、 F_b が低下していると考えられる。この結果を検討するために、液体窒素中において PP は空間電荷の注入が起こりにくい試料であるとの考え⁽¹¹⁾に加え、KP は負電荷が侵入し易い試料であるという仮定を導入す

る。この仮定に基づけば、陰極側に KP がある構成 II、III は KP に負電荷が侵入し、試料全体の実効厚さが薄くなったため、 F_b が低下していると説明できる。また、全ての構成でインパルスの F_b の方が直流の F_b よりも大きくなった。これはインパルスより印加時間の長い直流の方が KP への負電荷侵入が多いという点と PP フィルムへの電荷堆積が多いため、面積効果が影響していると考えられる。また、KP が陽極側にある構成 I、IV においては、KP が正ストリーマを分散させて先端電界を緩和するが、PP が負ストリーマに直接晒されるため、 F_b の低下を引き起こしていると考えられる。さらに、液体窒素中において KP に負電荷が侵入するという仮定を導入することで KP の F_b が負極性印加時に低下する結果も説明できる。この負極性印加時の負電荷侵入を詳細に検討するために、直流プレストレス試験を行った。次節にて詳細に述べる。

5.4 直流プレストレス試験による負電荷侵入の検討

5.4.1 直流プレストレス試験

直流プレストレス回路を図 5.8 に示す。直流プレストレス試験は絶縁体内部の電荷挙動を検討する一つの方法である。この方法は始めに一定時間直流電圧を印加し、試料内に積極的に電荷を注入する。その後、立ち上がり早いインパルス電圧を印加することで試料内の電荷挙動を固定した状態で絶縁破壊させる試験である。この試験から得られた絶縁破壊の強さと直流プレストレスを印加しない場合の絶縁破壊の強さを比較することによって、試料内の電荷の挙動について推測することができる。

電極系と試料は 5.3 節同様に球-平板電極系(球電極: ϕ 12 mm、SUS 製、平板電極: ϕ 30 mm、端部曲率半径 2 mm、SUS 製)と KP、PP フィルム、PPLP(表 5.2)をそれぞれ用いた。

表 5.2 試料の物性値

試料	紙密度 [g/cm ³]	厚さ [mm]	PP 比
KP	0.72	0.125	-
PP フィルム	-	0.069	1
PPLP	0.75	0.125	0.42

試料を電極の中心が一致するように挟み込み、大気圧沸騰状態の液体窒素に浸漬した。液体窒素が定常状態になったことを確認した後、10 kV のプレストレス電圧を 300 s 印加し、立ち上がり 1.2 μ s のインパルス電圧を印加し絶縁破壊させた。なお、予想される絶縁破壊電圧よりも高いインパルス電圧を 1 発のみ印加することにより、インパルス電圧の波頭内で絶縁破壊させた。実際に印加した電界パターンは図 5.9 の 4 種類である。球-平板電極系の極性を変化させることにより、侵入する電荷の種類と方向を制御した。得られた絶縁破壊電圧を試料の厚さで除して絶縁破壊の強さ(F_b)を算出した。

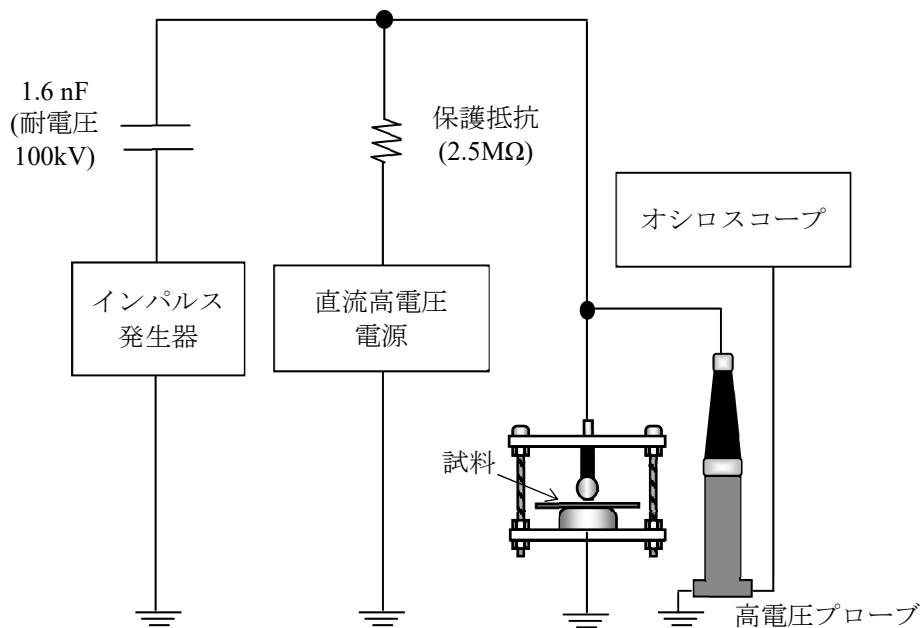


図 5.8 直流プレストレス回路

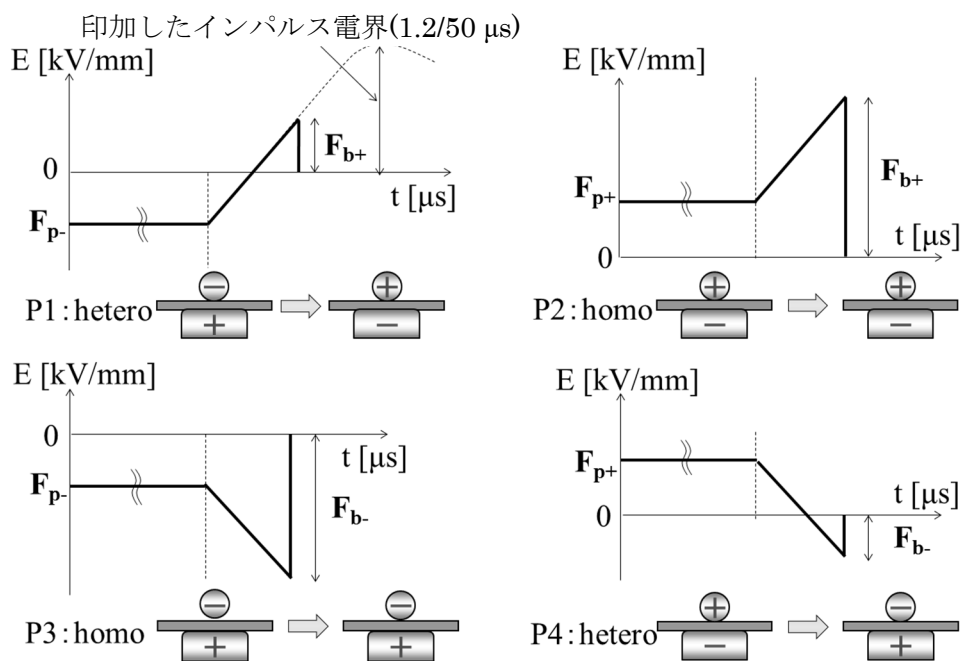


図 5.9 印加電界パターン

5.4.2 直流プレストレス印加時間の決定

図 5.10 に KP のインパルス絶縁破壊特性に及ぼす直流プレストレス印加時間の影響を示す。図中のプロットおよびエラーバーは、平均値および標準偏差をそれぞれ示している。また、図中の P1、P2 は図 5.11 における印加電界パターンに対応している。また、プレストレス電界印加時間 0 s は直流プレストレス無しの F_b (Imp- F_b) を示している。

図 5.10 より、直流プレストレス印加時間が 300 s で F_b は飽和傾向を示した。直流プレストレス電圧は、KP の直流絶縁破壊の強さ (DC- F_b) を基準にその半値である 10 kV としている。したがって、直流プレストレス電圧 10 kV、直流プレストレス印加時間 300 s とすれば直流プレストレス効果を十分に確認できることがわかった。これを基準として、PP フィルム、PPLP に対しても同様に直流プレストレス印加時間 300 s として直流プレストレス試験を行った。

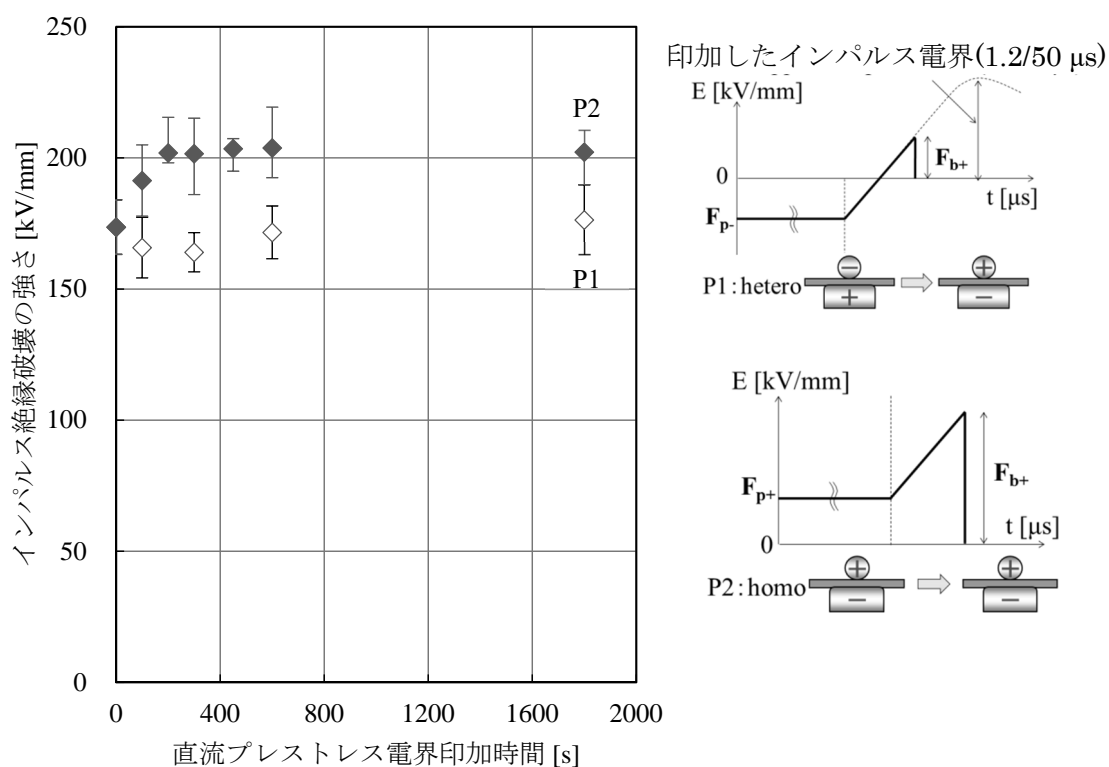


図 5.10 KP のインパルス絶縁破壊特性に及ぼす直流プレストレス印加時間の影響

5.4.3 KP、PP フィルム、PPLP のインパルス絶縁破壊に及ぼす電荷侵入の影響

図 5.11、図 5.12、図 5.13 に KP、PP フィルム、PPLP のインパルス絶縁破壊に及ぼす電荷侵入の影響を示す。図中のプロットおよびエラーバーは、平均値および標準偏差をそれぞれ示している。また、図中の P1 から P4 は図 5.9 の印加電界パターンに対応している。また、プレストレス電界印加時間 0 s は直流プレストレス無しの F_b (Imp- F_b) を示している。

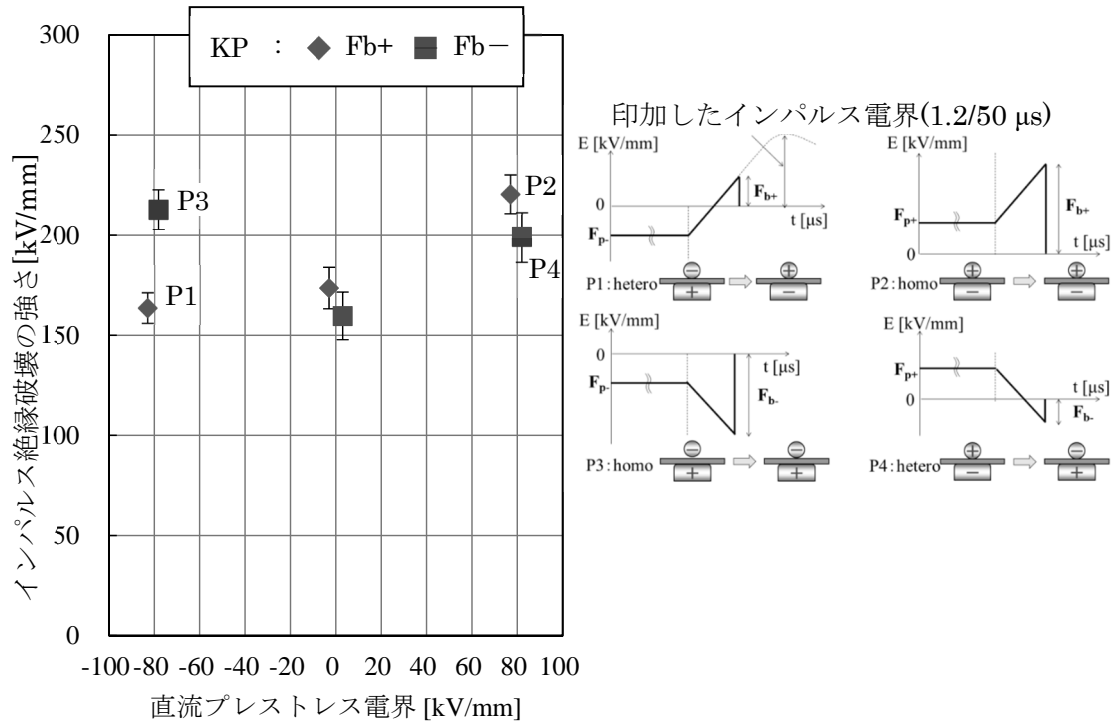


図 5.11 KP のインパルス絶縁破壊に及ぼす電荷侵入の影響

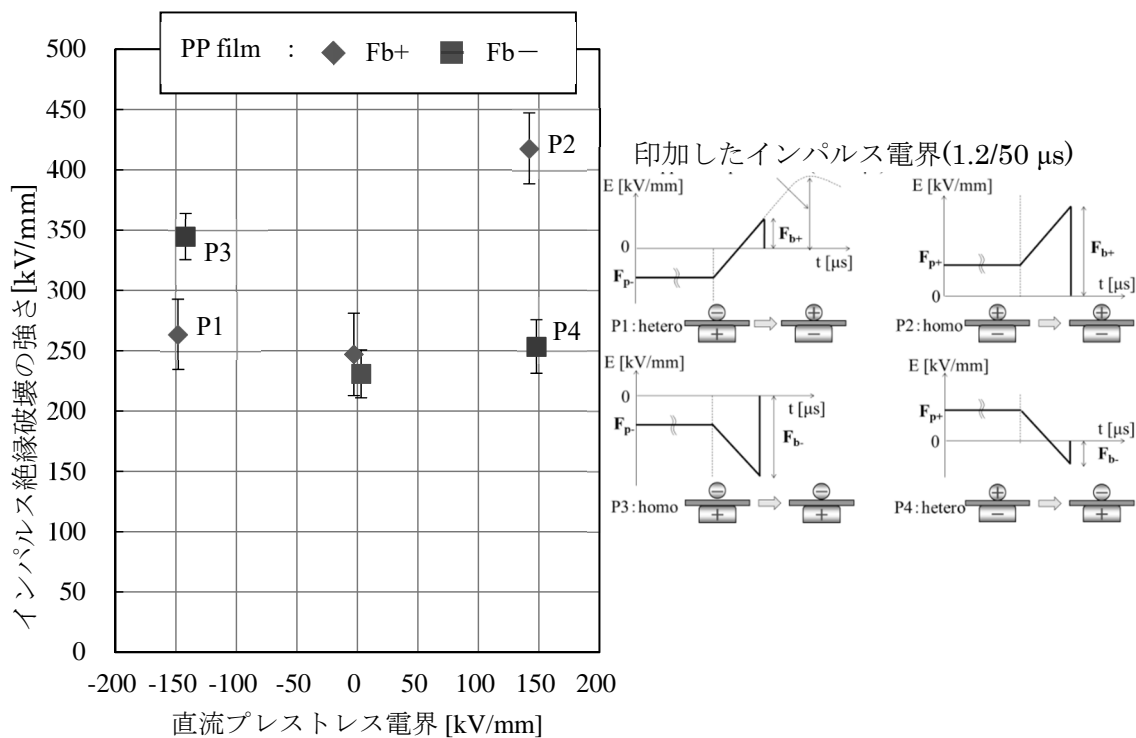


図 5.12 PP フィルムのインパルス絶縁破壊に及ぼす電荷侵入の影響

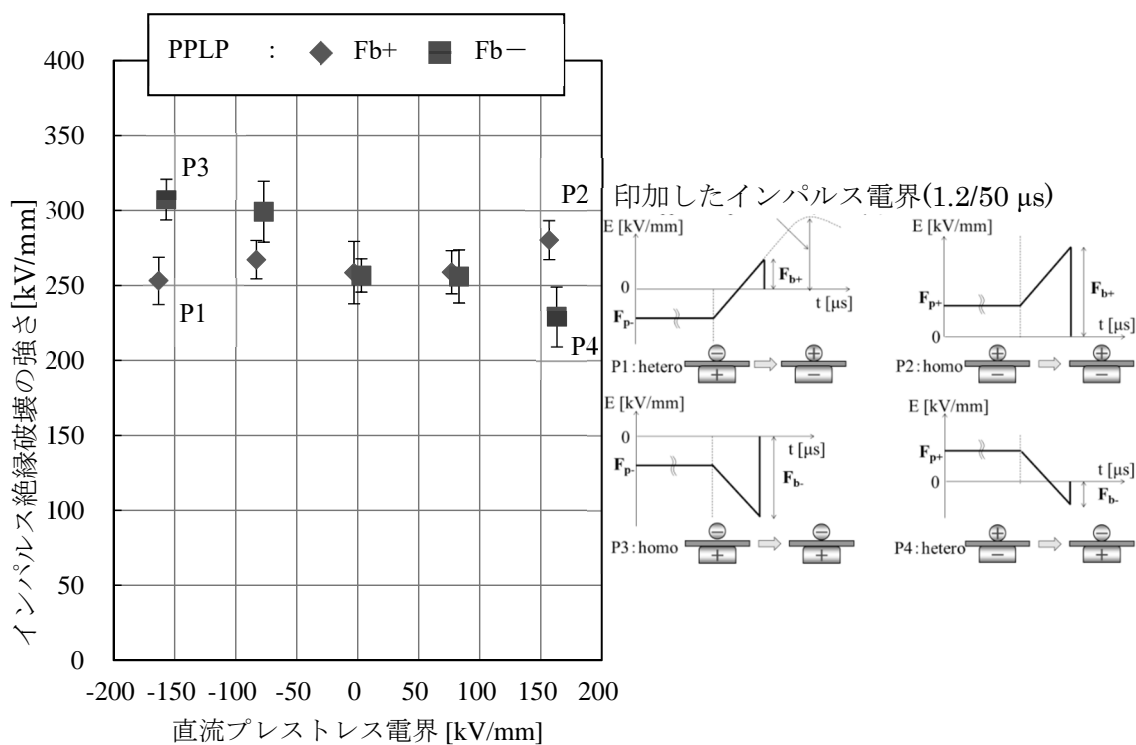


図 5.13 PPLP のインパルス絶縁破壊に及ぼす電荷侵入の影響

表 5.3 に各試料の印加電界パターンに対する絶縁破壊の強さの傾向を示す。

表 5.3 各試料の直流プレストレスに対する絶縁破壊の強さの傾向

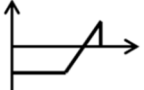
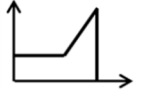
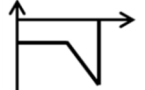
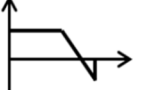
	P1 	P2 	P3 	P4 
PPLP	同等	増加	増加	減少
KP	同等	増加	増加	増加
PP film	同等	増加	増加	同等

表 5.3 より、P1、P2、P3 の電界パターンではどの試料も同様な直流プレストレス効果を示している。しかしながら、P4 においては試料毎に異なった直流プレストレス効果を示している。Bradwell による同様の直流プレストレス試験において、直流プレストレス電界とインパルス電界が同極性の場合にはホモ空間電荷効果により局所電界が緩和されるため F_b が上昇し、逆極性の場合にはヘテロ空間電荷効果により局所電界が強調されるため F_b が低下することが示されている⁽¹²⁾⁽¹³⁾。この一般的なプレストレス効果と比較すると、本研究で得られた P1、P4 の電界パターンの結果は一致しないことがわかる。特に P4 が印加された KP の F_b はヘテロ電界が印加されているにもかかわらず上昇することは非常に興味深い。そこで、P1 および P4 における直流プレストレス効果を試料構造が電荷侵入に与える影響を踏まえて一般的なプレストレス効果と異なった原因を考察した。

(a) KP

図 5.14 に P1、P4 における直流プレストレス印加時の電荷分布モデルを示す。液体窒素中における KP には負電荷が侵入し易いことが示唆されている。そこで、負電荷が正電荷に比べて多く侵入すると仮定してモデルを構築した。

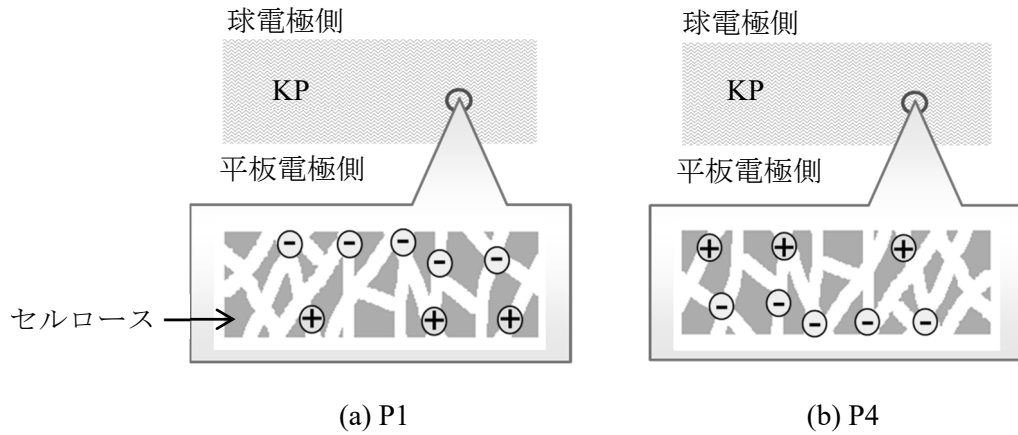


図 5.14 KP の P1、P4 における直流プレストレス印加時の電荷分布モデル

次に、インパルス電界が印加される直前の電荷分布モデルについて考える。図 5.15 に P1 におけるインパルス電界印加直前の電荷分布モデルを示す。

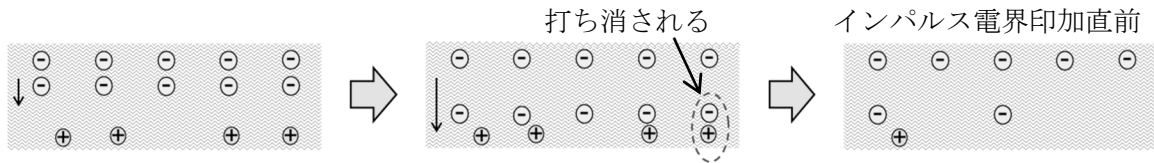


図 5.15 KP の P1 におけるインパルス電界印加直前の電荷分布モデル

KP には負電荷が侵入し易いことから、負電荷は KP の奥まで侵入すると仮定する。この仮定を踏まえれば、正電荷は侵入してきた負電荷により打ち消され、インパルス電界印加直前には KP 内部にほとんど存在しないと考えられる。この状態で、インパルス電界が印加された場合について考える。P1 は正極性インパルスを印加するため正ストリーマが発生する。正ストリーマが進展するためには液体窒素中の負電荷もしくは KP 内部の負電荷を引き抜く必要がある。絶縁体から負電荷を引き抜くことは非常に困難と考えられるため、正ストリーマ自身は KP 内部に侵入すること困難となり、その進展に KP 内部の電荷は影響を与えないと考えられる。したがって、KP に P1 の電界を印加した場合には、直流プレストレスの効果はほとんど影響が無くなり Imp-Fb とほぼ同等になったと考えられる。

図 5.16 に P4 におけるインパルス電界印加直前の電荷分布モデルを示す。

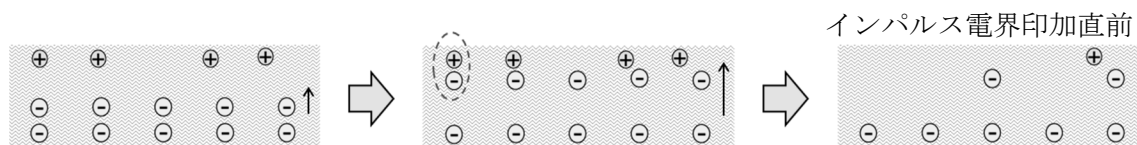


図 5.16 KP の P4 におけるインパルス電界印加直前の電荷分布モデル

P1 と同様に直流プレストレスによって負電荷が侵入し、インパルス電圧印加直前には KP 内部は負電が支配的と考えられる。P4 は負極性インパルスを印加するため負ストリーマが発生する。負ストリーマは負電荷を放出しながら進展していく。また、負ストリーマの先端電荷は負電荷であることから KP 内部に侵入し易いと考えられるため、その進展は KP 内部の電荷の影響を受け易いと考えられる。直流プレストレスによって KP 内部には負電荷が多く存在するため、負ストリーマの先端電界は緩和される。したがって、P4 の電界を印加した場合の KP はヘテロ電界が印加されているにも関わらず F_b が増加したと考えられる。

(b) PP フィルム

図 5.17 に P1、P4 における直流プレストレス印加時の電荷分布モデルを示す。

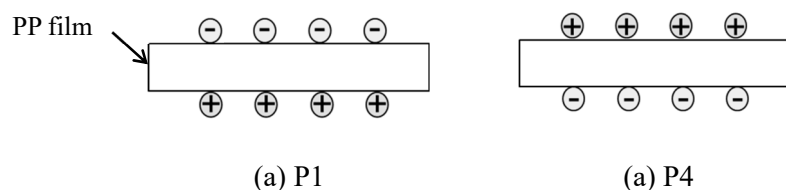


図 5.17 PP フィルムの P1、P4 における直流プレストレス印加時の電荷分布モデル

PP フィルムは液体窒素中において空間電荷が侵入し難いことが報告されている⁽¹¹⁾。したがって、直流プレストレスが印加されると、PP フィルム表面には電極の極性と同極性の電荷が蓄積すると考えられる。単純に蓄積した電荷が絶縁破壊寸前まで存在しているとする P1、P4 においては試料表面の電荷と逆極性のインパルスが印加されるため、局所電界が強調され F_b は減少するはずである。しかし、表 5.3 より P1、P4 の電界を印加した場合の F_b は $Imp-F_b$ とほぼ同等になった。ここで、逆極性インパルス電界が絶縁破壊電界まで立ち上がる間にすでに部分放電開始電圧に至っていることから、試料表面の電荷はこの放電により打ち消されると仮定する。この仮定を踏まえれば、PP フィルム表面の電荷は放電により打ち消されるため、直流プレストレスの効果が無くなり F_b が $Imp-F_b$ と同等になると考えることができる。

(c) PPLP

図 5.18 に P1、P4 における直流プレストレス印加時の電荷分布モデルを示す。

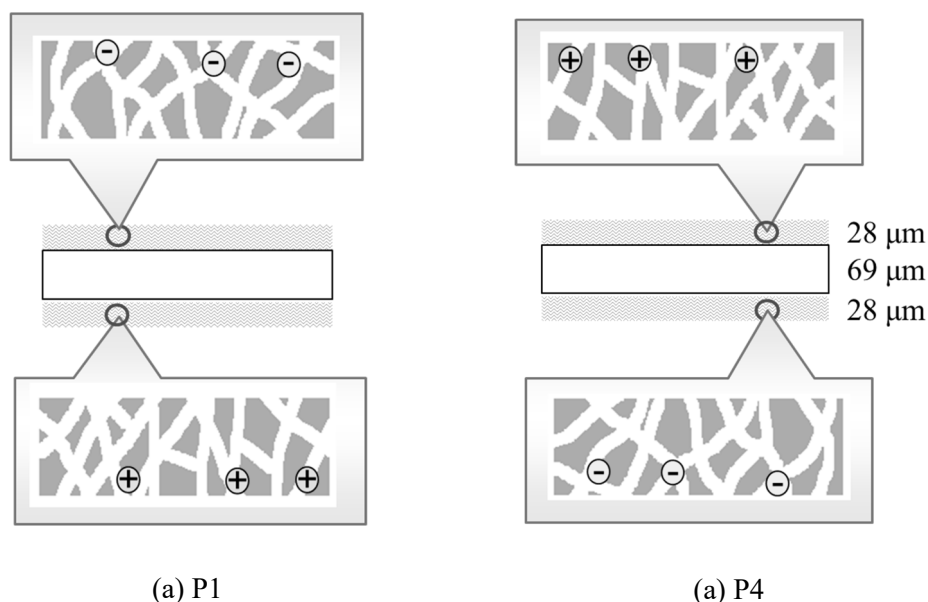


図 5.18 PPLP の P1、P4 における直流プレストレス印加時の電荷分布モデル

PPLP はセルロース繊維で構成される KP とポリプロピレンから構成される PP を積層した材料である。そのため、両者の特性を有していると考えられる。KP 層には負電荷が侵入する。しかし、電荷の侵入しない PP 層を有しているため、負電荷の進展はブロックされ KP のように負電荷が対向電極側の正電荷を打ち消すことはないと考えられる。次に、インパルス電界が印加される直前の電荷分布について考える。P1 においては正ストリーマ自身が KP 層内部に侵入することが困難なため、その進展は KP 層内部の電荷の影響を受けないと考えられる。したがって、PPLP に P1 の電界を印加した場合には、直流プレストレスの効果はほとんど影響が無くなり Imp-Fb とほぼ同等になったと考えられる。P4 においては負ストリーマの先端電荷は負電荷であることから KP 層内部に侵入し易く、その進展は KP 層内部の電荷の影響を受け易いと考えられる。KP 層内部には正電荷が存在するため、ヘテロ空間電荷として作用し局所電界が強調される。したがって、P4 の電界を印加した場合の Fb は減少したと考えられる。

以上の考察内で導入した電荷侵入の仮定をまとめると以下の通りである。

1. KP には負電荷が侵入し易い
2. PP フィルムは電荷が侵入し難く、表面に堆積し易い
3. 表面に堆積した電荷はインパルス電界が立ち上がる間に発生する部分放電によって大部分がキャンセルされる
4. PPLP は PP 層のブロッキング効果によって KP 層内に侵入した電荷が対向電極までは進展しない

5.5 KP 内部への負電荷侵入抑制効果の検討

5.5.1 検討方法

5.4 節より、KP 層内部に侵入した負電荷が PPLP の絶縁性能低下を引き起こす可能性が示唆された。KP 内部への電荷侵入メカニズムとしては、①部分放電、②セルロース繊維日表面の電気伝導が考えられる。しかし、極低温環境下においては電気伝導が抑制されるため、部分放電が負電荷侵入の主要因として考えられる。KP はセルロース繊維が折り重なった構造であるため、その内部に微小な空間を多数有している。この空間が存在するために液体絶縁体の浸漬性が良く絶縁紙単体としての特性よりも優れた絶縁特性を引き出すことができる、また侵入したストリーマを分散する効果があるためバリア層としての役割も果たすことができる。しかし、部分放電によって電荷侵入が生じる場合、KP 内部の微小空間は逆に弱点となると考えられる。このような考えの下、負電荷侵入抑制効果の以下の 2 つの方法によって検討した。

- ① 絶縁紙の絶縁破壊特性に与える透気抵抗度依存性
- ② 絶縁紙-氷複合系の部分放電特性および絶縁破壊特性との比較

5.5.2 絶縁紙の絶縁破壊特性に与える透気抵抗度依存性

5.5.2.1 試料および実験方法

表 5.4 に使用した試料の諸特性を示す。電極系は球-平板電極系(球電極: $\phi 12\text{ mm}$ 、SUS 製、平板電極: $\phi 30\text{ mm}$ 、端部曲率半径 2 mm 、SUS 製)を用いた。試料を電極系の中心と一致するように挟み込み、大気圧沸騰状態の液体窒素に浸漬した。液体窒素が定常状態になったことを確認した後、電圧上昇率 500 V/s の直流ランプ電圧もしくは立ち上がり $1.2\text{ }\mu\text{s}$ の標準インパルス電圧を印加し絶縁破壊させた。なお、予想される絶縁破壊電圧よりも高いインパルス電圧を 1 発のみ印加することにより、インパルス電圧の波頭内で絶縁破壊させた。得られた絶縁破壊電圧を試料の厚さで除して絶縁破壊の強さ(Fb)を算出した。

表 5.4 各試料の諸特性

試料	KP-A	KP-B	KP-C	KP-D
紙密度 [g/cm ³]	0.72	0.85	1.05	1.13
厚さ [mm]	0.125	0.100	0.102	0.074
透気抵抗度 [s/100ml]	1580	10800	9100	36800

5.5.2.2 実験結果および考察

透気抵抗度は、100 ml の空気が紙を通り抜けるまでの時間で定義される。放電が絶縁紙内部を通り抜けて貫通したときに絶縁破壊に至ると考えれば、透気抵抗度と放電の絶縁紙内部への侵入の間には相関があると考えられる。図 5.19 に KP の絶縁破壊の強さの透気抵抗度依存性を示す。図中のプロットおよびエラーバーは、約 10 点の測定値の平均値および標準偏差をそれぞれ示している。

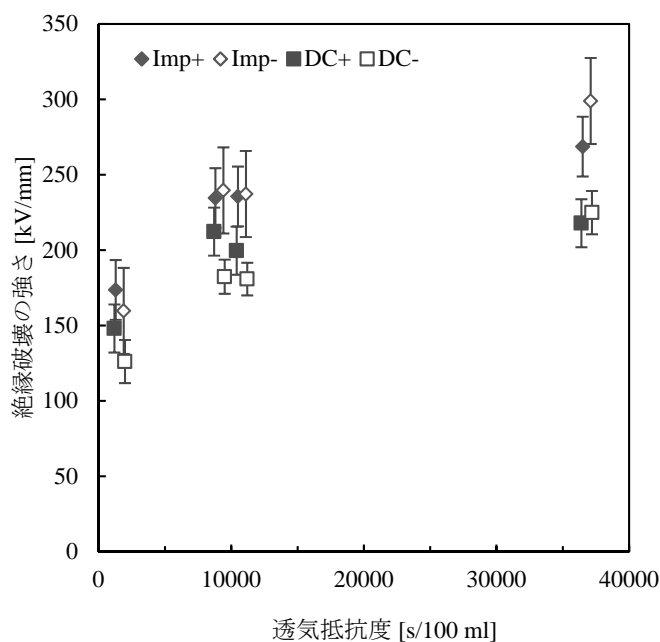


図 5.19 KP の絶縁破壊の強さの透気抵抗度依存性

図 5.19 より、透気抵抗度の増加に伴って F_b は増加した。これは、透気抵抗度が高い絶縁紙においては、絶縁破壊の経路が長くなるためと考えられる。

極性効果に着目すると、透気抵抗度が低い KP においては正極性 $F_b >$ 負極性 F_b に対して、透気抵抗度が高い KP においては正極性 $<$ 負極性 F_b となり、極性効果が反転している。正極性ストリーマは、先端電界およびエネルギー密度が高いことに加え、液体窒素中において進展が容易であることが報告されている。したがって、ストリーマの特性が主に絶縁破壊を決定しているのであれば正極性 $F_b <$ 負極性 F_b となることが予想される。透気抵抗度が低い KP

においては負電荷侵入による実行厚さの低下効果が正ストリーマの特性による F_b の低下効果よりも顕著に表れたため正極性 $F_b >$ 負極性 F_b と考えられる。以上より、絶縁紙の透気抵抗度を高くすることによって電荷侵入を抑制できる可能性が示唆された。

5.5.3 絶縁紙-氷複合系による電荷侵入抑制効果

5.5.3.1 試料

水は室温においては絶縁にとって天敵であるが、極低温においては電気伝導の抑制効果があるため優れた絶縁体となる。絶縁紙-氷複合系は、絶縁紙内部を氷で満たした絶縁系であり、絶縁紙内部の液体窒素の気化に伴う部分放電を排除できるため、絶縁紙-液体窒素複合系よりも絶縁破壊特性および部分放電特性に優れていること等が報告されている。本研究では、絶縁紙内部が氷で満たされているため、部分放電による電荷侵入の抑制が可能であると考えた。また、絶縁紙-氷複合系は部分放電のエネルギーを氷の融解熱に消費できるため、耐部分放電性が高く且つ電荷侵入を抑制した次世代直流超電導ケーブルの電気絶縁構成の候補としても有望である。

厚さ 0.1 mm、密度 0.85 g/cm³ のクラフト紙を約 90℃のイオン交換水に浸漬し、常温により 90 分間、真空脱気による含浸処理を行った。その後、大気圧沸騰状態の液体窒素に試料を浸漬し、絶縁紙 - 氷複合材料とした。

5.5.3.2 電極系

図 5.20 に電極系を示す。電極系として、球-平板電極系を用いた。球電極は SUS 製で直径 12 mm、平板電極は SUS 製で 30 mm、端部曲率 2 mm である。部分放電は球電極と試料間の液体窒素ギャップにて発生すると考えられるため、液体窒素ギャップをエポキシ樹脂でモールドしたモールド球-平板電極系も用いた。エポキシ樹脂は、主剤(XNR2509)と硬化剤(XNR2509)を 10 対 3 の割合で混合し、20 分間の真空脱気処理を行ってから、60 ℃ の恒温槽で 24 時間以上硬化させることによって、モールド球電極を作製した。

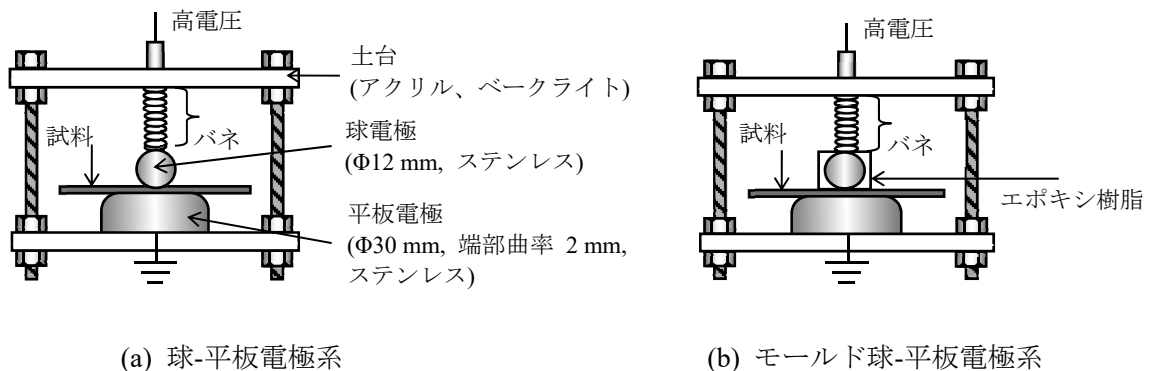


図 5.20 電極系

5.5.3.3 絶縁破壊および部分放電測定システム

図 5.21 に絶縁破壊と部分放電の同時測定システムを示す。電圧上昇率 500 V/s の直流ランブ電圧を印加し、絶縁破壊が生じるまでの部分放電を計測した。CD-5 の出力電圧から換算される放電電荷量が 250 pC を超えた場合を部分放電と定義した。

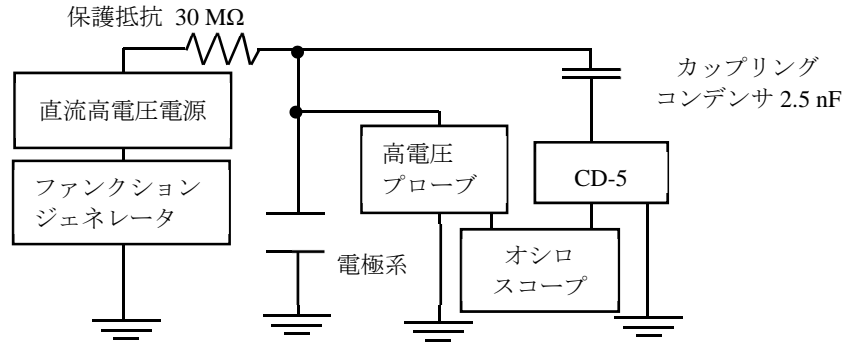


図 5.21 絶縁破壊と部分放電の同時測定システム

5.5.3.4 実験結果および考察

図 5.22 にモールドの有無による絶縁紙-氷複合系の絶縁破壊特性の変化を示す。プロットは 5 点の測定値の平均値でありエラーバーは標準偏差を示している。

図 5.22 より絶縁紙-液体窒素複合系および絶縁紙-氷複合系の F_b はモールド電極を用いることによって増加した。極性効果に着目すると、絶縁紙-液体窒素複合系はモールドの有無に関わらず正極性 $F_b >$ 負極性 F_b であるのに対して、絶縁紙-氷複合系はモールド無しの場合には極性効果がほぼ確認できないが、モールドすることによって正極性 $F_b <$ 負極性 F_b となった。

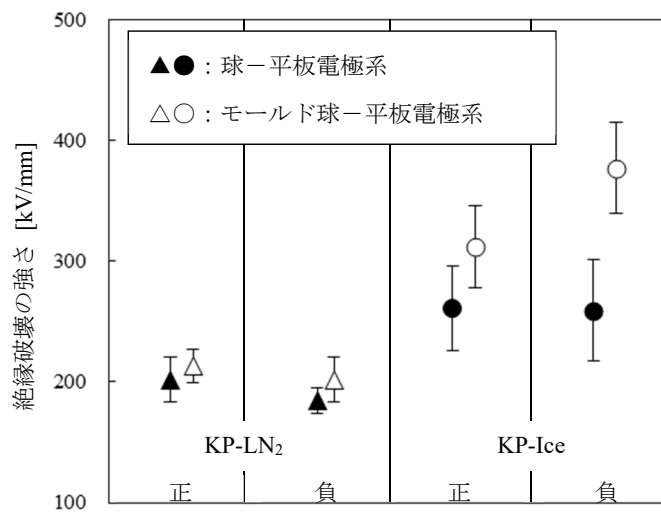


図 5.22 モールドの有無による絶縁紙-氷複合系の絶縁破壊特性の変化

絶縁紙-液体窒素複合系の負極性 F_b の低下は前節までの議論と同様に負電荷の侵入に伴った実行厚さの低下が原因と考えられる。絶縁紙-氷複合系においては、絶縁紙内部が氷で満たされたことによる電荷侵入の抑制効果があると考えれば負極性 F_b が正極性 F_b よりも低下しないことが説明できる。

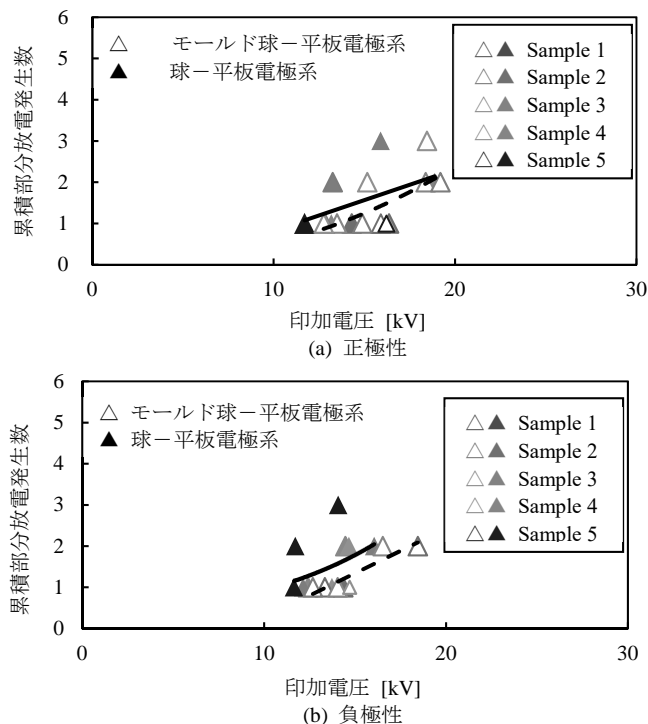


図 5.23 絶縁紙-液体窒素複合系の絶縁破壊までの累積部分放電発生数

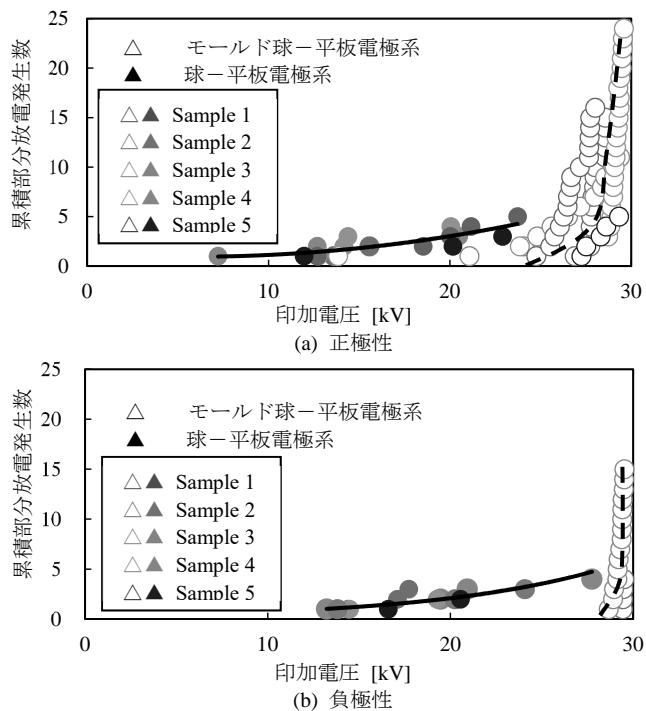


図 5.24 絶縁紙-氷複合系の絶縁破壊までの累積部分放電発生数

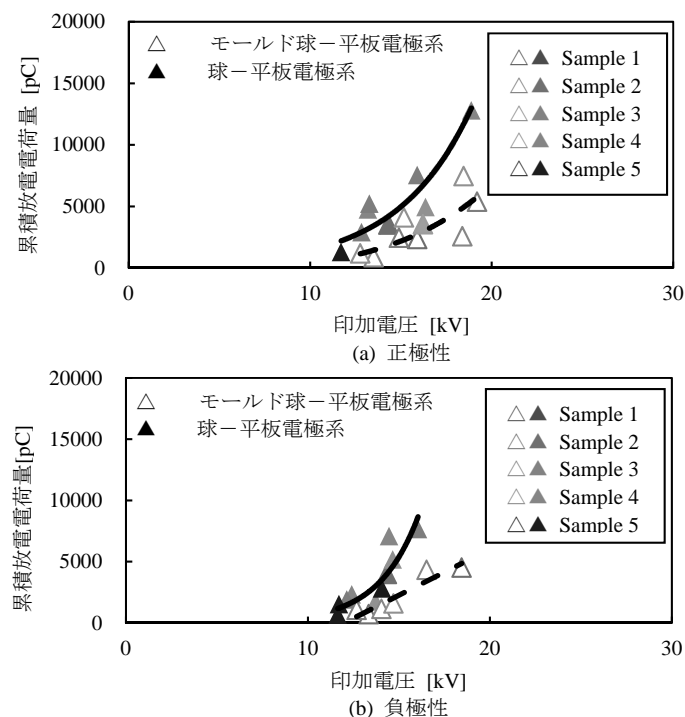


図 5.25 絶縁紙-液体窒素複合系の絶縁破壊までの累積部分放電電荷量

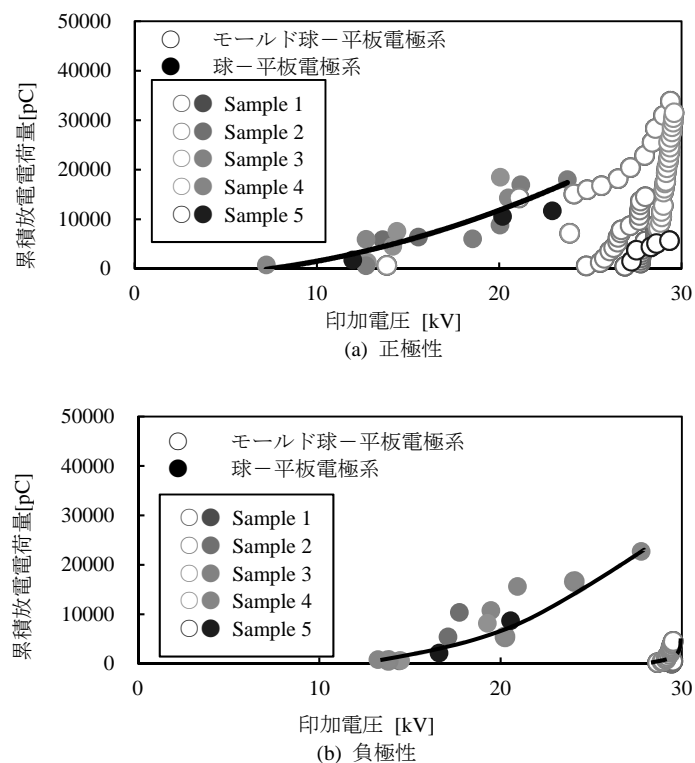


図 5.26 絶縁紙-水複合系の絶縁破壊までの累積部分放電電荷量

図 5.23、図 5.24、図 5.25、図 5.26 は絶縁破壊までの累積部分放電発生数と累積部分放電電荷量である。絶縁紙-液体窒素複合系においては、モールド電極の有無によってどちらの特性も大きく変化していない。モールド電極は液体窒素ギャップ中の部分放電を抑制できるが、エポキシ樹脂と試料界面の沿面放電が生じ易くなり、それがモールド電極系における部分放電特性に影響を与えていると考えられる。部分放電特性が大きく変化しないため絶縁破壊の極性効果もモールドの有無によって変化しなかったと考えられる。一方で、絶縁紙-氷複合系においてはモールド電極の有無による部分放電特性の変化が顕著である。特に負極性においては 3/5 の試料は絶縁破壊まで本実験の測定感度範囲内の放電が一度も観測されなかった。これが、モールド電極系における絶縁紙-氷複合系の負極性 F_b の増加に起因していると考えられる。

モールド無し電極における絶縁紙-氷複合系の部分放電特性および絶縁破壊特性は正負に大きな差はない。絶縁紙-液体窒素複合系の部分放電特性においても同様に正負の極性差は確認できないが、絶縁破壊特性には極性効果が確認できる。したがって、絶縁紙-氷複合系においては負極性において部分放電が発生したとしても電荷侵入が抑制されているため F_b が低下しなかったと考えられる。以上より、絶縁紙内部を氷で満たすことによって部分放電に電荷侵入を抑制できる可能性が示唆された。

5.6 まとめ

直流超電導ケーブルにおける絶縁紙-液体窒素複合系の部分放電を介した絶縁破壊に与える空間電荷の影響を検討した結果、以下が明らかとなった。

- (1) KP、PP フィルム、PPLP の直流・インパルス絶縁破壊試験を液体窒素中において行った結果、どの試料においても負極性印加時の F_b が正極性印加時の F_b に比べて低くなった。
- (2) KP-PP 二層試料の直流・インパルス絶縁破壊試験を行った結果、KP が陰極側にある構成において F_b が低下した。KP 内部に負電荷が侵入し、PP フィルムには空間電荷が侵入しないと仮定すれば、KP 内部に負電荷が侵入し実効厚さが低下したため F_b が低下したと説明することができる。
- (3) KP、PP フィルム、PPLP の直流プレストレス効果は直流プレストレス電界と逆極性のインパルス電界を印加した場合に Bradwell 等による一般的な直流プレストレス効果と異なった。
- (4) KP は負電荷が侵入し易く、対向電極側の正電荷は KP 内部に侵入しても負電荷により多くが打ち消されると仮定すれば、負極性インパルスが印加された際には負極性ストリーマの先端電荷が負電荷であるため KP 内部の負電荷がホモ空間電荷として作用し局所電界を緩和したため F_b が増加すると考えられる。

- (5) インパルス電界が印加された場合、既に部分放電開始電圧に到達していると考えれば、電荷が内部に侵入し難い PP フィルムにおいて試料表面に電荷が蓄積しても打ち消されてしまい、直流プレストレスの効果がほぼ無くなると考えられる。
- (6) PPLP は、PP 層があるため KP 層内部に侵入した負電荷は対向電極まで移動ができず、正電荷を打ち消すことがないため、負極性インパルスが印加された際には負極性ストリーマの先端電荷が負電荷であるため、内部の正電荷がヘテロ空間電荷として作用し局所電界を強調したため F_b が減少すると考えられる。
- (7) 電荷の侵入メカニズムは部分放電と電気伝導が主に考えられるが、極低温環境下であるため部分放電が主要因と考えられる。絶縁紙の絶縁破壊の透気抵抗度依存性と絶縁紙-複合系の部分放電特性と絶縁破壊特性を取得し電荷侵入の抑制手法を検討した結果、絶縁紙の透気抵抗度を増加もしくは絶縁紙内部を氷で満たした場合に電荷侵入が抑制され、絶縁性能が向上することが示唆された。

参考文献

- (1) 早川：「超電導電力機器における電気絶縁技術研究の現状と展望」，電気学会論文誌 B, Vol.126, No.1, pp.1-4, 2006.
- (2) 廣瀬：「高温超電導ケーブルの実用化にむけて」，電気学会論文誌 B, Vol.128, No.4, pp.619-622, 2008.
- (3) Takato Masuda : “High-temperature Superconducting Cable Technology and Development Trends”, SEI TECHNICAL REVIEW, No.59, 2005.
- (4) 山口：「直流超電導システムの研究開発」，平成 17 年度～平成 21 年度私立大学学術研究硬度化推進事業「社会連携研究推進事業」研究成果報告書, pp.1-8, 2010.
- (5) 露木，他：「超電導直流ケーブルの電気絶縁に関する研究」，低温工学, Vol.35, No.7, pp.350-356, 2000.
- (6) 前野，他：「ポリプロピレンラミネート紙の過渡的な電荷蓄積」，電気学会論文誌 A, Vol.177, No.7, pp.722-726, 1997.
- (7) 武田：「XLPE 材料の空間電荷分布と直流インパルス重畳絶縁破壊特性」，電力中央研究所研究報告, W99037, 2000.
- (8) S. H. Kim, et al. : “Electrical Insulation Characteristics of PPLP as a HTS DC HTS Cable Dielectric and GFRP as Insulating Material for Terminations”, IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol.22, No.3, 2012.
- (9) 月岡，他：「油浸フィルム絶縁系の絶縁破壊」，電気学会論文誌 A, Vol.9, No.2, pp.63-69, 1978.
- (10) 村田，他：「油浸 PPLP のインパルス絶縁破壊に関する基礎的研究」，電気学会論文誌 A, Vol.114, No.2, pp.173-178, 1994.

- (11) 長尾：「極低温絶縁技術とそのおもしろさ」，電気学会論文誌 A，Vol.124，No.9，pp.759-762，2004.
- (12) A. Bradwell, et al.: “Conduction in polythene with strong electric fields and the effect of prestressing on the electric strength”，Proceedings of IEE, Vol.118, No.1, pp. 247-254, 1971.
- (13) 電気学会：放電ハンドブック下巻，pp.199-201，1998.

第6章 絶縁体-空気ギャップ複合絶縁系における部分放電と表面帯電

6.1 まえがき

各種産業用モータのさらなる小型化・高出力化が望まれており、それに伴う機器内部の高電界化が予想されている。しかし、高電界化によりモータ巻線間の微小ギャップにおいて部分放電が発生し易くなり、絶縁劣化ひいては絶縁破壊を引き起こすことが懸念される。さらに、実機は様々な環境下で使用されることが予想されるため、電気絶縁部の部分放電特性に及ぼす各種環境要因の影響を明らかにすることが重要である⁽¹⁾。

部分放電開始電圧(PDIV)はモータ巻線の健全性および欠陥の有無を判定する一つの指標とされている。一般に大気圧中での放電現象は電極形状や印加電界、周囲媒質等のさまざまな要因の影響を受ける⁽²⁾⁽³⁾。そのため、各要因を分離して検討することは困難であるが、測定値のばらつきを少なく安定的に取得することは、部分放電特性に与える各種要因の検討を行う上で重要であり、かつ、機器の健全性を判断する上でも誤診断を回避できる。PDIVのばらつきには、初期電子の存在および発生確率と試料表面の帯電が影響していると考えられる。一般的にPDIVの検討の際には、同一試料を用いて連続してPDIVを取得し、その平均値を用いている。部分放電によって試料表面は帯電するため、連続測定した場合、PDIVの平均値は試料表面の帯電の影響を含む。本章では、測定値のばらつきの要因の一つである絶縁体表面の帯電に着目し、絶縁体/空気ギャップ複合絶縁系における除電によるPDIVの測定ばらつき抑制効果と帯電分布が直流及び交流PDIV特性に与える影響について検討した結果を示す。

6.2 実験方法

図6.1に部分放電測定システムを示す。電極系を図6.2に示す。電極系として球-平板電極系(球電極φ12 mm, 平板電極φ65 mm, 端部曲率10 mm)を用いた。試料には厚さ0.125 mmのポリイミドを用いた。なお、試料と球電極間に0.1 mmの空気ギャップを設けた。実験は以下の手順でそれぞれ5回行った。

- ① 高分子試料では実験に未供試の試料においても既に表面帯電している場合があるため、試料表面をエタノールで除電した後、ブロワーを用いて十分に乾燥させた。
- ② 電圧上昇率 50 V/s の正極性および負極性の直流ランプ電圧もしくは電圧上昇率 50 Vrms/s、60 Hz の交流ランプ電圧を印加し、同調式部分放電測定器 CD-5 を用いて部分

放電を検出した。なお、10 pC 以上の放電が最初に発生した時の印加電圧を部分放電開始電圧(PDIV)と定めた。

- ③ PDIV を測定後、表面電位計(TREK 社、Model 347HV)を用いて、試料の表面電位が最大となる位置の表面電位を測定した。図 6.2 の通り、表面電位計プローブと試料間のギャップを距離 1.2 mm とした。このとき、プローブ直下の表面電位の測定範囲はφ5 mm である。
- ④ 上部電極に正極性または負極性の電圧上昇率 50V/s の直流ランプ電圧を印加し、PDIV を再度測定した。球電極と試料の位置関係が手順②の場合と等しくなる状態で測定を行った。

ここで、帯電は時間の経過とともに空気中のイオン等による中和や試料内部への注入によって減衰する⁽⁴⁾⁽⁵⁾ことが報告されている。しかし本研究において、室温環境下における帯電の減衰はみられず、高湿度環境下で顕著に発生し、その場合はおよそ 1 分以内に帯電が 0V に減衰していることを確認した。そこで、室温環境下(19 °C、56 %)において試験を行い、帯電の減衰の影響を極力排除した。

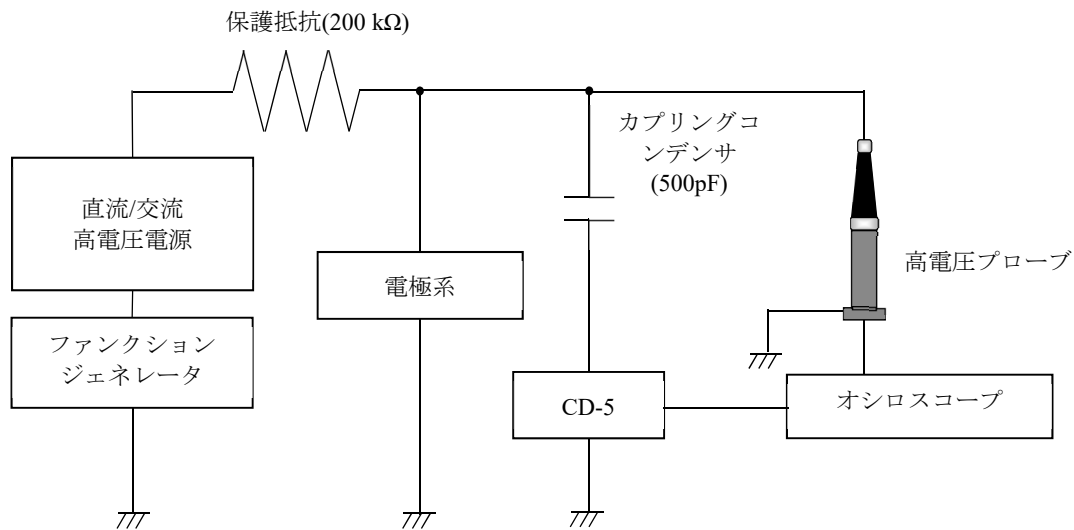


図 6.1 部分放電測定システム

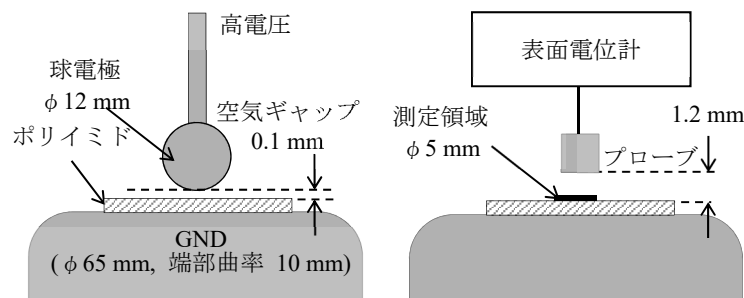


図 6.2 電極系と表面電位測定システム

6.3 表面帯電が PDIV 測定値のばらつきに与える影響

図 6.3 にポリイミドにおける直流 PDIV の測定回数依存性を示す。図中の塗潰しプロットは測定ごとに除電を行わず連続測定した場合の PDIV を示しており、中抜きのプロットは測定ごとに除電処理を行った場合の PDIV を示している。

図 6.3 より、測定ごとに除電を行わなかった場合の PDIV は測定回数を重ねるごとに徐々に上昇した。部分放電がある一定の電位差で発生すると考えた場合、前の部分放電によって試料表面は帯電するため、帯電電位と球電極間の電位差が再度 PDIV に到達したときに次の部分放電が発生すると考えられる。したがって、方極性の電圧を連続的に印加すると PDIV は図 6.3 の通り上昇すると考えられる。一見すると PDIV の平均値は上昇しているため絶縁性能が向上しているようにも捉えられるが、実際の機器の健全性を PDIV の平均値を用いて検討する際には帯電の影響を含んだ PDIV は実際の PDIV よりも高めに測定されていることになるため、誤診断の原因となることが分かる。

一方で、測定ごとに除電処理を行った場合の PDIV は測定回数にほぼ依存しない。したがって、同一試料を用いて方極性の電圧を連続的に印加する場合においては、除電処理によって PDIV 測定値のばらつきを低減する必要があると考えられる。

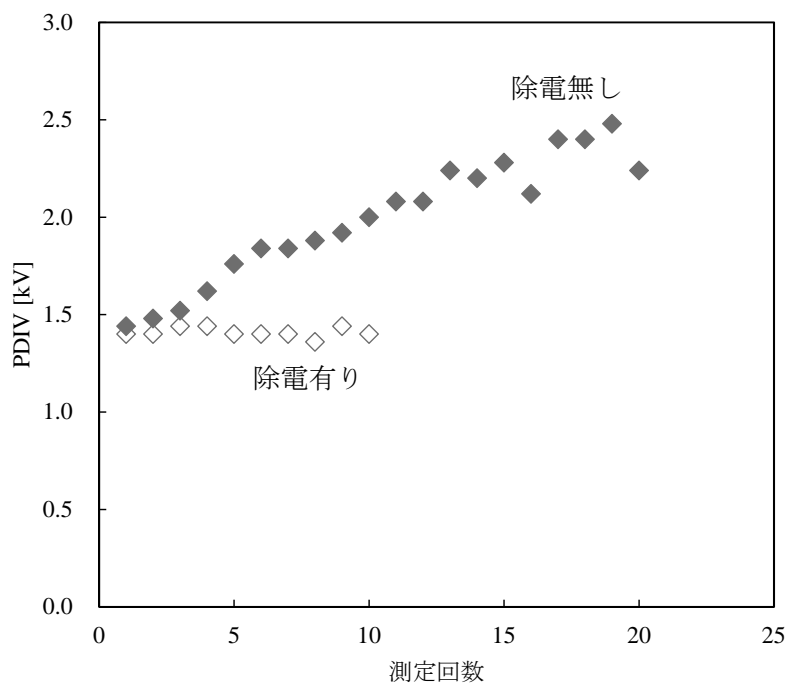


図 6.3 ポリイミドにおける直流 PDIV の測定回数依存性

6.4 試料表面の帯電分布が直流 PDIV に与える影響

6.4.1 部分放電による表面電位分布

図 6.4 に除電後のポリイミドの表面電位分布、図 6.5 に正極性直流 PDIV 後のポリイミドの 3 次元表面電位分布を示す。図 6.5(a)は 1 回目の正極性直流 PDIV 後の表面電位分布を示しており、図 6.5(b)は除電を行わずに連続測定した場合の 2 回目の正極性直流 PDIV 後の表面電位分布である。図 6.5 より、部分放電発生後のポリイミドの表面電位分布は電位ピークを持つことが確認できる。また、2 回目の正極性直流 PDIV 後の表面電位分布は同様な分布を示すが、ピークは試料表面の帯電と同極性の電圧を印加したため電位ピークは 1 回目に比べて高くなっている。2 回目の部分放電による帯電分布は 1 回目の帯電分布にさらに帯電するため、放電発生位置によっては電位分布が重なった分布になる可能性も考えられる。しかし、本実験からは電位ピークが 2 つ現れる結果は確認できなかった。

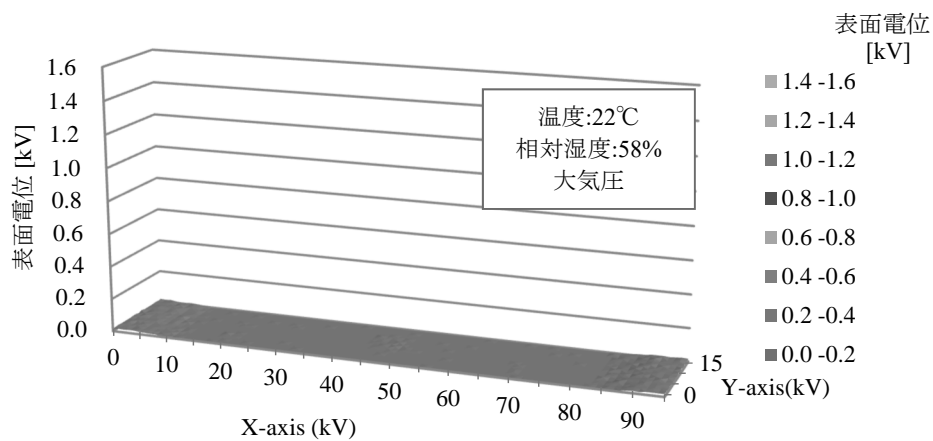
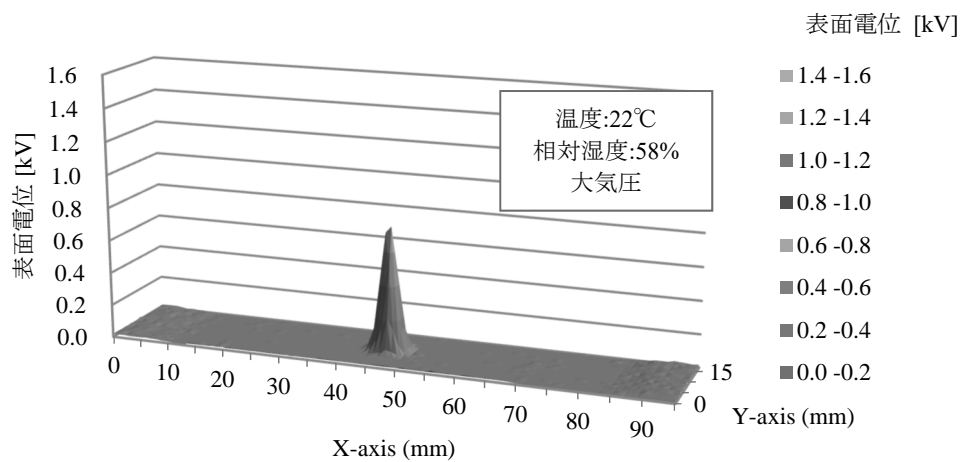
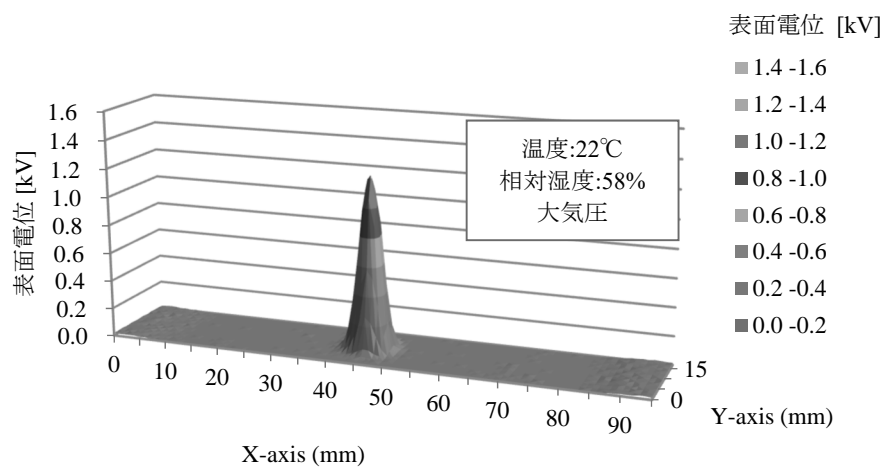


図 6.4 除電後のポリイミドの表面電位分布



(a) 1回目の正極性直流 PDIV 後の表面電位分布



(b) 2回目の正極性直流 PDIV 後の表面電位分布

図 6.5 正極性直流 PDIV 後の表面電位分布

6.4.2 表面電位分布による2回目の部分放電発生位置の検討

図 6.6 に図 6.5 の各表面電位分布を真上から見た図を示す。図 6.6 に示した白点は表面電位分布における電位ピークの位置であり、Charge peak1 は1回目、Charge peak2 は2回目の PDIV 後の表面電位分布における電位ピークを表している。図 6.6 より、正極性直流 PDIV の部分放電発生位置は1回目と2回目で異なることが確認できた。

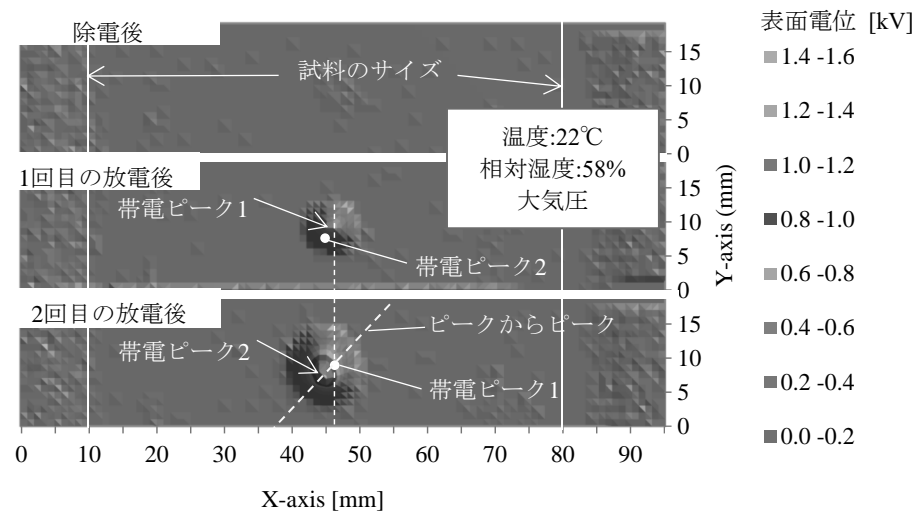


図 6.6 真上から見た正極性直流 PDIV 後の表面電位分布

図 6.7 に同様に検討した負極性の場合の結果を示す。図 6.7 に示した白点は表面電位分布における表面電位ピークの位置であり、帯電ピーク 1 は1回目、帯電ピーク 2 は2回目の PDIV 後の表面電位分布における電位ピークを表している。図 6.7 より、負極性直流 PDIV 後の表面電位ピークの位置は1回目と2回目で大きく変化がないことが確認できた。

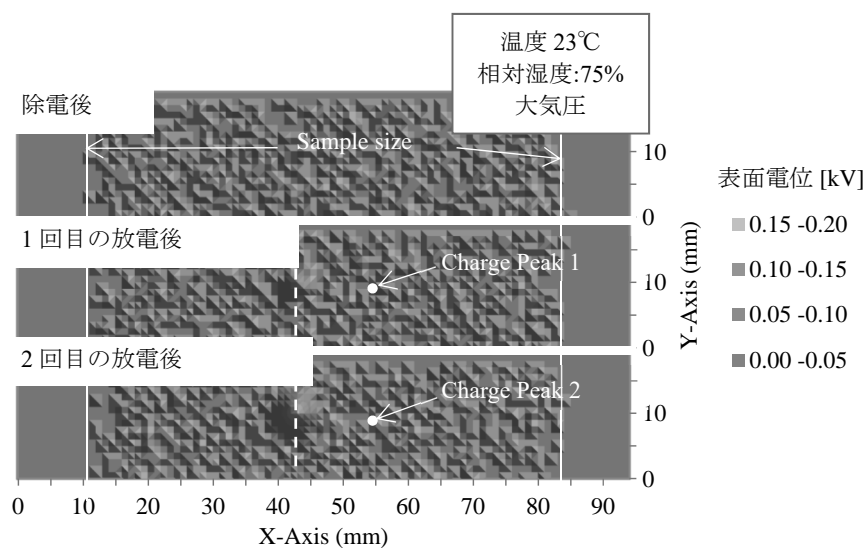


図 6.7 真上から見た負極性直流 PDIV 後の表面電位分布

表 6.1 正極性電圧印加時の放電発生位置の変化

No.	放電発生点の違い [mm]
1	1
2	1
3	1
4	0
5	1.4
平均値	0.9

表 6.2 負極性電圧印加時の放電発生位置の変化

No.	放電発生点の違い [mm]
1	0
2	1
3	0
4	0
5	0
平均値	0.2

表 6.1 及び表 6.2 に正極性及び負極性電圧印加時の表面電位ピーク位置の変化を示す。正極性においては放電発生位置が変化し易いことが分かる。

図 6.8 に正極性及び負極性電圧印加時の表面電位ピークの断面図を示す。図 6.8 より正極性よりも負極性電圧印加時の表面電位が小さく狭い範囲で帯電している。金属電極が負極性の場合、部分放電開始に必要な初期電子は金属から放出される。正極性印加時には、ポリイミド側からは初期電子を引き抜く必要があるが、絶縁体から電子を引き抜くことは困難なため初期電子供給確率に極性差が生じ、正極性電圧印加時よりも負極性電圧印加時の PDIV は低下する。そのため、電子なだれにより生じる荷電粒子の量も負極性印加時の方が少ないと考えられるため、部分放電による帯電は小さく狭い範囲で分布したと考えられる。また、絶縁体試料の帯電特性について、特に極性効果は試料によって異なることが報告されている。たとえば、PMMA の場合には正極性放電による帯電分布よりも負極性放電による帯電分布の方が狭い範囲で帯電するが⁽⁶⁾、ポリプロピレンの場合には正極性よりも負極性において帯電電荷量が多いという結果が得られている⁽⁷⁾。以上より、部分放電による帯電特性は材料毎に異なるため、本研究における帯電特性の極性差についても放電のエネルギー差のみが要因であるとは一概には言えない。

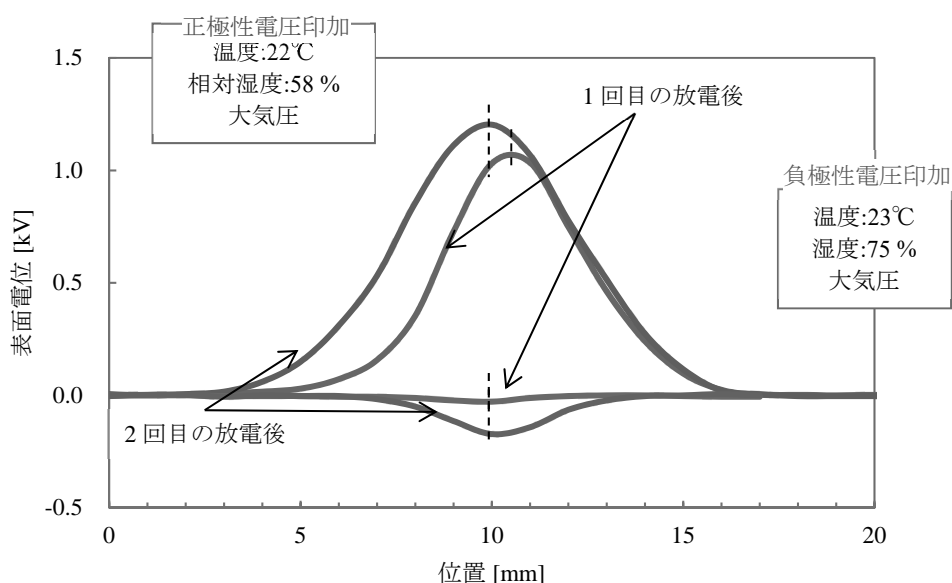


図 6.8 正極性及び負極性電圧印加時の表面電位ピークの断面図

6.4.3 帯電を考慮した PDIV

図 6.9 に帯電を考慮した直流 PDIV 特性を示す。図中の各プロットは 5 回の測定の平均値であり、エラーバーはその最大・最小値を示している。なお、プロット及びエラーバーは部分放電の極性に関わらず PDIV の絶対値である。図 6.9 における四角のプロット(帯電無)は表面電位が 0V の場合における各極性の PDIV (除電試料における PDIV) を示している。また、同図中の白抜きのプロットは帯電を考慮する前の帯電の影響を受けた PDIV であり、黒抜きのプロットは「帯電を考慮した PDIV」である。帯電を考慮した PDIV は以下の方法で算出した。

$$(\text{帯電を考慮した PDIV}) = (\text{帯電した試料における PDIV}) - (\text{表面電位})$$

また、図 6.9 において、表面電位の極性と印加電圧の極性が同じ場合を同極性、逆の場合を逆極性と定義した。例えば、正極性に帯電した試料に負極性の電圧を印加した場合は逆極性である。図 6.9 より、除電試料における直流 PDIV を比較すると、正極性よりも負極性の方が小さくなっている。負極性の場合、初期電子が金属電極球側から発生するため初期電子の供給が容易である。一方、正極性の場合には絶縁体側から初期電子を引き出す必要があるため、負極性に比べて初期電子は発生し難いと考えられる。したがって、負極性においては初期電子の供給確率が高いため PDIV 低下すると考えられる。次に、除電試料における直流 PDIV と帯電を考慮した直流 PDIV を比較すると、印加電圧と試料表面の帯電が逆極性の場合の PDIV は、帯電を考慮することによって除電試料における直流 PDIV とよく一致した。しかし、同極性の場合には一致せず、むしろ帯電を考慮しない場合の方がよく一致している。これについては、6.4.2 項の帯電分布の考察により説明することができる。

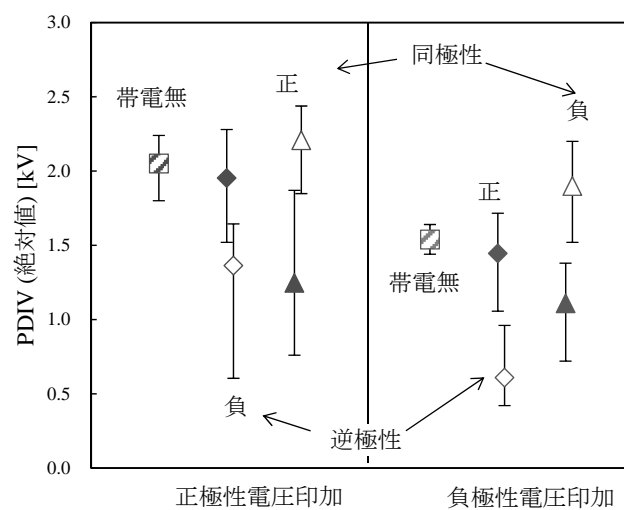


図 6.9 帯電を考慮した直流 PDIV 特性

図 6.10 に帯電分布に基づいた放電経路の予想モデル図を示す。ここで、部分放電は球-平板電極間の最も電位差の大きい場所で発生すると仮定する。この仮定に基づくと、図 6(a)より、表面電位と印加電圧が逆極性の場合には、球電極直下が最も電位差が大きくなる。帯電を考慮した PDIV の算出には、球電極直下の最も高い表面電位を用いている。そのため、予想される部分放電発生位置が表面電位のピーク位置と一致するため、帯電を考慮した PDIV と除電試料における PDIV がほぼ一致したと考えられる。なお、両者には僅かに誤差が生じているが、これは表面電位計の測定値が測定範囲の平均値を出力するため、表面電位の測定値が実際の表面電位の最大値を下回っているためと考えられる。

一方、表面電位と印加電圧が同極性の場合には、図 6(b)より球電極直下の電位差は小さくなる。電位差の最も大きい場所で部分放電が発生するとすれば、球電極直下から少し離れた場所の方が電位差は球電極直下よりも大きくなる。しかし、帯電を考慮した PDIV の算出には球電極直下の最も大きい表面電位を用いている。したがって、帯電を考慮した PDIV は除電試料における PDIV と一致せず減少したと考えられる。そこで、6.4.2 項にて示した部分放電発生位置の変化を考慮して再度帯電を考慮した PDIV を算出した。

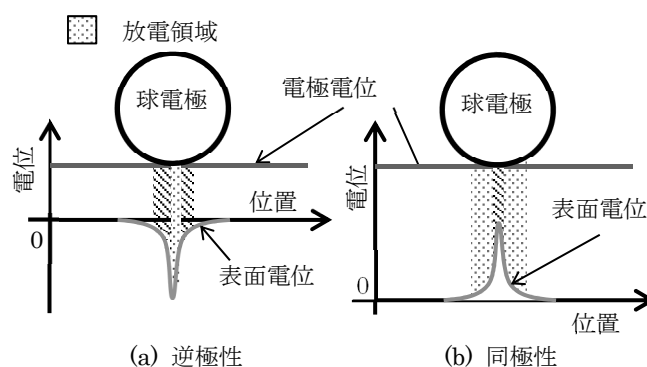


図 6.10 帯電分布に基づいた放電経路の予想モデル図

図 6.11 に同極性印加時における部分放電発生位置の帯電を考慮した PDIV を示す。図 6.11 中のプロットは 5 回の測定値であり、破線は除電試料における PDIV の平均値を示している。図 6.11 は新たに取得したものであるため図 6.9 と帯電を含んだ PDIV および帯電を考慮した PDIV の値とばらつきが異なっている。これは、測定日毎に部分放電による試料の表面帯電特性が異なるためと考えられる。しかしながら、本研究では PDIV に与える帯電の影響の定性的な議論に留めている。図 6.11 はそれぞれの PDIV の関係性は定性的には問題ないと考えた。定量的な議論を行うためには、試料表面の帯電特性をより詳細に検討する必要がある。

図 6.11 より、部分放電発生位置における帯電を考慮すれば同極性においても除電試料における PDIV とほぼ一致することが分かる。以上より、帯電によって PDIV は大きく変化するが、PDIV は帯電電位を考慮したギャップ間の電位差のみで決定されていることが分かる。

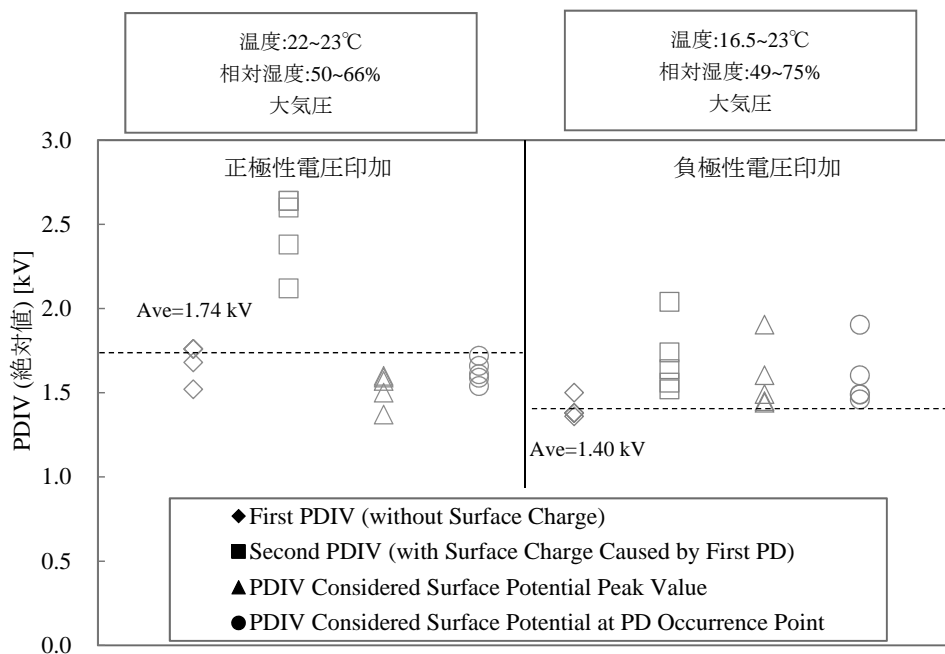
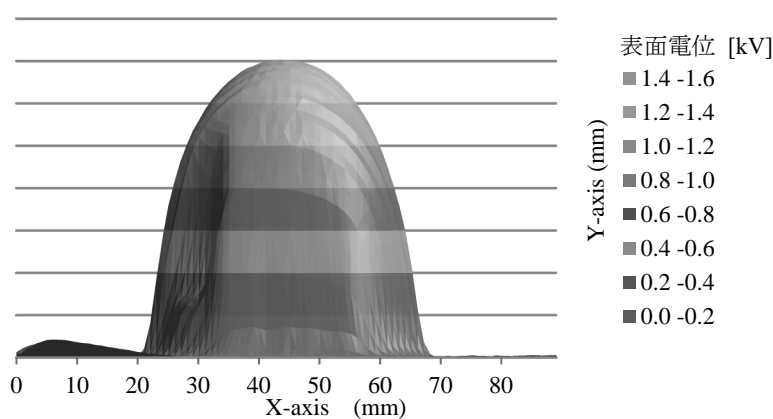


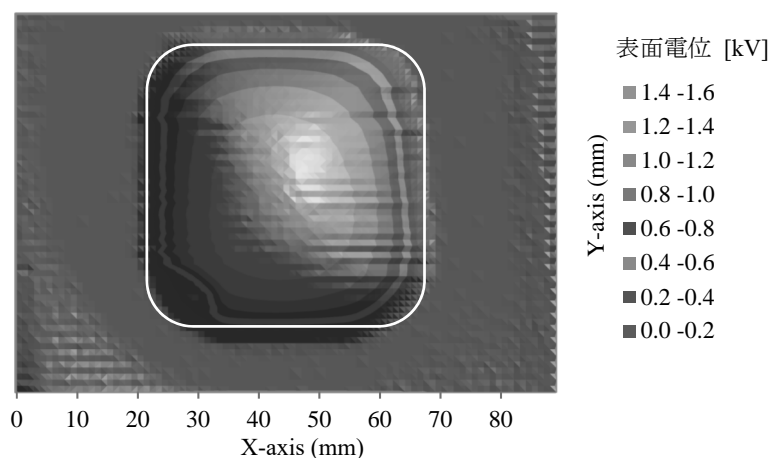
図 6.11 部分放電発生位置の帯電を考慮した同極性における PDIV

6.5 試料表面の均一な帯電分布が直流 PDIV に与える影響

6.4 節にて帯電分布が直流 PDIV 特性に影響を与えることが示唆された。同極性および逆極性印加時の帯電を考慮した PDIV の変化も部分放電発生位置の帯電を考慮すれば除電試料における PDIV とほぼ一致することが分かった。したがって、試料表面の帯電分布が均一な場合においては、極性に関わらず単純な電位差のみで PDIV を議論できると考えられる。そこで、コロナ帯電ガン(株式会社グリーンテクノ、GC90)を用いて、コロナ放電によりイオン化した空気中のイオンを試料表面に出来るだけ均一に帯電させた。試料表面の帯電量はコロナ帯電ガンの出力電圧および出力時間、試料とコロナ帯電ガン先端の距離で決定される。出力電圧 6 kV、出力時間 25 秒、試料-帯電ガン間の距離を 10 cm として、表面電位の最大値がおおよそ 1.1 kV となるように帯電させた。図 6.12 にコロナ帯電ガンによる帯電分布を示す。図 6.12 よりコロナ帯電ガンによる帯電分布はほぼ均一な分布であることが分かる。



(a) 側面図



(b) 上面図

図 6.12 コロナ帯電ガンによる帯電分布

図 6.13 に均一な帯電が直流 PDIV に与える影響を示す。図 6.13 中の各プロットは 5 回の測定の平均値であり、エラーバーはその最大・最小値を示している。四角のプロットは除電試料における PDIV、白抜きのプロットは帯電の影響を受けた PDIV、黒抜きのプロットは帯電を考慮した PDIV を示している。

図 6.13 より、コロナ帯電ガンを用いて均一に試料表面を帯電させた場合、部分放電による局所的な帯電分布における実験結果と異なり、印加電圧と帯電分布が同極性の場合においても除電した試料における PDIV と帯電を考慮した PDIV はほぼ一致した。以上より、直流 PDIV 特性を把握するためには試料表面の帯電特性を正確に把握する必要があるが、PDIV 値そのものは電位差によって決定されていることが示唆された。

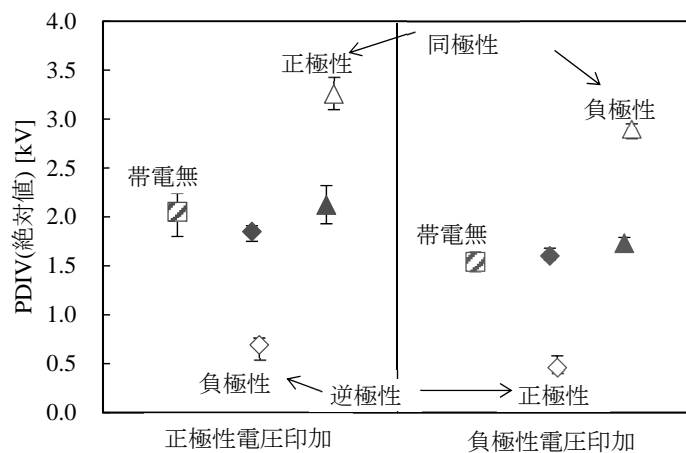


図 6.13 均一帯電における PDIV

6.6 試料表面の帯電が交流 PDIV に与える影響

直流 PDIV においては、試料表面の帯電を除電することで PDIV のばらつきが減少し、その帯電分布が PDIV 特性に影響を与えることが示唆された。一方で各種産業用モータ等の実機は交流電圧下で使用されるため、帯電が交流電圧下の PDIV 特性に与える影響を把握する必要がある。そこで、試料表面の帯電状態が交流 PDIV 特性に与える影響について検討した。

図 6.14 に各極性に試料を帯電させた場合における帯電を考慮した交流 PDIV と交流、直流ランプ電圧印加時の除電試料における PDIV を示す。図中の各プロットは 5 回の測定の平均値であり、エラーバーはその最大・最小値を示している。交流部分放電試験においては、印加電圧の極性が変化するため、前の部分放電による帯電が次の部分放電の発生極性を決定する。ここで、6.4 節の直流 PDIV 特性の結果から、試料表面の帯電が印加電圧と逆極性の場合に部分放電が発生し易いことが分かっている。つまり、交流においても正極性に試料が帯電している場合は交流の負極性で放電が発生し、負極性に帯電している場合は正極性で放電が発生することが予想される。また、交流においても部分放電は球-平板電極間の最

も電位差の大きい場所で発生すると仮定すれば、例えば正極性に帯電した場合は交流の負極性で放電が発生する。換言すれば、極性が反転する際に放電が発生し易くなる。この場合の帯電を考慮した交流 PDIV が電位差のみで決定されるならば、負極性の除電試料における直流 PDIV とほぼ同等になることが予想される。以上のような方法で帯電を考慮した交流 PDIV を算出し、交流において部分放電が発生した時の印加電圧の極性に対応した除電試料における直流 PDIV 特性を図 6.14 のように比較した。図 6.14 において、黒抜きの三角、丸のプロットは帯電を考慮した PDIV であり、白抜きのプロットは帯電の影響を受けた PDIV を示している。

図 6.14 より、交流においても帯電を考慮すれば PDIV は除電試料における直流 PDIV とほぼ一致した。したがって、交流 PDIV 特性もギャップの電位差で決定されると考えられる。また、交流印加時の除電試料における PDIV と帯電を考慮した交流 PDIV 特性を比較すると負極性の方が正極性よりも低いことがわかる。この点に関しても直流 PDIV 特性と同様に初期電子の供給確率が起因していると考えられる。しかし、交流 PDIV 特性は 4/5 の確率で負極性の部分放電が発生し、1/5 の確率で正極性の部分放電が発生した。本研究では、同調式部分放電検出器 CD-5 を用いて 10 pC の部分放電が最初に発生した印加電圧を PDIV と定めている。したがって、交流印加時に僅かではあるが正極性で部分放電が発生したのは、正極性の部分放電を検出する直前に閾値以下の小さな負極性の部分放電が発生し、試料表面が負極性に帯電した可能性が考えられる。

そこで、表面電位の大きさが部分放発生電極性に与える影響について検討した。コロナ帯電ガンを用いて試料を負極性の任意の表面電位の大きさに帯電させ、交流 PDIV を測定した。この場合、PDIV が電位差のみで決まるのであれば、試料表面は負極性に帯電しているため、印加電圧が正極性の場合のみで部分放電が発生するはずである。表面電位の大きさが交流部分放電発生極性に与える影響を図 6.15 に示す。図中のプロットは、各極性の帯電を考慮した PDIV を示している。図 6.15 より、負極性表面電位が 0.4 kV 以上の場合には交流の正極性で部分放電が発生した。一方、表面電位が低くなるにつれて交流の負極性で部分放電が発生する確率が増加し、0.15 kV 付近からは負極性でのみ部分放電が発生した。また、正極性よりも負極性の PDIV が低くなった。以上より、交流電圧印加時には帯電量に従って PDIV の発生極性が変化する可能性が示唆された。

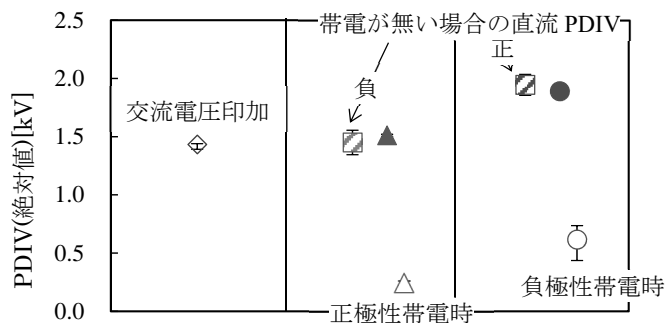


図 6.14 帯電が交流 PDIV に与える影響

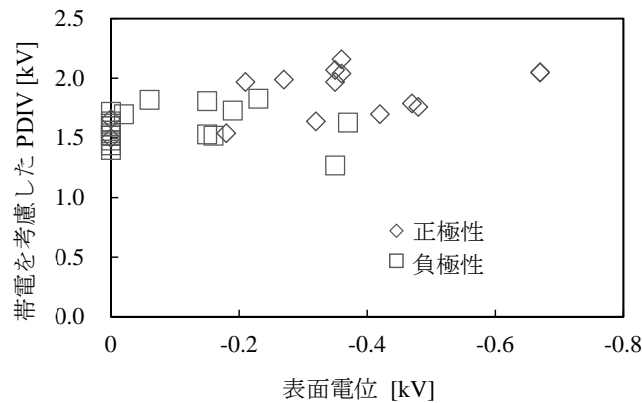


図 6.15 表面電位の大きさが交流部分放電発生極性に与える影響

6.7 まとめ

絶縁体/空気ギャップ複合絶縁系を用いて、直流及び交流 PDIV に与える表面帯電の影響を検討した。以下に得られた知見を示す。

- (1) 直流及び交流電圧印加時において、試料表面に帯電が存在する場合は、帯電量と帯電極性に依存して PDIV が増減することを確認した。そのため、ばらつきを抑えて PDIV 特性を取得するためには帯電の影響を考慮する必要があると考えられる。
- (2) 除電試料における直流 PDIV を比較すると、負極性の PDIV よりも正極性の PDIV の方が高くなった。これは負極性においては、初期電子が金属球側から行われるため、初期電子の供給確率が高くなるためと考えられる。
- (3) 印加電圧と試料表面の帯電が逆極性の場合、帯電を考慮した PDIV と除電試料における PDIV は一致した。しかし、同極性の場合は、帯電を考慮した PDIV が除電試料における PDIV よりも低い傾向を示した。
- (4) 部分放電がある一定の電位差で発生すると仮定すれば、逆極性の場合、最も電位差の大きくなる球電極直下において放電が発生すると考えられる。同極性の場合には、球電極直下の試料表面と電極との電位差は最小となるため、放電は発生し難く、電位差が確保される球電極直下以外の周囲で放電が発生すると考えられる。
- (5) コロナ帯電ガンを用いて試料表面を均一に帯電させた場合、印加電圧と試料表面が同極性の場合において、帯電を考慮した PDIV と除電試料における PDIV が一致した。PDIV 特性を正確に把握するためには、試料表面の帯電状態を正確に把握し、それを考慮する必要があると考えられる。
- (6) 交流 PDIV においても、直流 PDIV 同様に帯電を考慮すれば、除電試料における PDIV とほぼ一致した。直流 PDIV においては、試料表面と逆極性の電圧を印加した場合に PDIV が発生し易いことがわかっている。しかし、帯電量が小さい場合には正極性で部

分放電が発生し、大きくなるにつれて負極性で発生する確率が高くなった。したがって、帯電量によって PDIV の発生極性が変化する可能性が示唆された。

参考文献

- (1) 瀧野, 他 : 「インバータサージ下で発生する部分放電の電流波形を用いた評価の検討」, 電気学会基礎・材料・共通部門大会, Vol.XVII-1, pp.371-376, 2010.
- (2) 小山, 他 : 「絶縁シートを用いた CIGRE Method-II 電極における部分放電開始電圧の温度・湿度依存性」, 電気学会全国大会, Vol.2, pp.72, 2012.
- (3) Yusuke Kikuchi, et al. : “Effects of Ambient Humidity and Temperature on Partial Discharge Characteristics of Conventional and Nanocomposite Enameled Magnet Wires” , IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 15, No. 6, pp.1617-1625, 2008.
- (4) 國重, 他 : 「絶縁体の表面帯電分布に与える要因に関する実験的考察」, 電気学会全国大会, Vol.1, pp.53-54, 2014.
- (5) Hans Sjöstedt , et al. : “Charging Characteristics of EPDM and Silicone Rubbers Deduced from Surface Potential Measurements” , IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 16, No. 3, pp.696-703, 2009.
- (6) 石田 : 「放電発生電圧に与える残留電圧と湿度の影響」, 電気電子絶縁材料システムシンポジウム B-2, pp.61-65, 2013.
- (7) 工藤 : 「交流および直流コロナ放電による高分子フィルムの帯電現象」, 明治大学科学技術研究所紀要, Vol.20, No.1, 1981.

第7章 電力機器のオンライン絶縁劣化診断技術の提案へ向けた基礎検討

7.1 はじめに

我々の生活と経済活動を維持する上で電力機器・ケーブルの故障を未然に防止することは必要不可欠である。既に敷設されたそれらの機器を現場でモニタリングし、劣化状態を把握することによって修理・交換の必要性やその時期を判断することも望まれる。2章で述べた通り絶縁劣化診断手法は様々である。本章では、電力機器のオンライン絶縁劣化診断に資する新たな診断技術の提案に向けた基礎検討として、アンテナを用いた部分放電に起因する放射電磁波特性と部分放電の関係性と交流損失電流の非線形性による絶縁体内部への空間電荷侵入量の検討に関して述べる。

7.2 アンテナを用いた新たな部分放電検出手法の提案

7.2.1 アンテナ

本研究では、パッチアンテナ、ディスコーンアンテナを用いて試験を行った。以下にそれぞれのアンテナの特性に関して述べる。

(1) パッチアンテナ

図 7.1 に本研究で用いた部分放電検出センサの構成図を示す。表 7.1 にパッチアンテナおよび検出器の仕様を示す。また、図 7.2、図 7.3 に検出器の入力信号対出力電圧特性、パッチアンテナの寸法を示す。

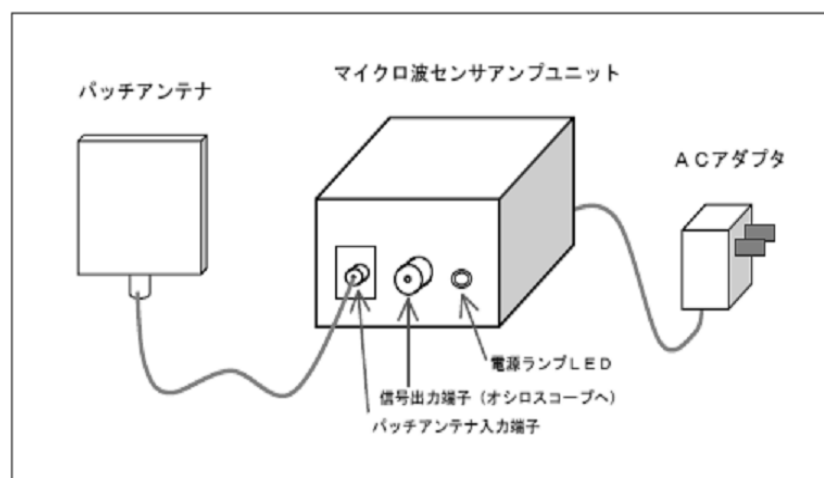


図 6.1 部分放電検出センサの構成図

表 6.1 パッチアンテナおよび検出器の仕様

パッチアンテナ	
型名	MW-9A502A
VSWR	2 以下(1.8 GHz)
外形	L 93.6±1.0 mm×W 80.0±1.0 mm×H 9.6±1.0 mm
質量	300g 以下
検出器	
型名	MW-9502A
最小検出レベル	"-90dBm"(検出器入力端)
ダイナミックレンジ	60 dB (-90 dBm～-30 dBm)
出力	DC 出力 値:0.5±0.03V～1.5±0.03V (無信号時)～(最大信号時)
共通	
動作環境温度	0℃～40℃
使用条件	室内

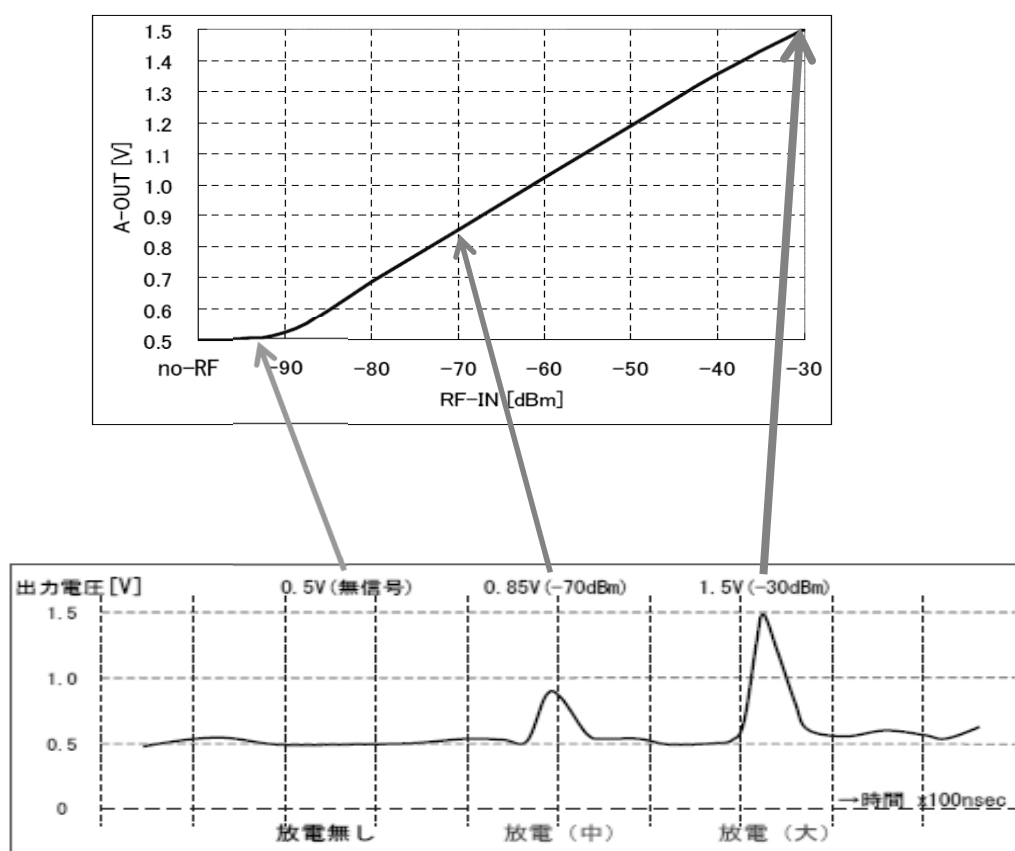


図 6.2 入力信号-出力電圧特性

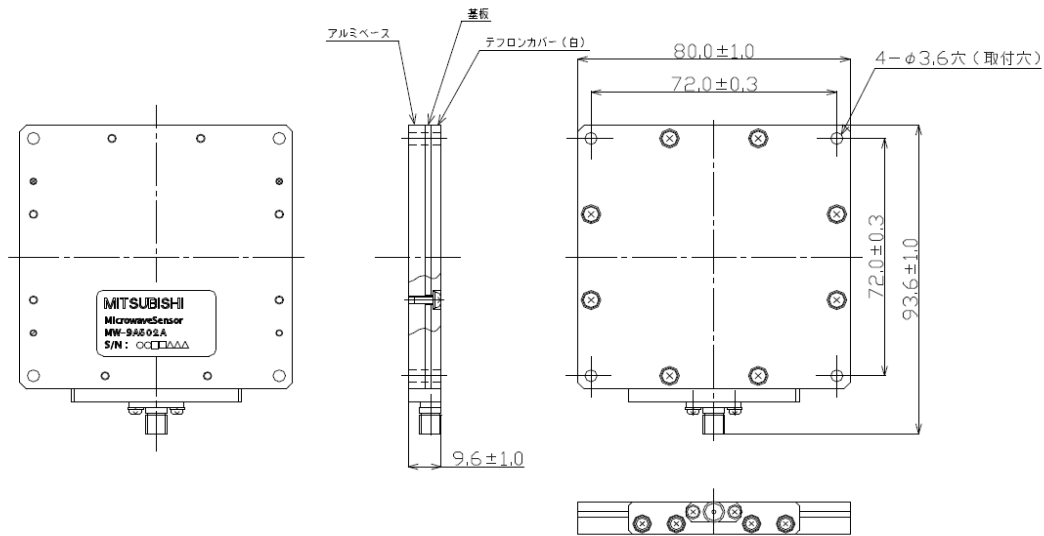


図 6.3 パッチアンテナ外形寸法

(2) ディスコーンアンテナ⁽¹⁾

図 6.4 は、同軸ケーブルの芯線側を上部の金属円板に付けたディスコーンアンテナである。外導体側は円錐型のスカートに付いており、垂直ダイポールアンテナのエレメントを極端に太くして、帯域幅を広げたアンテナと考えられる。ディスコーンは、円板(disk)と円錐(cone)の組み合わせからつけられた名前である。立体構造より、波長の寸法から主に VHF 帯(λ : 1~10 m)や UHF 帯(10 cm~1 m)で使われている。本研究で用いたディスコーンアンテナは、広帯域無指向性ディスコーンアンテナであり受信可能周波数は 30 MHz~3 GHz である。アンテナを用いた PD 検出は、一般的に通信・放送波等のノイズの影響を受け難いこと等の利点を持つ UHF 帯(300 MHz~3 GHz)が用いられる。そのため本研究でも、測定周波数が UHF 帯を含むアンテナを用いた。

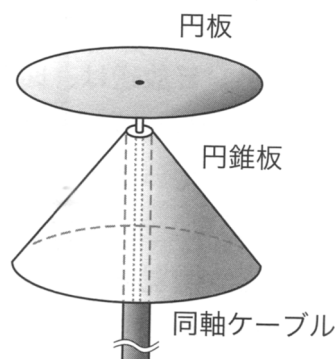


図 6.4 ディスコーンアンテナの構造⁽¹⁾

7.2.2 パッチアンテナによる部分放電に起因した放射電磁波強度に与える線路容量の影響

7.2.2.1 実験方法

コンデンサとスイッチを用いた PD 発生・検出回路を作製し、任意のパルス電圧波形を用いて、針-平板電極系で PD を発生させた。そして、PD 発生個所および PD 発生個所付近の回路電流からの放射電磁波を測定した。図 7.5 に PD 発生・検出回路、図 7.6 に針-平板電極系 1 に印加したパルス電圧波形を示す。PD 発生個所からの放射電磁波を測定する場合は、針-平板電極系 1 を短絡し、針-平板電極系 2 に PEN (PolyEthylene Naphthalate) フィルム(厚さ $6\text{ }\mu\text{m}$)を挟むことにより、沿面放電を発生させた。回路電流による放射電磁波を測定する場合は、針-平板電極系 2 を短絡し、針-平板電極系 1 に PEN フィルムを挟むことにより、沿面放電を発生させた。ここで、針-平板電極系を短絡する場合は、機械的に針と平板電極を接触短絡するのみで、はんだ等を用いて針電極と平板電極の接触をよくする等の処置は施していない。そのため、数 Ω 程度の接触抵抗を有している。また、回路電流からの放射電磁波は、PD 発生個所からの放射電磁波に比べて小さいことが予想される。回路電流からの放射電磁波強度を極力正確に測定するために、PD 発生個所(シールドケース 1)と放射電磁波測定個所(シールドケース 2)を分離した。

図 7.5 の線路(a)を同軸ケーブルに変えることで線路をシールドすると共にその容量を増加させ、PD 電流波形と放射電磁波を測定した。シールドケース 2 内部の配線の長さや取り回しは、放射電磁波強度の特性に大きな影響を与える。本研究では、配線が最短となるように線路(a)の長さを高圧側、GND 側それぞれ 15 cm とした。この条件において、同軸ケーブルの線路容量はおよそ 80 pF である。PD 電流波形は $50\text{ }\Omega$ 検出抵抗により測定し、放射電磁波は針-平板電極系から 15 cm 離れた位置に設置したアンテナにより測定した。アンテナは、パッチアンテナ(株式会社電子制御国際、 1.8 GHz)を用いた。パッチアンテナの出力は信号処理が施されており、受信放射電磁波強度に応じた波高値を持つパルス電圧が出力される。図 7.7 に取得したパッチアンテナの出力信号の例を示す。本研究ではパッチアンテナの出力信号の波高値を放射電磁波強度と定義した。ここで、電流波形の波頭の立ち上がり微分値と放射電磁波強度の間には強い相関があることを報告している⁽²⁾。図 7.8 に示すように、電流波形の波頭の立ち上がり微分値(dI/dt)を電流波頭ピーク値の 10% と 90% の傾きと定義した。

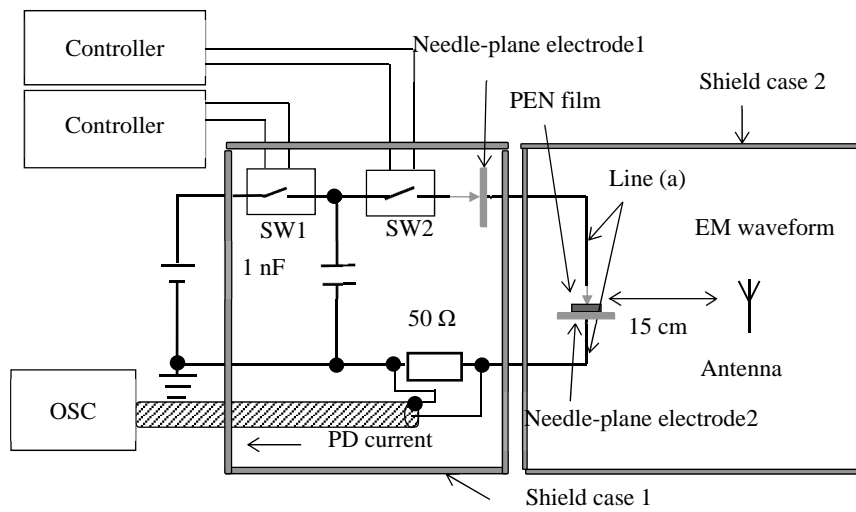


図 7.5 パルス電圧発生回路

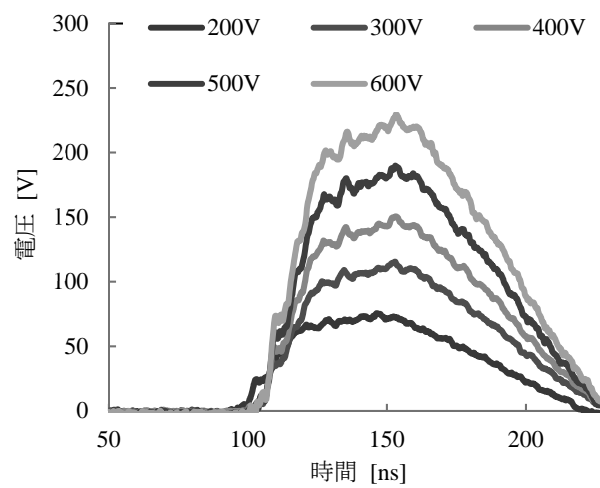


図 7.6 印加電圧波形

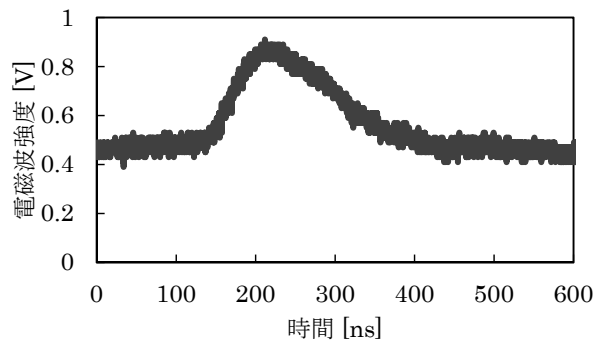


図 7.7 パッチアンテナの出力信号例

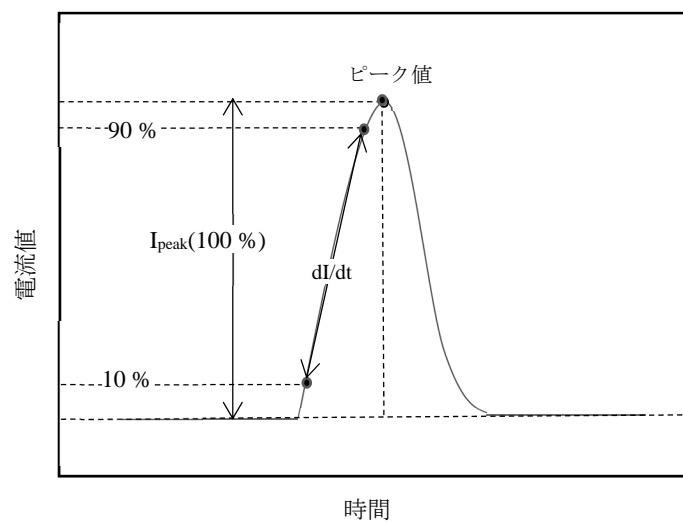


図 7.8 部分放電電流波形の核パラメータの定義

7.2.2.2 PD 発生個所および回路電流からの放射電磁波

図 7.5 の回路中の線路(a)に被覆線を用いた。被覆線の長さは高圧側・接地側共に 15 cm とした。図 6.10 に PD 発生個所および回路電流からの放射電磁波強度を示す。図の横軸は電流波形の波頭の立ち上がり微分値と電流値の最大値の積であり、プロットは 5 点の平均値、エラーバーは標準偏差を示している。

図 6.10 より、PD 発生個所からの放射電磁波強度に比べ回路電流からの放射電磁波強度は小さいが、検出可能であることが判明した。さらにこの結果は、回路電流がアンテナを用いた PD 検出に影響を与える可能性も示唆している。

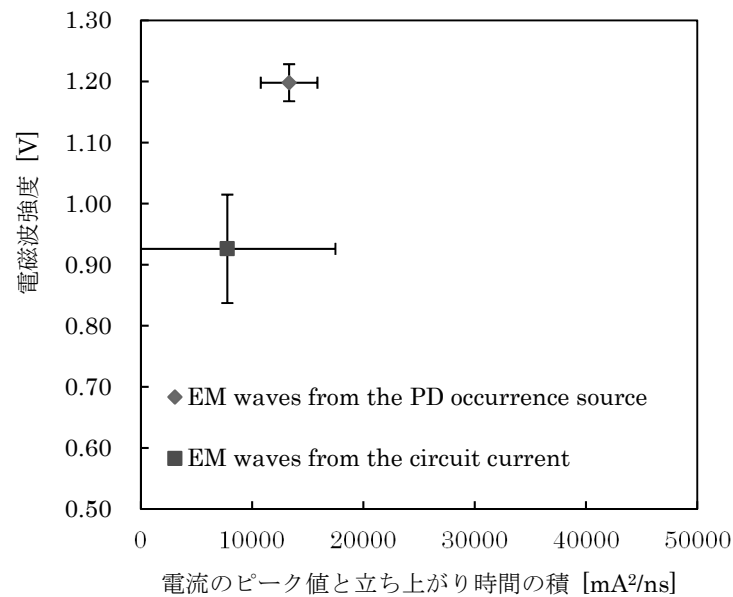


図 7.9 PD 発生個所および回路電流からの放射電磁波強度

7.2.2.3 PD 発生個所付近の線路容量が PD 発生個所からの放射電磁波強度に与える影響

PD 発生個所付近の線路をシールドすると共に線路容量を増加させる目的で、図 7.5 の回路中の線路(a)を被覆線に代えて同軸ケーブルに変更した。同軸ケーブルの長さは高圧側・GND 側共に 15 cm であり、線路容量はそれぞれおよそ 80 pF である。以下に示す線路(a)の条件で実験を行った。

- (1). PD 発生個所の高電圧側、GND 側共に被覆線を使用。
- (2). PD 発生個所の高電圧側、GND 側共に同軸ケーブルを使用。
- (3). PD 発生個所の高電圧側、GND 側共に同軸ケーブル。ただし、同軸ケーブル接地なし。
- (4). PD 発生個所の高電圧側に被覆線、GND 側に同軸ケーブル使用。
- (5). PD 発生個所の高電圧側に同軸ケーブル、GND 側に被覆線を使用。

図 7.10 に PD 発生個所からの放射電磁波強度の PD 発生個所付近の線路容量依存性を示す。図の横軸は電流波形の波頭の立ち上がり微分値と電流値の最大値の積であり、プロットは 5 点の平均値、エラーバーは標準偏差を示している。

図 7.10 より被覆線を用いた場合、放射電磁波強度が最も大きくなった。これは、PD 発生個所からの放射電磁波だけでなく、線路(a)を流れる回路電流からの放射電磁波も含まれる

ためと考えられる。それに対して、同軸ケーブルを用いた場合、放射電磁波は小さくなった。これは、線路(a)を流れる回路電流からの放射電磁波が同軸ケーブルにより遮蔽されたためと考えられる。また、同軸ケーブルの接地の有無は放射電磁波強度にあまり影響を与えなかった。ここで、PD 発生個所付近の線路(a)の高電圧側あるいは GND 側片側のみに同軸ケーブルを用いた場合について考察すると、PD 発生個所の高電圧側に同軸ケーブルを用いた場合、PD 発生個所の GND 側に同軸ケーブルを用いた場合に比べ放射電磁波強度および電流波形の波頭の立ち上がり微分値と電流値の積が大きくなった。これは、PD 発生個所高電圧側に同軸ケーブルを用いた場合、PD 発生個所の高電圧側の同軸ケーブルの線路容量に電荷が蓄積され、PD 発生時に線路容量に蓄積された電荷が供給されるため放射電磁波強度および電流波形の波頭の立ち上がり微分値と電流値の最大値の積が大きくなったと考えられる。以上より、PD 発生個所のみならず回路電流からの放射電磁波もアンテナを用いた部分放電計測に大きな影響を及ぼしていることが示唆された。

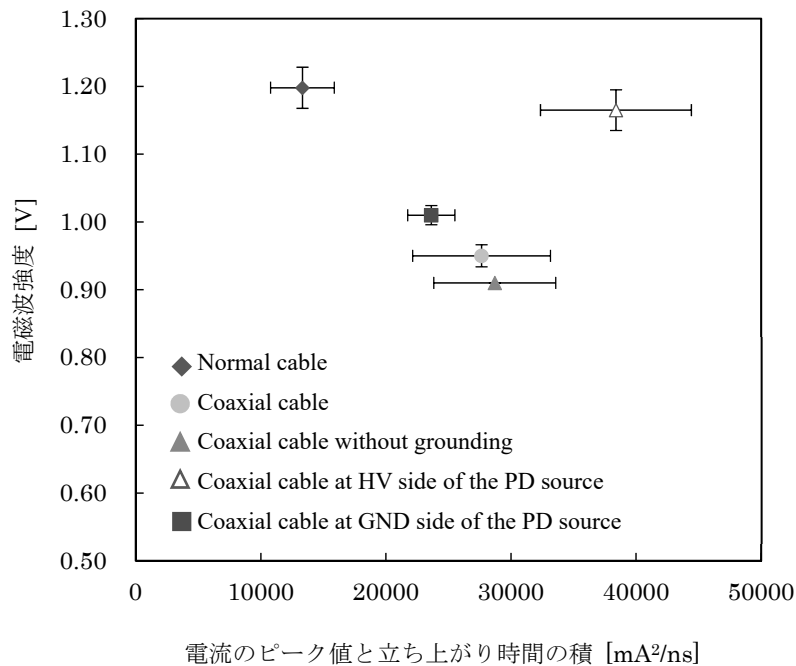


図 7.10 PD 発生個所からの放射電磁波強度の PD 発生個所付近の線路容量依存性

7.2.2.4 PD 発生個所付近の線路容量が PD 発生個所からの放射電磁波強度に与える影響

図 7.5 の回路は、PD 発生個所付近に実際の機器の回路接続部の接触抵抗を模擬するために針-平板電極系 2 を接触短絡させて接触抵抗を模擬している。接触抵抗付近の線路をシールドすると共に線路容量を増加させる目的で、回路中の接触抵抗付近の線路(a)を通常の被

覆線に代えて同軸ケーブルを用いた。同軸ケーブルの長さは 15 cm であり、線路容量はおおよそ 80 pF である。以下に示す線路(a)の条件で実験を行った。

- (1). 針-平板電極 2 の高電圧側に被覆線、GND 側に同軸ケーブル使用。
- (2). 針-平板電極 2 の高電圧側に同軸ケーブル、GND 側に被覆線使用。

図 7.11 に回路電流からの放射電磁波強度の接触抵抗付近の線路容量依存性を示す。図の横軸は電流波形の波頭の立ち上がり微分値と電流値の最大値の積である。プロットは 5 点の平均であり、エラーバーは標準偏差を示している。

図 7.11 より、接触抵抗の高電圧側に同軸ケーブルを用いた場合、接触抵抗の GND 側に同軸ケーブルを用いた場合に比べ、PD 電流の立ち上がり微分値と電流値の積および放射電磁波強度が小さくなった。接触点の高電圧側に同軸ケーブルを接続したことによる線路容量の増加に伴う充電電流の増加により、接触点に流れる電流が減少したため、放射電磁波強度が小さくなったと考えられる。また、線路容量の増加によって充電に要する時間が長くなったため、電流波形の波頭の立ち上がり微分値と電流値の積が小さくなったためとも考えられる。これより、回路電流からの放射電磁波においても、接触抵抗がある場合、接触抵抗付近の線路容量が放射電磁波強度に影響を与える可能性が示唆された。

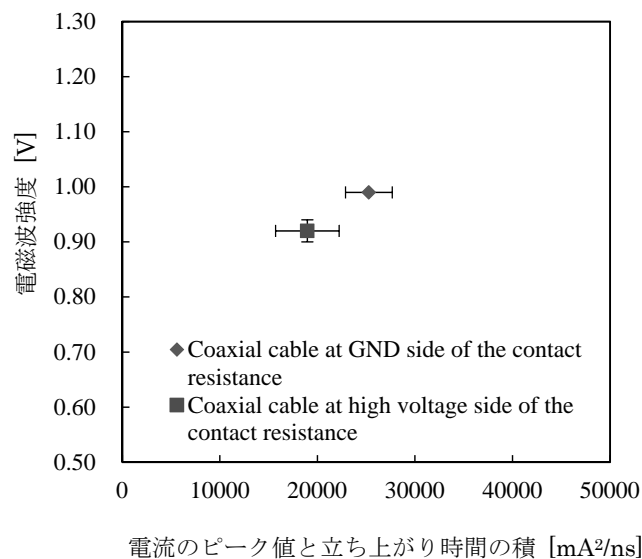


図 7.11 回路電流からの放射電磁波強度の接触抵抗付近の線路容量依存性

7.2.3 ディスコアンテナによる部分放電に起因した放射電磁波強度に与える線路容量の影響

7.2.3.1 実験方法

パルス電圧発生回路は 6.2.3 項と同様の図 7.12 に示す通りのコンデンサとスイッチを用いた PD 発生・検出回路である。図 7.13 に示す通りの任意のパルス電圧波形を用いて、針-

平板電極系で PD を発生させた。そして、PD 発生個所および PD 発生個所付近の回路電流からの放射電磁波を測定した。アンテナは、ディスコーンアンテナ(DIAMOND ANTENNA、30 MHz～300 GHz)の2種類を用いた。ディスコーンアンテナの出力波形を図 7.14 のようにフーリエ変換することによって周波数スペクトルを求めた。

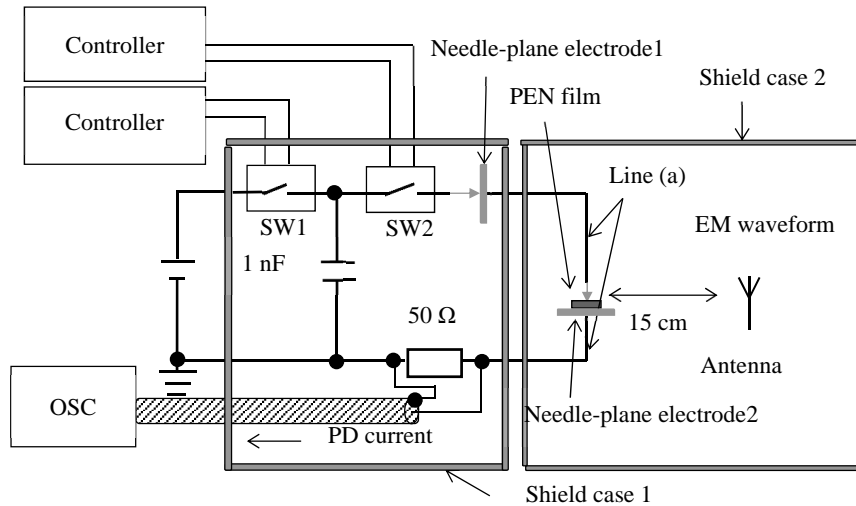


図 7.12 パルス電圧発生回路

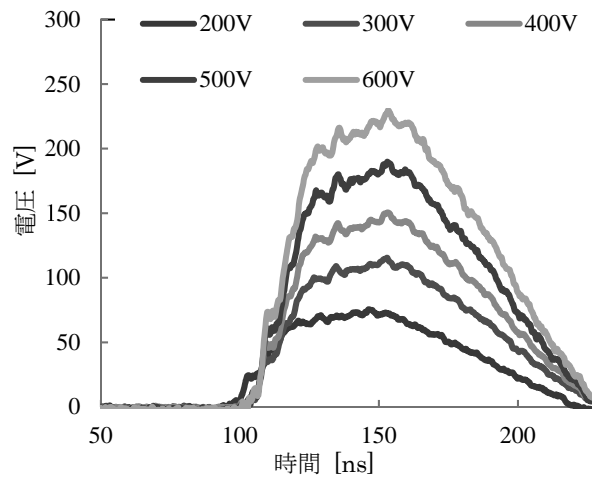


図 7.13 印加電圧波形

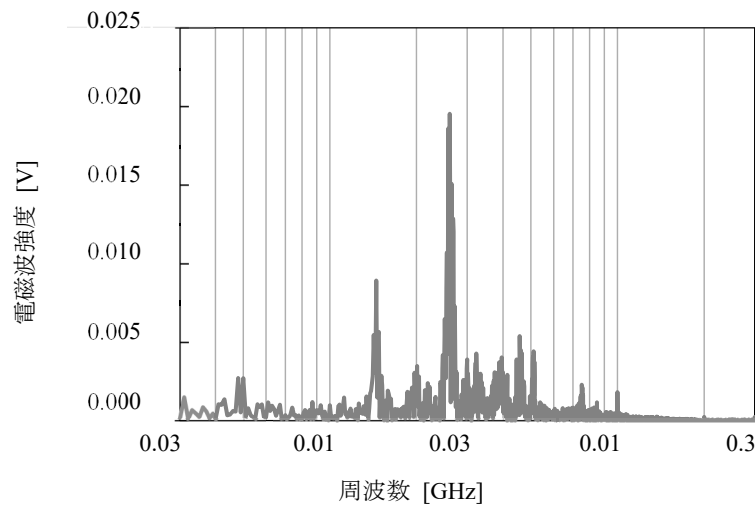


図 7.14 フーリエ変換後のディスコーンアンテナの出力信号例

7.2.3.2 PD 発生個所および回路電流からの放射電磁波の周波数スペクトル

ディスコーンアンテナを用いて PD 発生個所および回路電流からの放射電磁波の周波数スペクトルの違いについて検討した。図 7.15 に PD 発生個所および回路電流からの放射電磁波の周波数スペクトルを示す。測定は 5 回行い、図 7 はその代表的な 1 例を示している。一般的に PD 発生個所からの放射電磁波強度の最大ピーク値は回路電流からの放射電磁波強度の最大ピーク値よりピークが大きいと考えられる。しかし、図 7.15 より、回路電流からの放射電磁波強度の最大ピーク値は PD 発生個所からの放射電磁波強度の最大ピーク値に比べ大きくなるという逆の結果であった。回路電流からの放射電磁波は、回路の接触抵抗で消費されたエネルギーに依存すると考えられる。一方、PD 発生個所からの放射電磁波は、針-平板電極系に PEN フィルムを挟んでいるため、沿面放電による放射電磁波と考えることができる。したがって、試料表面上で沿面放電が多数生じていると考えれば、1 点でエネルギーが消費される回路電流からの放射電磁波強度に比べて PD 発生個所付近の放射電磁波強度が小さくなることを説明できる。

また、周波数スペクトルに着目すると、PD 発生個所からの放射電磁波は同じ大きさのピークが 2 個所の周波数に現れた。それに対して、回路電流からの放射電磁波は大きなピークが 1 個所に現れた。沿面放電が発生した場合、試料の沿面方向に複数の電流が流れていると考えられる。大きさの異なる複数の電流がほぼ同時に発生していると考えれば、放射電磁波のピークが複数現れることも説明できる。一方で、回路電流は回路内を一方方向に集中して流れるため 1 個所にピークが現れたと考えられる。また、沿面放電は試料表面の電子トラップや電子親和力等によっても変化すると考えられる⁽³⁾。2 個所にピークが現れた要因として沿面放電が進展する際に電子トラップに放電内の電荷がトラップされ、放電の全体エネルギーが減少し沿面放電進展メカニズムが変化したことが原因とも考えられる。

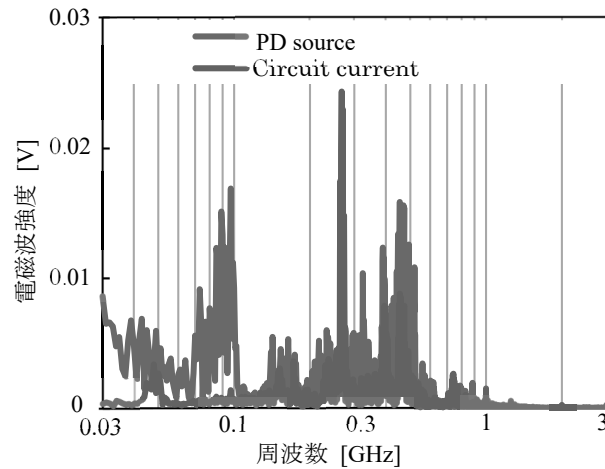


図 7.15 PD 発生個所および回路電流からの放射電磁波の周波数スペクトル

7.2.3.3 PD 発生個所付近の線路容量が PD 発生個所および回路電流からの放射電磁波の周波数スペクトルに与える影響

図 7.12 の針-平板電極系の高圧および GND 側を同軸ケーブルとした場合の PD 発生個所および回路電流からの放射電磁波の周波数スペクトルについて検討した。図 7.16 に結果を示す。測定は 5 回行い、図 8 はその代表的な 1 例を示している。

図 7.16 より同軸ケーブルのみの場合においては、放射電磁波強度は極めて小さくなるが、線路の途中に接触点として針-平板電極系を設けた回路の場合においては、電磁波を検出することができた。したがって、回路に接触点がある場合は、回路がシールドされていたとしても、放射電磁波を検出できることが示唆された。

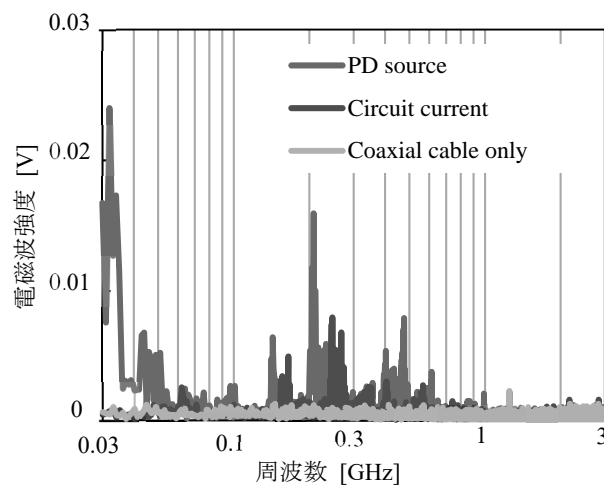


図 7.16 同軸ケーブルとした場合の PD 発生個所および回路電流からの放射電磁波の周波数スペクトル

7.2.3.4 ギャップ放電における PD 発生個所および回路電流からの放射電磁波の周波数スペクトル

前項までは、針-平板電極系に PEN フィルムを挟み、沿面放電を発生させた場合における放射電磁波の周波数スペクトルについて検討した。その結果、沿面放電においては、放電が試料表面上で多数発生するため、放射電磁波のピークが複数の周波数に現れると考えられた。そこで、針-平板電極系に 10 μm の空気ギャップを設けて、直流 400 V を印加し、パルス電圧を発生させて放電を 1 個所に限定したギャップ放電の場合における PD 発生個所および回路電流からの放射電磁波強度について検討した。図 7.17、図 7.18 に放電形態の違いによる PD 発生個所および回路電流からの放射電磁波の周波数スペクトルをそれぞれ示す。測定は 5 回行い、図 7.17、図 7.18 それぞれは代表的な 1 例を示している。

図 7.17 より、PD 発生個所からの放射電磁波の周波数スペクトルに着目すると、ギャップ放電発生時の PD 発生個所からの放射電磁波は沿面放電に比べてピークが集中して現れた。それに対して、沿面放電発生時の PD 発生個所からの放射電磁波は複数の周波数にピークが現れた。放電の種類や電極のギャップ間距離が放射電磁波の周波数スペクトルに影響を与えている可能性があることが報告されている⁽⁴⁾。そのため、放電形態の違いによる周波数スペクトルの違いが現れることは十分起こりうると考えられる。また図 7.18 より回路電流からの放射電磁波の周波数スペクトルに着目すると、沿面放電発生時およびギャップ放電発生時においてピークの位置に違いが現れた。部分放電の電磁波の周波数スペクトルは放電回路の共振条件に対応していることが報告されている⁽⁴⁾。したがって、回路電流からの放射電磁波のピークにおいても、回路の共振条件が関係していると考えられる。

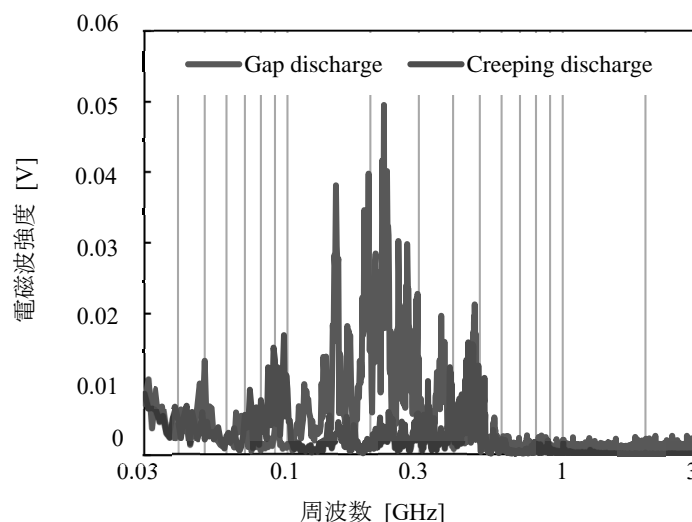


図 7.17 放電形態の違いによる PD 発生個所からの放射電磁波の周波数スペクトル

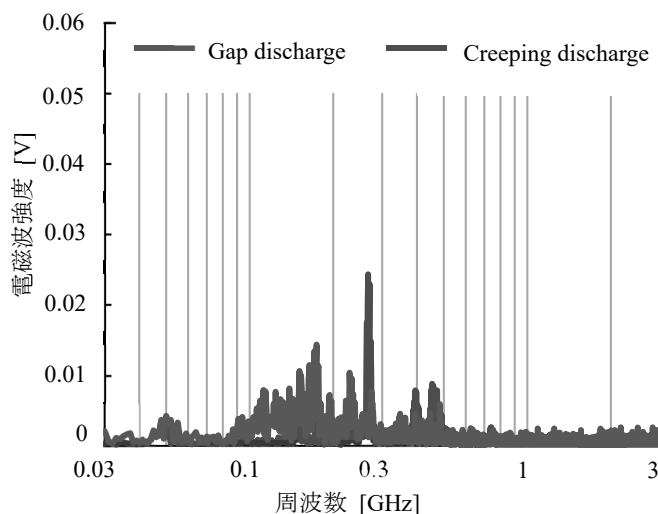


図 7.18 放電形態の違いによる回路電流からの放射電磁波の周波数スペクトル

7.2.3.5 PD 発生個所および回路電流からの放射電磁波周波数スペクトルの電圧依存性および部分放電電荷量との関係

部分放電による放射電磁波は、放電電流波形の立ち上がり時間と強い相関を示し、電磁波強度は放電の強さに依存すると考えられる。したがって、部分放電による放射電磁波強度は電圧依存性を示すことが予想される。前項までにおいて、回路電流からの放射電磁波を用いて部分放電を検出可能であることが示唆された。そこで、回路電流の放射電磁波の電圧依存性を検討した。図 7.19 に PD 電流波形を示す。図 7.19 の PD 電流波形は、測定の度に異なるため、回路定数だけではなく、放電に起因した要因が含まれていると考えられる。したがって、本研究では図 7.19 に示すように PD 電流波形の包絡線内部の面積を用いて電荷量を検討した。図 7.20 に沿面放電(PDcreep)およびギャップ放電(PDgap)の場合における、回路からの放射電磁波強度の電圧依存性を示す。図 7.20 より、放電形態によらず放射電磁波強度は印加電圧の上昇に伴って大きくなった。図 7.21 に放射電磁波強度および放電電荷量の印加電圧依存性を示す。図中の塗りつぶしのプロットは放電電荷量、白抜きプロットは放射電磁波強度を示している。放射電磁波強度については、図 7.20 における印加電圧に対して顕著な増加傾向が確認できる 0.2 GHz 付近の各最大値を用いた。図 7.21 より、放電形態によらず放射電磁波強度と放電電荷量は印加電圧の上昇に伴って増加した。これまで、アンテナを用いた放電検出は放電源の付近にアンテナを設置することが一般的である。以上より、必ずしも、アンテナを PD 発生個所付近に設置する必要はなく、周辺回路から漏れる放射電磁波を検出することで、放電の大きさも検討できる可能性が示唆された。

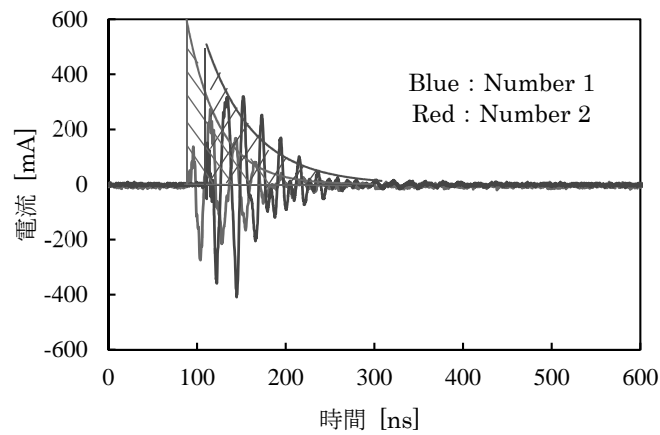


図 7.19 PD 電流波形

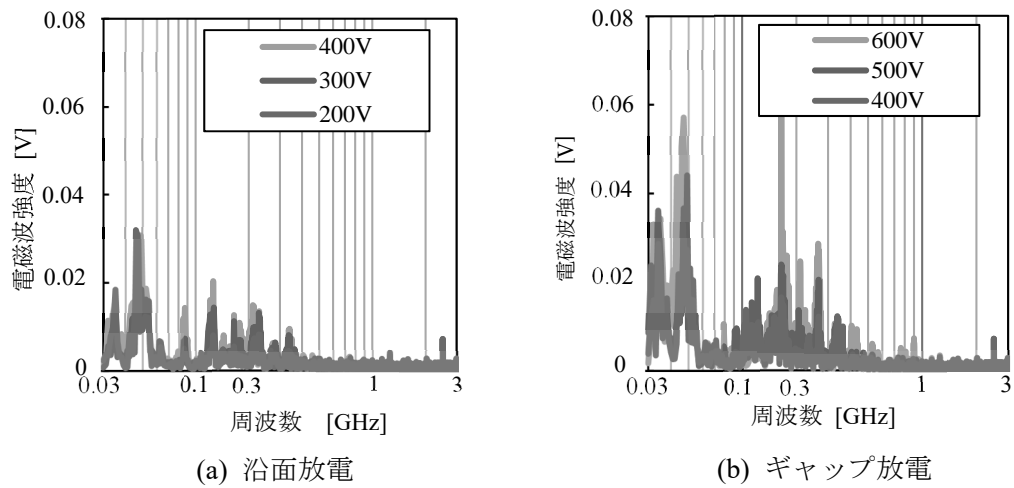


図 7.20 回路電流からの放射電磁波強度の電圧依存性

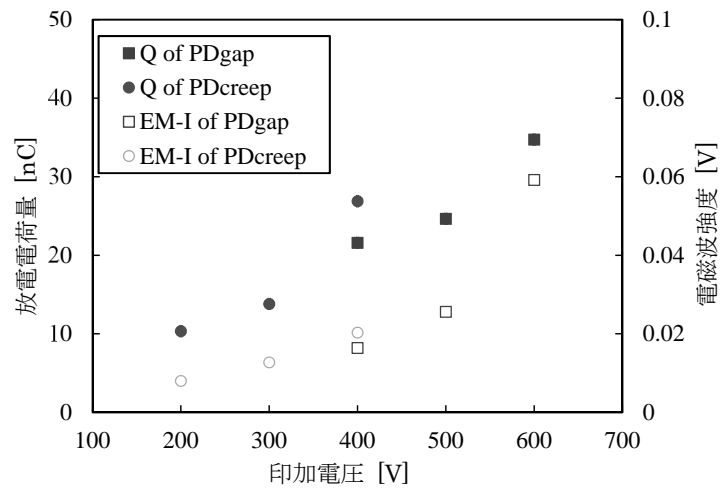


図 7.21 放射電磁波強度および放電電荷量の印加電圧依存性

7.2.4 まとめ

部分放電による放射電磁波は、放電電流波形の立ち上がり時間と強い相関を示し、電磁波強度は放 PD 発生個所と PD 発生個所付近の回路電流からの放射電磁波強度について検討した。以下に得られた知見を示す。

- (1) PD 発生個所と PD 発生個所付近の回路電流からの放射電磁波強度を測定した結果、回路電流からの放射電磁波強度は、PD 発生個所からの放射電磁波強度に比べて小さいものの検出可能である。
- (2) PD 発生個所の高電圧側に同軸ケーブルを用いた場合、PD 発生個所の GND 側に同軸ケーブルを用いた場合に比べ、放射電磁波強度および電流波形の波頭の立ち上がり微分値と電流値の最大値の積が大きくなった。これは、PD 発生個所の高電圧側の同軸ケーブルの線路容量に電荷が蓄積され、PD 発生時により多くの電荷が供給されるためと考えられる。
- (3) 実際の機器の回路接続点には接触抵抗があるため、電極系を接触短絡してそれを模擬した。接触抵抗の高電圧側に同軸ケーブルを用いた場合、接触抵抗の GND 側に同軸ケーブルを用いた場合に比べ、PD 電流の立ち上がり微分値と電流値の積および放射電磁波強度が小さくなった。接触点の高電圧側に用いた同軸ケーブルにより線路容量が増え、それを充電するための電流が増加し、その分、接触点を流れる電流が減少したためと考えられる。また、線路容量の増加によってその充電時間も長くなるため、電流波形の波頭の立ち上がり微分値と電流値の最大値の積が小さくなったためとも考えられる。
- (4) 一般的に PD 発生個所からの放射電磁波強度の最大ピーク値は回路電流からのものに比べ大きいと考えられる。しかし、沿面放電発生個所と回路電流からの周波数スペクトルのピークの結果は逆であり、沿面放電発生個所からの放射電磁波は 2 個所の周波数帯でピークを示した。これは、回路電流は回路内を一方向に集中して流れるのに対して、沿面放電は試料表面で多数発生しているためと考えられる。
- (5) 放電箇所を 1 個所に限定するためにギャップ放電の場合について検討した。結果として、ギャップ放電については、放射電磁波の数は数スペクトルのピークは 1 個所に集中した。
- (6) ギャップ放電と沿面放電における PD 発生個所からの放射電磁波強度と放電電荷量の電圧依存性について検討した。結果として、放電形態によらず放射電磁波強度と放電電荷量は印加電圧の上昇に伴って増加した。

7.3 高電界交流損失電流の非線形性と空間電荷

7.3.1 交流損失電流波形計測

誘電性材料の実使用条件を考えると、特に電力関係においては、近年直流電界下での運用機会が増加しつつあるが、依然として交流電界下での使用がほとんどである。その使用温度も極低温から室温以上まで、幅広い範囲にわたっている。このような使用条件に対して、低電界領域や室温付近までの高電界領域ではあまり問題とならなかった誘電損失も高温領域においては直流伝導率の急増により、空間電荷の移動に関連した伝導損失が重畳するため、交流損失の増加が懸念される⁽⁵⁾。交流電界印加時の電流応答は、印加電界周波数に関連した誘電特性および導電特性を示すことになる。この交流電界下の損失には、直流電界下とは異なった交流電界下特有の現象が含まれていると考えられる。一般には、 $\tan\delta$ という一周期の平均的な損失係数を測定するため、そこから得られる情報量は限られるが、交流損失電流波形には、非線形な挙動に関連した交流損失機構に対する有益な情報が含まれている可能性が高い。図 7.22 に交流損失電流測定回路を示す。試料を流れる交流電流は、充電電流(I_c)成分と損失電流(I_R)成分の 2 つの成分に分割できる。回路内の抵抗(R_s)を調整し、 I_c 成分を打ち消すことで I_R 成分のみをオペアンプで増幅して、交流損失電流波形を取得した。取得した交流損失電流波形を高速フーリエ変換を用いて解析した。ノイズ除去のため、本研究では第 5 高調波までを足し合わせて用いた。

0 kVrms/s ~ 25 kVrm/s の正弦波交流電界(30、50、100 Hz)を印加した。また印加方法は 3 種類の直線状交流ランプ電圧(3.5、7.0、14.0 Vrms/s)とした。なお、本研究では、実験前に低電界(およそ 4 kVrms/mm)で R_s を調整し、試料の充電電流成分を打ち消した後は R_s を調整していない。実験は 30 °C、50 %RH の恒温槽内で行った。

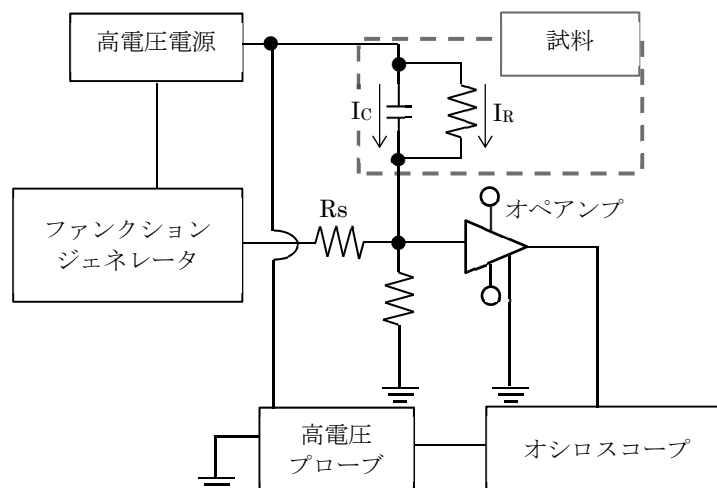


図 7.22 交流損失電流測定回路

7.3.2 試料および電極系

先行研究においては、ポリプロピレンやポリエチレン等を用いて高温領域における高電界誘電特性の検討が行われてきた⁽⁶⁾⁽⁷⁾。本研究では、直流電界下において顕著な空間電荷の侵入が確認できる材料としてエチレン酢酸ビニル共重合(EVA)フィルム(厚さ 30 μm 、10 wt%、比誘電率 2.68)と空間電荷計測の参照波形取得時に使用される等、空間電荷侵入が生じ難い材料としてポリエチレンテレフタレート(PET)フィルム(厚さ 12 μm 、比誘電率 3.35)を用いた。試料の片面には主電極(ϕ 28 mm)、ガード電極(内径 ϕ 35 mm、外径 ϕ 40mm)を金蒸着によって施し、もう片面には高電圧電極(ϕ 40 mm)を同様に金蒸着によって施した。電極系を図 7.23 に示す。図 7.23 の電極系は、高電界印加時の部分放電を抑制するため、電極系全体をエポキシ樹脂でモールドした。

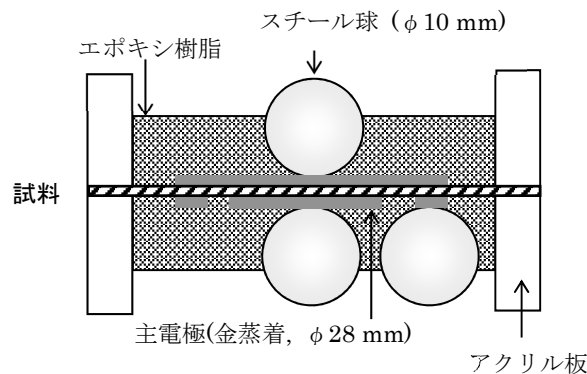


図 7.23 電極系

7.3.3 実験結果および考察

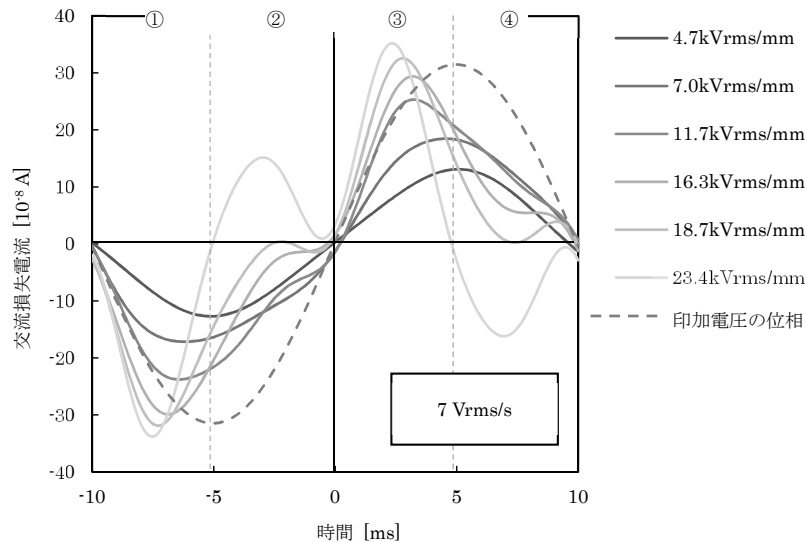
7.3.3.1 交流損失電流波形による交流空間電荷侵入の検討

図 7.24 に電圧上昇率 7.0 Vrms/s、50 Hz の直線状交流ランプ電圧下における EVA フィルムおよび PET フィルムの交流損失電流波形を示す。図 7.24 中における破線は、印加電界もしくは空間電荷の影響を受けていない場合の交流損失電流と同位相の正弦波の概形を示したものである。また、交流波形の負の周期の立下りを領域①、立上りを領域②、正の周期の立上りを領域③、立下りを領域④と定義した。図 7.24 において、EVA フィルムは、極値を 4 つもつ特異な挙動を示している。

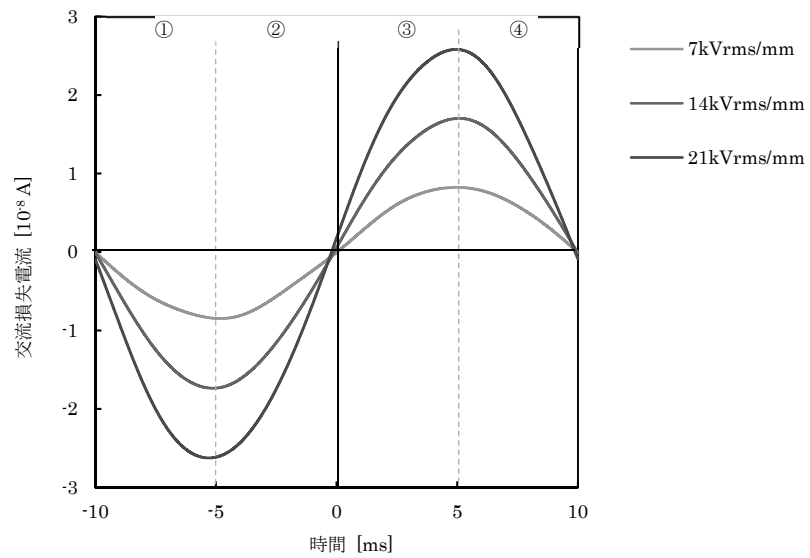
図 7.24 より、EVA フィルムは印加電界の増加に伴って、正弦波状波形ではなく非線形性を示すのに対し、PET フィルムにおいて非線形性は確認できなかった。EVA フィルムは直流電界下において、空間電荷が進入することが報告されている⁽⁸⁾。一方、PET フィルムは、直流電界下における空間電荷計測の参照波形にも用いられることから、空間電荷が進入し難い材料であると考えられる。図 7.24(a)より、EVA フィルムは領域①③において大きな電流が流れ、領域②④においては急激に減少している。図 7.25 に交流印加時における空間電荷のモデルを示す。例えば、交流波形の領域②で侵入した空間電荷は印加電圧の極性反転によっ

て、領域③においてはヘテロ空間電荷として作用する。そのため、領域③においては局所電界が強調されるため、電流が増加したと考えられる。一方、領域④においては、侵入した空間電荷はホモ空間電荷として作用する。したがって、領域④においては局所電界が緩和されるため、電流が減少したと考えられる。

ここで、交流損失電流波形の印加電圧に対する位相差に着目すると、EVA フィルムにおいては、印加電圧の増加に伴って印加電界の位相に対して位相が進んでいることがわかる。図 7.26 に各電流成分のベクトル図を示す。図 7.26 における I_c および I_R は空間電荷が侵入していない場合の充電電流成分および損失電流成分であり、 $\angle I_c$ および $\angle I_R$ は空間電荷の進入に伴って増減するそれぞれの電流成分を表している。本研究においては、低電界で I_c 成分を打ち消している。そのため、空間電荷侵入によって試料の静電容量が変化した場合、高電界においては損失電流成分のみならず充電電流成分も非線形性を示すと考えられる。したがって、実際に測定された交流損失電流波形は、空間電荷の影響によって多少増加した充電電流成分($\angle I_c$)が、 I_R 成分($I_R + \angle I_R$)に重畳される。そのため、図 7.26 における I_1 が測定されるため、印加電圧波形に対して θ_1° 位相が進んだ波形が得られると考えられる。ここで、単位面積当たり一定の空間電荷が試料内部に侵入すると仮定した場合、空間電荷の進入によって試料の実効厚さは薄くなるため、試料の静電容量は増加すると考えられる。図 7.24(a) より、EVA フィルムにおいては印加電界の増加に伴って空間電荷が進入し、静電容量が増加したため、交流損失電流波形の位相は印加電界に対して徐々に進んだと考えられる。一方、PET フィルムは空間電荷の進入が少ない材料である。そのため、図 7.24(b) より、印加電界の増加に対して位相はほとんど変化しなかったと考えられる。



(a) EVA フィルム



(b) PET フィルム

図 7.24 EVA フィルムおよび PET フィルムの交流損失電流波形(7.0 Vrms/s、50 Hz)

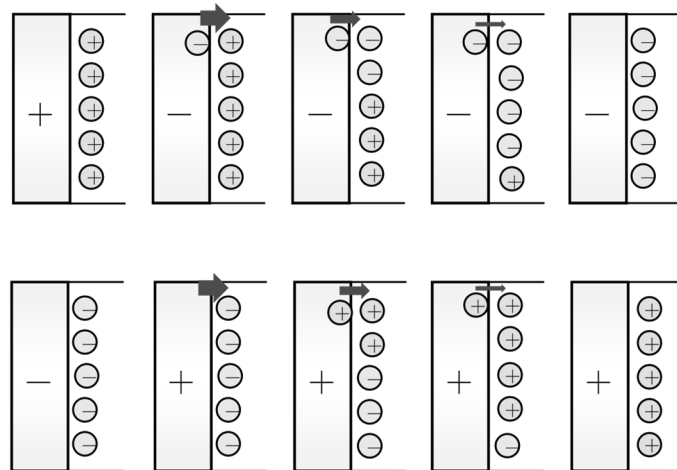


図 7.25 交流印加時における空間電荷のモデル

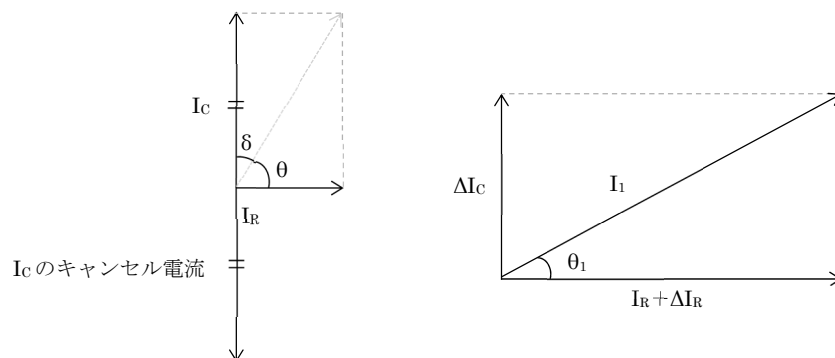


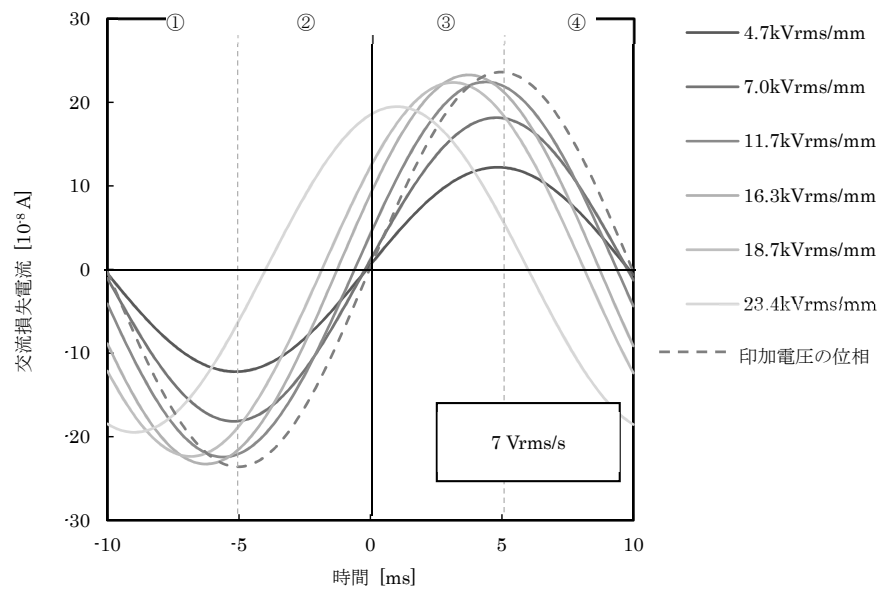
図 7.26 各電流成分のベクトル

7.3.3.2 交流損失電流波形の印加電界に対する位相差を用いた空間電荷侵入量の検討

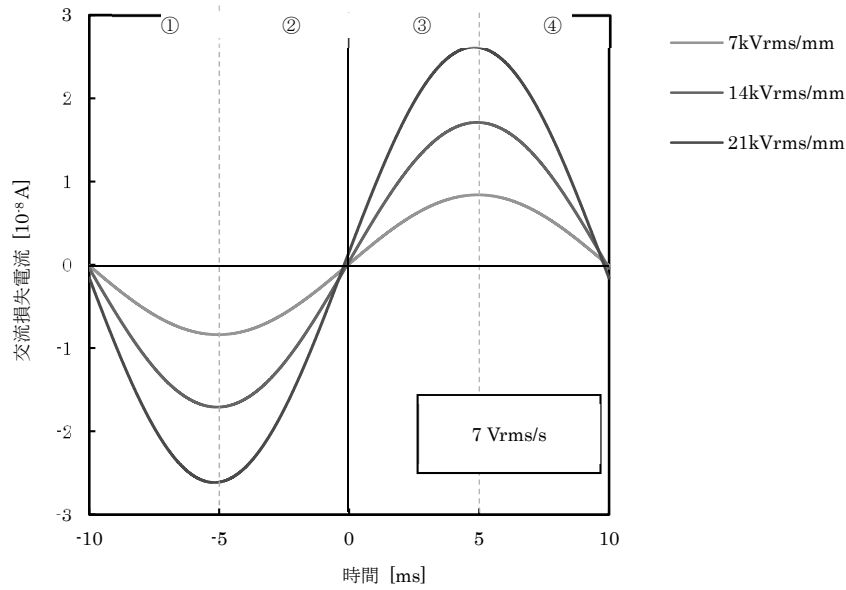
交流印加電圧に応じて空間電荷侵入が生じた場合、試料の静電容量が増加する。試料の静電容量が増加すれば、交流損失電流波形に充電電流成分が重畳されることになり、印加電圧に対する位相差が変化する。よって、交流損失電流波形の印加電圧に対する位相差を基に交流電圧印加下における空間電荷侵入を試料の実効厚さの低下として評価することができる。図 6.27 のベクトル図より、空間電荷の侵入量を試料の実効厚さの減少量(Δd)として、以下の式を用いて求めた。

$$\frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r S}{d - \Delta d} = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r S}{d} + \frac{I_1}{\omega V} \sin \theta_1$$

ここで、 ε_0 は真空の誘電率、 ε_r は比誘電率、 d は試料の厚さ、 S は試料の面積、 V は印加電圧を表している。印加電界の増加に伴って、交流損失電流波形は非線形性を示すため、空間電荷の侵入量の検討には基本波成分を用いた。図 7.27 に EVA フィルムおよび PET フィルムの交流損失電流波形の基本波成分を示す。図 7.28 に EVA フィルムおよび PET フィルムの空間電荷侵入量の電界依存性を示す。図 7.28 より、EVA フィルムにおいては、印加電界の増加に伴って、試料の実効厚さが徐々に薄くなった。空間電荷侵入に伴う実行厚さの低下として、EVA フィルムは 40.8 nm(23.4 kVrms/mm)、PET フィルムは 1.2 nm(21.2 kVrms/mm) と評価できた。以上より、交流損失電流波形の位相差を用いて、交流電界下における微小な空間電荷進入を検討できる可能性が示唆された。



(a) EVA フィルム



(b) PET フィルム

図 7.27 EVA フィルムおよび PET フィルムの交流損失電流波形の基本波成分

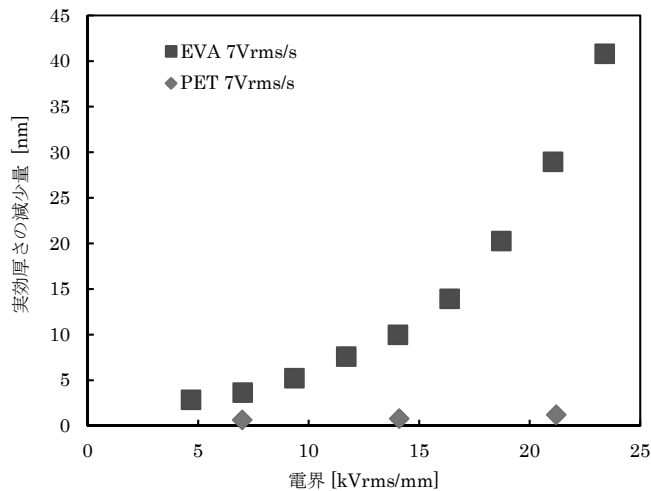


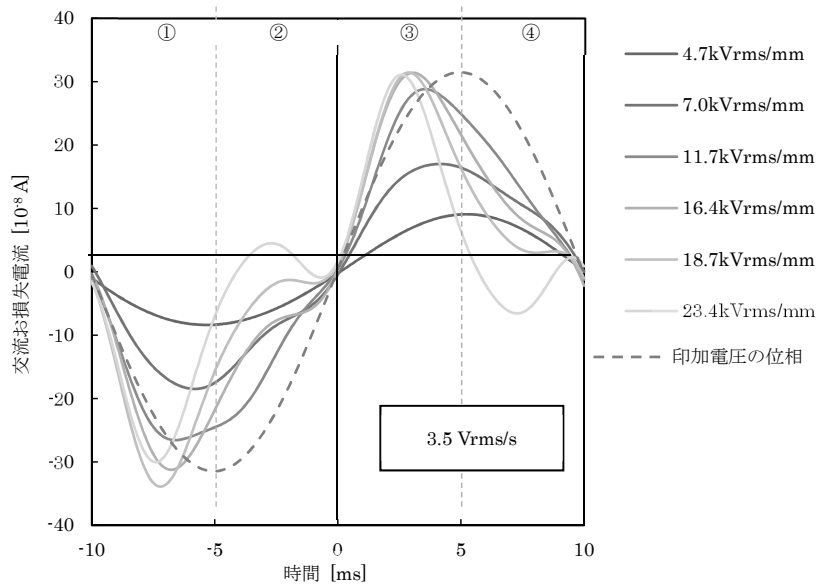
図 7.28 EVA フィルムおよび PET フィルムの空間電荷侵入量の電界依存性

7.3.3.3 交流損失電流波形の電圧上昇率依存性

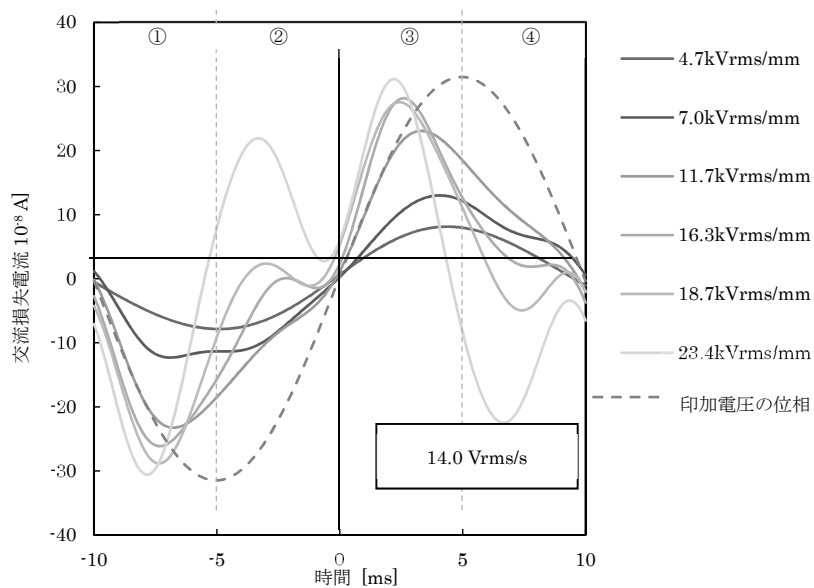
図 7.29 に EVA フィルムの 3.5 Vrms/s および 14.0 Vrms/s における交流損失電流を示す。基本波成分を用いて空間電荷の侵入量を検討した。図 7.30 にそれぞれの基本波成分を示す。図 7.31 に空間電荷侵入による試料実行厚さ減少の電圧上昇率依存性を示す。図 7.31 より、電圧上昇率が速い場合に空間電荷は多く試料内部に侵入していることがわかる。

交流電界下においては、極性反転が生じる。そのため、電圧上昇率が速い場合には前の半周期で侵入した空間電荷がキャンセルされることなく試料内部に残ったため、試料内部に多く侵入したと考えられる。ここで、図 7.24 および図 7.29 の領域②および領域④に着目す

ると、電圧上昇率によって印加電界に対する電流の増加傾向が異なっていることがわかる。先に述べたように、本研究では充電電流成分 I_c を低電界でキャンセルしているため、高電界においては空間電荷の影響によって増加した ΔI_c 成分が交流損失電流成分 ($I_R + \Delta I_R$) に重畳した波形が測定されていると考えられる。図 7.24 および図 7.29 より、領域②および領域④は、充電電流成分の極性反転する位相とほぼ同相であることがわかる。領域②および領域④においては、極性反転によって侵入した空間電荷がヘテロ空間電荷として作用し、損失電流成分のみならず I_c 成分は増加すると考えられる。結果的に、 ΔI_c 成分も増加すると考えられる。本研究では空間電荷の進入量を交流損失電流の印加電界に対する位相差で評価している。図 7.26 のベクトル図からもわかるように、位相差が生じる原因は ΔI_c 成分と考えられることから、交流損失電流波形の領域②および領域④の傾向の違いは、空間電荷の影響を受けた充電電流に起因していると考えられる。

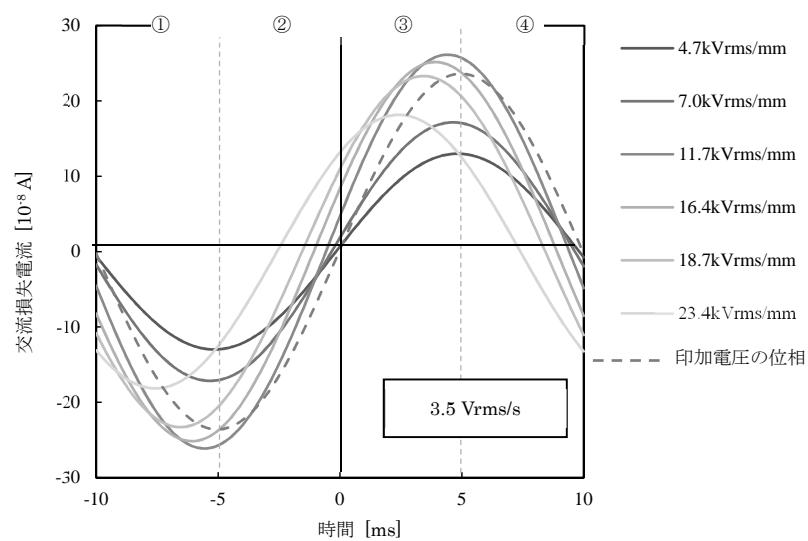


(a) 3.5 Vrms/s

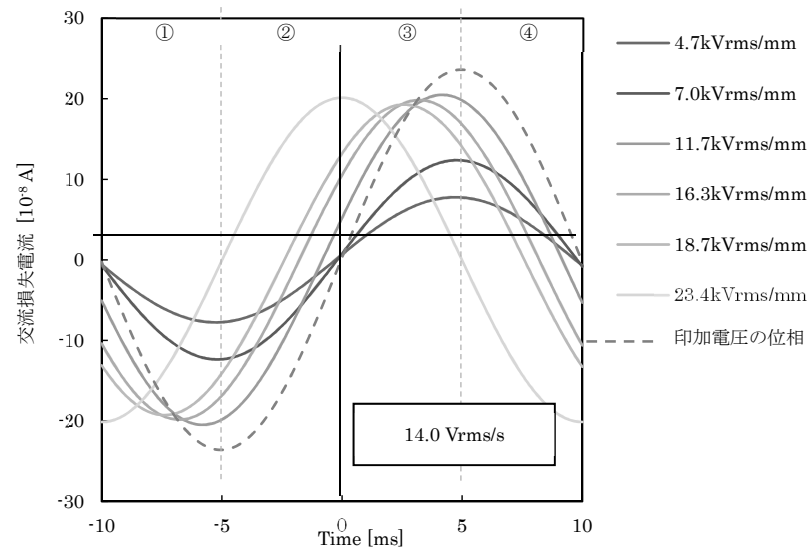


(b) 14.0 Vrms/s

図 7.29 EVA フィルムの交流損失電流の電圧上昇率依存性(50 Hz)



(a) 3.5 Vrms/s



(b) 14.0 Vrms/s

図 7.30 3.5 Vrms/s および 14 Vrms/s における EVA フィルムの交流損失電流の基本波成分 (50 Hz)

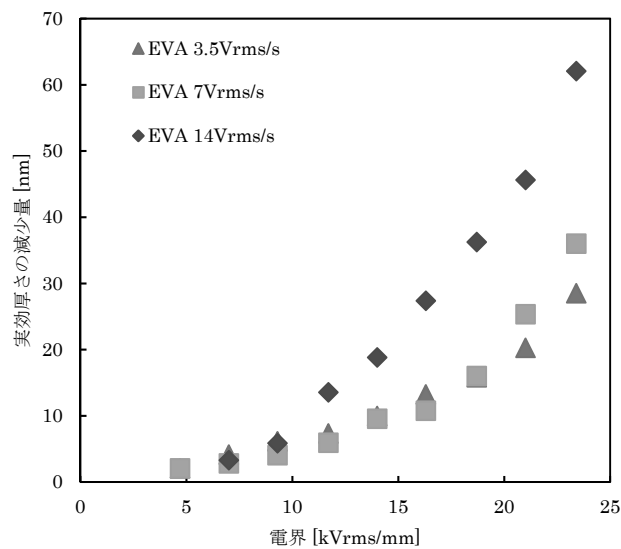


図 7.31 EVA フィルムの実行厚さ減少に与える印加電界上昇率の影響

7.3.3.4 交流損失電流波形の周波数依存性

図 7.32 に EVA フィルムの交流損失電流波形の周波数依存性を示す。図 7.32 中における破線は、空間電荷の影響を受けていない場合の交流損失電流と同位相の正弦波の概形を示したものである。また、交流波形の負の周期の立下りを領域①、立上りを領域②、正の周期の立上りを領域③、立下りを領域④と定義した。本研究では、低電界で充電電流成分をキャ

ンセルしている。高電界において、損失電流成分のみならず、充電電流成分も非線形性を示すと考えられる。そのため、測定される交流損失電流波形には、空間電荷の影響を受けて増減した充電電流成分の差分が重畳されていると考えられる。領域②と領域④は、充電電流成分の極性反転部分に相当するため、侵入した空間電荷のヘテロ空間電荷効果により充電電流成分が増加する領域である。したがって、領域②と領域④は充電電流成分の影響を受けていると考えられる。さらに、低周波数の方が空間電荷は侵入し易いと考えられる。これらより、30 Hz においては、50、100 Hz に比べて、空間電荷が侵入し易いため、試料の見掛けの静電容量の増加に伴って充電電流成分の影響が大きくなり、交流損失電流波形の位相は充電電流成分の位相とほぼ同相になったと考えられる。また、周波数の増加に伴って空間電荷侵入は生じ難くなるため、充電電流成分の影響が小さくなり、100 Hz においては領域②と領域④のピーク値が減少したと考えられる。

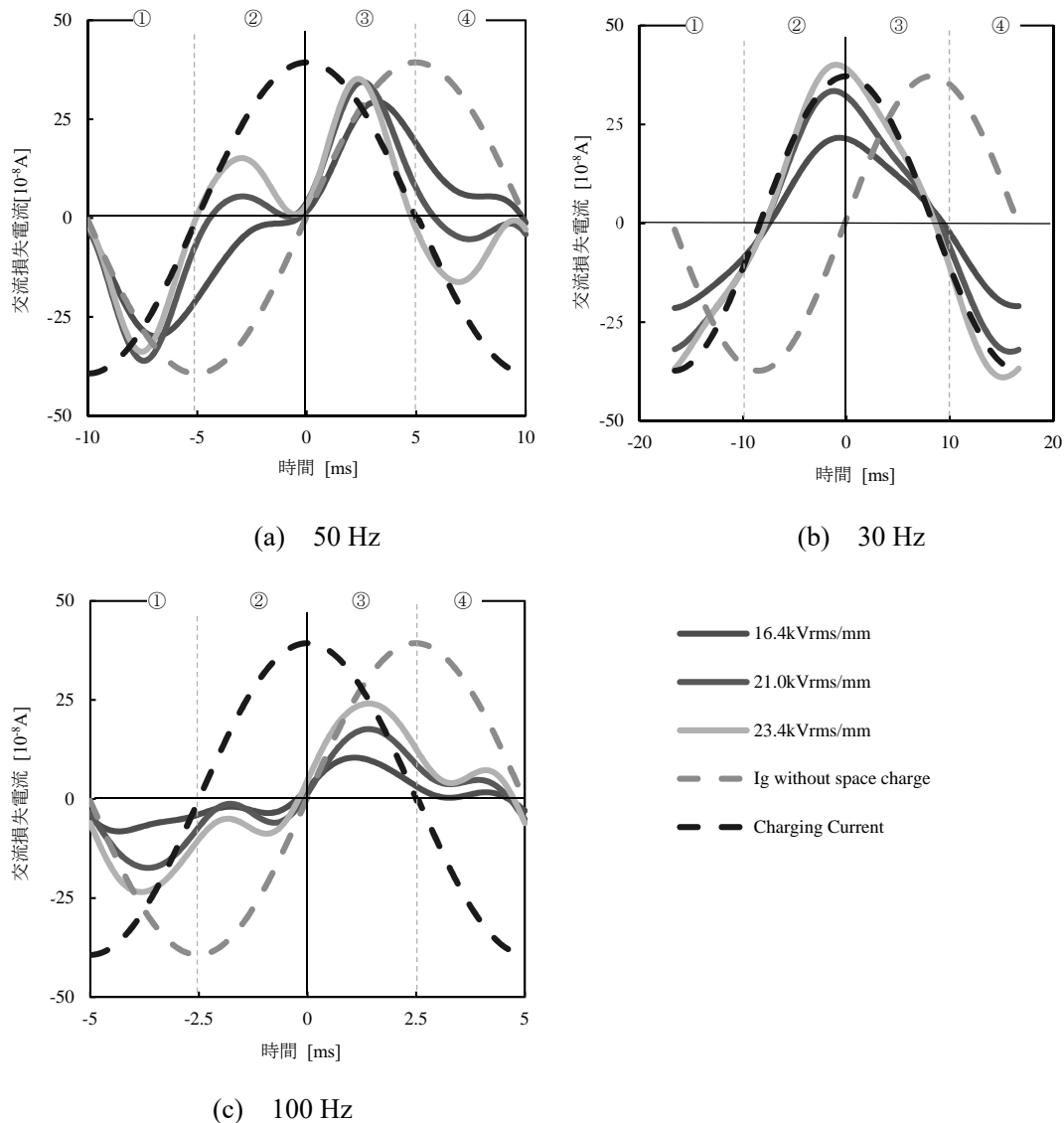


図 7.32 EVA フィルムの交流損失電流波形の周波数依存性

7.3.4 まとめ

エチレン酢酸ビニル共重合 (EVA) フィルムおよびポリエチレンテレフタレート (PET) フィルムを用いて、交流電界下における交流損失電流波形の非線形性と空間電荷の関係について検討した。以下に得られた知見を示す。

- (1) EVA フィルムの交流損失電流波形は立ち上がり時に電流が増加し、立下り時には減少するような非線形性を示した。EVA フィルムは直流電界下において空間電荷の侵入が報告されている。したがって、交流の半周期で侵入した空間電荷は極性反転時にヘテロ空間電荷として作用するため、電流は増加し、また交流ピーク以降はホモ空間電荷として作用するため、電流は減少したと考えられる。
- (2) PET フィルムの交流損失電流波形は非線形性が確認できなかった。PET フィルムは直流における空間電荷測定の参照波形にも用いられることから、交流においても空間電荷が侵入し難い材料と考えられる。したがって、PET の交流損失電流波形は非線形性を示さなかったと考えられる。
- (3) 本研究では、低電界で充電電流成分をキャンセルしている。高電界において、損失電流成分のみならず、充電電流成分も非線形性を示すと考えられる。そのため、測定される交流損失電流波形には、空間電荷の影響を受けて増減した充電電流成分の差分が重畳されていると考えられる、交流損失電流波形の位相差に着目すると、EVA フィルムは印加電界の増加に伴って、印加電界の位相に対して徐々に進んだ。一方、PET フィルムにおいては位相差がほとんど確認できなかった。したがって、位相差は空間電荷侵入に起因していると考えられる。
- (4) 交流印加電圧に応じて空間電荷侵入が生じた場合、試料の静電容量が増加する。試料の静電容量が増加すれば、交流損失電流波形に充電電流成分が重畳されることになり、印加電圧に対する位相差が変化する。よって、交流損失電流波形の印加電圧に対する位相差を基に交流電圧印加下における空間電荷侵入を試料の実効厚さの低下として評価することができる。静電容量の変化から実効厚さの減少を算出した結果、EVA フィルムは 40.8 nm(23.4 kVrms/mm)、PET フィルムは 1.2 nm(21.2 kVrms/mm)の空間電荷が進入したことが推定できた。交流損失電流波形の位相差を用いて、交流電界下における微量の空間電荷進入を検討できる可能性が示唆された。
- (5) 交流損失電流波形は電界上昇率によって、充電電流成分の極性反転部に相当する部分の傾向が異なった。一般に、電界上昇率によって空間電荷の侵入量は異なる。電界上昇率によって交流損失電流波形が異なったのは、空間電荷の影響を受けた充電電流に起因していると考えられる。
- (6) 交流損失電流波形は周波数によって、充電電流成分の極性反転部に相当する部分の傾向が異なった。低周波数においては、空間電荷が侵入し易いため、試料の見掛けの静電容量の増加に伴って充電電流成分の影響が大きくなり、交流損失電流波形の位相は充電電流成分の位相とほぼ同相になったと考えられる。

参考文献

- (1) 小暮, 他: 電波とアンテナが一番わかる, 技術評論社, p.158, p.197, 2011.
- (2) 竹内, 他: 「模擬部分放電発生回路を用いた電流波形と放射電磁波強度における相関性の検討」, 平成 24 年度電気関係学会東海支部連合大会, CD-ROM, G4-7, 2012.
- (3) 山田, 他: 「シクロヘキサンの破壊前駆電流と破壊の進展速度に及ぼす四塩化炭素の添加効果」, 電気学会論文誌 A, Vol.112, No.7, pp.651-657, 1992.
- (4) 堤, 他: 「空气中, 針-平板電極系におけるコロナ放電の電波雑音スペクトル」, 電気学会論文誌 A, Vol.111, No.8, pp.733-740, 1991.
- (5) 所, 他: 「高温領域におけるポリエチレンフィルムの高電界誘電特性」, 電気学会論文誌 A, Vol.111, No.2, pp.111-116, 1991.
- (6) 遠山, 他: 「高温領域における電子線照射架橋ポリエチレンフィルムの高電界誘電特性」, 電気学会論文誌 A, Vol.115, No.6, pp.521-526, 1995.
- (7) 所, 他: 「高温領域におけるポリプロピレンフィルムの高電界誘電特性」, 電気学会論文誌 A, Vol.110, No.6, pp.372-378, 1990.
- (8) 村上, 他: 「極低温-室温領域における EVA フィルム中の空間電荷測定」, 電気学会論文誌 A, Vol.121, No.8, pp.758-763, 2001.

第8章 総括

8.1 本研究によって得られた知見

本論文では、電力機器・ケーブルで主に採用されている複合絶縁系において帯電電荷の挙動が部分放電特性および絶縁破壊特性に与える影響を明らかにした。以下に得られた知見を列挙する。

(1) 高粘度絶縁油中における部分放電と表面帯電

長距離海底ケーブルにも採用されている直流 DC ソリッドケーブルの絶縁紙-高粘度油複合絶縁系は、従来の低粘度絶縁油を複合した絶縁系に比べて部分放電が発生し難くなった。高粘度絶縁油を浸漬したことによる絶縁抵抗の増加が帯電電荷の移動を生じ難くするためと考えられる。高粘度絶縁油を浸漬することによって絶縁性能の向上が期待できる。

(2) 絶縁紙-液体窒素複合系の部分放電を介した絶縁破壊と内部帯電

直流超電導ケーブルの電気絶縁構成として絶縁紙-液体窒素複合系を用いた場合、絶縁紙内部へ部分放電によって負電荷が侵入し、絶縁破壊の強さを低下することを明らかにした。絶縁紙の密度を増加することによって絶縁紙内部への負電荷侵入の抑制が期待できる。

(3) 絶縁体-空気ギャップ複合絶縁系における部分放電と表面電荷

電気自動車用モータに使用されるポリイミドの部分放電特性に与える帯電の影響を調査し、除電による部分放電開始電圧の測定ばらつきの低減と帯電によって部分放電開始電圧が増減することを明らかにした。また、帯電分布を加味することによって部分放電がギャップ間の電位差のみで決定されていることを示した。

(4) アンテナを用いた新たな部分放電検出手法

パッチアンテナとディスコーンアンテナを用いて部分放電に起因した回路電流からの放射電磁波の検出を行った。従来の部分放電発生源にアンテナを向けて検出する方法と同様に回路電流からも部分放電に起因した放射電磁波が検出可能であり、その放射電磁波強度が部分放電の大きさに比例することと周波数スペクトルに放電の種類に応じた特徴があることを明らかにした。機器外部の接続部から漏れる放射電磁波の信号を解析することによって、機器内部の劣化状態を推測する新たな部分放電検出技術を提案できる可能性がある。

(5) 交流損失電流波形を用いた内部帯電診断

空間電荷侵入が生じ易いエチレン酢酸ビニル共重合体の交流損失電流波形には空間電荷

侵入の影響で非線形性を示した充電電流成分が重畳するため、従来のポリプロピレンやポリエチレンで観測されていた交流損失電流波形と比べて特異な非線形性波形が得られることを明らかにした。また、交流損失電流波形の位相差を用いることによって微量の空間電荷侵入を推定できることを示した。交流損失電流は波形の非線形性を用いた電力ケーブルの診断は行われる際、第3次高調波の信号増加を劣化指標として用いられる。しかし、第3次高調波の増加が何に起因したものかは十分に把握できていないと考えられる。先行研究と本研究の成果を合わせると絶縁体内部の空間電荷の増加が大きく影響していることを示唆した。

8.2 工学的応用

本研究から得られた知見の工学的応用に関して以下に述べる。アンテナを用いた新たな部分放電検出手法および交流損失電流波形を用いた内部空間電荷計測に関しては基礎検討であるため、工学的応用の記載は避け今後の課題のみを次節にて述べた。

(1) 高粘度絶縁油中における部分放電と表面帯電

DC ソリッドケーブルを運用する上で、電力潮流制御による極性反転の方式によって絶縁性能および試験方法の観点から以下の二つが提言できる。

- ① 実際の DC ケーブルにおいては極性反転が生じる場合には、高粘度絶縁油は帯電電荷の移動を抑制するため極性反転時に帯電電荷がヘテロ電荷として作用し電界を強調するため、絶縁性能低下の要因になる可能性もある。しかしながら、DC 送電の電力潮流の制御方式において極性反転が少ないもしくは無い場合(電流反転方式)においては、絶縁油の粘度を上げることで部分放電の発生間隔を長くすることができるため絶縁劣化ひいては絶縁破壊が生じ難くなり、絶縁上有利になる。
- ② 電力ケーブルは出荷試験および竣工試験時に部分放電を測定することによってその健全性を判断する。しかしながら、表 8.1 の通り CIGRE(国際大電力システム会議)や IEC(国際電気標準会議)において決定されている電力ケーブルの規格試験項目(表 8.1)⁽¹⁾には直流における部分放電測定の記載はない。極性反転が生じる場合(電圧反転方式)においては、高粘度絶縁油を用いた場合は帯電電荷によって局所電界が強調されるため部分放電の発生を助長することになる。したがって、この場合には部分放電測定により健全性を判断する必要がある。一般的に、部分放電測定の結果は統計的に解析されるため、多数の実験結果を取得する必要がある。絶縁油の粘度が非常に高い場合においては、部分放電の発生時間間隔が長いいため、試験に時間を要することになる。本研究の成果を基に帯電電荷の逃げに関係する漏えい抵抗と材料の静電容量から求まるを定義すれば、試験時間 T は $T \gg \tau$ にする必要がある。実際のケーブル形状とは異なるため一概には言えないが、本研究の成果より直流一定電圧下においてはおよそ 300 s 間隔(放電発生時定数 τ)で部分放電が発生しているため、1000 発の

部分放電を測定するためには $1000 \text{ 発} \times 300 \text{ s} = 300000 \text{ s}$ (およそ 84 時間)試験時間を要することになる。試験時間を短縮して帯電の影響を確認するためには、極性反転試験を行えばいいが、極性反転の間隔 T_r を $T_r \ll \tau$ とする必要がある。

表 1.1 各種電力ケーブルに推奨される電気試験⁽⁶⁾

Cable Type	1	2	3	4	5
Rated Voltage	33kV(AC)	150 kV (AC)	420 kV (AC)	150kV(DC)	450kV(DC)
Insulation	XLPE	XLPE	Paper/Oil	Polymer	Mass-impregnated
Mechanical tests	Electra 171 ⁴				
Electrical type test	Electra 189a with reference to IEC60840	IEC60840	IEC62067	CIGRE technical Brochure TB219	Electra 189b
Test Sequence	TB PD tan δ HC PD LI AC (PD) (same as in IEC 60502)	TB PD tan δ HC PD LI AC (PD)	TB PD tan δ HC PD SI(for $U_m \geq 300 \text{ kV}$) LI AC (PD)	TB LC SI LI&DC DC	TB LC PR LI SI

TB: Tensile bending test, PD: Partial discharge test, HC: Heating cycle voltage test, LI: Lightning impulse test, SI: Switching impulse test, LC: Load cycle test, PR: Polarity reversal test, DC: High voltage test with DC, AC: High voltage test with AC

(2) 絶縁紙-液体窒素複合系の部分放電を介した絶縁破壊と内部帯電

超電導ケーブルの絶縁紙には今後も PPLP が主流と考えられる。PPLP は優れた絶縁性能を有しているが、従来の解釈はそもそも優れた絶縁性能を有する PP フィルムが PPLP の絶縁性能を支えており、耐ストリーマ性が高い KP が PP フィルムを保護するバリア層の役割を担っていると解釈されている。しかしながら、本研究から得られた知見より、直流超電導ケーブルにおいては、KP 内部への負電荷侵入が PP フィルム周辺の電界を変歪する(図 8.1)ため PPLP の絶縁性能を低下する恐れがある。PPLP の直流電界下における絶縁性能を向上する上では KP の密度を増加することが有効と考えられる。しかしながら、液体窒素の浸漬性の観点から考えれば、密度の増加は浸漬性を悪くする。本研究では絶縁紙単層での試験のため、実際のケーブルの絶縁層に比べて極めて薄いことから浸漬性の問題は実験結果に表れていないと考えられる。ケーブルモデル等を用いて浸漬性と電荷侵入抑制効果が両立する絶縁紙の密度の選定を行えば、直流超電導ケーブルに適した絶縁紙の選定指標を提言できると考えられる。超電導ケーブルは交流での実績も少なく、未だ発展途上である。直流超電導ケーブルの絶縁に関する報告例もあるが、本研究のように電荷侵入モデルを含めて詳細に絶縁破壊メカニズムを検討した例は無い。一方で、北海道石狩市における直流超電導ケーブルのプロジェクトや鉄道の直流超電導き電ケーブルのプロジェクト等も始まっている。従来の電圧階級に合わせて絶縁破壊の強さの高い絶縁紙を選定する方法ではなく、電荷侵入メカニズムを考慮して絶縁紙の特性を選定する方法によって超電導ケーブルの信頼性は更に向上することが期待できる。また、本研究によって得られた知見は、直流超電導ケーブル用の絶縁紙開発に基本的な指針を与えるものと考えられる。

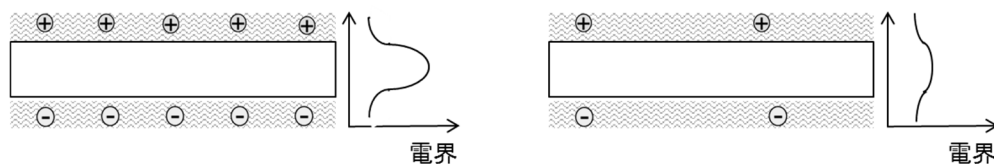


図 8.1 空間電荷侵入による PP フィルム周辺の電界変歪の模式図

(3) 絶縁体-空気ギャップ複合絶縁系における部分放電と表面電荷

モータ巻線の評価指標として部分放電開始電圧計測と同時に発光計測が用いられる場合が多い。また、実機モータを模擬したツイストペア試料を用いる場合が多い。ツイストペア試料はエナメル線をより合わせた試料であるため、エナメル線間に微小なギャップを多数有している。したがって、部分放電発生個所が試料内に多数存在する場合がある。実際にツイストペア試料による部分放電特性を取得した結果、同時に数か所で部分放電による発光が観測されている報告(図 8.2)もある⁽²⁾。本研究の成果より、帯電によって PDIV が増減することを明らかにした。これを踏まえれば、発光計測によって部分放電の発生を確認する場合においては、前の部分放電による発光箇所と次の部分放電による発光箇所が異なっている

ことを確認する必要があると考えられる。例えば、同じ場所で発光している部分放電の発生電圧を機器の健全性の判断指標等に用いた場合、図 6.3 のように部分放電発生電圧は同極性電圧を印加し続けた場合に増加するため、機器の安全性を過剰に評価することになり、それを用いて絶縁設計を行った場合には、実際の絶縁性能を見誤る可能性が高くなる。また、PDIV の最小値を用いて設計電界を決定する場合においても、最小値そのものが帯電によって変化している可能性がある。

以上の通り、同一試料を用いて連続試験する場合には、放電発生個所は測定された部分放電発生電圧ごとに異なることを確認する必要がある。電圧印加方法に極性反転を加えて帯電を排除する等の試験電圧の選択にも工夫が必要と考えられる。

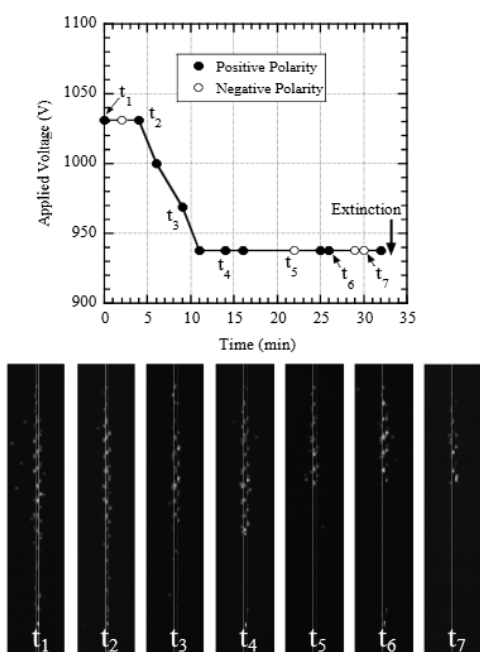


図 8.2 ツイストペア試料における部分放電特性⁽²⁾

8.3 今後の課題と問題点

本研究の成果は、帯電挙動が部分放電特性に与える影響を実際の電力機器・ケーブルに用いられる複合絶縁系の簡易モデルを用いて検討したため、実際の絶縁層の厚さや電圧波形による検討は行えていない。実際の電界分布とは異なるため本研究で得られた電荷挙動のモデルをそのまま実機に適用することはできない。したがって本研究の成果を基に実機に近いモデルを用いた実験とその結果の解析を行う必要がある。以下に各複合絶縁系における検討課題を述べる。

(1) ケーブルモデルによる実形状に近い条件での実験

ソリッドケーブルおよび超電導ケーブルの絶縁構成にはバッドギャップが存在している。図 8.3 の通りバッドギャップの位置による部分放電特性および絶縁破壊特性に与える帯電の影響を本研究で得られた電荷挙動モデルを基に解析し、より実形状に近い電界における帯電挙動が絶縁性能に与える影響の把握が必要である。例えば、本研究の成果から予想されるモデルとしては、高電圧側により近い絶縁層には密度の高い絶縁紙を用いるといった新たなケーブル形状における絶縁構成の提案も可能となると考えている。しかし、液体絶縁体の粘度と絶縁紙の密度が浸漬性に大きく影響するため実験的な検討は必要不可欠である。

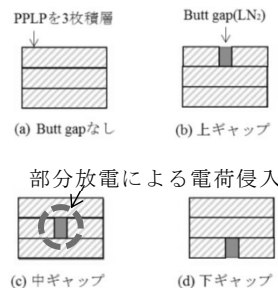


図 8.3 バッドギャップの条件

(2) インバータサージ電界下における実験

電気自動車で実際に問題となるのはインバータサージであるが、本研究では簡単のために直流電界を印加し帯電と部分放電の関係を明らかにした。実際のサージ電圧における部分放電特性はツイストペアサンプルにおける検討例が多く、本研究で行った簡易モデルでの検討例は極めて少ない。実際にはツイストペア試料を用いて更に実機モデル近付けることが望まれるが、図 8.4 の通りツイストペア試料を用いたインバータサージ化における帯電と繰り返し部分放電開始電圧の関係⁽³⁾は本研究の成果のようにギャップ間の電位差のみで検討できない可能性を示している。サージ電圧下においては電極からの初期電子供給が直流に比べて生じ難くなるため、絶縁体表面から簡単に脱離できる状態においては、帯電電荷自身が初期電子として作用することも十分に想定される。図 8.4 の報告は、サージ電圧下に

における分部分放電特性が帯電によって変化する可能性を実験的に示しているが、本研究で行った簡易モデルで先に検討し、その後ツイストペア試料を用いて検討を行うことでサージ電圧下における帯電電荷の振る舞いが部分放電特性に与える影響を更に詳細に検討できると考えられる。簡易モデルにおけるインバータサージ電界下での帯電挙動を把握し、直流電界下において得られた帯電挙動モデルを基にインバータサージ電界下における部分放電特性の解析を行うことで、より実機適用可能な知見が得られるものとする。

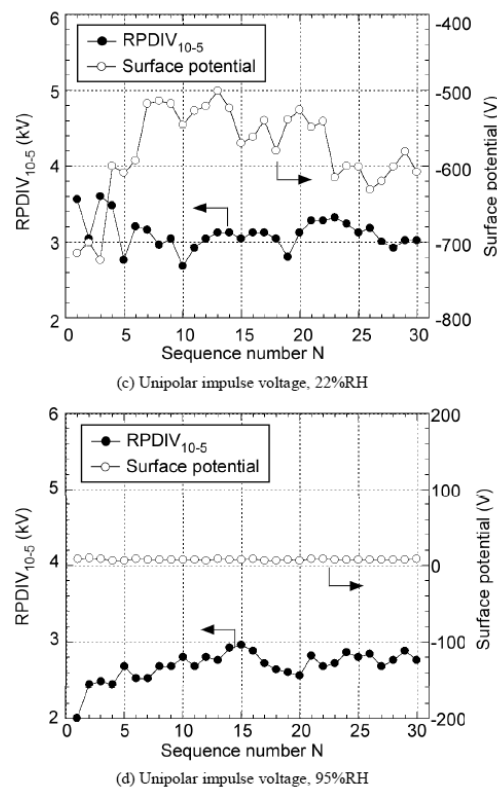


図 8.4 サージ電圧下におけるツイストペア試料の繰り返し部分放電特性と表面電位⁽³⁾

(3) アンテナによる部分放電に起因した回路電流からの放射電磁波検出の条件の見直し

本研究では、コンデンサをスイッチで充放電することによって任意のパルス電圧を印加し部分放電を発生させた。得られた回路電流からの放射電磁波の強度と周波数スペクトルには回路の共振条件が大きく影響している可能性がある。回路の共振条件を回路シミュレータ等で解析し、得られた周波数スペクトルを再度解析し直す必要がある。また実際には交流電圧下で運用される機器が大半であることから、交流電圧下における部分放電に起因した回路電流からの放射電磁波特性を検討する必要がある。その際、媒質の体積抵抗率によって放射電磁波強度が変化することが分かっている。また、沿面放電の進展に材料表面の電子状態が影響している可能性も考えられる。これらを含めて、さらなる検討が必要である。

(4) 交流電界下における電気伝導モデルの見直し

本研究では交流損失電流の非線形性を直流電界下における空間電荷の挙動を用いて解析し、定性的には説明できたと考えている。しかし、交流電界下における電気伝導は直流電界下と異なる。交流電界下の空間電荷計測をパルス静電応力法(PEA 法)等によって取得し、その際の空間電荷形成モデルと交流損失電流波形の非線形性を比較・検討することが必要と考えられる。

参考文献

- (1) Thomas Worzyk : “Submarine Power Cables Design, Insulation, Repair Environmental Aspects”, Springer, p.139, 2009.
- (2) 梅原, 他 : 「模擬インバータサージ電圧下におけるエナメル線ツイストペアの部分放電特性」, 電気関係学会九州支部連合大会, 04-2P-02, p.515, 2011.
- (3) 菊池, 他 : 「繰り返しインパルス電圧における部分放電開始電圧の湿度特性と前課電効果」, 電気学会論文誌 A, Vol.135, No.3, pp.168-174, 2015.

謝辞

本研究の遂行ならびに本論文の作成に当たり、終始親切なご指導、ご鞭撻を承りました豊橋技術科学大学教授 工学博士 長尾雅行先生ならびに同大学教授 工学博士 穂積直裕先生、同大学准教授 博士(工学) 村上義信先生、名古屋大学助教 博士(工学) 栗本宗明先生に心から御礼申し上げます。また、本論文の作成あたり有益なご助言をいただきました豊橋技術科学大学教授 博士(工学) 滝川浩史先生ならびに同大学教授 工学博士 櫻井庸司先生に厚く御礼申し上げます。また日頃、研究を進めるにあたり種々の御便宜を頂いた豊橋技術科学大学 電気・電子情報工学系 機能電気システムコースの先生方をはじめ、電気・電子情報工学系の各先生方に心から御礼申し上げます。

本研究の遂行にあたり実験・解析に多大なるご協力いただいた本研究室学生諸氏に感謝いたします。

ポリイミド表面上の帯電が部分放電特性に与える影響の検討においては、装置の構築および実験結果の解析において有益なご助言をいただきました静岡理工科大学教授 工学博士 石田隆弘先生に厚く御礼申し上げます。

交流損失電流波形の非線形性を用いた空間電荷侵入量の検討においては、装置の構築および実験結果の解析において有益なご助言をいただきました沼津工業高等専門学校教授 工学博士 遠山和之先生に厚く御礼申し上げます。

液体窒素中における PPLP の絶縁破壊特性に与える電荷挙動の検討においては、試料を提供いただきました住友電気工業株式会社 超電導製品開発部 応用開発部 ケーブル技術グループの皆様に厚く御礼申し上げます。

最後に、本論文の作成ならびに日々の生活を温かく見守ってくれた両親に心から感謝して本研究の謝辞といたします。

研究業績

本研究内容に関する業績

査読付学術論文			
No.	論文題目	発表機関	著者
1	絶縁紙-液体窒素複合系の 絶縁破壊に及ぼすプレストレスの 影響	電気学会論文誌 A, Vol.134, No.12, pp.629-634 (2014)	<u>川島朋裕</u> , 村上義信, 長尾雅行, 稲垣芳宏, 芦辺祐一, 増田孝人
2	絶縁体/空気ギャップ複合絶縁系 における直流および交流部分放 電開始電圧に及ぼす表面帯電の 影響	電気学会論文誌 A, Vol.135, No.4, pp.235- 240 (2015)	<u>川島朋裕</u> , 井上快勝, 横見和也, 村上義信, 石田隆弘, 長尾雅行
3	部分放電に起因した回路電流か らの放射電磁波強度に及ぼす 線路容量の影響	電気学会論文誌 A, Vol.136, No.7, pp.409- 413 (2016)	<u>川島朋裕</u> , 山田倫弘, 竹内健司, 村上義信, 山田修一, 長尾雅行
4	高粘度絶縁油中における絶縁紙 の直流部分放電特性と電荷挙動	電気学会論文誌 A, Vol.136, No.7, pp.442- 447 (2016)	<u>川島朋裕</u> , 大西浩樹, 村上義信, 長尾雅行
査読付レター			
No.	論文題目	発表機関	著者
1	Dielectric characteristic of insulating paper-ice composite material in liquid nitrogen	IEEE Transactions on Fundamentals and Materials, Vol.133, No.3, pp.123-124 (2013)	<u>T. Kawashima</u> M. Kurimoto Y. Murakami M. Nagao

査読付国際会議論文			
No.	論文題目	発表機関	著者
1	Dielectric characteristic of insulating paper-ice composite material in liquid nitrogen	2011 International Symposium on Electrical Insulating Materials, Kyoto, Japan, MVP2-27, pp.433-436 (2011)	<u>T. Kawashima</u> M. Kurimoto Y. Murakami M. Nagao
2	Influence of DC prestress on impulse breakdown strength of insulating paper-liquid nitrogen composite system	IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, Montreal, Canada, pp.361-364 (2012)	<u>T. Kawashima</u> M. Kurimoto Y. Murakami M. Nagao Y. Inagaki Y. Ashibe H. Hirota
3	Influence of prestressing on the breakdown of insulating paper-liquid nitrogen composite system	2014 International Symposium on Electrical Insulating Materials, Nigata, Japan, VA24, pp.272-275 (2014)	<u>T. Kawashima</u> Y. Murakami M. Nagao Y. Inagaki Y. Ashibe T. Masuda
4	DC prestressing effect on breakdown characteristic of insulating paper in liquid nitrogen and insulating oil	2014 IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, Iowa, USA, 3A-20, pp.138-141 (2014)	<u>T. Kawashima</u> Y. Murakami M. Nagao Y. Inagaki Y. Ashibe T. Masuda

その他の業績

学術論文 (4 編)

1. 村上 義信, 宇瀬 尚平, 山口 修平, 川島 朋裕, 武藤 浩行, 穂積 直裕, 長尾 雅行, 「鱗片状窒化ホウ素の配向が静電吸着法で作製したポリメタクリル酸メチル/窒化ホウ素コンポジット電気絶縁材料の電気特性および熱的特性に与える影響」電気学会論文誌 A, Vol.137, No.4, pp.202-207, 2017.
2. 宇瀬 尚平, 村上 義信, 武藤 浩行, 川島 朋裕, 長尾 雅行, 「静電吸着法を用いた放熱性ポリメタクリル酸メチル/窒化ホウ素コンポジット絶縁材料の作製」, 電気学会論

文誌 A, Vol.136, No.4, pp.186-192, 2016.

3. 藤井 敦啓, 廣田 翔, 村上 義信, 武藤 浩行, 川島 朋裕, 田尻 邦彦, 塩田 裕基, 釣本 崇夫, 長尾 雅行, 「静電吸着法を用いた放熱性コンポジット絶縁材料の作製」, 電気学会論文誌 A, Vol.135, No.4, pp.217-222, 2015.
4. M. Kurimoto, T. Kawashima, D. Kusaba, Y. Murakami, M. Nagao, “DC dielectric breakdown characteristic of mesoporous-alumina/epoxy composite”, IEEJ Transactions on Fundamentals and Materials, Vol.133, No.3, pp.111-115, 2013.

国際会議発表 (3 件)

1. K. Inoue, K. Yokomi, T. Kawashima, Y. Murakami, T. Ishida, M. Nagao, “Influence of surface charge distribution on insulating sheet on partial discharge inception voltage under DC voltage application”, 4th International Symposium on Technology for Sustainability, No.451, (4 pages), Taipei, Taiwan (2014)
2. A. Fujii, Y. Murakami, T. Kawashima, H. Muto, M. Nagao, “Development of PMMA/BN composite insulating material using electrostatic absorption method”, 4th International Symposium on Technology for Sustainability, No.441, (4 pages), Taipei, Taiwan (2014)
3. M. Nagao, Y. Murakami, T. Kawashima, “Visualization of electric charge behavior in electrical insulating materials”, Institute for Global Network Innovation in Technology Education, P-10, (1 page), Penang, Malaysia (2013)

受賞 (5 件)

1. 川島 朋裕, IEEE 名古屋支部優秀学生賞, IEEE 名古屋支部 (2010)
2. T. Kawashima, Most Valuable Poster Presentation Award, “Dielectric characteristic of insulating paper-ice composite material in liquid nitrogen”, 2011 International Symposium on Electrical Insulating Materials (2011)
3. 川島 朋裕, 電気学会優秀論文発表賞 B 賞, 「液体窒素中における絶縁紙-氷複合材料の誘電特性」, 電気学会東海支部連合大会 (2012)
4. T. Kawashima, 2012 IEEE DEIS Japan Chapter Best Paper Presentation Award in International Conference, “Dielectric characteristic of insulating paper-ice composite material in liquid nitrogen”, Dielectric and Electrical Insulation Society (DEIS) Japan Chapter (2012)

5. T. Kawashima, 2013 IEEE DEIS Japan Chapter Student Best Paper Presentation Award, “Influence of DC prestress on impulse breakdown strength on insulating paper-liquid nitrogen composite system”, Dielectric and Electrical Insulation Society (DEIS) Japan Chapter (2013)

国際会議論文 (10 編)

1. T. Kawashima, Y. Kitagawa, Y. Murakami, N. Hozumi, M. Nagao, “Influence of Charge Behavior on Breakdown Strength of Kraft Paper in Liquid Nitrogen”, International Electronics Symposium, Bali, Indonesia, pp. 234-237 (2016)
2. T. Kawashima, Yip Pui San, Y. Murakami, M. Nagao, “Effects of partial discharge on DC breakdown characteristics of paper-ice composite insulation system in liquid nitrogen”, 2016 IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, Toronto, Canada, pp. 235-238 (2016)
3. T. Kawashima, Y. Yamashita, Y. Murakami, M. Nagao, K. Tohyama, “Nonlinear distortion of AC dissipation current waveform and space charge in EVA film”, 1st International Conference on Dielectrics, Montpellier, France, pp.147-150 (2016)
4. Y. Murakami, T. Sugiyama, T. Kawashima, M. Nagao, M. Fukuma, “Signal recovery of space charge distribution using acoustic property in PEA method”, 2015 IEEE 11th International Conference on the Properties and Applications of Dielectric Materials, Sydney, Australia, pp.344-347, 2015.
5. Y. Murakami, T. Sugiyama, T. Kawashima, M. Nagao “Development of thermal conductive PMMA/BN electric insulating composite material using electrostatic adsorption method”, 2015 IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, Michigan, USA, pp.680-683, 2015.
6. M. Kida, T. Kawashima, Y. Murakami, M. Nagao, “AC partial discharge characteristic at minute air gap under non-uniform electric field”, 2015 IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, Michigan, USA, pp.322-325, 2015.
7. H. Tanaka, T. Kawashima, Y. Murakami, M. Nagao, “Flashover characteristics of silicone rubber surface influenced by surface charge”, 2015 IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, Michigan, USA, pp.836-839, 2015.

8. Y. Murakami, T. Sugiyama, T. Kawashima, M. Fukuma, M. Nagao, “Space Charge Measurement System Equipped with a Function to Measure Acoustic Properties”, 2014 International Symposium on Electrical Insulating Materials, Nigata, Japan, DS1, p.156, 2014.
9. M. Yamada, Y. Murakami, T. Kawashima, M. Nagao, “Electrical Breakdown of Dielectric Elastomer and Lamination Effect”, Conference on Electrical Insulation & Dielectric Phenomena, Iowa, USA, 3A-17, pp.126-129, 2014.
10. Y. Murakami, H. Suzuki, T. Kawashima, M. Nagao, “Electrical characteristics of PVDF/BTO nanocomposites under DC voltage application”, Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, Iowa, UAS, 8A-5, pp.683-686, 2014

国内会議発表 10 件(その他 113 件、計 123 件)

1. 川島 朋裕, 山下 佑樹, 村上 義信, 長尾 雅行, 遠山 和之, 「エチレン酢酸ビニル共重合フィルムの高電界非線形交流損失電流と空間電荷」, 電気学会誘電・絶縁材料研究会, DEI-16-105, p.69-73, 2016.
2. 川島 朋裕, 村上 義信, 長尾 雅行, 遠山 和之, 「EVA フィルムの交流損失電流波形の周波数依存性と空間電荷」, 電気学会全国大会, 2-036, p.46, 2016.
3. 川島 朋裕, 山田 倫弘, 竹内 健司, 村上 義信, 山田 修一, 長尾 雅行, 「部分放電発生個所付近の回路条件がアンテナを用いた部分放電検出に与える影響」, 電気学会基礎・材料・共通部門大会, 17-A-p2-4, pp.58-63, 2015.
4. 川島 朋裕, 村上 義信, 長尾 雅行, 稲垣 芳宏, 芦辺 祐一, 増田 孝人, 「絶縁紙 - 液体窒素複合系の絶縁破壊に及ぼすプレストレスの影響」, 電気学会放電/誘電・絶縁材料/高電圧研究会, ED-14-004/DEI-14-022/HV-14-038, pp.17-22, 2013.
5. 川島 朋裕, 村上 義信, 長尾 雅行, 稲垣 芳宏, 芦辺 祐一, 増田 孝人, 「絶縁油および液体窒素中における絶縁紙の絶縁特性に及ぼす電荷侵入の影響」, 第 44 回電気電子絶縁材料システムシンポジウム, E-2, pp.141-146, 2013.
6. 川島 朋裕, 大西 浩樹, 栗本 宗明, 村上 義信, 長尾 雅行, 稲垣 芳宏, 芦部 祐一, 広田 博史, 「PPLP-液体窒素複合系のインパルス絶縁破壊に及ぼす正極性直流プレストレス電界の影響」, 電気学会全国大会, 2-028, p.35, 2013.
7. 川島 朋裕, 栗本 宗明, 村上 義信, 長尾 雅行, 稲垣 芳宏, 芦部 祐一, 広田 博史,

「絶縁紙-液体窒素複合系のインパルス絶縁破壊に及ぼす直流プレストレス効果」, 電気学会全国大会, 2-013, p.15, 2012.

8. 川島 朋裕, 栗本 宗明, 村上 義信, 長尾 雅行, 稲垣 芳宏, 芦部 祐一, 広田 博史, 「PPLP-液体窒素複合系のインパルス絶縁破壊特性に及ぼす直流プレストレス効果」, 電気関係学会東海支部連合大会, G1-8, 2012.
9. 川島 朋裕, 栗本 宗明, 村上 義信, 長尾 雅行, 稲垣 芳宏, 芦部 祐一, 広田 博史, 「絶縁紙-液体窒素複合系の絶縁破壊に及ぼす直流プレストレス効果」, 電気学会基礎・材料・共通部門大会, XVIII-3, pp.383-388, 2012.
10. 川島 朋裕, 栗本 宗明, 村上 義信, 長尾 雅行, 「液体窒素中における絶縁紙-氷複合材料の誘電特性」, 電気関係学会東海支部連合大会, M2-1, 2011.

特許

1. 村上義信, 長尾雅行, 川島朋裕, 武藤浩行, 「複合絶縁板および複合絶縁板の製造方法」, 特願 2015-155609, 2015 年 8 月 6 日出願, 豊橋技術科学大学