

— 修士論文 —

# 高温超電導ケーブルモデルの 各種環境下における部分放電特性

Partial discharge characteristics of high temperature superconducting  
cable model under various environments

平成 21 年 2 月 4 日提出

指導教員： 日高 邦彦 教授  
熊田 亜紀子 准教授

東京大学大学院工学系研究科電気工学専攻

37-076418 鈴木 雄斗

## 内容梗概

現在、都市部において電力需要の増加は著しく、送電容量の向上が強く望まれている。しかし、特に都市部においては新たな送電設備の建設は非常に困難となってきた。そこで既存の管路を利用し、従来のケーブルを置き換えるだけで送電容量の大幅な向上が見込める超電導ケーブルが注目されている。特に HTS(High Temperatures Superconducting) ケーブルと呼ばれる液体窒素温度 77K において超電導状態になる高温超電導ケーブルは、商用線路にて実地試験がなされるなど、本格的な導入を目前とした段階にある。

HTS ケーブルは従来の送電ケーブルと同様に、中心導体の周りに絶縁層が存在し、さらに外層によりシールドされ、絶縁層は合成絶縁紙 (polypropylene laminated paper, PPLP) と液体窒素による複合絶縁方式を採用している。この PPLP はケーブルの湾曲で PPLP が巻き込み合い破損するのを防ぐためにバットギャップという隙間を設けながら巻かれている。

このバットギャップでは部分放電 (Partial Discharge) が生じやすく、送電ロスや絶縁耐力の低下を招くことになる。一般にケーブルの出荷時には、全長にわたり絶縁破壊および部分放電特性を測定し健全性を確保するが、HTS ケーブルでは出荷時にケーブル全長に液体窒素を含浸できないため、ケーブルの一部を切り出したサンプルの絶縁破壊及び部分放電特性を検査することで、全長の健全性を推定している。そのため、液体窒素含浸を伴わない常温での代替試験方法の実現が強く望まれている。本研究ではその可能性および妥当性について評価するため、室温空気、気体窒素及び液体窒素の 3 環境下における PPLP バットギャップ内の部分放電特性の比較・検討を行った。

測定試料では実際の HTS ケーブルの構造に近いケーブル状試料を用いた。ケーブル状試料は異なる構造を持つ 3 種類のものを用意し、それぞれについて空気、気体窒素環境下及び液体窒素中で PD 計測を行った。印加電圧は直流、交流 (50Hz) を使用し、特に交流電圧を使用した方が部分放電開始電圧の推測が行いやすい事を確認した。種々の電荷量の部分放電を観測し電荷量の増減と印加電圧の増減の相関関係を利用し  $Q - V$  特性を取得し、液体窒素環境下における部分放電を他環境下における  $Q - V$  特性から推測する手法を提案する。

---

# 目次

<b>1</b>	<b>序論</b>	<b>1</b>
1.1	研究背景	1
<b>2</b>	<b>高温超電導ケーブル</b>	<b>2</b>
2.1	超電導ケーブルの現状と将来動向	2
2.2	高温超電導ケーブルの構造と絶縁方式	3
2.2.1	高温超電導ケーブルの全体構造	3
2.2.2	PPLP(Polypropylene Laminated Paper)	4
2.3	バットギャップと部分放電現象	5
2.3.1	バットギャップ	5
2.3.2	部分放電から絶縁破壊へ	6
2.4	高温超電導ケーブルの出荷試験	7
2.5	研究目的	8
<b>3</b>	<b>測定装置及び条件</b>	<b>9</b>
3.1	部分放電測定手法概要	9
3.2	ケーブルモデル	11
3.3	測定装置	15
3.3.1	大気圧空気環境下及び気体窒素環境下	15
3.3.2	液体窒素環境下	18
3.3.3	電荷量校正装置	20
3.4	測定条件	22
3.5	部分放電検出回路	22
3.5.1	測定抵抗の違いによる信号波形の変化	22
3.5.2	EMTPによるマッチングシミュレーション	25
<b>4</b>	<b>実験結果</b>	<b>28</b>
4.1	ケーブルモデルI -3層全てにバットギャップを有するモデル-	28

4.1.1	直流電界下	28
4.1.2	直流電界下の $Q - V$ 特性とまとめ	30
4.1.3	交流電界下	38
4.1.4	交流電界下の $Q - V$ 特性とまとめ	43
4.2	ケーブルモデル II -半導電層に面した所のみバットギャップを有するモデル-	51
4.2.1	直流電界下	51
4.2.2	直流電界下の $Q - V$ 図まとめ	52
4.2.3	交流電界下	61
4.2.4	交流電界下の $Q - V$ 図とまとめ	62
4.3	ケーブルモデル III -中間層のみにバットギャップを有するモデル-	71
4.3.1	直流電界下	71
4.3.2	直流電界下の $Q - V$ 図まとめ	72
4.3.3	交流電界下	82
4.3.4	交流電界下の $Q - V$ 図とまとめ	83
<b>5</b>	<b>まとめ・考察</b>	<b>92</b>
5.1	直流電界下における部分放電現象	92
5.2	交流電界下における $Q - V$ 特性	92
5.2.1	ケーブルモデル I	93
5.2.2	ケーブルモデル II	100
5.2.3	ケーブルモデル III	100
5.3	バットギャップ内の電界による評価	107
5.4	理論値との比較	107
5.5	まとめ	110
5.6	今後の課題	110
	<b>謝辞</b>	<b>111</b>

---

# 第 1 章

## 序論

### 1.1 研究背景

オフィスビルのIT化や高層マンションブーム等により、都市部の電力需要は増加の一途を辿り、現在都市部へ給電する送電ケーブルはその容量限度いっぱいの運転を強いられている状態である。都市部においては新規建設ルートの確保が困難であり、送電ケーブルの容量増加が強く望まれている。そこで実効的な電流密度が銅線の100倍以上、すなわち $100\text{A}/\text{mm}^2$ 以上の電流密度で送電可能である超電導ケーブルが注目されている。超電導ケーブルは、極低温において電気抵抗が0になる超電導現象 [1] を利用したケーブルであり、既存のケーブルを置き換えることにより送電容量の増加が見込める。

超電導ケーブルには、液体ヘリウム温度4.2Kまで冷却することによって超電導状態になる低温超電導線材を使用した低温超電導ケーブル (Low Temperature Superconducting Cable = LTS cable) と、液体窒素温度77Kで超電導状態になる線材を利用した高温超電導ケーブル (High Temperature Superconducting Cable = HTS Cable) のがある [2]。現在は冷却コストの観点から、高温超電導ケーブルの研究が主として行われている。

超電導ケーブルにおいては、導体の電気抵抗が0となるため、送電ロスを大幅に減らすことができ、現用の送電用ケーブルと比較して、軽量かつコンパクトで大容量の送電が可能となり、トータルの送電コストの削減が可能となる。

また、高温超電導ケーブルは省エネ効果とともに経済価値も高いと見込まれる。高温超電導冷却のための液体窒素が絶縁油なみの耐電圧を有し、電流容量も増加するため、従来、都心近郊で275kVから66kVに降圧していた変圧器が不要になり、一気に66kVのまま都市中心部に給電できるようになる。さらに、コンパクト化によって既存の地下管路が利用できるなど、既存設備の有効活用が可能であり、建設費の大幅なコストダウン、地下空間の有効活用にもつながる。

東京の電力密度はニューヨークの二倍、パリの三倍といわれており、21世紀型エネルギーインフラ技術として、高温超電導ケーブル送電技術の可能性は大きく、今後の動向が注目されている。

---

## 第 2 章

### 高温超電導ケーブル

#### 2.1 超電導ケーブルの現状と将来動向

日本における送電線では主に OF(Oil Filled) ケーブルや CV(架橋ポリエチレン) ケーブルが使用されている。しかしその中心導体が持つ抵抗のために、送電時におけるジュール損が発生してしまう。そのため、発電所によって作られた電気は変圧器により最大で 500kV まで昇圧し、電流を抑えることでこのジュール損を抑制してきた。しかし HTS ケーブルでは理論上は導体の抵抗が 0 になるため、この送電時のロスが大幅に抑えられ、変圧器による昇圧の必要もなくなる。また超電導線は、実効的な電流密度が銅線の 100 倍以上、すなわち  $100\text{A}/\text{mm}^2$  以上の電流密度での送電が可能であり、従来の電力ケーブルよりもコンパクトな送電システムの構築が可能となる。都市部の電力需要が急増するなか、新たな設備の建設なしに送電容量の構造が見込める HTS ケーブルの魅力は非常に大きなものである。高温超電導ケーブルの損失には、超電導自体の磁化損失に相当する交流損失、絶縁体の誘電損失、外部からの侵入熱による熱損がある。その損失を補うため、高温超電導ケーブルは液体窒素による冷却が必要になる。液体窒素温度における冷凍機の効率は 0.1 と考えており、その損失を考慮する必要がある。

66kV・3kA の 35 万 kW 級のケーブルで比較すると、超電導ケーブルの損失は従来のケーブルの損失と比較して 2 分の 1 程度であると評価されている。

HTS ケーブルは 2006 年に、New York 州 Albany 市の 2 つの変電所 (Menands と Riverside) を結ぶ線路の一部に、長さ 350m、電圧 34.5kV、電流 800A の三心一括型ケーブルが布設され試験運転が開始された [3]。Mohawk 社が電力線路を提供し、BOC 社は冷却を担当、住友電気工業が超電導ケーブルを提供している。この試験においては図 2.1 に示すように、超電導ケーブルを 320m と 30m 部の 2 箇所に分けてジョイントによって接続している。7000 時間に及ぶ送電をこなし 2007 年 5 月、無事試験を終了し、現在第 2 期の試験として超電導線材を変更し通電が行われている。現在アメリカの戦略では 2030 年までに超電導ケーブルによる送電網を構築する計画が検討されており、送電網の未来を担う中心的なケーブルであると言える。

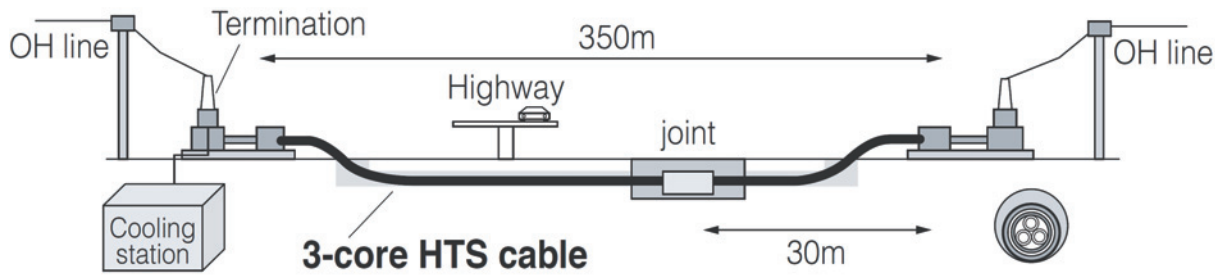


図 2.1 Albany プロジェクトのケーブルシステム

## 2.2 高温超電導ケーブルの構造と絶縁方式

### 2.2.1 高温超電導ケーブルの全体構造

現在開発されている高温超電導ケーブルのうち代表的なものの写真を図 2.2 に示す。超電導線材には Bi 系線材が使われており、それをフォーマと呼ばれる中心導体にスパイラル状に積層して巻きつけてある。電気絶縁体としては、低温での絶縁強度と低誘電損失性を考慮し、半合成絶縁紙 PPLP (Polypropylene Laminated Paper) が用いられ、これに液体窒素を含浸させた複合絶縁方式を採用している [4]。絶縁層の外側には、導体と同じ超電導線をスパイラル巻きし、超電導シールド層が構成されている。このシールド層はケーブル端部で三相短絡されており、導体と逆位相で等しい電流が誘導され、ケーブル外部への磁場をほぼ 0 にすることができる。このケーブルコアを 3 本撚り合わせ、2 重の SUS コルゲート管の中に収納している。SUS コルゲート内管と外管との間は、断熱性能を上げるため、積層断熱材が施され、真空状態に維持されている。本研究では高温超電導ケーブルにおける絶縁部分、すなわち PPLP と液体窒素の複合絶縁部における部分放電に着目している。

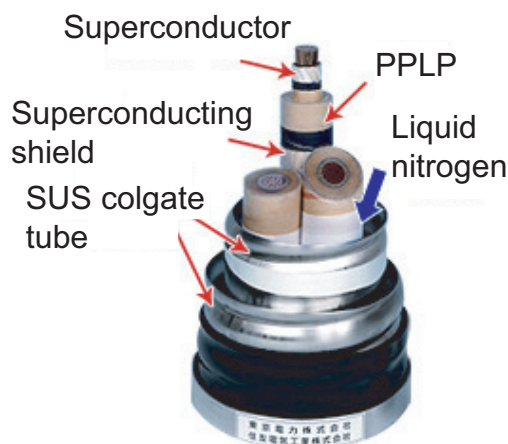


図 2.2 高温超電導ケーブル

### 2.2.2 PPLP(Polypropylene Laminated Paper)

超電導ケーブルにおける絶縁部にはPPLP(Polypropylene Laminated Paper)が使用されている。従来の絶縁紙と絶縁油による複合絶縁方式を採用した OF ケーブルにおける油浸絶縁材料の低損失化は、これまで多くの研究開発がなされてきた。ここでいう絶縁材料とは天然セルロース紙(クラフト紙)であるが、天然セルロース紙のみによる特性の向上はこれ以上不可能という領域に到達してしまった。そこで考えられたのがプラスチックの使用である。プラスチックの優れた誘電特性を生かしながら、一方天然セルロース紙の優れた機械的特性、インパルス特性、油の流通特性、さらには経済性を加味したプラスチックフィルムとクラフト紙を積層一体化して成る複合絶縁紙の時代である。このプラスチックには様々な候補の中から経済性と耐熱性の両方を考慮してポリプロピレン (PP) が選ばれた [5]。

一般に PP の様なフィルムを OF ケーブルの絶縁テープとして用いるには、油を通さないフィルムの片面または両面に図 2.3 の通り油を通す A and/or B の絶縁テープを施す必要がある。このように 3 層ラミネートしたテープをラミネート紙と呼ぶ [6]。A、フィルム、B 全てが合成された材料を使う場合を(全)合成紙、A、B に天然セルロース紙を用いる場合を半合成紙という。

図 2.3 の中間のフィルム層のプラスチックとして PP を選んだラミネート紙が PPLP であるが、PPLP には A と B に配置する材料により CPC、CPF、SPS、SPF、SPC と呼ばれる 5 通りのものが考えられた (C:Cellulose paper, P:Polypropylene binder, F:Film, S:Synthetic paper)。これらの構成に対して様々な検討と実験が繰り返されたが、それにより次のようなことが判明した [7,8,9]。

- CPF、SPC は片面のみがセルロース紙のタイプであるため、A、B の機械強度や油中挙動が大きく異なり、片面がそりかえる現象が生じやすく扱いが難しい
- SPS、SPF はオール合成材料より成り、誘電体損(ケーブルに課電することで生じる損失)が最も低くなることが期待され、一部はシート試験で実際にそのような結果が見られたものの、インパルス破壊強度が不十分であった
- CPC 以外の全てについて、結局 A、B に合成材料を用いるとコスト面で汎用化に耐えうるステージにまで持ち込める自信が持てなかった

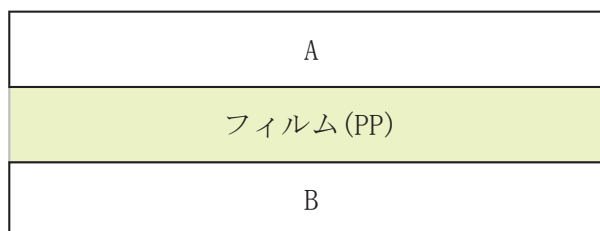


図 2.3 3層ラミネート構造



これらのことから、今日に至るまでに実用化されたのは唯一 CPC タイプの PPLP のみである。それゆえ、特に断りが入らない限り PPLP は全て CPC タイプのことを表す。

PPLP の厚さとしては、275kV 級において最低必要とされる 100 ~ 150 $\mu\text{m}$  クラスのもの 2 種類 (125 $\mu\text{m}$  と 155 $\mu\text{m}$ ) と将来の 500kV 級をにらんで 200 $\mu\text{m}$  クラスのものが作られた。ここでは特に 125 $\mu\text{m}$  のものについて、その特性をセルローズ紙のみの場合と比較したものを表 2.1 に示す。ただし、ここでいう PP 比率とは PPLP の厚さに対する PP 層の厚さの割合のことで、誘電率及び破壊強度は油浸時のものである。表 2.1 からわかるように、同程度の厚さのセルローズ紙と比較すると、極めて絶縁特性に優れた PPLP ができあがったことになる。

表 2.1 PPLP の一般諸特性

	PPLP	セルローズ紙
厚さ [mm]	0.125	0.150
密度 [g/cm <sup>3</sup> ]	0.88	0.62
PP 比率 [%]	42	0
誘電率	2.8	3.1
インパルス破壊強度 [kV/mm]	250	150
AC 短時間破壊強度 [kV/mm]	135	80

高温超電導ケーブルにおける、絶縁部では前節の PPLP をさらに液体窒素で含浸したものを使用している。液体窒素は PPLP の絶縁耐力を向上させるだけでなく、高温超電導ケーブルを極低温に保つための冷却の役割がある。実際には超電導ケーブルには冷却システムを付帯設備として保持し、液体窒素を圧力をかけながら、絶えず高温超電導ケーブルの SUS コルゲート管内を循環させている。

## 2.3 バットギャップと部分放電現象

### 2.3.1 バットギャップ

絶縁部として使用されている PPLP は HTS ケーブル製造時に図 2.5 のようにバットギャップと呼ばれる隙間を設けながら巻いていく必要がある。バットギャップを十分に設けずに巻くと、ケーブル全体が湾曲した際に PPLP 同士が巻き込み、破れてしまうからである。超電導ケーブルは、出荷の際に図 2.6 のようにドラムに巻きつけられ、また敷設時においてもケーブルが湾曲する事があるため、必ずこのバットギャップを作りながら絶縁紙を巻かなくてはならない。図 2.2 に示した高温超電導ケーブルの断面図を図 2.4 に示す。この図に示されるとおり、バットギャップには

- 両側とも PPLP に接しているもの

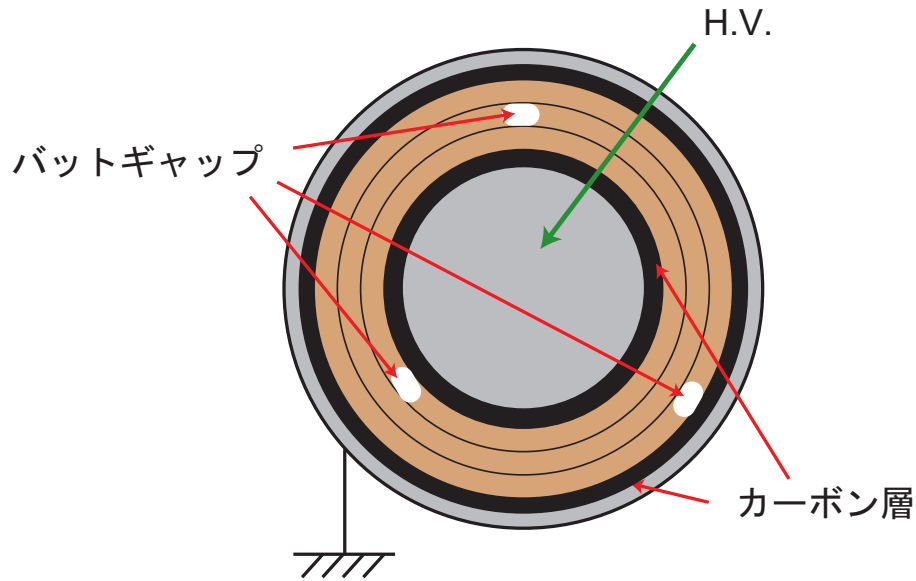


図 2.4 バットギャップ

- 片側はPPLP、もう一方は半導電層 (カーボンペーパー) に接しているもの

の 2 種類がある。これら 2 種類のバットギャップについて、次章に述べる部分放電に関する特性を把握しておくことが望まる。



図 2.5 バットギャップ

### 2.3.2 部分放電から絶縁破壊へ

高温超電導ケーブル内に存在するバットギャップはケーブルの絶縁上弱点となる。バットギャップ内で部分放電 (Partial Discharge = PD) が起こってしまうからである。部分放電とは、電極間を橋絡せず空間の一部のみを橋絡する放電現象のことをいう。この部分放電はそれ自体が送電ロスとなるだけでなく、長期的には材料の劣化や絶縁破壊を引き起こす [10]。

図 2.7 に部分放電から絶縁破壊に至るまでの過程を模式化したものを示す。部分放電が繰り返し起こると、絶縁体表面が侵食され、先端の鋭いくぼみ (ビット) が形成される。するとそこに放電が集中し、先端の電界が高まってトリーが発生する。そのトリーが成長し、最終的には絶縁破壊に至る。



図 2.6 出荷時のケーブル

したがって、高温超電導ケーブルの出荷試験においては、絶縁破壊試験だけでなく部分放電試験も実施することが非常に重要とされている。

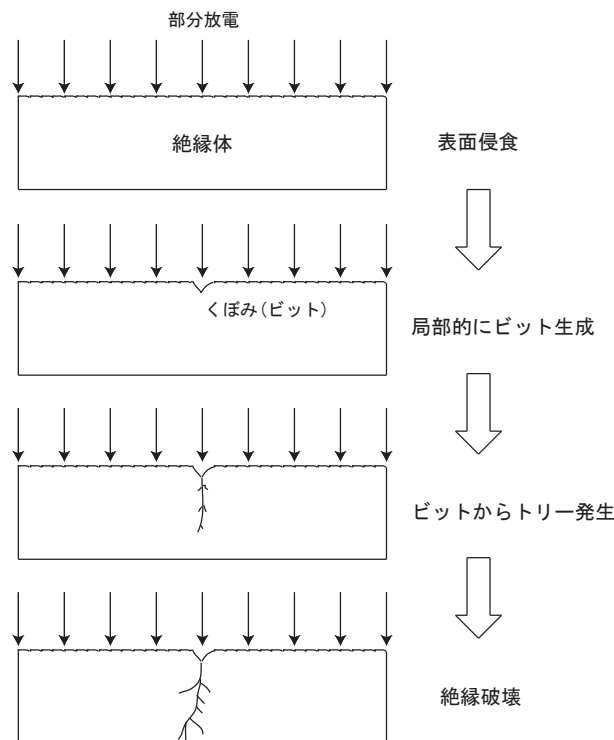


図 2.7 部分放電から絶縁破壊へ

## 2.4 高温超電導ケーブルの出荷試験

高温超電導ケーブルの出荷試験では絶縁破壊試験と共に部分放電試験が行われる。高温超電導ケーブルは実地での使用時は液体窒素に含浸して使用されているが出荷時の試験のみにおいて、

全てのケーブルを液体窒素に含浸して試験を行うにはコストや手間が甚大になる。そのため現状はケーブルの一部を切り出しその部分のみを液体窒素に浸し全体の健全性を推測しているに過ぎない状態である。

電力の安定供給の観点からは全長試験を行う必要があり、液体窒素を使用することによるコストの問題点が挙げられている。

### 2.5 研究目的

ケーブル出荷時の試験において液体窒素を使用しない代替試験の可能性を検討する。大気圧空気環境下、気体窒素環境下、液体窒素環境下において部分放電を測定し、各環境下における部分放電特性を比較することにより、液体窒素環境下における部分放電を他環境下で推測できるような指標を作ることが本研究の目的である。

## 第 3 章

### 測定装置及び条件

本研究では高温超電導ケーブル PPLP バットギャップ内の部分放電を測定する事が目的であり、実際のケーブルを模擬したケーブルモデルを用いて測定を行った。湿度の影響等から排除するため乾燥剤で満たされているデシケータで保管し、実験の時のみ大気中に取り出して実験を行った。

#### 3.1 部分放電測定手法概要

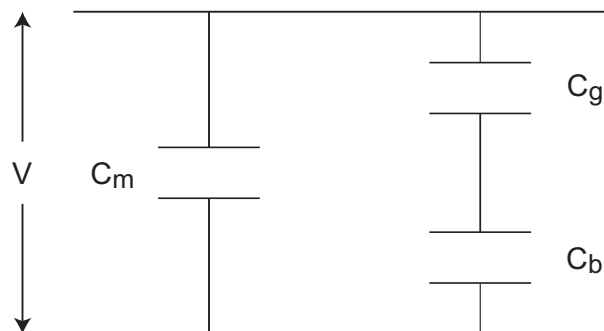


図 3.1 絶縁体内部のギャップを模した等価回路

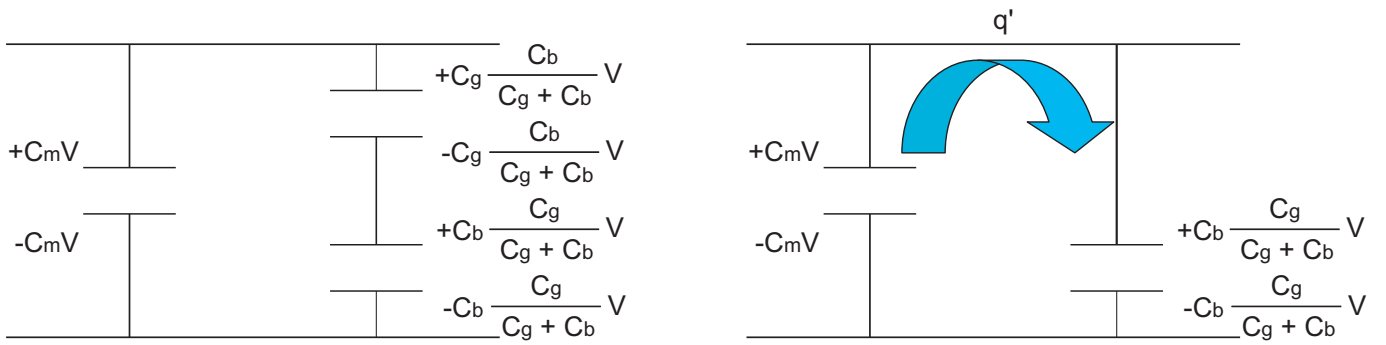
絶縁物の内部にギャップ (ボイド) がある場合の等価回路を図 3.1 に示す。図中の  $C_g$  はギャップの静電容量、 $C_b$  はギャップと直列に入る絶縁層の静電容量、 $C_m$  はギャップと並列に入る絶縁層の静電容量を表す。

ここに、外部から電圧  $V$  が印加されると、ギャップにかかる電圧  $V_g$  は、

$$V_g = \frac{C_b}{C_g + C_b} V \quad (3.1)$$

となる。印加電圧  $V$  が次第に大きくなると、ギャップにかかる電圧  $V_g$  が、ギャップの放電電圧に達しギャップ内でのみ放電が起こる (部分放電が発生する)。

ギャップが短絡したので、 $C_m$  に蓄積されていた電荷が  $C_b$  に流れ込み、釣り合いを保とうとす



(a)ギャップ短絡前

(b)ギャップ短絡後

図 3.2 ギャップ短絡 (部分放電発生) による電荷の移動

る。部分放電によって回路全体から失われた電荷量を  $q$  とすると、

$$q = C_g V_g \quad (3.2)$$

$$= C_g \frac{C_b}{C_g + C_b} V \quad (3.3)$$

となる。

次に、 $C_m$  から  $C_b$  に流れ込む電荷量  $q'$  を考える (図 3.2)。

ギャップ短絡後に回路に残った全電荷量  $Q$  は、

$$Q = \left( C_m + C_b \frac{C_g}{C_g + C_b} \right) V \quad (3.4)$$

となる。これが  $C_m$  と  $C_b$  に再配分されるが、その電荷量をそれぞれ  $Q_m$ 、 $Q_b$  とすると、

$$Q_m = \left( C_m + C_b \frac{C_g}{C_g + C_b} \right) \left( \frac{C_m}{C_m + C_b} \right) V \quad (3.5)$$

$$Q_b = \left( C_m + C_b \frac{C_g}{C_g + C_b} \right) \left( \frac{C_b}{C_m + C_b} \right) V \quad (3.6)$$

となる。よって、流入した電荷量  $q'$  は、

$$q' = C_m V - Q_m \quad (3.7)$$

$$= C_m V - \left( C_m + C_b \frac{C_g}{C_g + C_b} \right) \left( \frac{C_m}{C_m + C_b} \right) V \quad (3.8)$$

$$= \frac{2C_m^2 - C_b^2}{(C_g + C_b)(C_m + C_b)} C_g V \quad (3.9)$$

ここで、一般的に  $C_m \gg C_b, C_g$  であるので [11]、

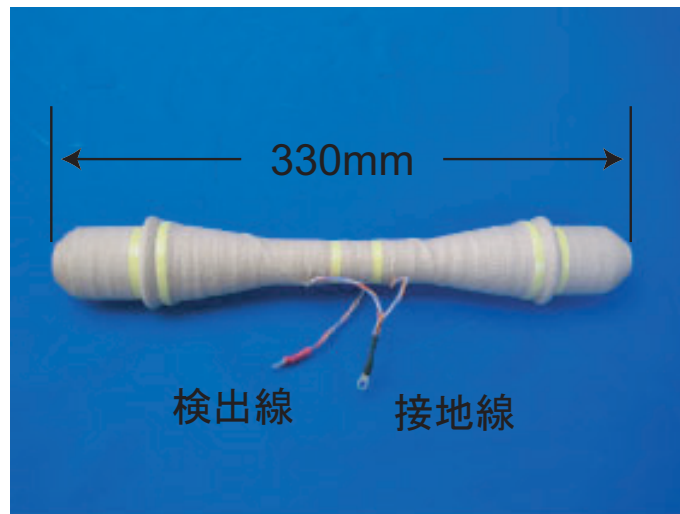
$$q' \approx \frac{2C_m C_g}{C_g + C_b} V \quad (3.10)$$

と近似することができる。

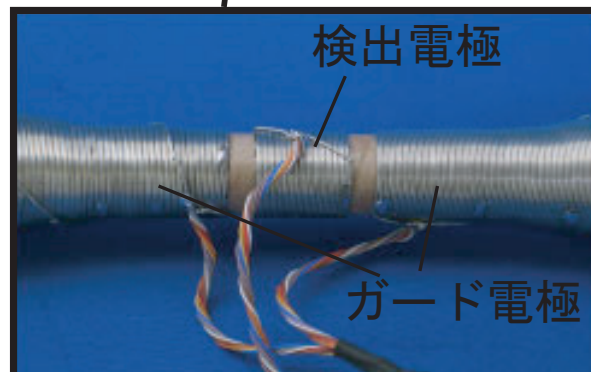
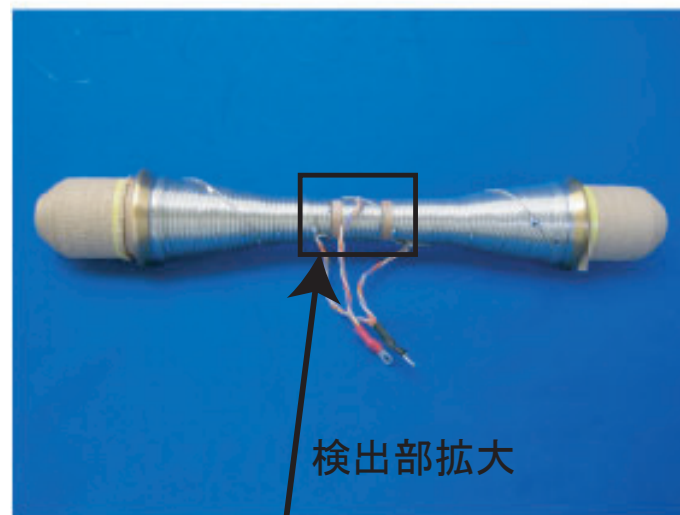
$C_g$  と  $C_b$  を測定することは不可能なため、真の放電電荷である  $q$  を測定することはできない。一般に、部分放電計測では、見かけの放電電荷である  $q'$  の測定を行う。式 (3.2) 及び (3.10) からわかるように、 $q$  と  $q'$  は異なる値となるが、先行研究 [12] により、本研究で用いる測定回路においては、 $q$  と  $q'$  の差は 8% 以内であることが実験的に示されているため、本研究ではこの見かけの放電電荷  $q'$  を部分放電による放電電荷として取り扱う。

## 3.2 ケーブルモデル

本研究で使用したケーブルモデルの写真を図 3.3 にその断面図を図 3.4 に示す。ケーブルモデルの中心には直径 20mm の金属棒があり、ここに高圧を印加する。この金属棒の周りに突合せ 2 層重ねでカーボン紙 (厚さ  $130\mu\text{m}$ ) が巻かれている (内導カーボン紙)。カーボン紙の 2 層目の突合せ位置は、1 層目の突合せ位置に対して紙幅の  $1/2$  ずらして巻かれている。内導カーボン紙の外側には絶縁紙 PPLP (厚さ  $125\mu\text{m}$ ) がバットギャップを作りながら、3 層重ねて巻かれている。試料は異なる構造をもつ 3 種類のものがあり、試料 I に関しては 3 層全てに、II に関しては 1 層目のみに、III に関しては 2 層のみにバットギャップが設けられている。なお、試料 I に関しては、2 層目のギャップ位置は 1 層目のギャップ位置に対して紙幅の  $1/3$  ずらして巻かれている。本来の高温超電導ケーブルはケーブルモデル I であるが、ケーブルモデル II 及び III はケーブルモデルの部分放電に対する弱点特定のため及び昨年度行われたシート試験との比較のため用意した。さらにこの絶縁紙の外側は、中心部分に幅 20mm のカーボン紙 (外導カーボン紙) が 2 層重ねて巻かれており、外側部分には補強絶縁紙とクレープカーボン紙 (伸び縮みするカーボン紙) が巻かれている。外導カーボン紙には検出電極となる軟銅線 (錫鍍金銅線) が巻かれており、クレープカーボン紙にはガード電極となる軟銅線が巻かれている。なお、最も外側には軟銅線を保護するためのクレープ紙が巻かれている。



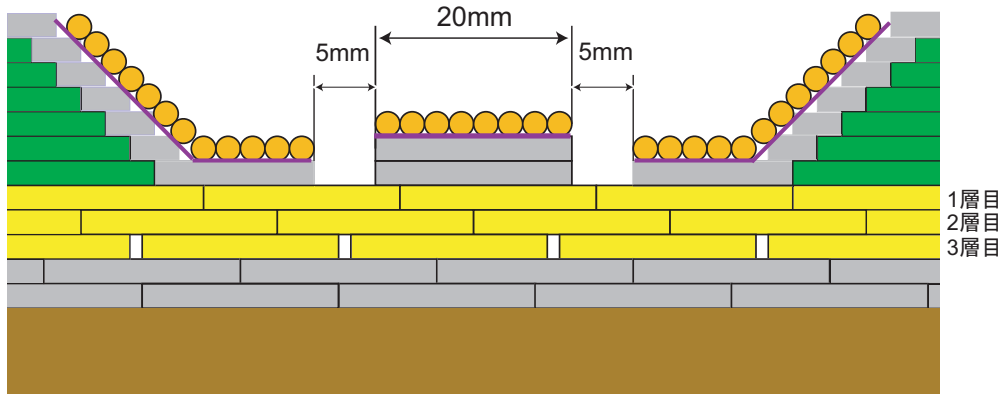
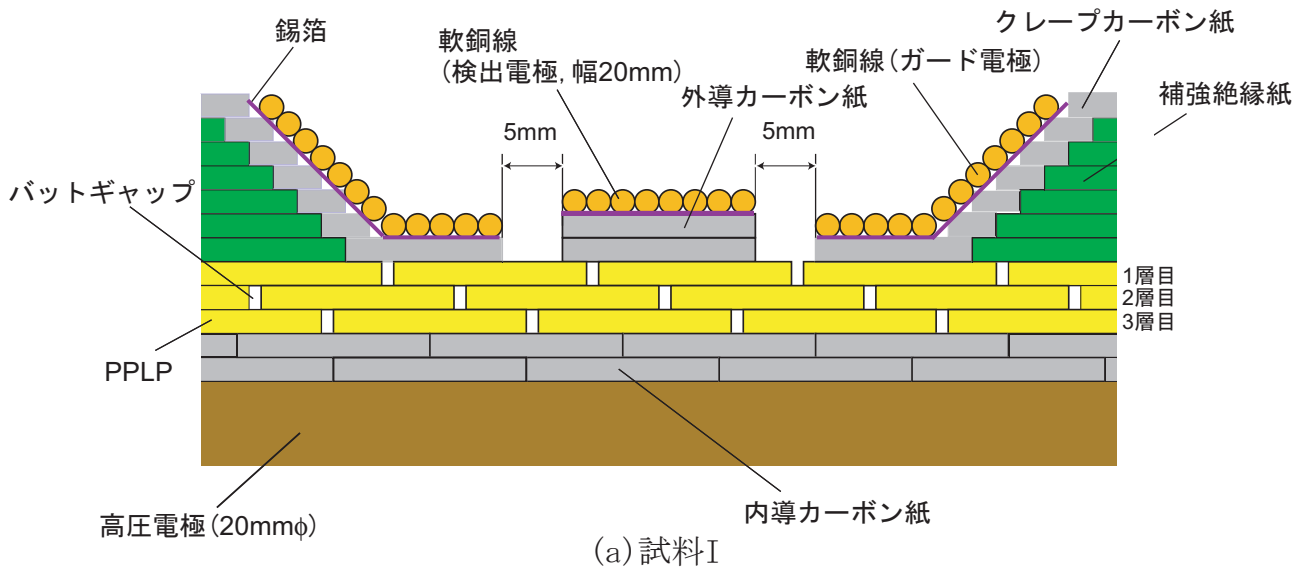
(a)



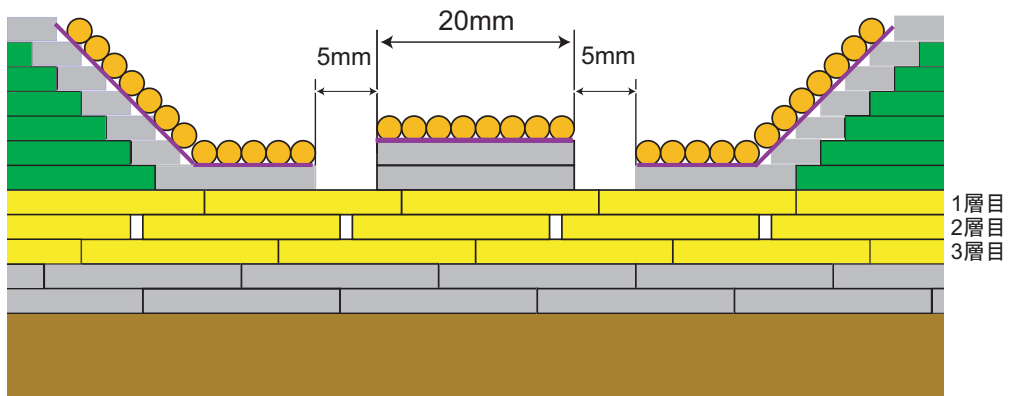
(b)

図 3.3 ケーブルモデル写真, (a) 測定時の状態, (b) 外側のクレープ紙を取り除いた状態





(b) 試料II



(a) 試料III

図 3.4 ケーブルモデル断面図

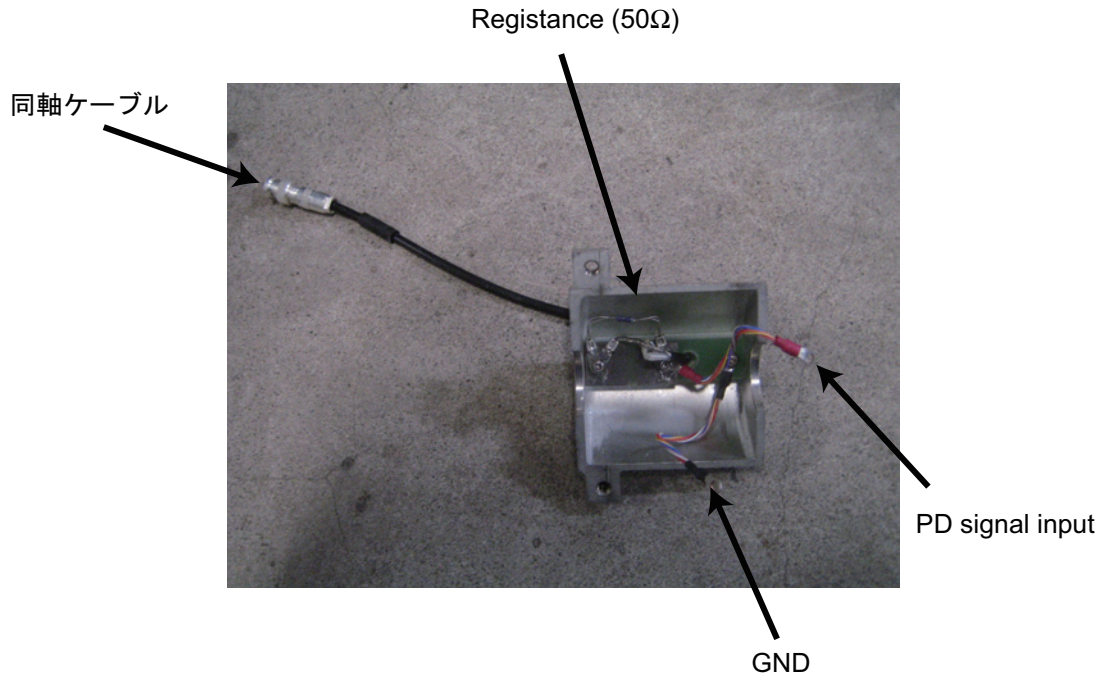


図 3.5 ケーブルモデルを覆う測定ボックス

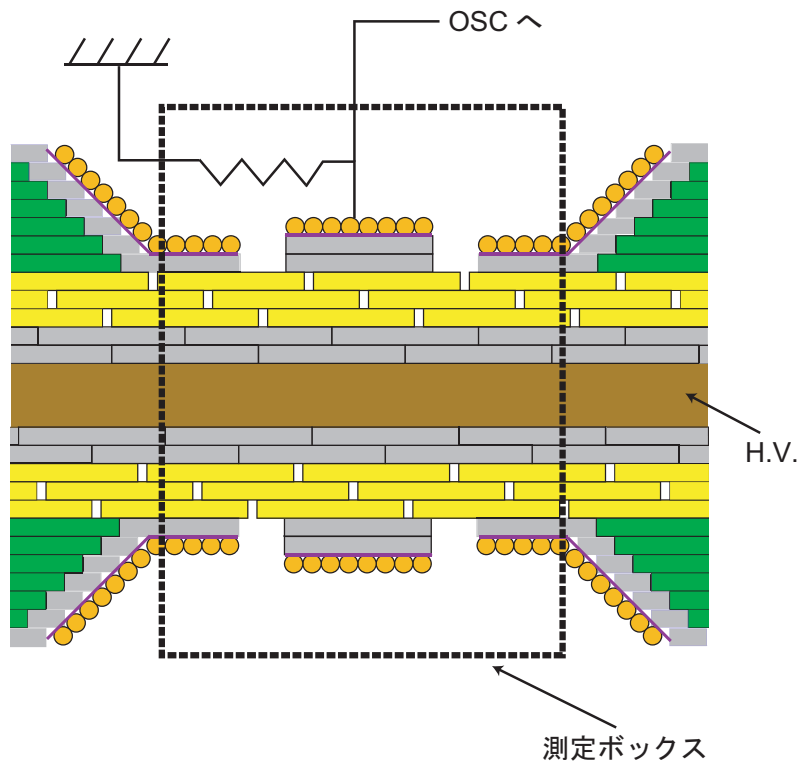


図 3.6 ケーブルモデルと測定ボックス

またケーブルモデルの検出部は図 3.5 に示すような測定抵抗等を内包している金属のボックスで覆われている。ケーブルモデル検出部から部分放電信号は図 3.6 のように 50Ω の抵抗を介し同軸ケーブルで取り出せるようになっている。またボックス本体はシールドされているため、外部

ノイズ抑制の役目も担っている。

### 3.3 測定装置

#### 3.3.1 大気圧空気環境下及び気体窒素環境下

本研究の測定においては、ケーブルモデルを任意の環境下で設置するため、2つのタンクを使用した。

大気圧空気環境下、気体窒素環境下で使用したタンク、その時の測定回路概要をそれぞれ図 3.7、図 3.8 に示す。高電圧はブッシングを通じて内部に設置されたケーブルモデルに印加され、部分放電はタンクのハーメチックシールを介して同軸ケーブルで取り出すことが可能である。またタンク本体はアースされており、外部からのノイズを遮蔽する役目も担っている。気体窒素封入時は、真空引きを行い、その後気体窒素を封入する。真空引きや、気体をタンクに封入する時は、図 3.7 のタンク下部及び右部のバルブを使用することにより気体の流れを調整する。気体を変更する時は必ず真空引きを行い、バットギャップ内にまで気体が充填するように、封入後は 1 時間以上の時間を空けてから測定を行った。

尚交流印加時においては、バットギャップの容量による充電電流を除去するために、ハイパスフィルタを使用している。ハイパスフィルタは  $1\text{k}\Omega$  の抵抗と、 $50\text{nF}$  のキャパシタで校正されており、そのカットオフ周波数は  $3.3 \times 10^4 \text{kHz}$  となっており、 $50\text{Hz}$  の充電電流は除去され、GHz オーダの部分放電電流信号は、減衰することなく取り出している。

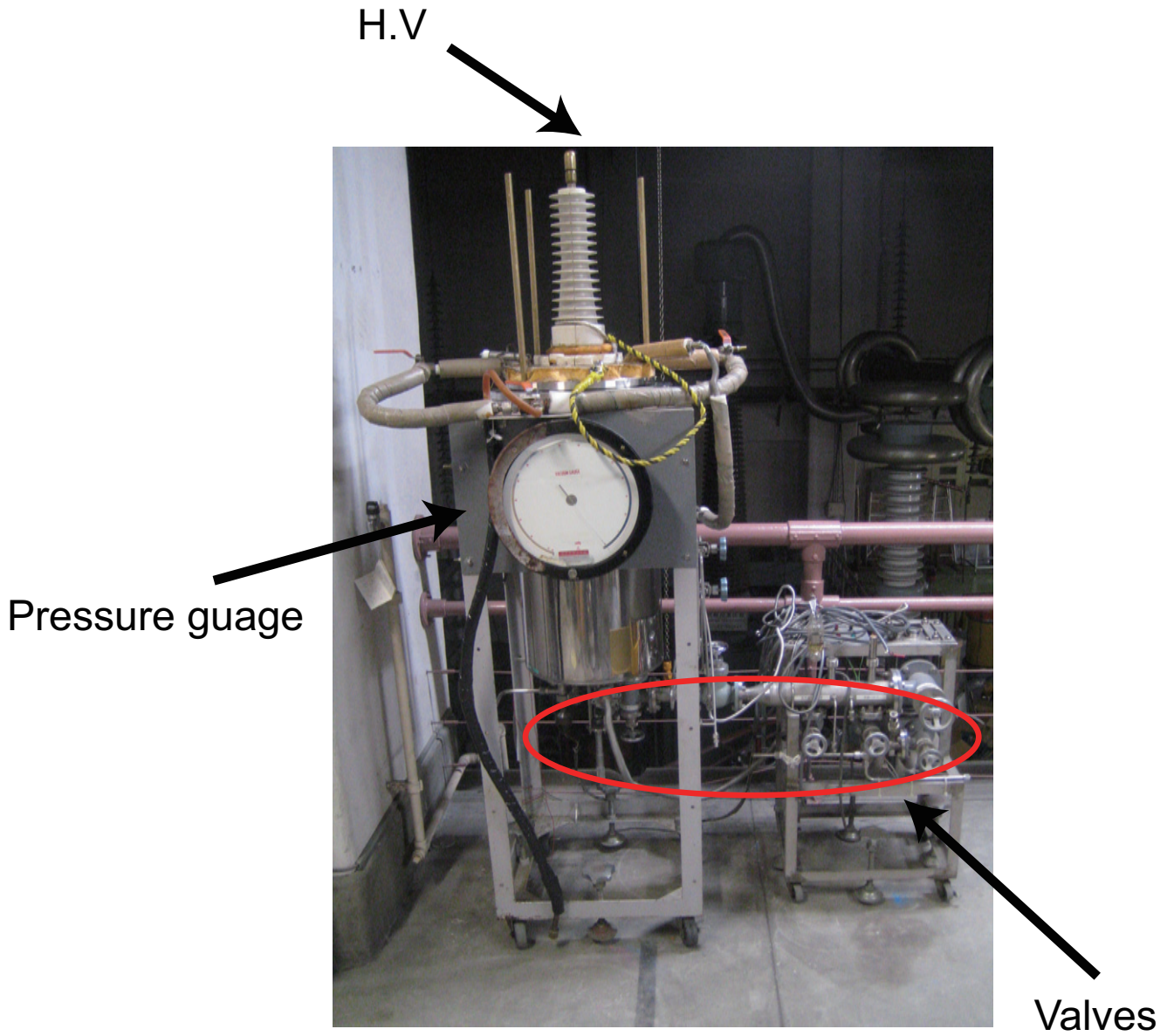


図 3.7 大気圧空気環境下、気体窒素環境下測定時に使用するタンク

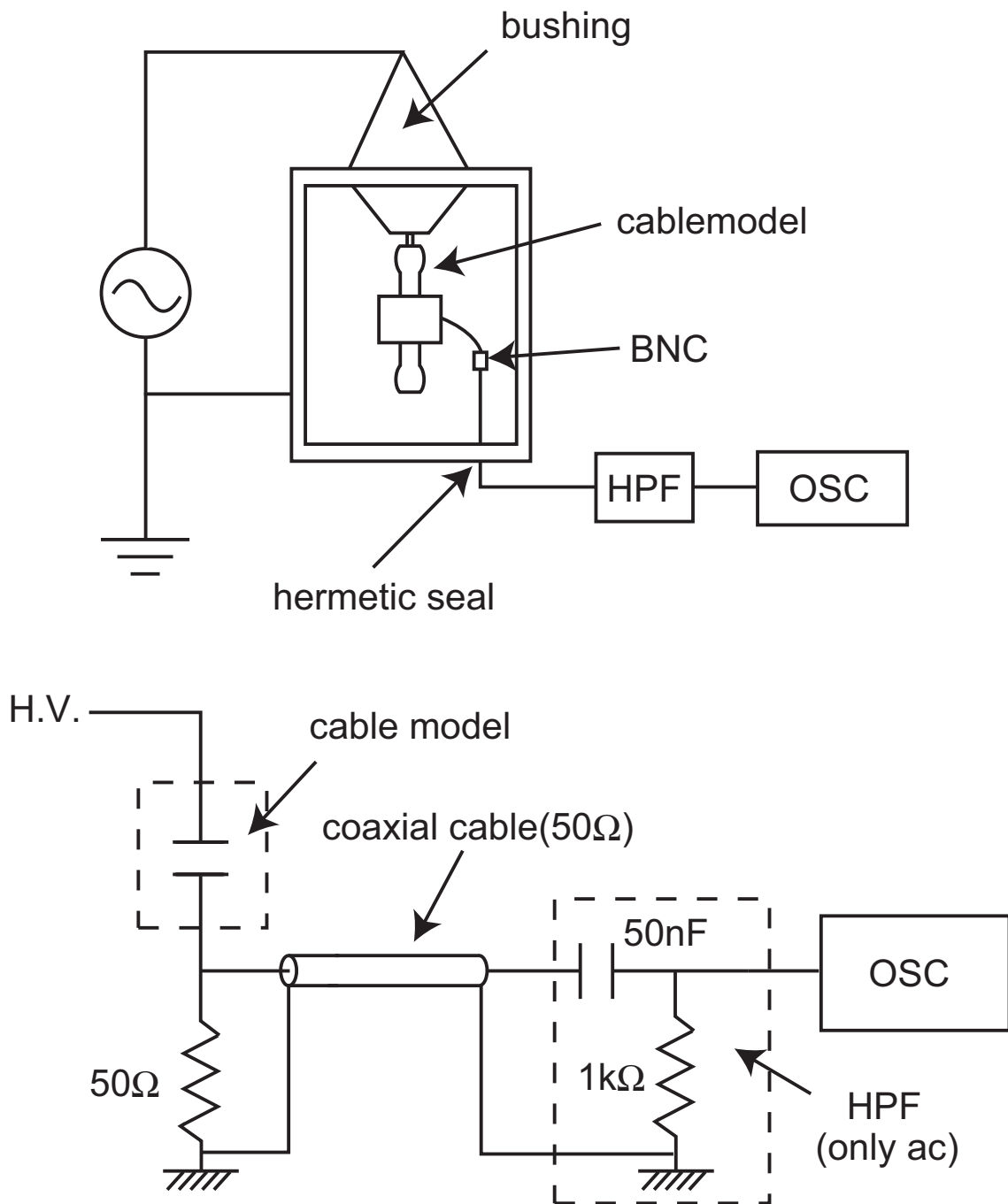


図 3.8 大気圧空気環境下、気体窒素環境下の測定回路概要

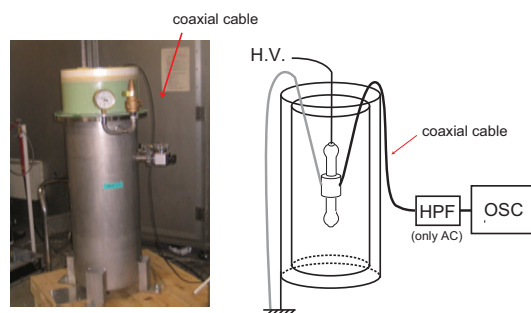


図 3.9 液体窒素環境下測定時に使用するタンクと概要図

### 3.3.2 液体窒素環境下

液体窒素環境下では図 3.9 に示す写真のようなタンク内に入れて行った。タンクの高さは 880mm で、内側は深さ 720mm、径は 245mm である。タンクは 2 重構造となっていて、中間の層を真空に維持することで断熱性能を持たせている。真空ジャケットと呼ばれるこの層は、2 個のバルブで封じられており、真空度が低下したときは、再び真空引きすることで高い断熱性能を保つことができる。また、タンク上方部には圧力計及び安全弁が装着されている。安全弁は、タンクを密閉したときの内圧が 0.02MPa に達したときに動作する。



図 3.10 気体窒素環境下測定時に使用するケーブルモデルの固定器具

ケーブルモデルを設置時は、液体窒素を封入後、蒸発等の影響による対流を抑えるため、30分程度時間を空けてから測定を行った。部分放電信号は測定ボックスから伸びる同軸ケーブルを延長しオシロスコープまで引き込んでいる。尚交流印加時はHPFを使用しバットギャップの容量による充電電流を除去している。

ケーブルモデルは図 3.10 に示す器具を使用してタンク内に固定している。ボックスから出ている同軸ケーブルを延長しオシロスコープで部分放電電流を取得している。

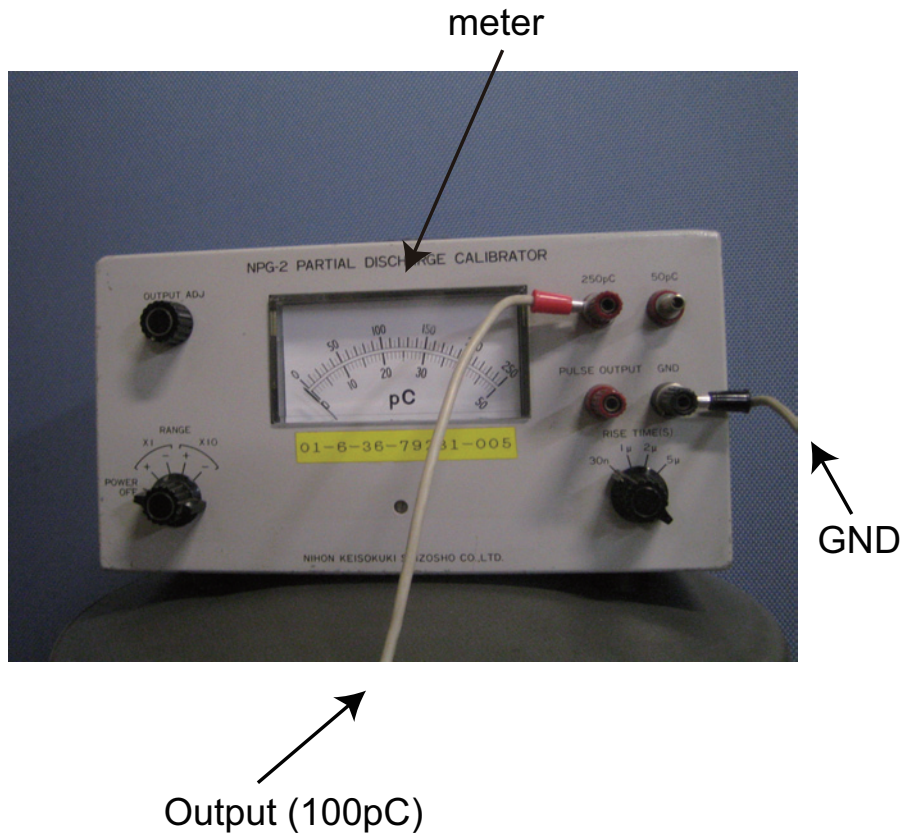


図 3.11 部分放電校正器

### 3.3.3 電荷量校正装置

電荷量の計算では、信号の反射等の影響から部分放電波形をそのまま時間で積分しても真の電荷量と異なる可能性がある。そこで図 3.11 に示す部分放電校正器 (NPG-2、日本計測器製造所製) を使用し、既知の電荷量を測定回路に注入し、その電流を積分することで校正値を求め、実際の部分放電電流の積分値にその校正値を乗算することで真の電荷量とした。

100pC の電荷量を注入しその時の電荷量/積分値をその回路で観測された部分放電電流の積分値に乗算し真の電荷量とした。

#### 電荷量校正実験

図 3.11 の部分放電校正装置を使用して、電荷量校正実験を行った。立ち上がりは 30ns の信号を用い、電荷量は 100pC である。

測定回路は図 3.12 のように図 3.8 のケーブルモデルを校正装置で置き換え、そこから 100pC の電荷量を回路に注入した。直流印加時と交流印加時では HPF の使用の有無があるため、HPF 使用時と除いたときの両方で同電荷量を注入し、オシロスコープで観測した。

HPF 使用つまり交流印加時の測定回路で得られた出力波形を図 3.13、HPF 除去時に得られた出力波形を図 3.14 に示す。



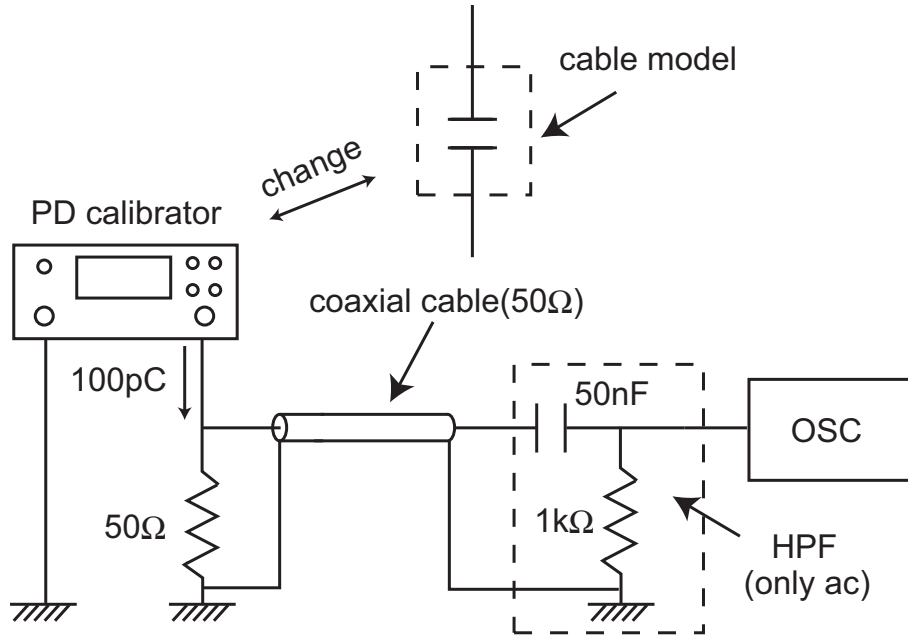


図 3.12 電荷量校正回路概要

図 3.13 を積分すると 36.1pC、図 3.14 を積分すると 91.1pC となる。つまり

- 交流印加時は出力波形の積分値  $\times \frac{100}{36.51} = 2.74$  倍
- 直流印加時は出力波形の積分値  $\times \frac{100}{91.1} = 1.098$  倍

することで、部分放電の真の電荷量とする。

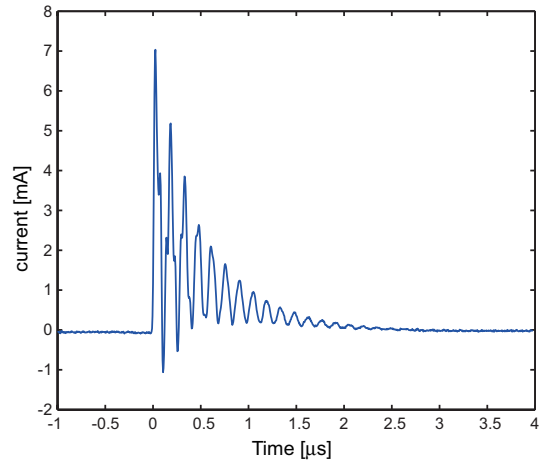
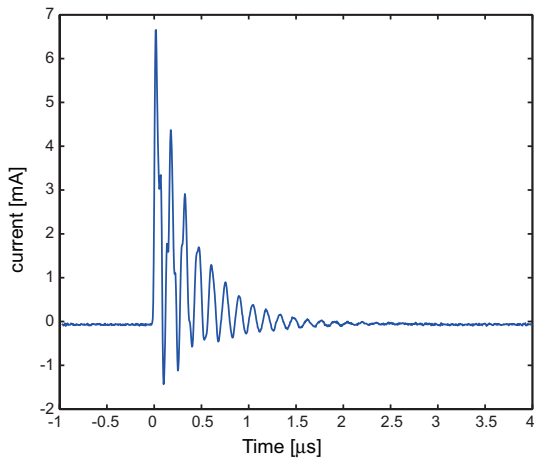


図 3.13 HPF 使用時 (交流印加時の回路) の出力波形

図 3.14 HPF 除去時 (直流印加時の回路) の出力波形

### 3.4 測定条件

本研究ではケーブルモデルを 3 種類用い、各ケーブルモデルのサンプル数は 3 本であり合計 9 本のケーブルモデルで測定を行った。各環境下において、以下の 3 つのパラメータを取得し、それらの比較を行う。

- 部分放電電流波形
- 部分放電開始電圧
- 部分放電電荷量

測定環境は、大気圧空気環境下、気体窒素環境下、液体窒素環境下の三種類であり、印加電圧は直流と交流 (50Hz) の 2 種類である。

測定環境・条件を表 3.1 にまとめた。尚表中の数字は測定を行ったケーブルモデルのサンプル数である。

なお部分放電電荷量は、オシロスコープのトリガレベルを 10 個 ~ 20 個異なる値に設定し、その都度観測された部分放電電流を積分して  $Q - V$  特性を取得した。

表 3.1 ケーブルモデルにおける測定条件

	空気		気体窒素		液体窒素	
	DC	AC	DC	AC	DC	AC
ケーブル I	3	3	3	3	3	3
ケーブル II	3	3	3	3	3	3
ケーブル III	3	3	3	3	3	3

### 3.5 部分放電検出回路

部分放電は図 3.8 のように測定抵抗  $50\Omega$  を介してオシロスコープで観測している。昨年度は部分放電信号を大きく観測するため  $1k\Omega$  を使用していたが、回路全体でマッチングがとれず、部分放電信号が振動する現象が見られた。ここでは測定抵抗の違いと部分放電信号の波形変化について考察する。

#### 3.5.1 測定抵抗の違いによる信号波形の変化

本研究では測定抵抗は  $50\Omega$  を使用している。同軸ケーブルの特性インピーダンスが  $50\Omega$  であり回路全体のマッチングを考慮し全てを  $50\Omega$  で統一した。更にオシロスコープの入力インピーダン

スを  $50\Omega$  として測定を行っている。昨年度は部分放電電流が微小であることが予想され、測定抵抗を大きくすることにより S/N 比を向上させる目的で  $1k\Omega$  を使用しており、回路全体で特性インピーダンスの統一を図っていなかった。ここで今年度の  $50\Omega$  使用時と昨年度の  $1k\Omega$  使用時の波形の違いを示す。

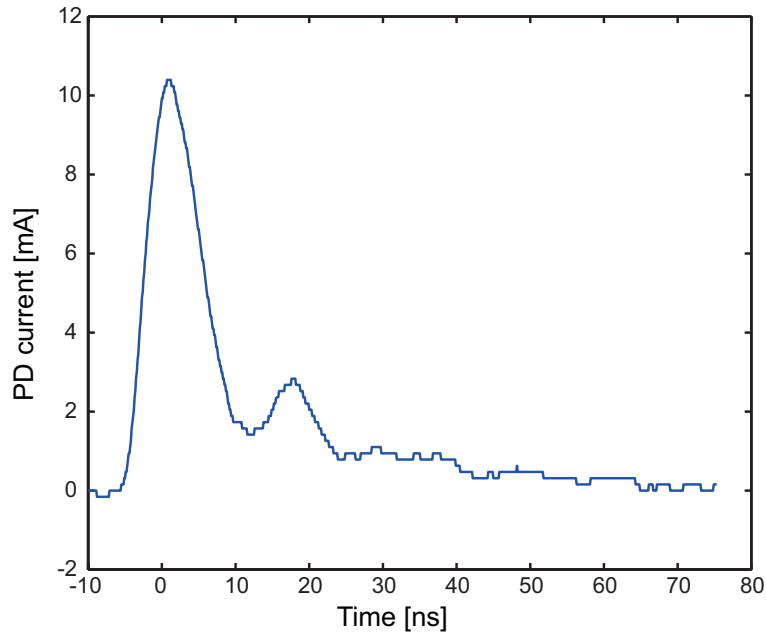


図 3.15 部分放電電流波形 (ケーブル I、空気中、直流)、測定抵抗  $50\Omega$

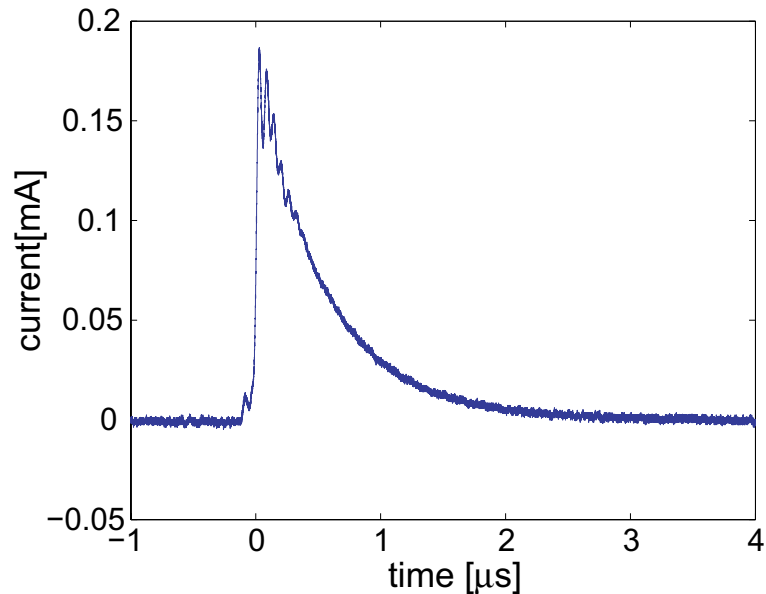


図 3.16 部分放電電流波形 (ケーブル I、空気中、直流)、測定抵抗  $1k\Omega$

昨年度 (測定抵抗  $1k\Omega$ ) 同条件 (ケーブルモデル I、大気圧空気環境下、AC 印加) で観測された波形を図 3.16 に示す。測定抵抗が  $1k\Omega$  を使用しており、同軸ケーブルの特性インピーダンス  $50\Omega$  とのマッチングが取れていないため、回路の終端等で反射が起こり、その結果  $2\mu s$  程度の信号として観測されている。つまり図 4.1 が本来の単発の部分放電電流波形と考えられるが、マッチングが

取れていないために反射を繰り返しその重ね合わせの結果として図 3.16 の波形となったと考えられる。測定抵抗を  $50\Omega$  に変更し回路全体も  $50\Omega$  と改善することで、より本来の部分放電電流波形に近いものを取得できたので本研究では測定抵抗を  $50\Omega$  に変更し回路全体の改善を施した上で測定を行った。

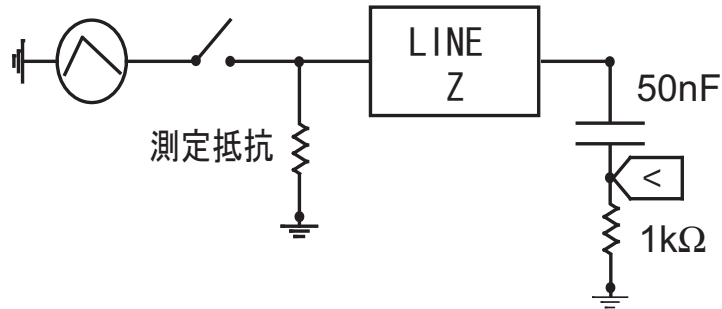
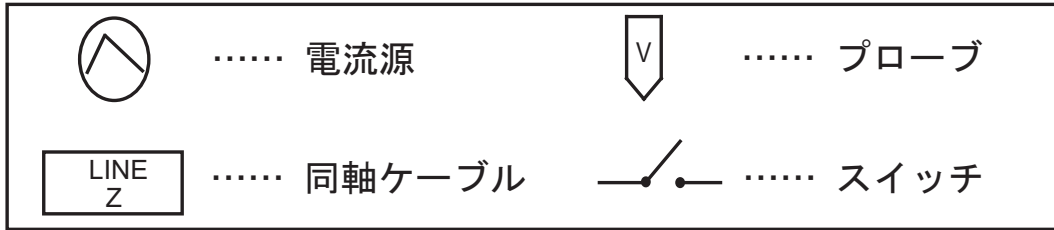


図 3.17 EMTP によるシミュレーション回路

### 3.5.2 EMTP によるマッチングシミュレーション

前節で測定抵抗の違いによる実験結果の比較を行ったが、EMTP においても同様に測定抵抗を  $1\text{k}\Omega$  から  $50\Omega$  に変え波形の変化を確認した。

EMTP でシミュレーションを行った回路を図 3.17 に示す。

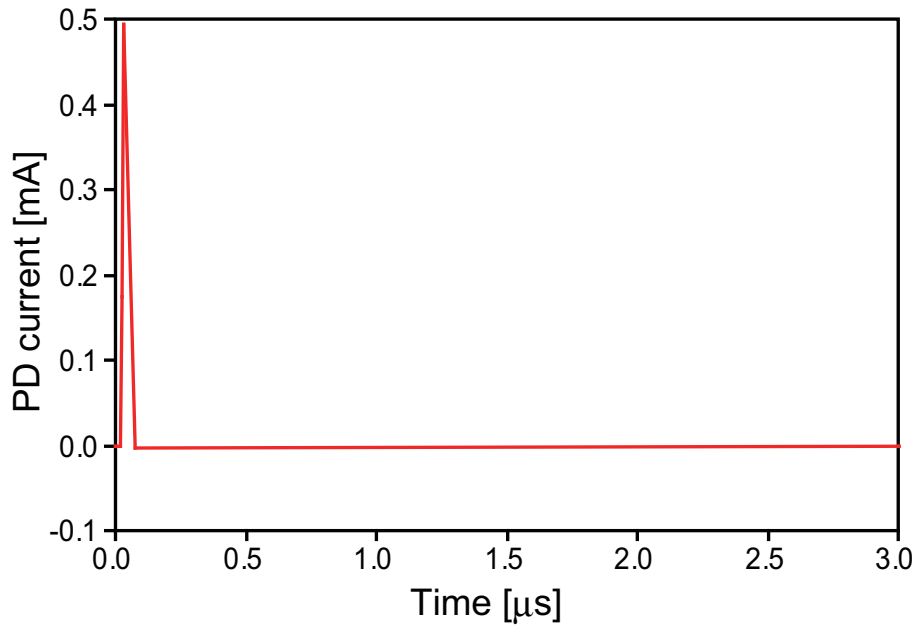


図 3.18 測定抵抗  $50\Omega$  でマッチングをとった場合

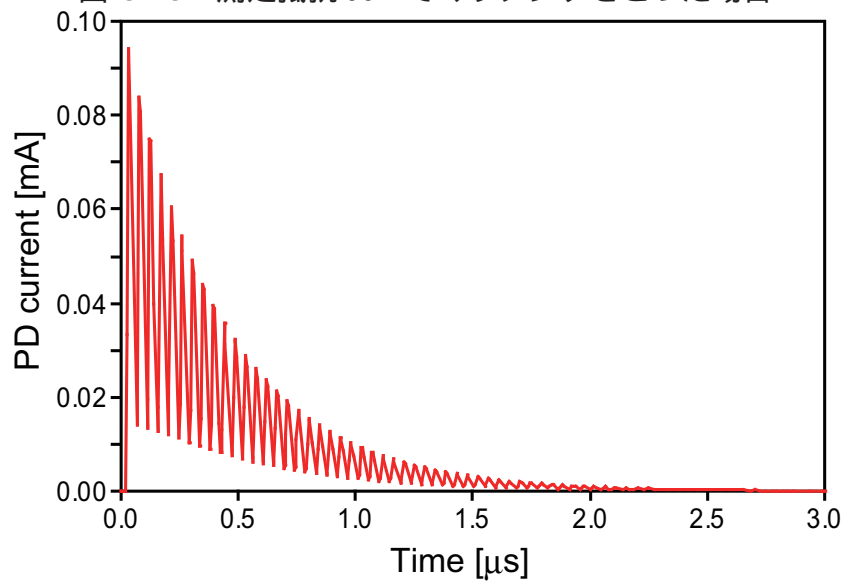


図 3.19 測定抵抗  $1k\Omega$  の場合

入力信号は電流源からパルスが発生した時刻  $t = 0$  においては閉じた状態となっており、その後、 $20\text{ns}$  でスイッチを開いた状態にすることで、実際の放電現象を模擬している。プローブ及びオシロスコープ等の素子については実際に使用したものに記載されている値を用いた。

測定抵抗を  $50\Omega$  にしてシミュレーションを行った結果を図 3.18、 $1k\Omega$  にしてシミュレーションを行った結果を図 3.19 に示す。プローブで得られた信号の時間幅は実際に観測された信号とほぼ一致している。また電流値はシミュレーションではマッチングを取った場合、ピーク値でマッチングを取らなかった場合に比べ 5 倍程度と大きくなった。実験値ではマッチングを取った場合ととらなかった場合で 30 倍程度の違いがある。数値は違うがマッチングを取ることで電流値が

大きくなることを確認でき測定抵抗を  $50\Omega$  と小さくしても S/N 比が悪化するせず本来の部分放電電流波形を取得するという面においては測定抵抗を  $50\Omega$  にした方が適していると考えられる。

また電荷量に関しては回路の変更がある度に校正を行っているため、波形の比較は測定抵抗や回路の変更により適さない場合があるが、部分放電電荷量に関しては有意なデータとして各ケースで比較が可能である。

---

## 第 4 章

### 実験結果

#### 4.1 ケーブルモデルI -3層全てにバットギャップを有するモデル-

##### 4.1.1 直流電界下

直流印加時では大気圧空気中、気体窒素環境下、液体窒素環境下で試験を行った。直流印加時では部分放電よりも先に絶縁破壊が起こるケースが見られ、その事を考慮し大気圧空気環境下、気体窒素環境下においては7kVまで、液体窒素環境下では25kVまで印加を行い、電荷量と部分放電印加電圧の関係を取得した。

##### 大気圧空気環境下

チャンバに大気圧空気(室温)をつめ、その環境下におけるケーブルモデル内の部分放電の測定を行った。その時に観測された代表的な波形を図4.1に示す。

時間幅で20ns程度の信号が観測された。

##### 気体窒素環境下

チャンバに気体窒素(室温)をつめ、その環境下におけるケーブルモデル内の部分放電の測定を行った。その時に観測された代表的な波形を図4.2に示す。

時間幅で20ns程度の信号が観測された。信号波形は大気圧空気環境下で得られる波形と酷似している。

##### 液体窒素環境下

液体窒素環境下で使用するタンクに液体窒素をつめ、その環境下におけるケーブルモデル内の部分放電の測定を行った。その時に観測された代表的な波形を図4.3に示す。



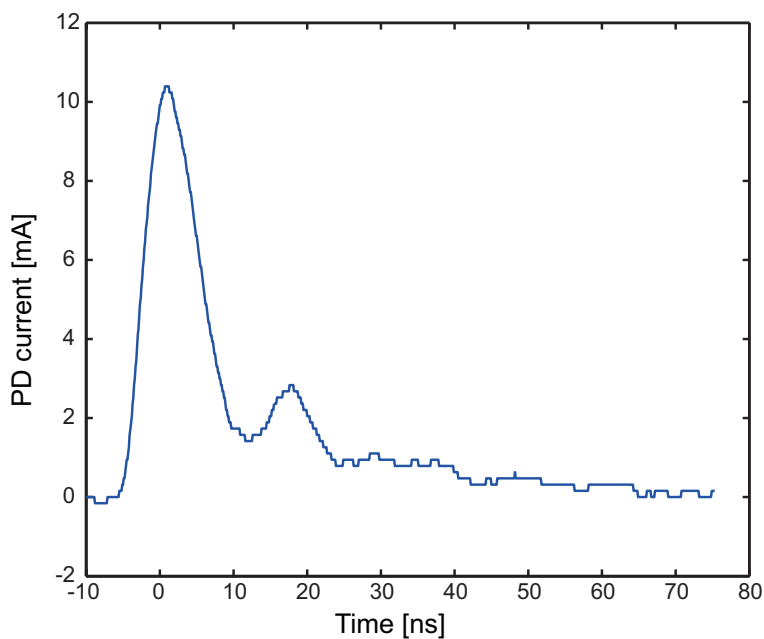


図 4.1 部分放電電流波形 (ケーブル I、空気中、直流)、測定抵抗  $50\Omega$

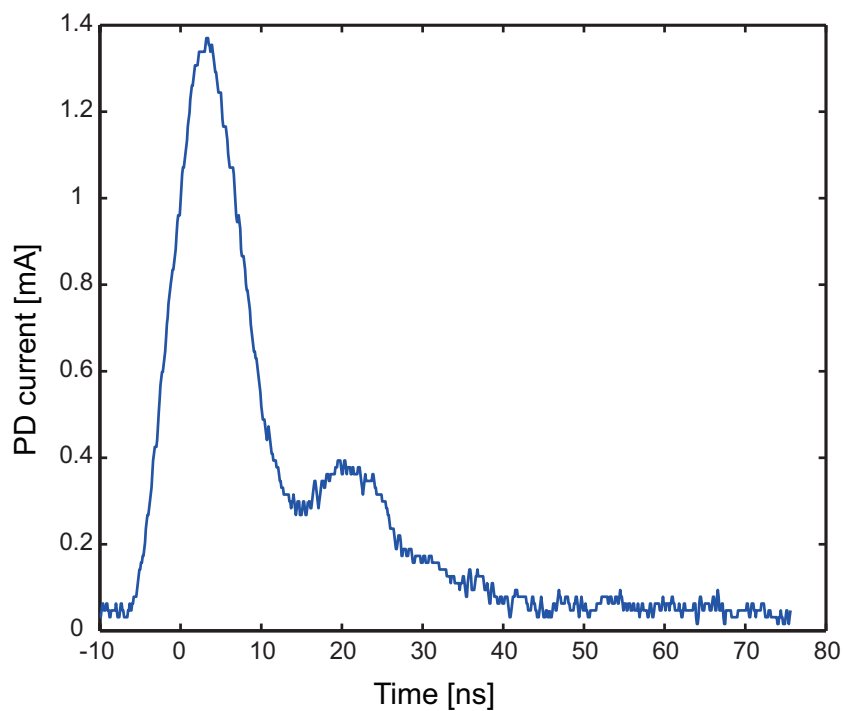


図 4.2 部分放電電流波形 (ケーブル I、気体窒素、直流)、測定抵抗  $50\Omega$

時間幅でその他環境下と同様に  $20\text{ns}$  程度の信号が観測された。波形もその他環境下で得られる信号と酷似している。

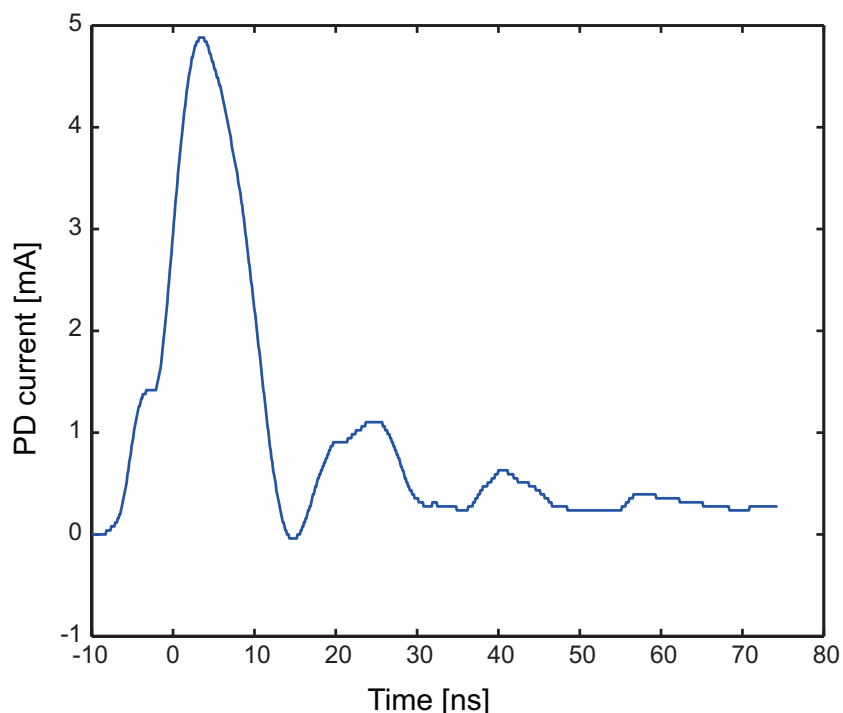


図 4.3 部分放電電流波形(ケーブルI、液体窒素中、直流)、測定抵抗  $50\Omega$

#### 4.1.2 直流電界下の $Q - V$ 特性とまとめ

観測された部分放電電流波形は各環境下で非常に酷似している。ここでは実際の電荷量と部分放電印加電圧の関係を比較する。

大気圧空気環境下、気体窒素環境下で観測された部分放電波形の電荷量とその時の印加電圧の関係を図 4.4 に縦軸をログスケールにしたものを図 4.5 に示す。図中の  $\square$  印が大気圧空気中における  $Q - V$  特性で、 $\times$  印が気体窒素環境下における  $Q - V$  特性である。なお  $\circ$  印は液体窒素環境下における  $Q - V$  特性で、本論文では特に断わりが無い限り統一されている。

直流印加時においては、電荷量のばらつきが大きくまた一般的に再現性も低い。図 4.4 を見ても、部分放電印加電圧と電荷量の間小さな相関が見られるに過ぎないという結果となった。

液体窒素環境下における  $Q - V$  特性を図 4.6 に示す。また縦軸をログスケールにしたものを図 4.7 に示す。大気圧空気中、気体窒素環境下に比較して部分放電印加電圧と電荷量の相関性が強く出た結果となった。前述したとおり、ケーブル保護の観点から印加電圧は絶縁破壊に至らない程度である。大気圧空気中、気体窒素環境下においては、直流で  $7\text{kV}$  付近までしか印加できていないため、電荷量が急上昇するという現象の前段階までしか印加できていない可能性がある。

なおケーブルモデル I は 3 本で同様の実験を行った。サンプル 2 の大気圧空気環境下、気体窒素環境下の  $Q - V$  特性を図 4.9 に液体窒素環境下の  $Q - V$  特性を図 4.10 に全環境下における  $Q - V$  特性を図 4.11 に示す。またサンプル 3 の大気圧空気環境下、気体窒素環境下の  $Q - V$  特性を図 4.12 に液体窒素環境下の  $Q - V$  特性を図 4.13 に、全環境下における  $Q - V$  特性を図 4.14 に示す。

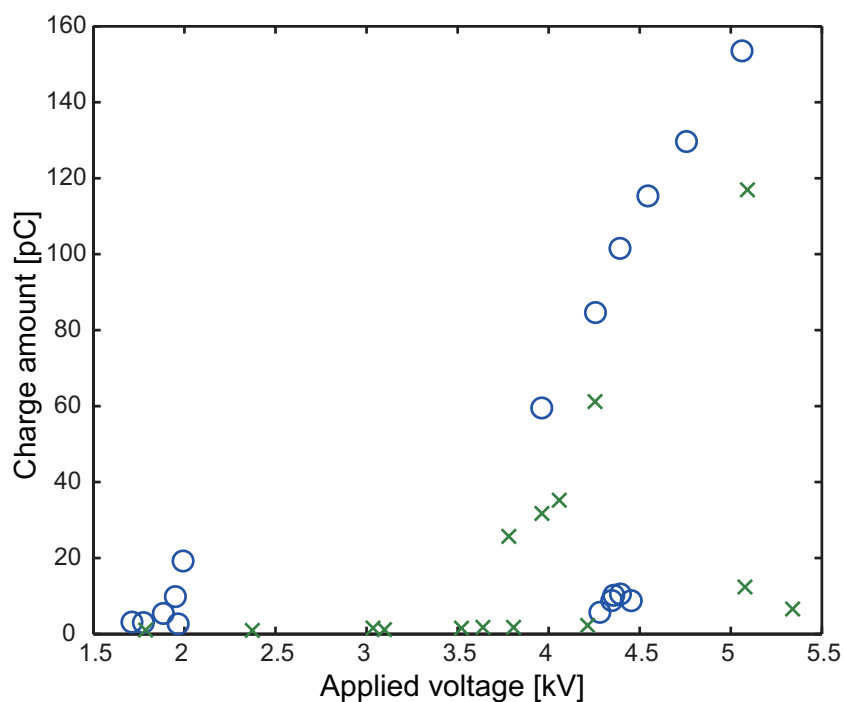


図 4.4  $Q - V$  特性、(ケーブル I サンプル 1 大気圧空気&気体窒素環境下、直流)

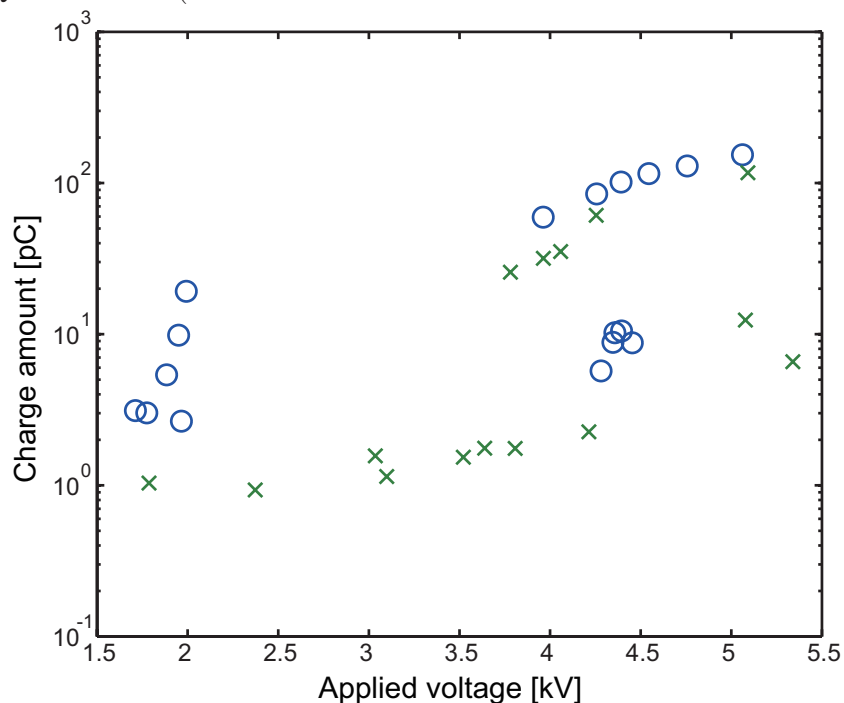


図 4.5  $Q - V$  特性、(ケーブル I サンプル 1 大気圧空気&気体窒素環境下、直流)

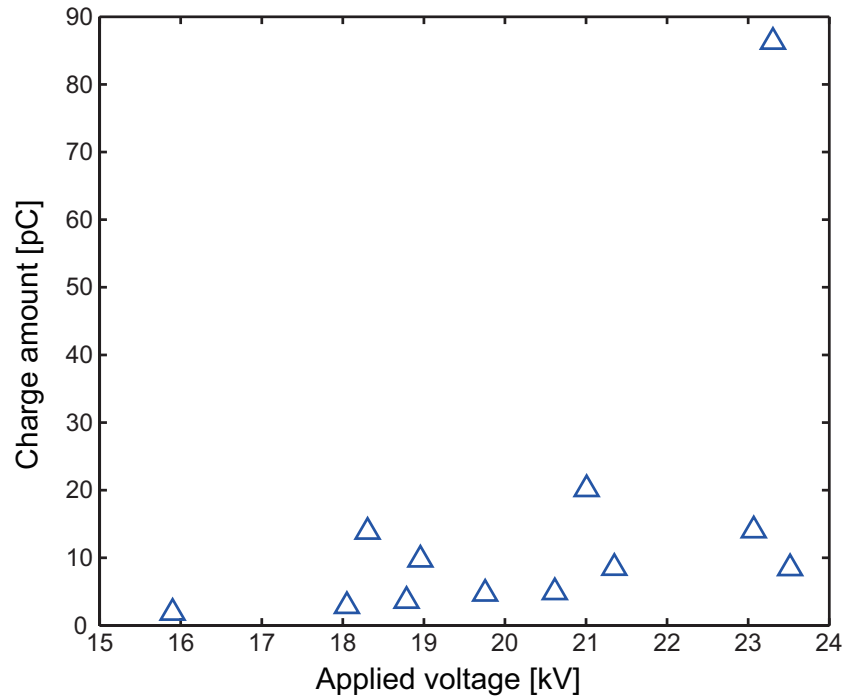


図 4.6  $Q - V$  特性、(ケーブル I サンプル 1、液体窒素環境下、直流)

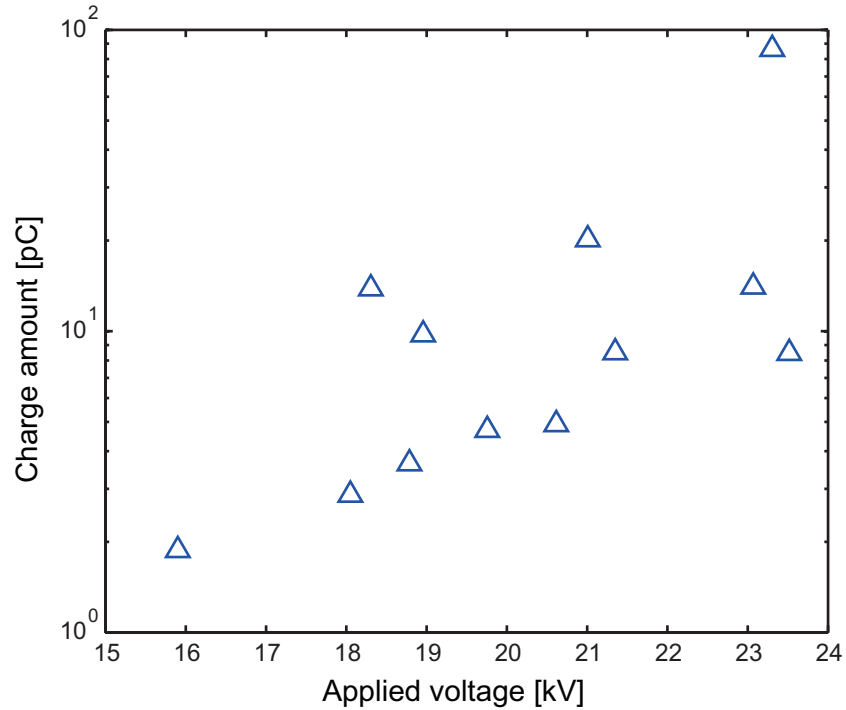


図 4.7  $Q - V$  特性、(ケーブル I サンプル 1、液体窒素環境下、直流)

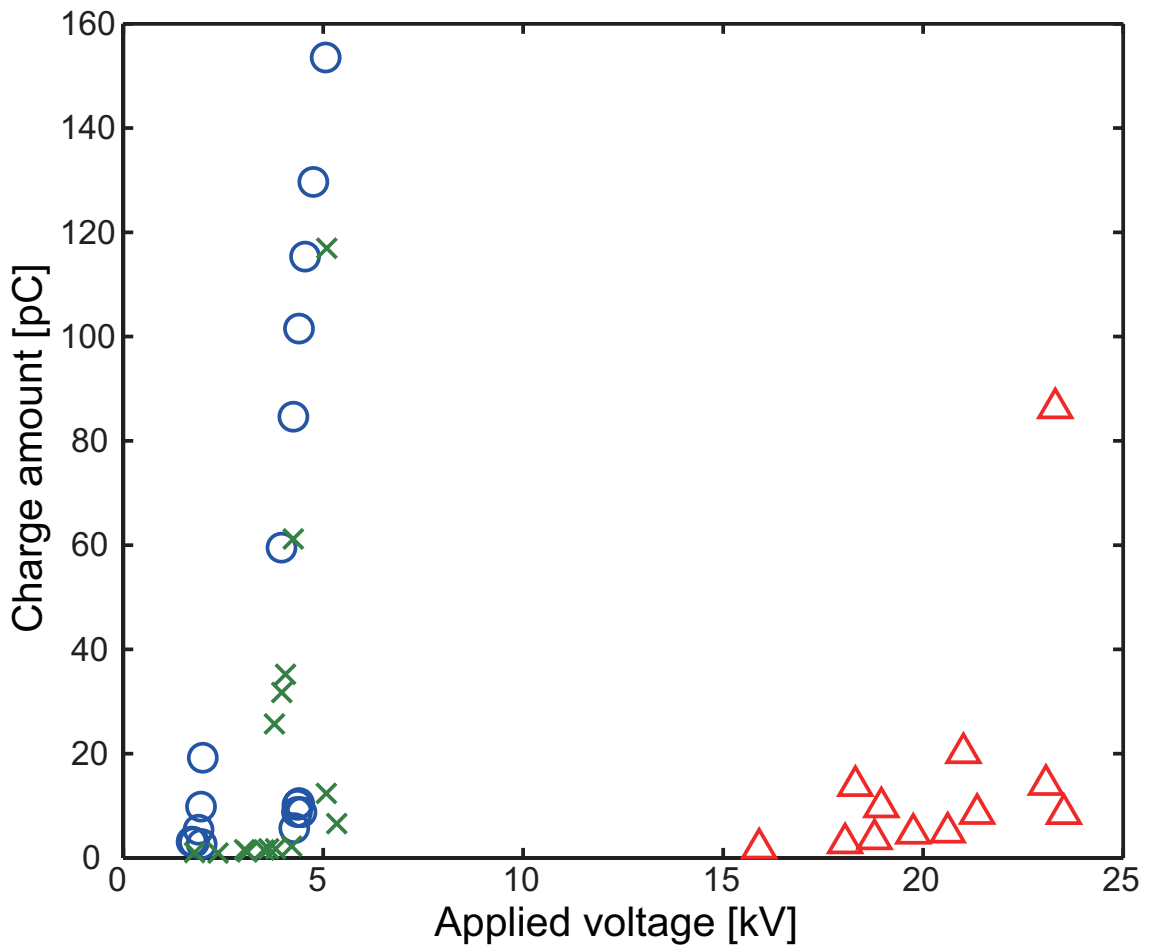


図 4.8 各環境下における  $Q - V$  特性 (ケーブル I サンプル 1, 直流)

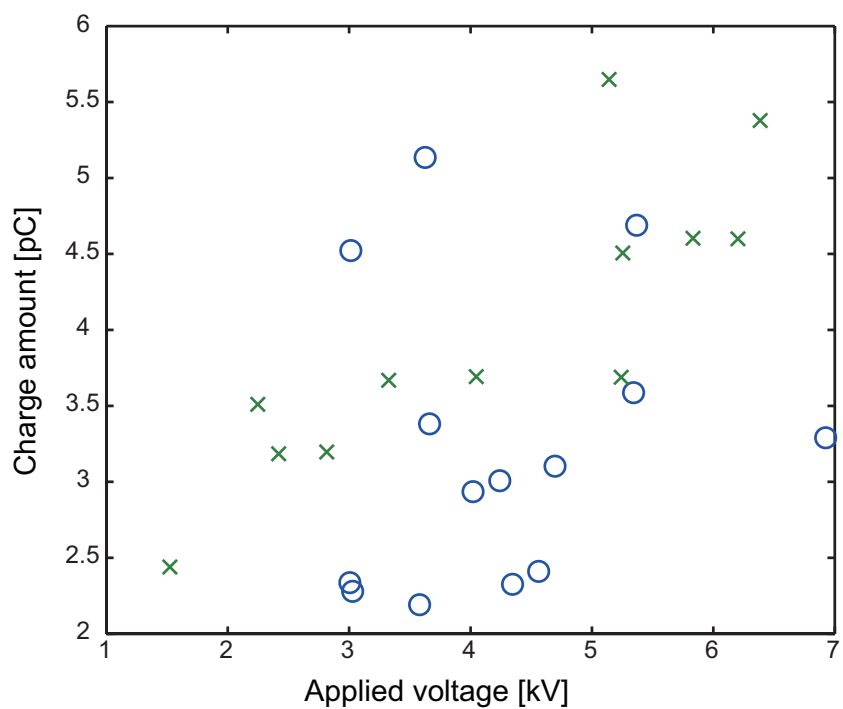


図 4.9  $Q - V$  特性、(ケーブル I サンプル 2 大気圧空気&気体窒素環境下、直流)

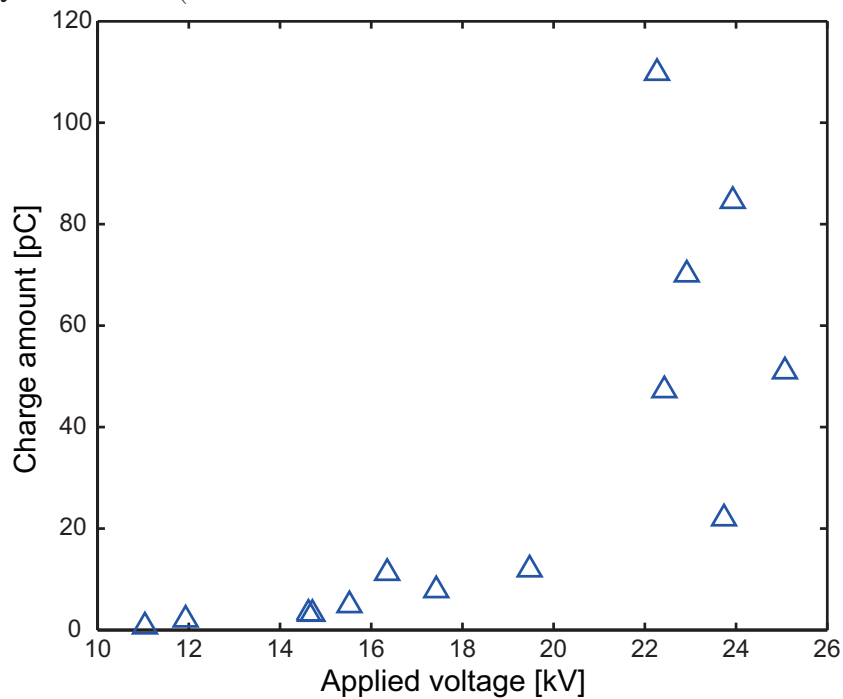


図 4.10  $Q - V$  特性、(ケーブル I サンプル 2 液体窒素環境下、直流)

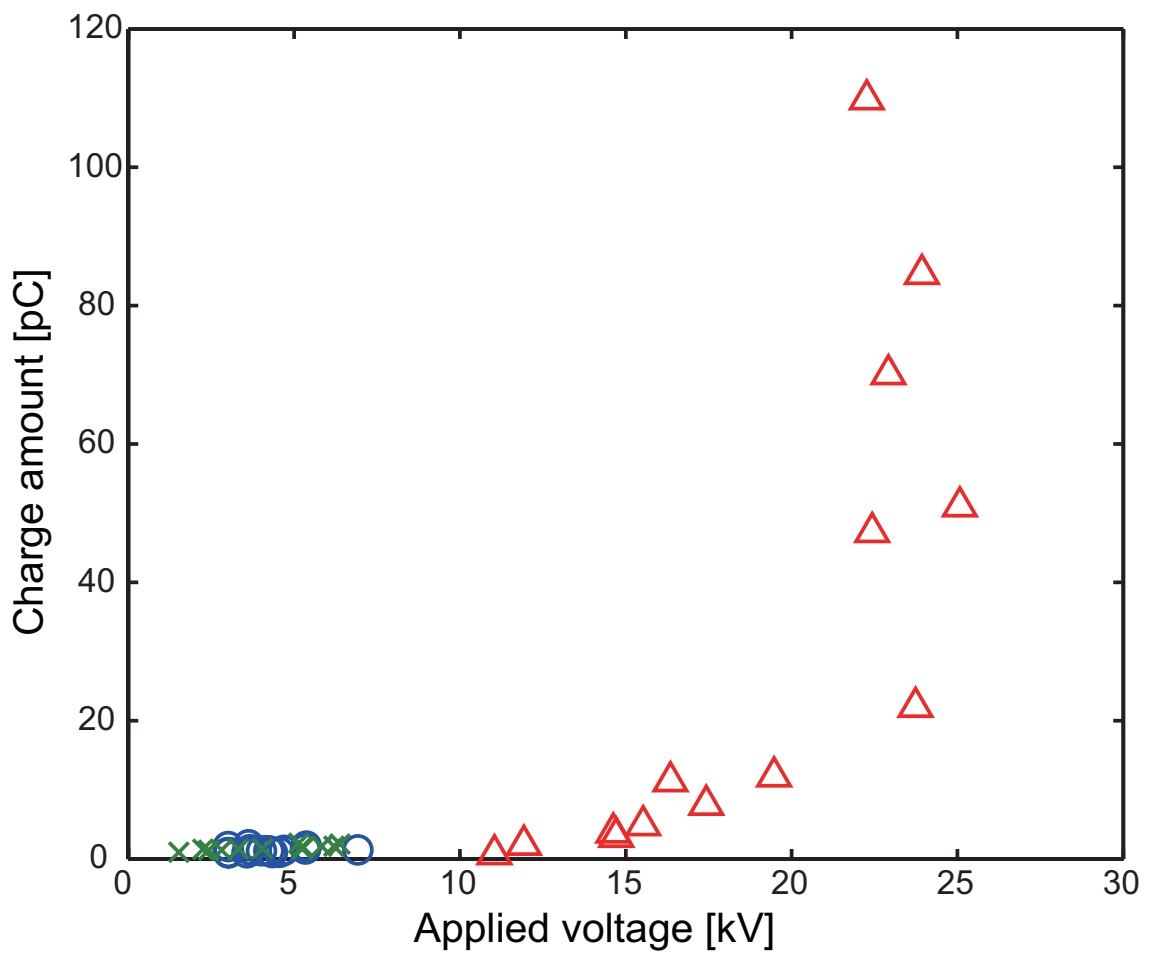


図 4.11  $Q - V$  特性、(各環境下における  $Q - V$  特性 (ケーブル I サンプル 2, 直流))

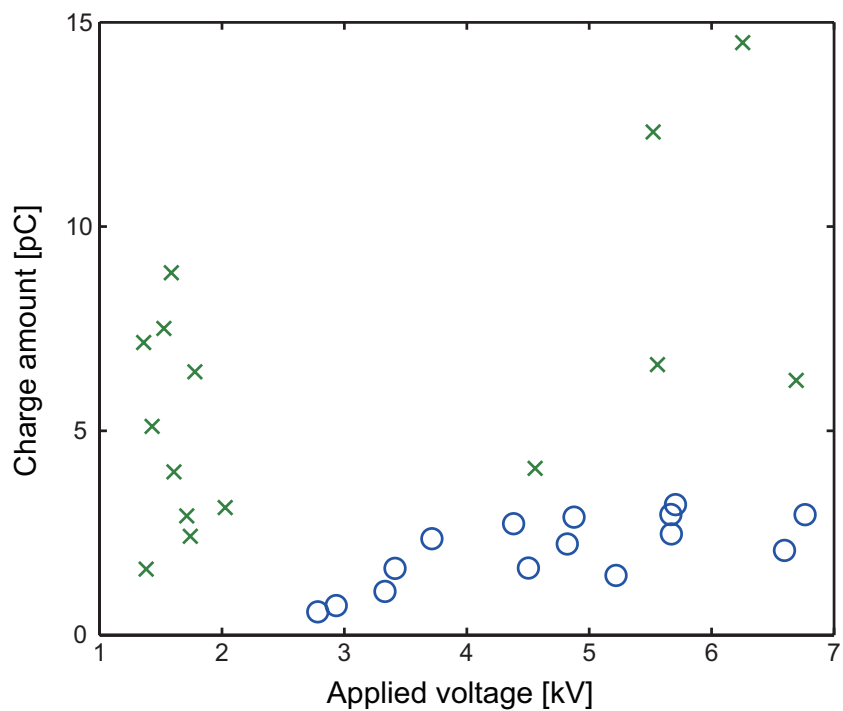


図 4.12  $Q - V$  特性、(ケーブル I サンプル 3 大気圧空気&気体窒素環境下、直流)

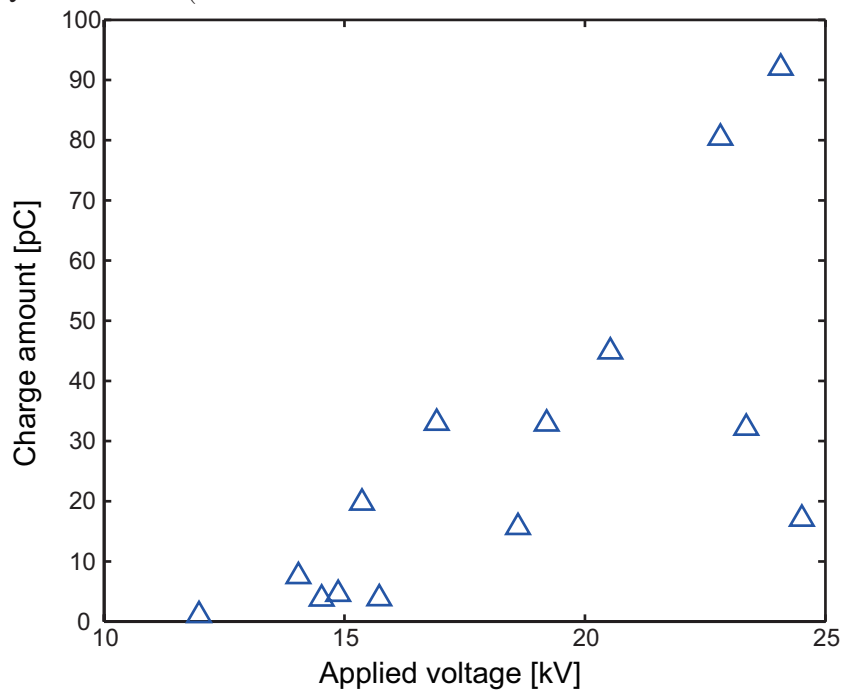


図 4.13  $Q - V$  特性、(ケーブル I サンプル 3 液体窒素環境下、直流)



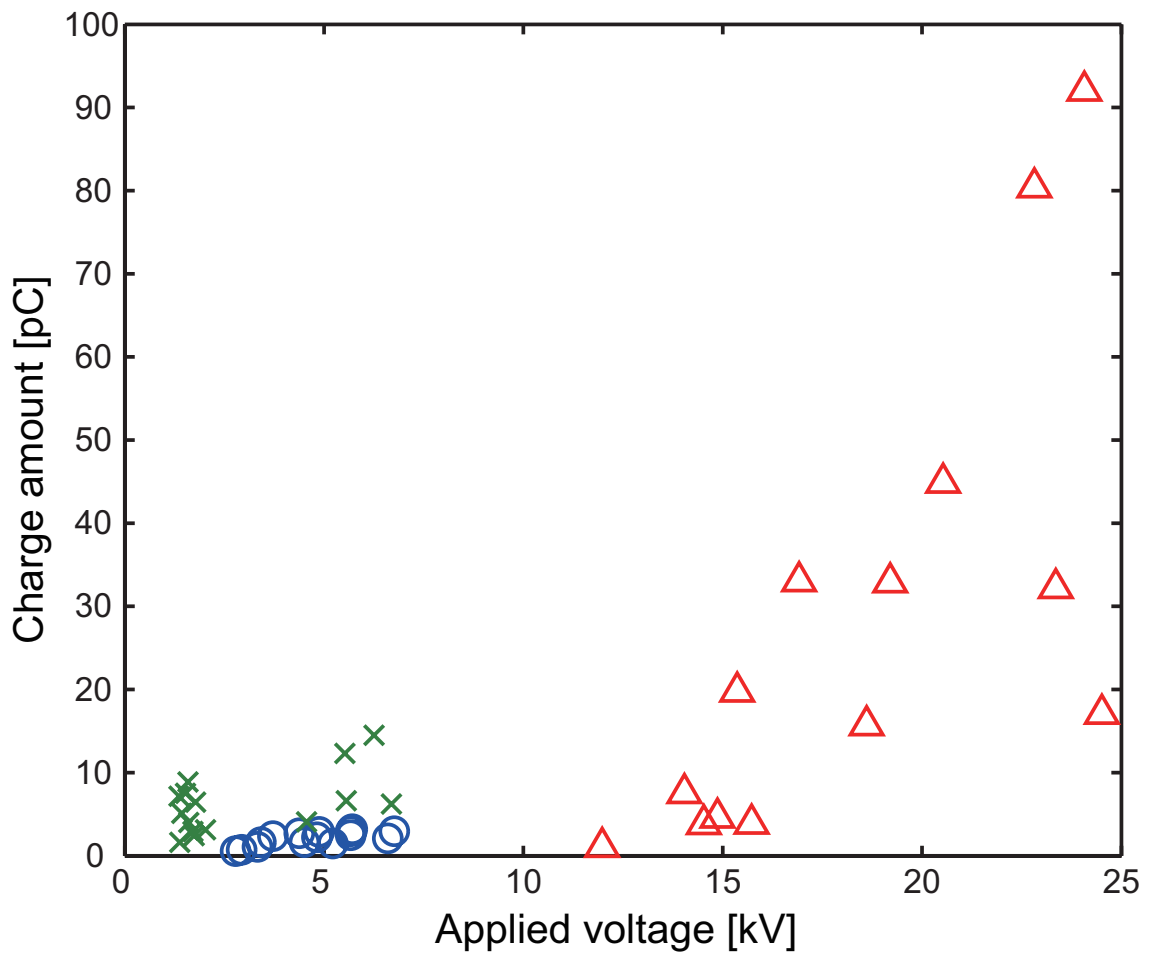


図 4.14  $Q - V$  特性、(各環境下における  $Q - V$  特性 (ケーブル I サンプル 3, 直流))

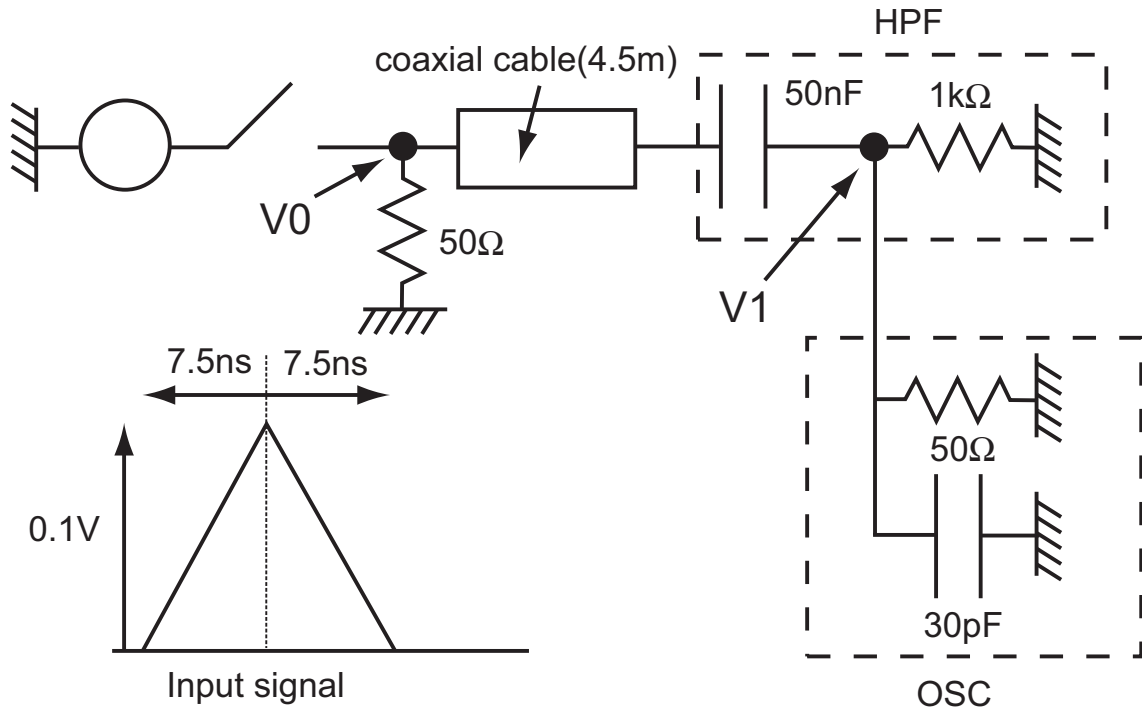


図 4.15 シミュレーションを行った回路 (オシロ有り)

### 4.1.3 交流電界下

ケーブルモデル I の交流印加時では、直流印加時と同様に大気圧空気環境下、気体窒素環境下、液体窒素環境下においてデータを取得した。オシロスコープで観測される電流波形のピーク値が 3mV から 500mV にわたる間で 15 ~ 20 回程度測定を行い、電流波形と  $Q - V$  特性を取得した。

#### EMTP によるマッチング考察

交流印加時はバットギャップによる充電電流除去目的でハイパスフィルタを使用している。HPF は 50nF のキャパシタと 1kΩ の抵抗で校正されており、回路全体として 50Ω に統一しているため、インピーダンスマッチングが取れていない可能性がある。そこで EMTP を用いてシミュレーションを行った。

シミュレーションを行った回路は図 4.15 である。入力信号は立ち上がり 7.5ns、立下り 7.5ns の三角波で実際の部分放電を模擬した。図中の V0、実際にオシロスコープで観測する V1 でそれぞれ得られた信号を図 4.16 に示す。実験と同様に緑色の V1 で観測される波形には反射は見られない。

図 4.15 を見ると HPF の 1kΩ はオシロスコープの入力インピーダンス 50Ω と並列になっている。そのため HPF の 1kΩ は 50Ω に近い値となり偶然マッチングが取れてしまっている可能性がある。そこで図 4.17 のようにオシロスコープを外してシミュレーションを行った。その時のシミュレーション結果が図 4.18 である。V0 においては 2 回分の振動が見られる。これはノード V1 においてはマッチングが取れていないため、反射波がケーブルを戻りノード V0 に達する。ノード V0 に達

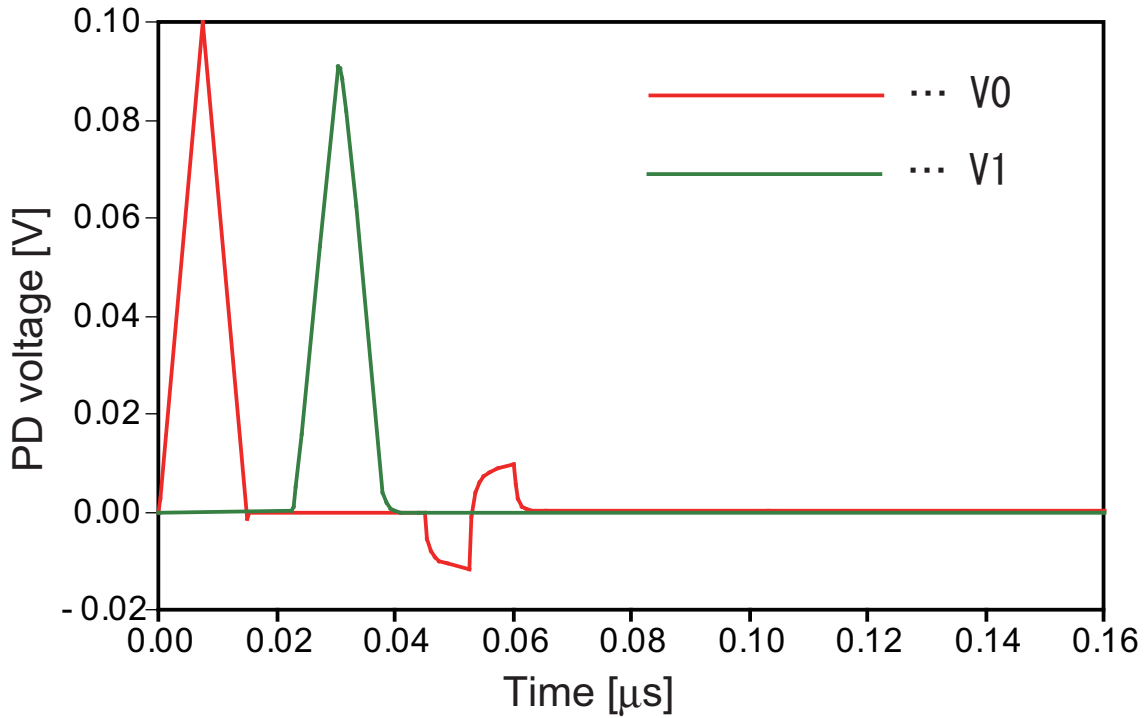


図 4.16 図 4.15 におけるシミュレーション結果

した信号は  $50\Omega$  でマッチングが取れているため、そこで全部アースに流れ込み再び V1 に向かう信号はなくなる。そのため観測しているノード V1 では信号が振動せずに観測されたのではないかと考えられる。

図 4.19 のように特性インピーダンス  $Z$  の半無限長線路の終端を抵抗  $R$  で設置した回路において、線路の左方から既知電圧は  $e_1$  が入射すると、線路状態の相違により波形は何らかの変形を受ける。

A 点における境界条件を解くことにより、反射波  $e_r$  と A 点での電圧はそれぞれ式 4.1、式 4.2 の様に示される。すると図 4.16 ではオシロスコープと HPF の合成抵抗  $R$  がほぼ  $50\Omega$  にみなせるため、反射波がほぼ 0 となり、式 4.2 の計算より  $Z = 50\Omega$  であるため、赤 (進行波の電位) と緑 (A 点での電位) の振幅が等しくなる。図 4.18 では  $R = 1k\Omega$  となるため、多くの進行波が反射し、A 点の電位は式 4.2 より、進行波 V0 の 2 倍程度となり、シミュレーションの結果と一致する。

$$e_r = \frac{R - Z}{R + Z} e_1 \quad (4.1)$$

$$e_2 = \frac{2R}{R + Z} e_1 \quad (4.2)$$

つまり HPF では抵抗  $1k\Omega$  を使用しているが、図 4.16、図 4.18 におけるノード V0 の部分で反射が止まるために、部分放電電流はオシロスコープ上つまり図中のノード V1 では実際の波形をほぼそのままに再現されることが確認できた。インピーダンスマッチングが完全に取れてはいない

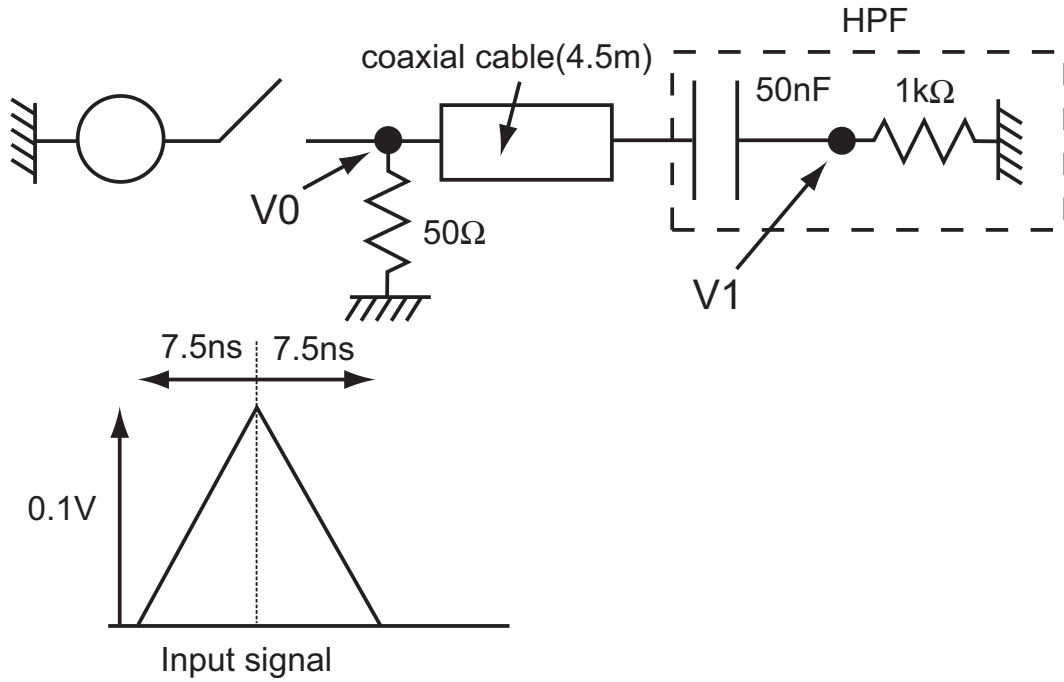


図 4.17 シミュレーションを行った回路 (オシロ抜き)

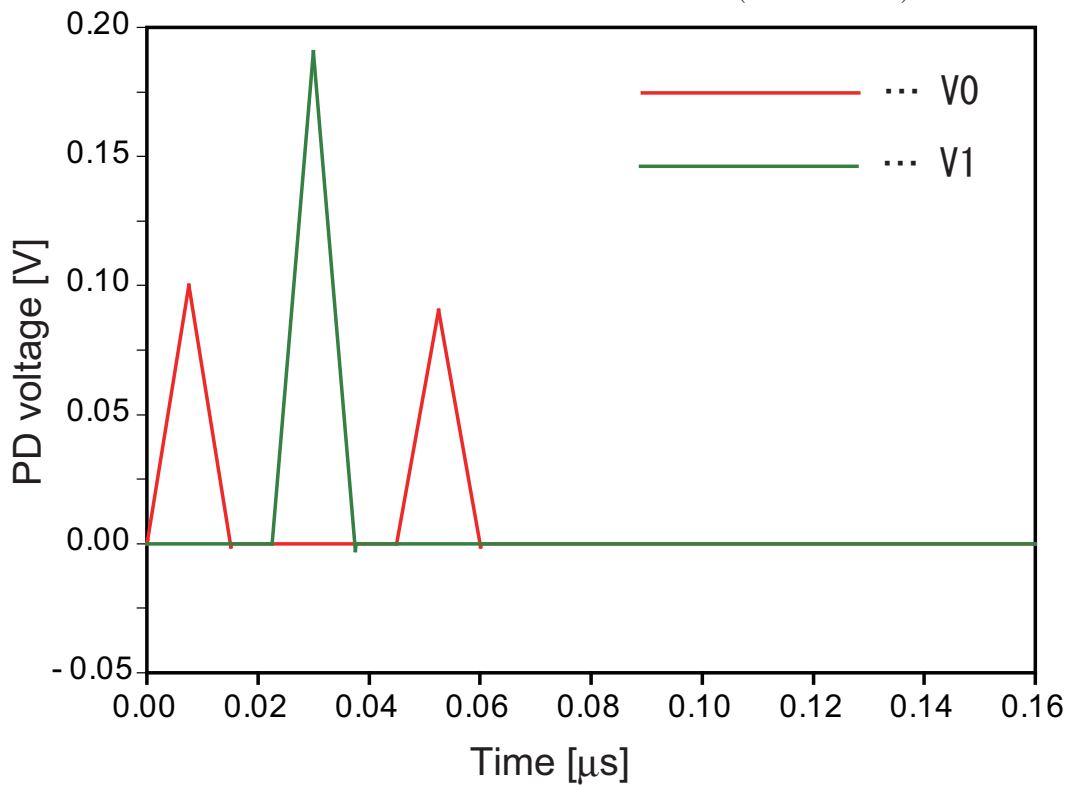


図 4.18 図 4.17 におけるシミュレーション結果

が、昨年度のような測定抵抗  $1\text{k}\Omega$  を使用し、部分放電信号が回路内で反射を繰り返すといった現象は見られない。

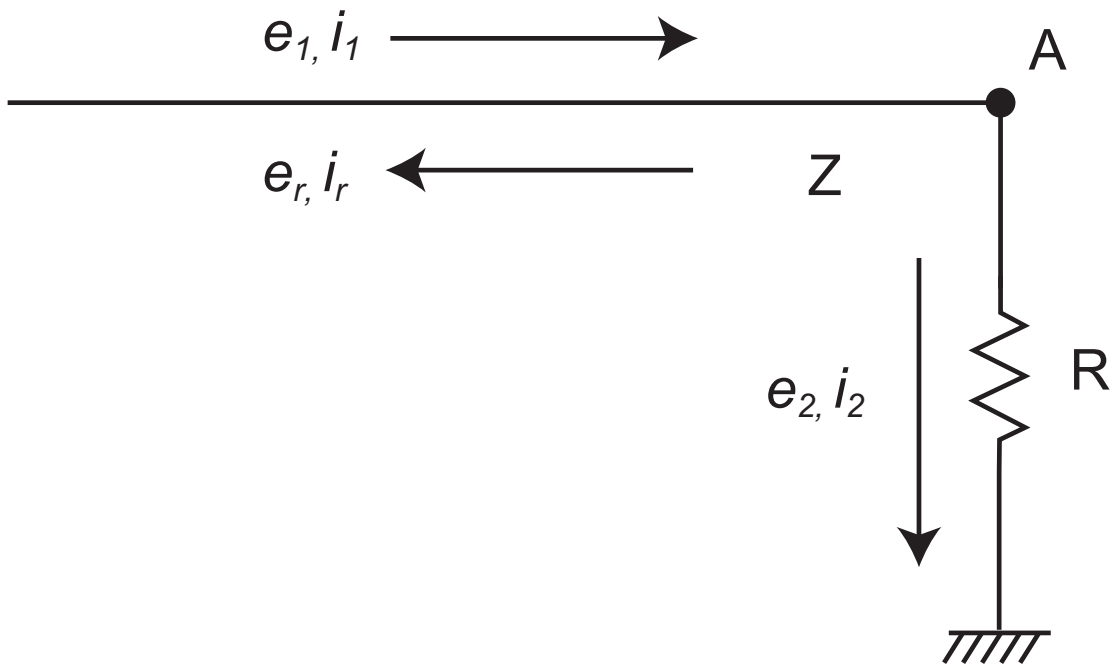


図 4.19 線路の終端における進行波

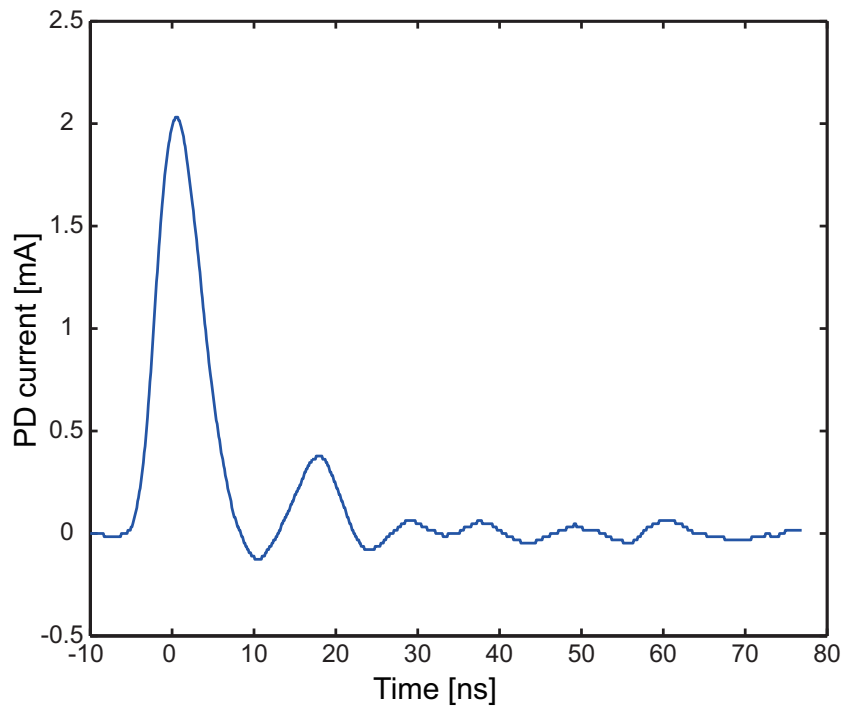


図 4.20 部分放電電流波形 (ケーブル I、空气中、交流)

大気圧空気環境下

ケーブルモデル I を大気圧空気を満たされたチャンバにつめ交流を印加し部分放電電流波形を取得した。

その時に得られた代表的な部分放電電流を図 4.20 に示す。

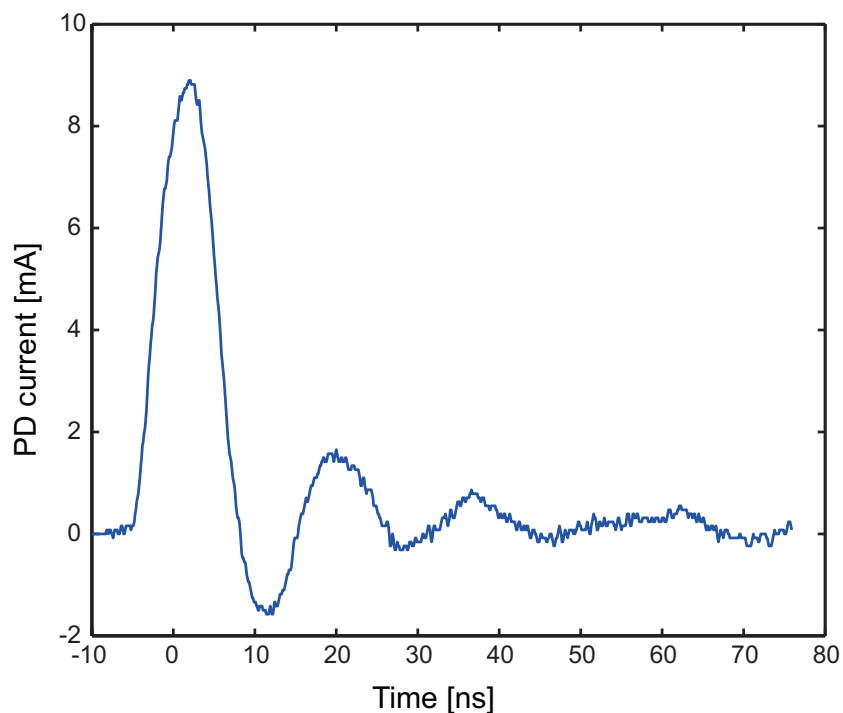


図 4.21 部分放電電流波形 (ケーブルI、気体窒素、交流)

部分放電電流は直流印加時と同様に 10ns 程度の信号として観測された。

#### 気体窒素環境下

ケーブルモデルIを気体窒素(大気圧)で満たされたチャンバにつめ交流を印加し部分放電電流波形を取得した。

その時に得られた代表的な部分放電電流波形を図 4.21 に示す。

部分放電電流は 10ns 程度の速い信号として観測された。大気圧空気環境下で得られた波形とも似ている。

#### 液体窒素環境下

ケーブルモデルIを液体窒素で満たされたチャンバに設置し交流電圧を印加し部分放電電流波形を取得した。

その時に得られた代表的な部分放電電流波形を図 4.22 に示す。

部分放電電流は 10ns 程度の信号として観測された。大気圧空気環境下、気体窒素環境下で得られた波形と似ており、部分放電電流波形は各環境下において変わらない。

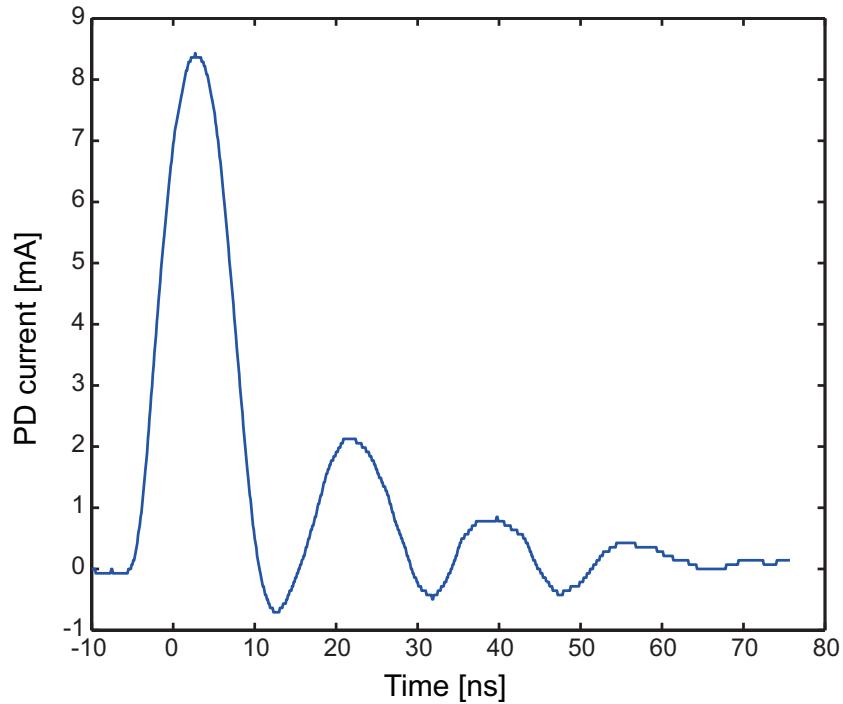


図 4.22 部分放電電流波形 (ケーブルI、液体窒素中、交流)

#### 4.1.4 交流電界下の $Q - V$ 特性とまとめ

部分放電電荷量と部分放電印加電圧の関係を比較する。大気圧空気環境下、気体窒素環境下で観測された部分放電波形の電荷量とその時の印加電圧の関係を図 4.23 に縦軸をログスケールにしたものを図 4.24 に示す。なお ○印は大気圧空気中における  $Q - V$  特性、×印は気体窒素環境下における  $Q - V$  特性である。

交流印加時においては、直流印加時のようなばらつきが少ない。また図 4.23 を見ると、部分放電印加電圧と電荷量の間に関係が見られる。ログスケールのグラフでは直線に近く、部分放電電荷量は部分放電印加電圧に対して指数関数的に増加していることがわかる。また部分放電印加電圧は気体窒素環境下の方が大気圧空気環境下よりも低いという結果がでた。

大気圧空気中には負性気体の酸素が含まれており、電子が吸着され放電が起こりにくい性質がある。その点気体窒素では、電子増倍が抑制されず部分放電印加電圧が大気圧空気に比べて低くなったと考えられる。

液体窒素環境下における  $Q - V$  特性を図 4.25 に示す。また縦軸をログスケールにしたものを図 4.26 に示す。大気圧空気中、気体窒素環境下と同様に部分放電印加電圧と電荷量の相関性が強く出た結果となった。

全ての環境下において部分放電電荷量は、部分放電印加電圧が上昇するにつれて、大幅に上昇する傾向が見られる。

ログスケールのグラフを見ると  $Q - V$  のプロットは直線に近い形となっており、部分放電印加

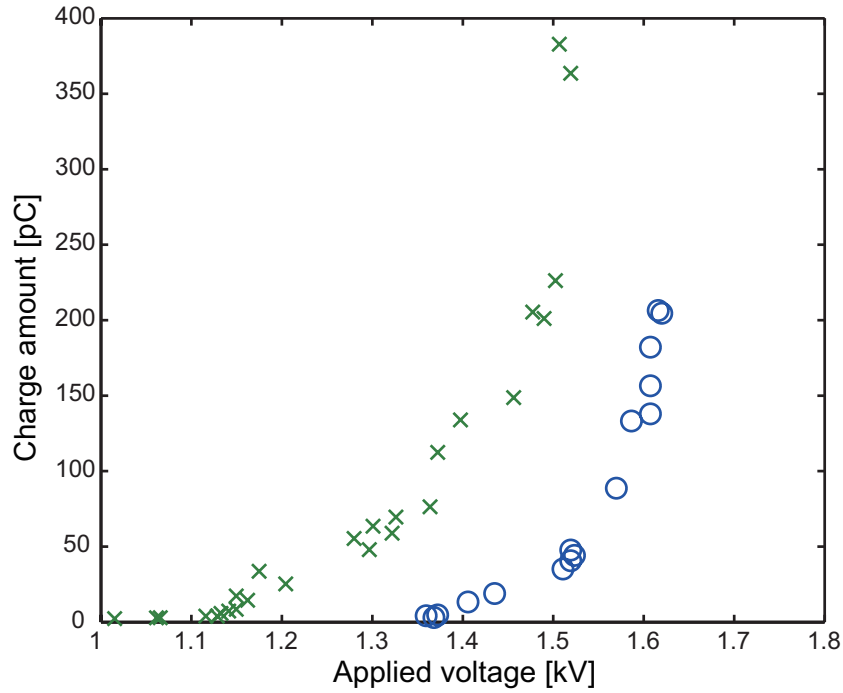


図 4.23  $Q - V$  特性、(ケーブルI 大気圧空気&気体窒素環境下、交流)

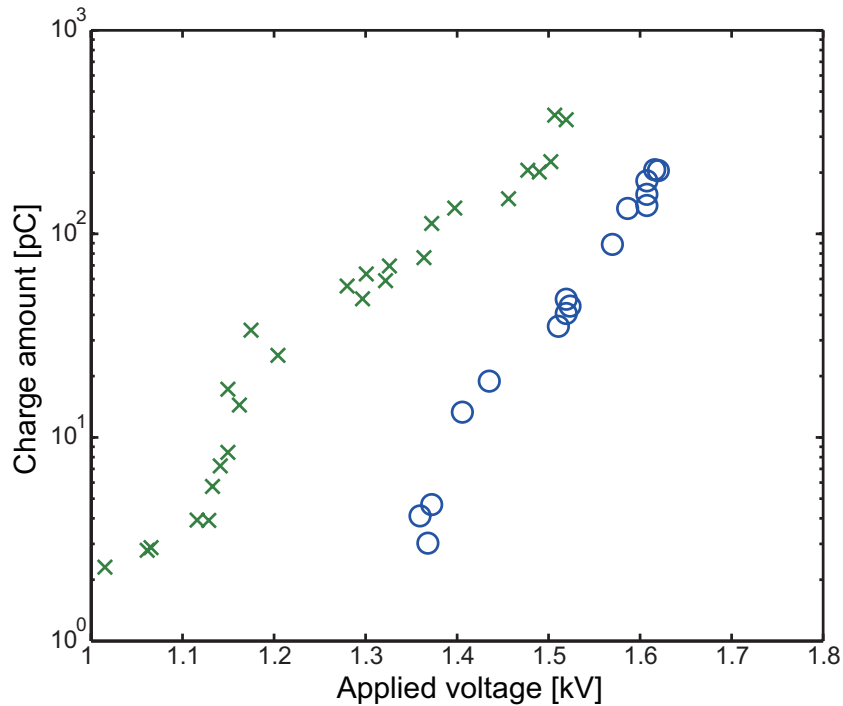


図 4.24  $Q - V$  特性、(ケーブルI 大気圧空気&気体窒素環境下、交流)

電圧が上昇すると指数関数的に電荷量が上昇する結果となった。

更に、全環境下における  $Q - V$  特性を一つのグラフにまとめたものを図 4.27 に示す。

部分放電印加電圧は液体窒素環境下が大きく、ついで大気圧空気環境下、気体窒素環境下となっている。また全ての環境下において部分放電印加電圧の上昇とともに、指数関数的に電荷量の上



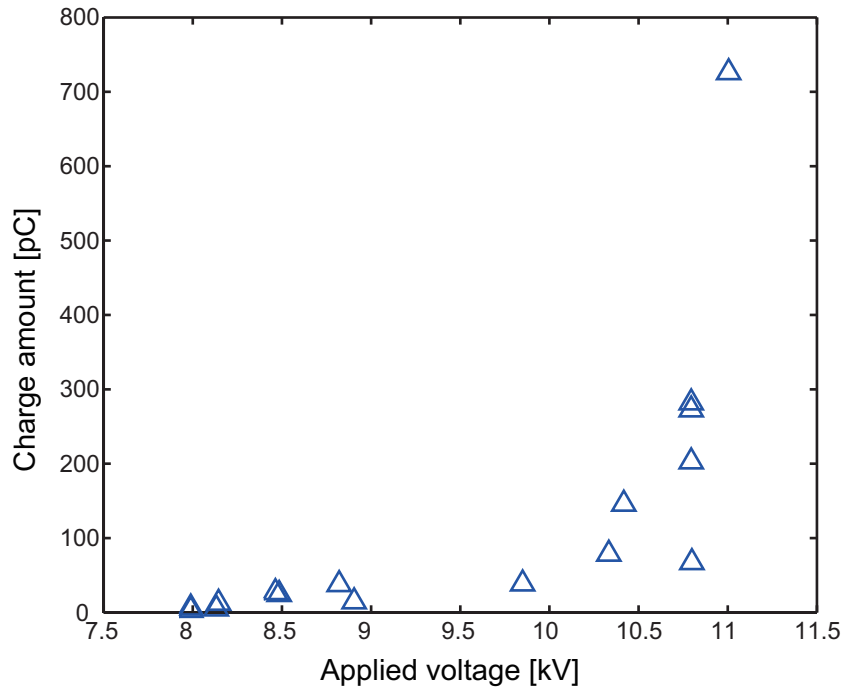


図 4.25  $Q - V$  特性、(ケーブル I、液体窒素環境下、交流)

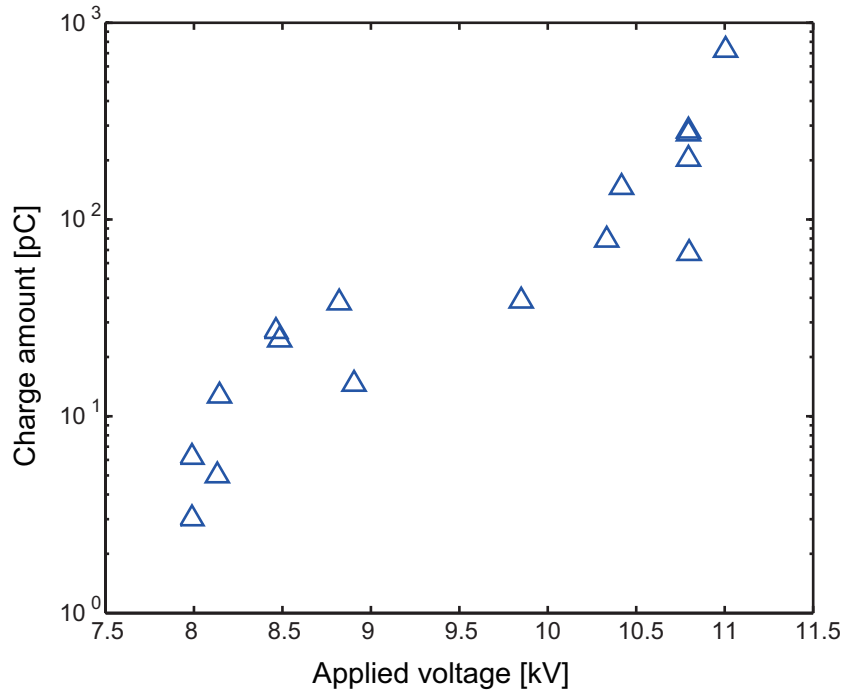


図 4.26  $Q - V$  特性、(ケーブル I、液体窒素環境下、交流)

昇するという傾向がみられた。

なおケーブルモデル I は 3 本で同様の実験を行った。サンプル 2 の大気圧空気環境下、気体窒素環境下の  $Q - V$  特性を図 4.28 に液体窒素環境下の  $Q - V$  特性を図 4.29 に全環境下における  $Q - V$  特性を図 4.30 に示す。またサンプル 3 の大気圧空気環境下、気体窒素環境下の  $Q - V$  特性を図 4.31 に液体窒素環境下の  $Q - V$  特性を図 4.32 に、全環境下における  $Q - V$  特性を図 4.33 に示す。

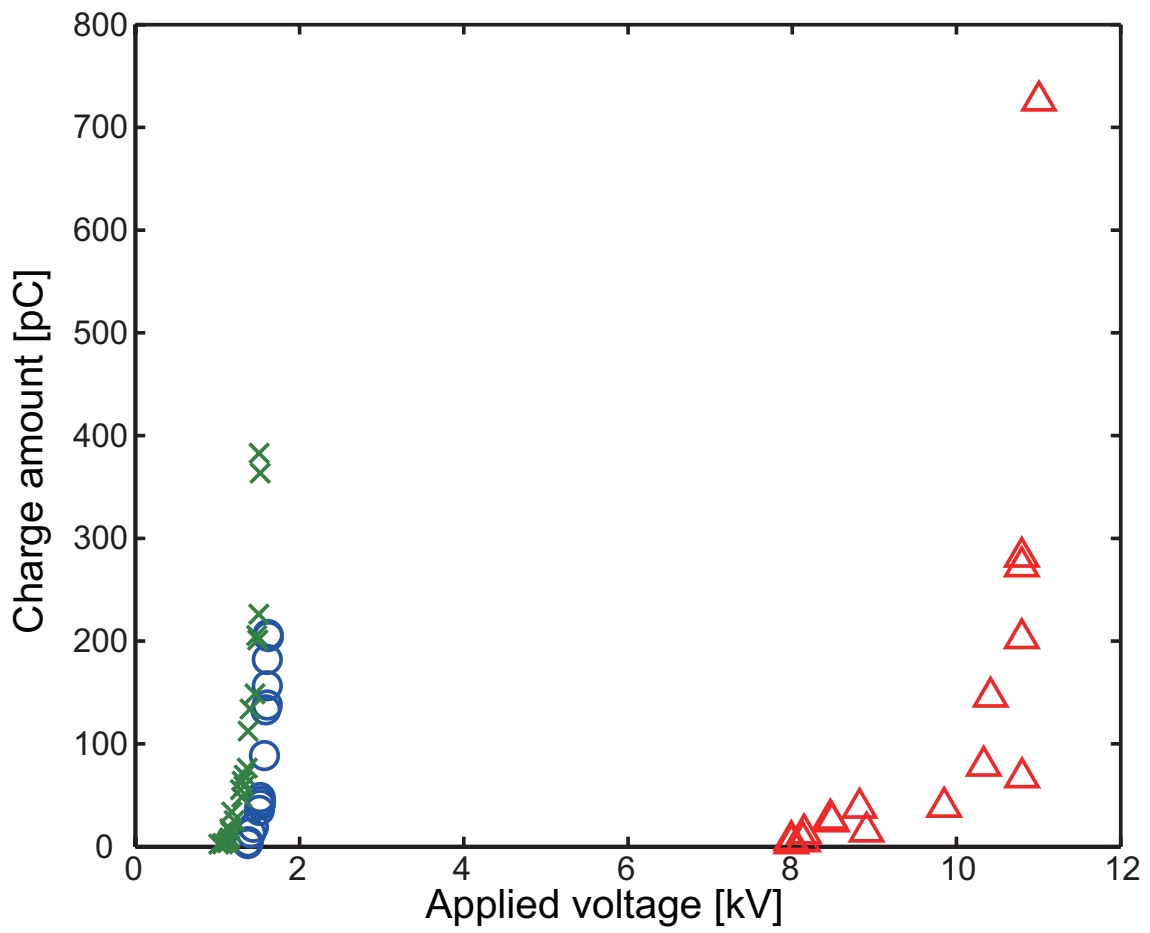


図 4.27 各環境下における  $Q - V$  特性

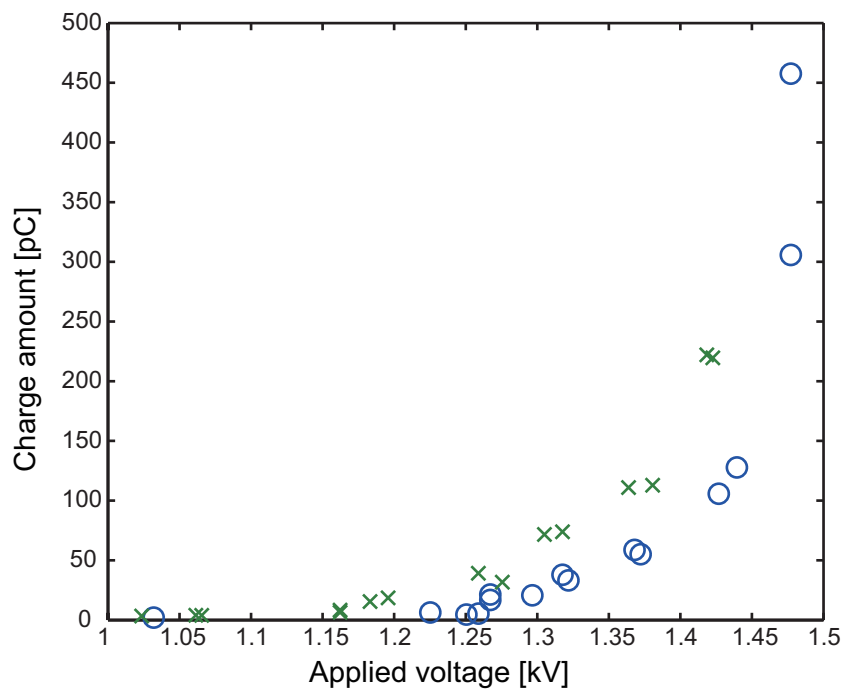


図 4.28  $Q - V$  特性、(ケーブル I サンプル 2 大気圧空気&気体窒素環境下、交流)

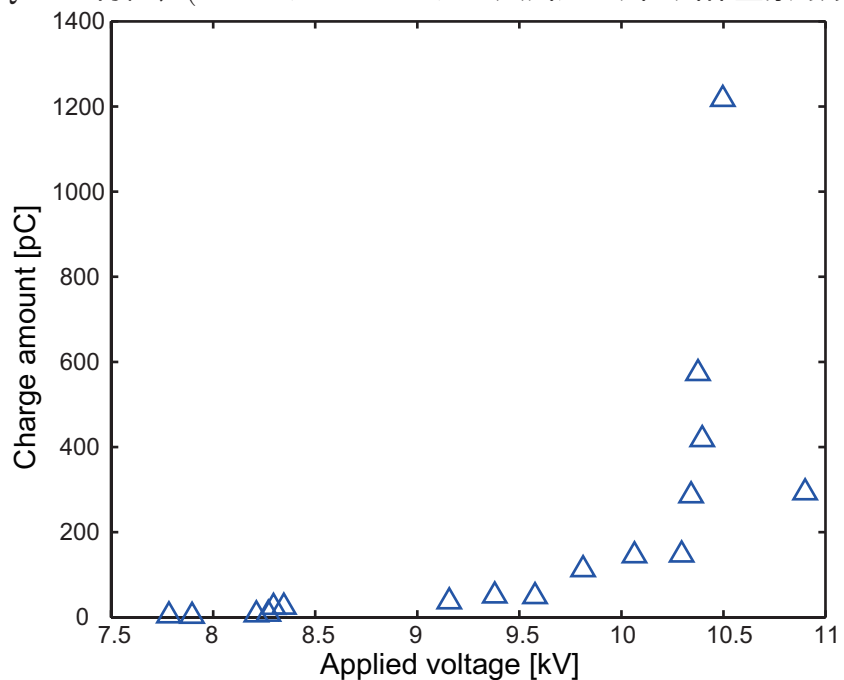


図 4.29  $Q - V$  特性、(ケーブル I サンプル 2 液体窒素環境下、交流)

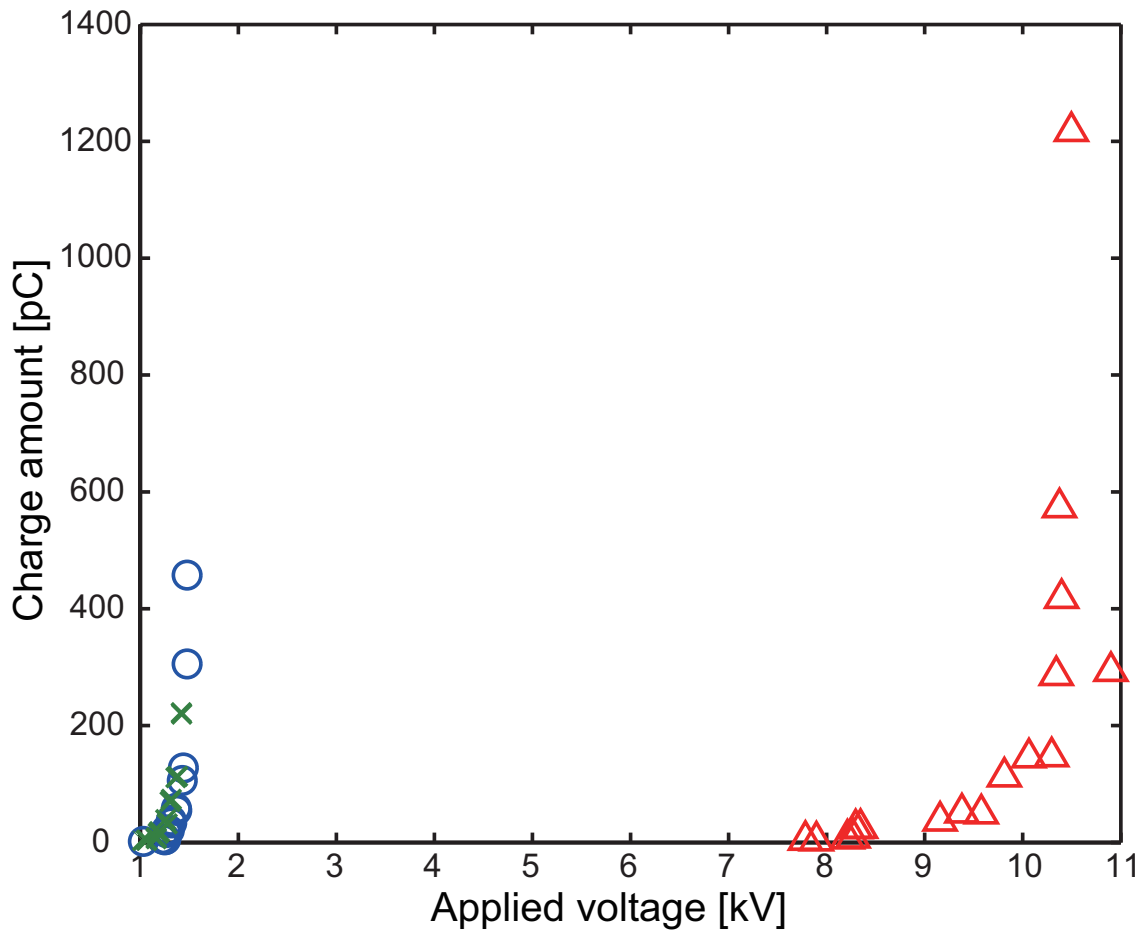


図 4.30  $Q - V$  特性、(各環境下における  $Q - V$  特性 (ケーブル I サンプル 2, 交流))

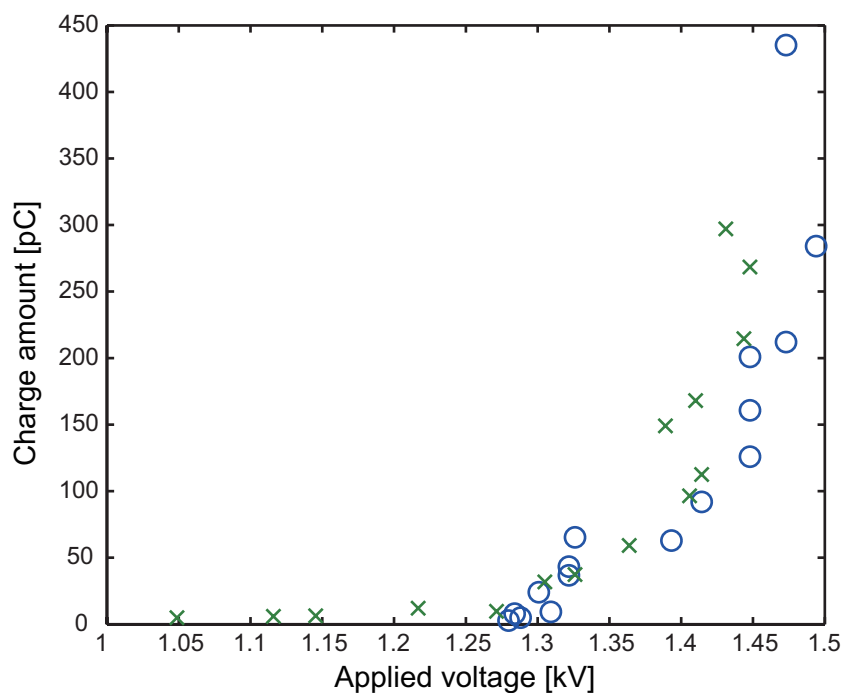


図 4.31  $Q - V$  特性、(ケーブル I サンプル 3 大気圧空気&気体窒素環境下、交流)

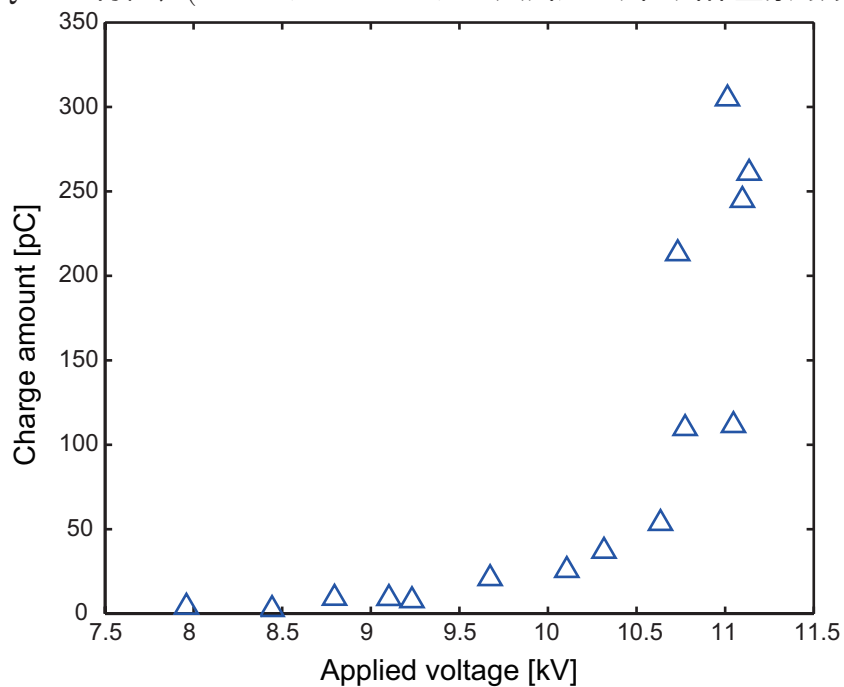


図 4.32  $Q - V$  特性、(ケーブル I サンプル 3 液体窒素環境下、交流)

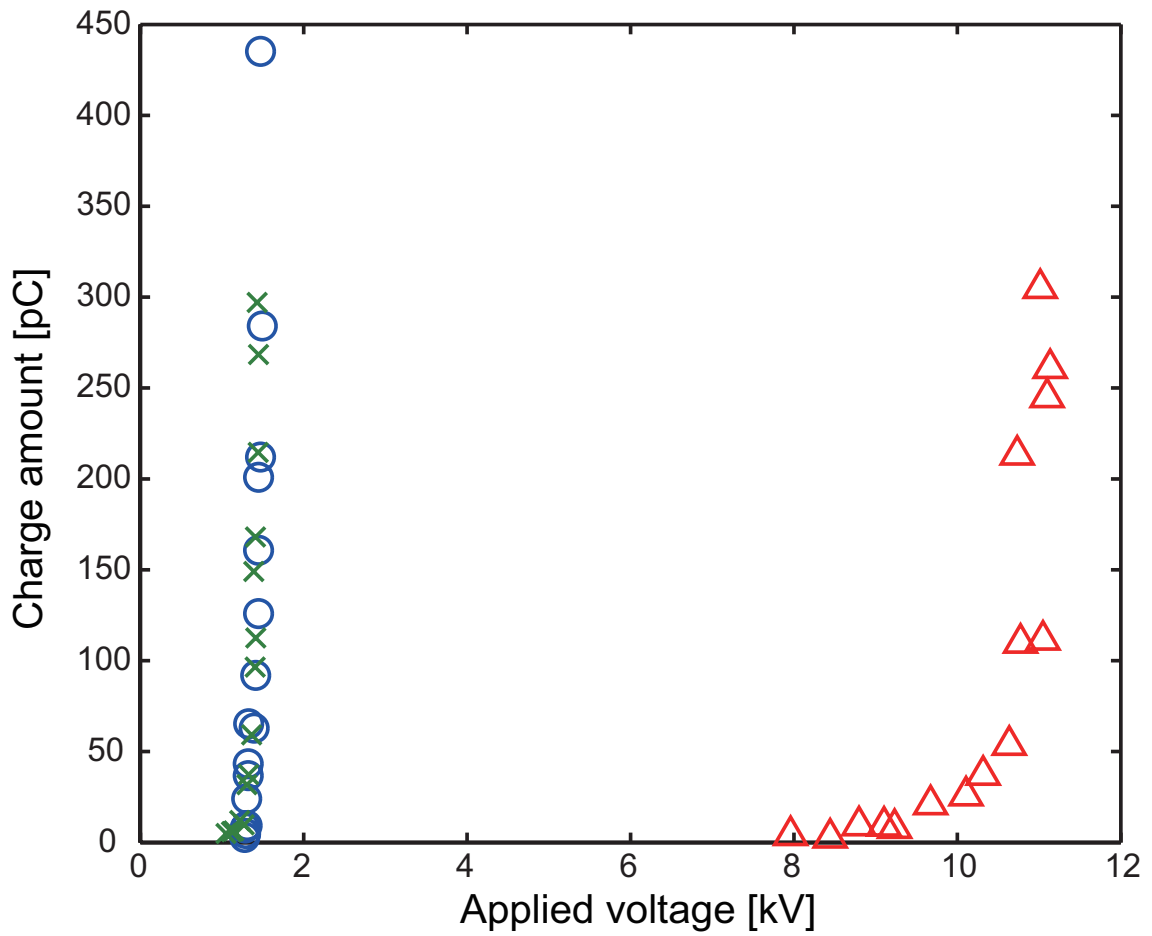


図 4.33  $Q - V$  特性、(各環境下における  $Q - V$  特性 (ケーブル I サンプル 3, 交流))

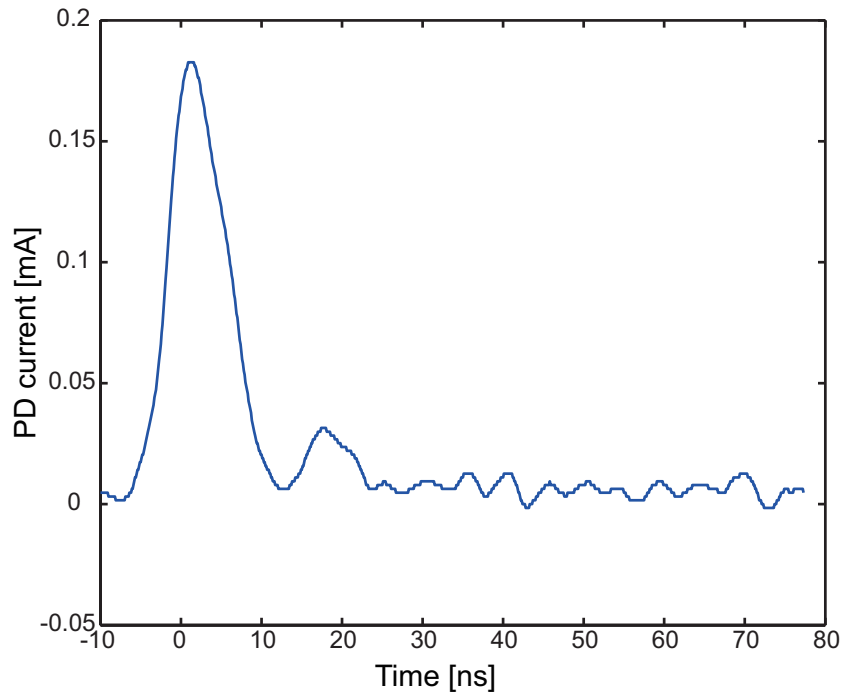


図 4.34 部分放電電流波形 (ケーブルモデル II、大気圧空気、直流)、測定抵抗  $50\Omega$

## 4.2 ケーブルモデル II -半導電層に面した所のみバットギャップを有するモデル-

### 4.2.1 直流電界下

直流印加時ではケーブルモデル I 同様大気圧空气中、気体窒素環境下、液体窒素環境下で試験を行った。絶縁破壊の発生を抑えるため大気圧空気環境下、気体窒素環境下においては  $7\text{kV}$  まで、液体窒素環境下では  $25\text{kV}$  まで印加を行い、電荷量と部分放電印加電圧の関係を取得した。

#### 大気圧空気環境下

チャンバに大気圧空気 (室温) をつめ、その環境下におけるケーブルモデル II 内の部分放電の測定を行った。その時に観測された代表的な波形を図 4.34 に示す。

時間幅で  $10\text{ns}$  程度の信号が観測された。

#### 気体窒素環境下

チャンバに気体窒素 (常温) をつめ、その環境下におけるケーブルモデル II 内の部分放電の測定を行った。その時に観測された代表的な波形を図 4.35 に示す。

時間幅で  $10\text{ns}$  程度の信号が観測された。信号波形は大気圧空気環境下で得られる波形と酷似している。

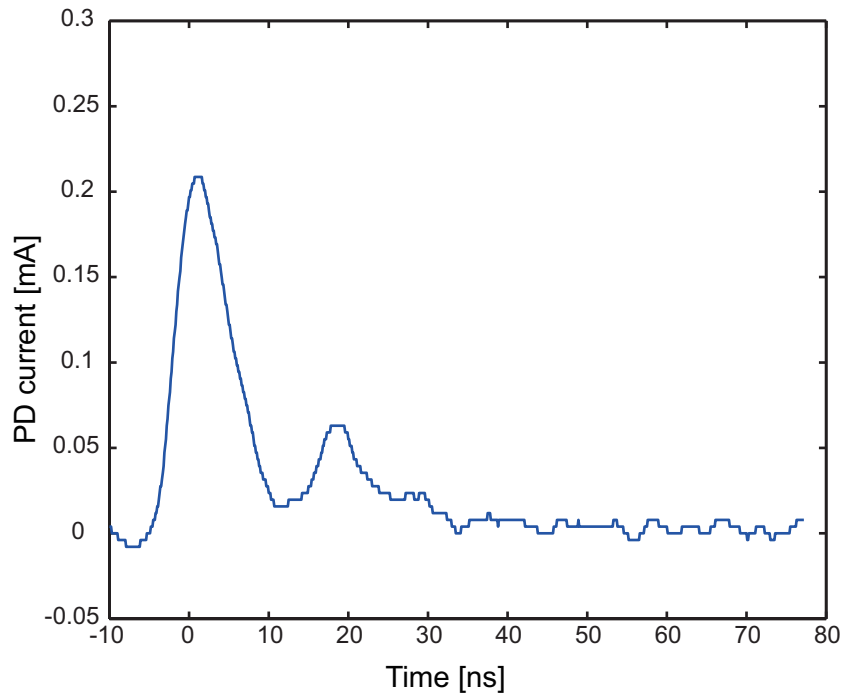


図 4.35 部分放電電流波形 (ケーブルモデル II、気体窒素、直流)、測定抵抗 50Ω

#### 液体窒素環境下

チャンバに液体窒素をつめ、その環境下におけるケーブルモデル内の部分放電の測定を行った。その時に観測された代表的な波形を図 4.36 に示す。

時間幅で 10ns 程度の信号が観測された。波形もその他環境下で得られる信号と酷似している。尚、印加電圧が 25kV の時にケーブルモデルが絶縁破壊してしまい、その後部分放電のデータを取得することができなかつたため、測定回数が 7 回と本来の測定回数の半分程しか取得していない。

#### 4.2.2 直流電界下の $Q - V$ 図まとめ

観測された部分放電電流波形は各環境下で非常に酷似している。電荷量と部分放電印加電圧の関係を比較する。

大気圧空気環境下、気体窒素環境下で観測された部分放電波形の電荷量とその時の印加電圧の関係を図 4.37 に示す。なお縦軸をログスケールにしたものをあわせて図 4.38 に示す。

直流印加時においては、電荷量のばらつきが大きくまた一般的に再現性も低い。図 4.37 を見ても、部分放電印加電圧と電荷量の間には小さな相関が見られるには過ぎない結果となった。

液体窒素環境下における  $Q - V$  図を図 4.39 に示す。また縦軸をログスケールにしたものを図 4.40 に示す。大気圧空気中、気体窒素環境下に比較して部分放電印加電圧と電荷量の相関性が強く出た結果となった。

更に、全環境下における  $Q - V$  図を一つのグラフにまとめたものを図 4.41 に示す。部分放電印



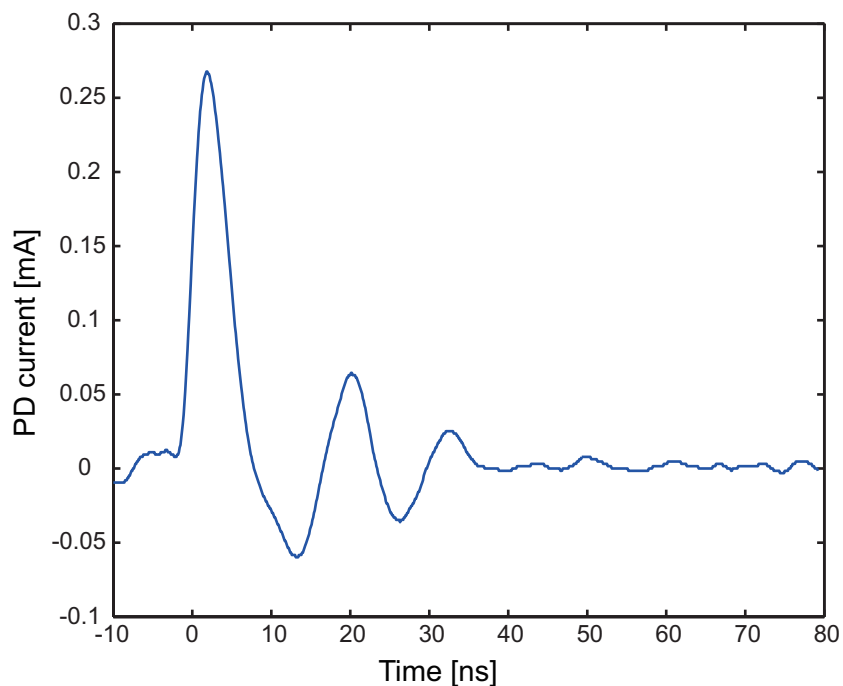


図 4.36 部分放電電流波形 (ケーブルモデル II、液体窒素中、直流)、測定抵抗  $50\Omega$

加電圧は大きい順に液体窒素環境下、大気圧空気環境下、気体窒素環境下となっている。

なおケーブルモデル II も 3 本で同様の実験を行った。サンプル 2 の大気圧空気環境下、気体窒素環境下の  $Q-V$  特性を図 4.42 に液体窒素環境下の  $Q-V$  特性を図 4.43 に全環境下における  $Q-V$  特性を図 4.44 に示す。またサンプル 3 の大気圧空気環境下、気体窒素環境下の  $Q-V$  特性を図 4.45 に液体窒素環境下の  $Q-V$  特性を図 4.46 に、全環境下における  $Q-V$  特性を図 4.47 に示す。

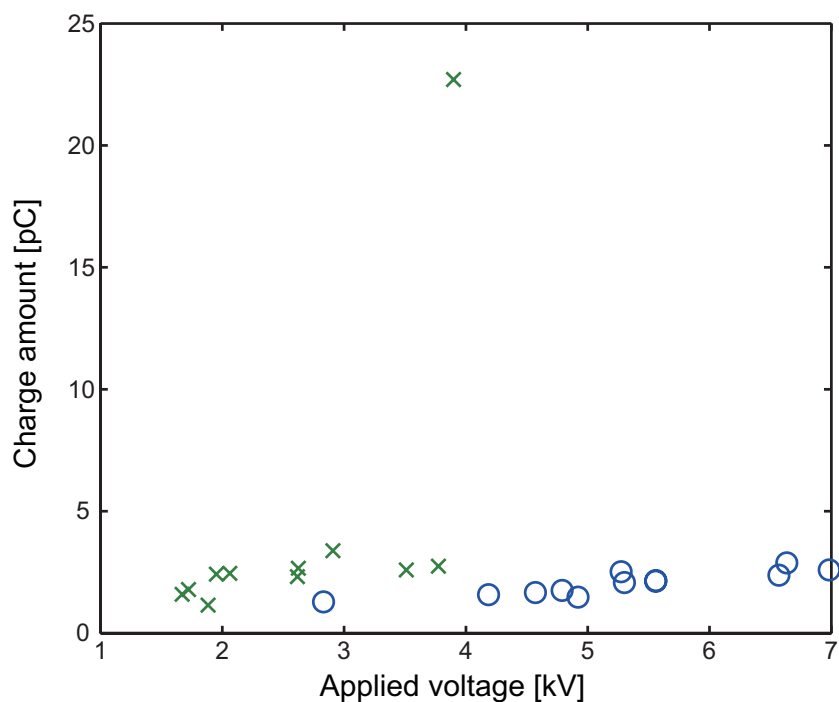


図 4.37  $Q - V$  図、(ケーブルモデル II サンプル 1 大気圧空気&気体窒素環境下、直流)

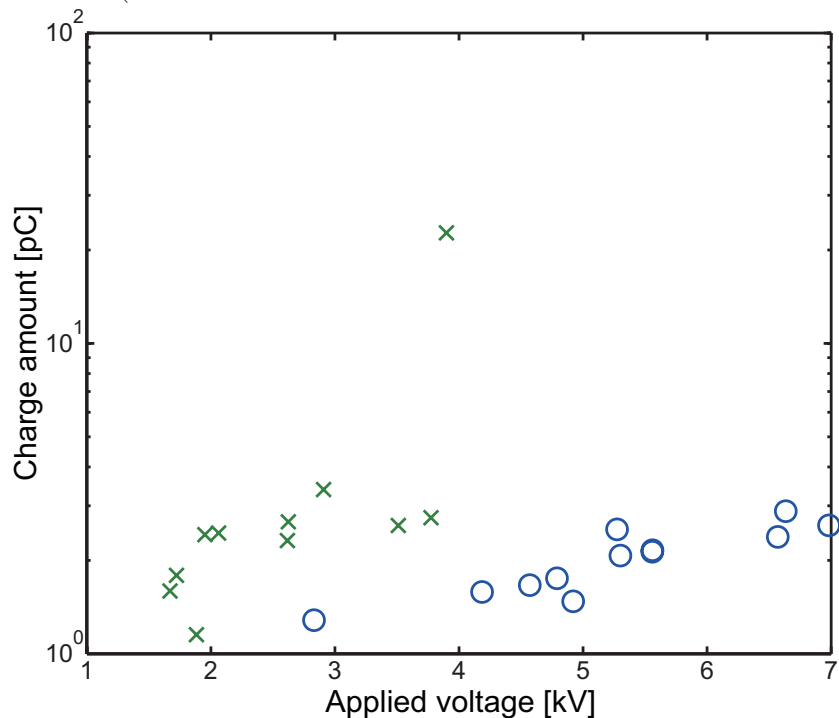


図 4.38  $Q - V$  図、(ケーブルモデル II サンプル 1 大気圧空気&気体窒素環境下、直流)

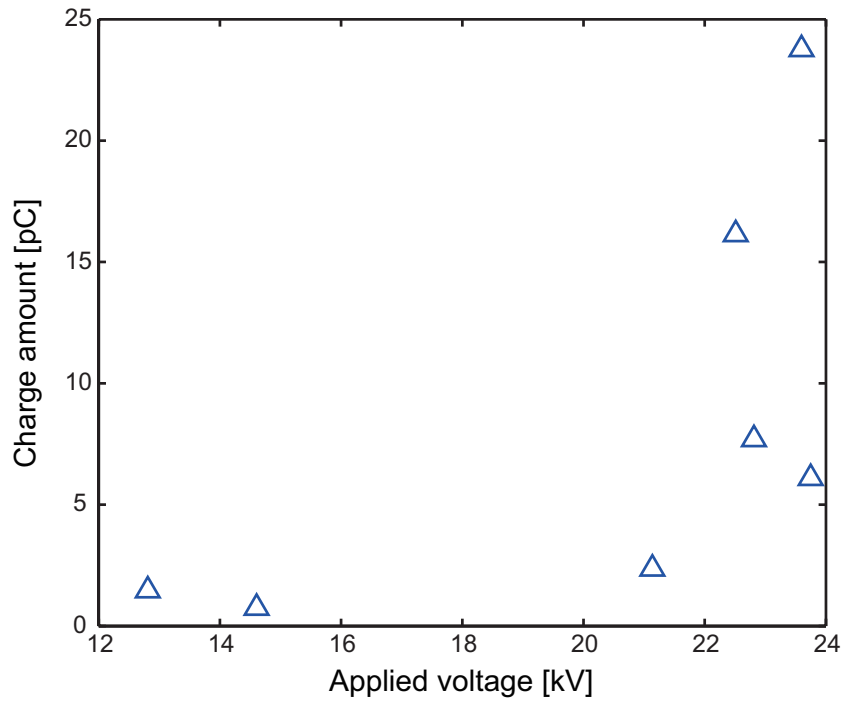


図 4.39  $Q - V$  図、(ケーブルモデル II サンプル 1、液体窒素環境下、直流)

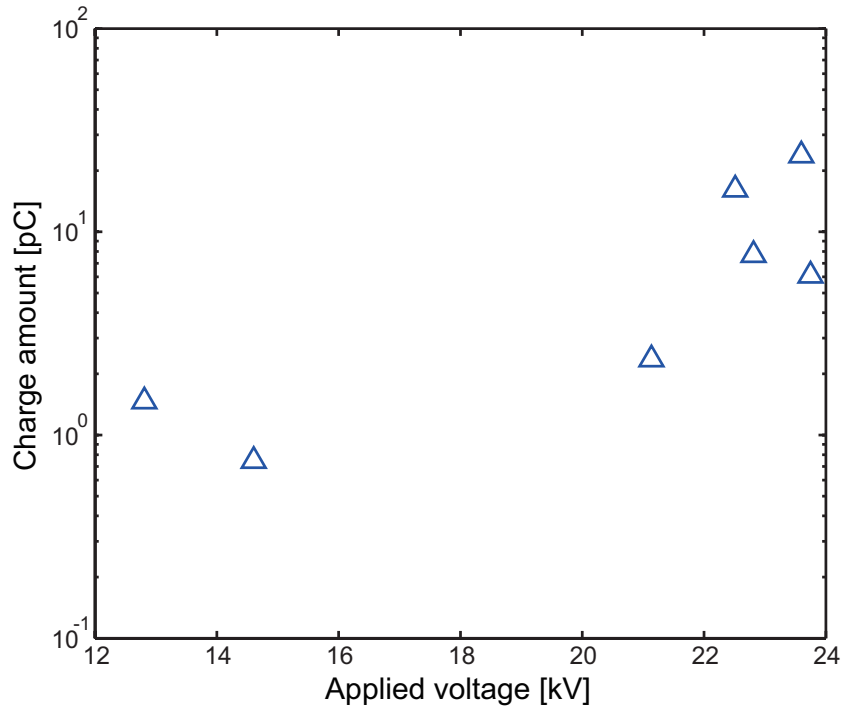


図 4.40  $Q - V$  図、(ケーブルモデル II サンプル 1、液体窒素環境下、直流)

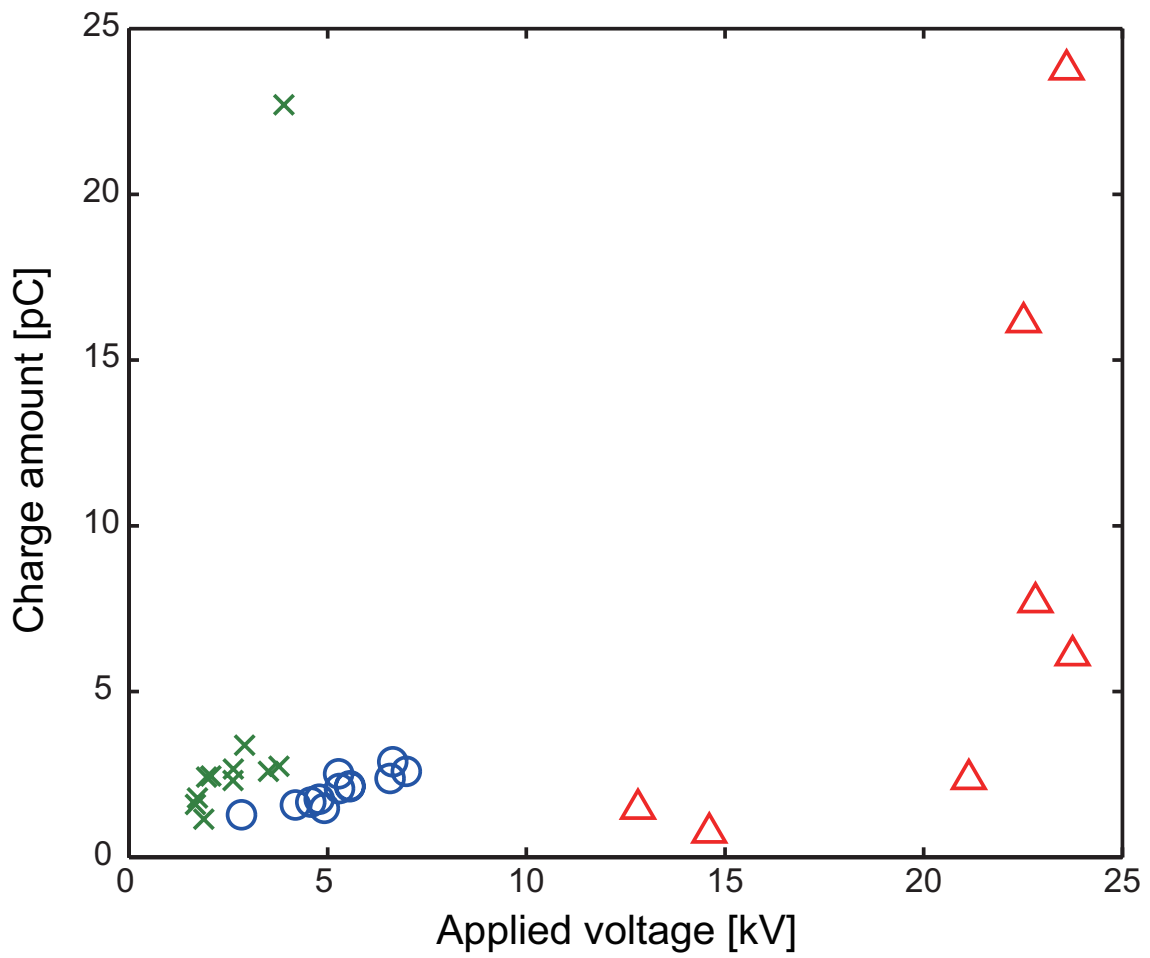


図 4.41 各環境下における  $Q - V$  図

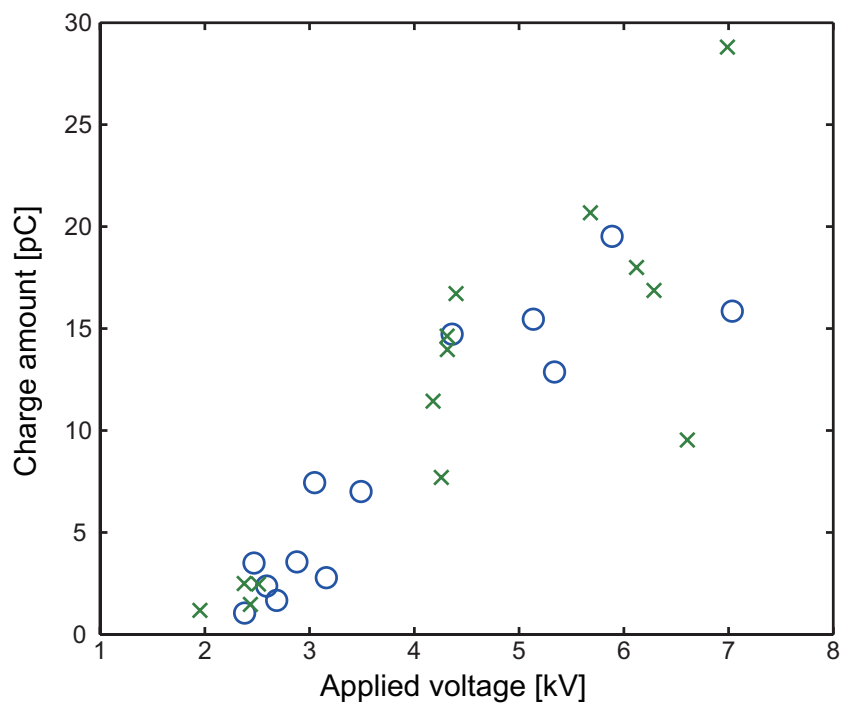


図 4.42  $Q - V$  図、(ケーブルモデル II サンプル 2 大気圧空気&気体窒素環境下、直流)

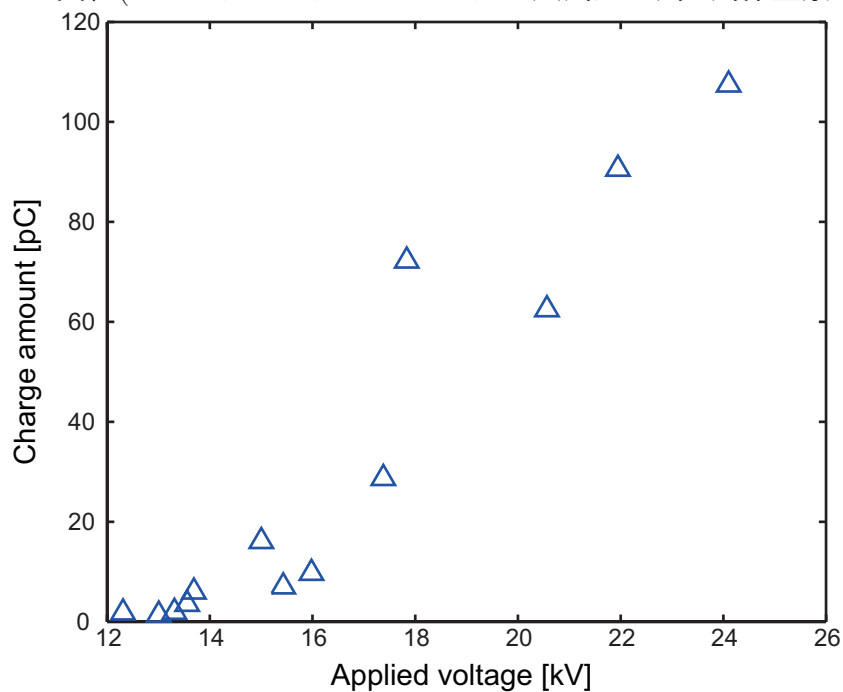


図 4.43  $Q - V$  図、(ケーブルモデル II サンプル 2 液体窒素環境下、直流)

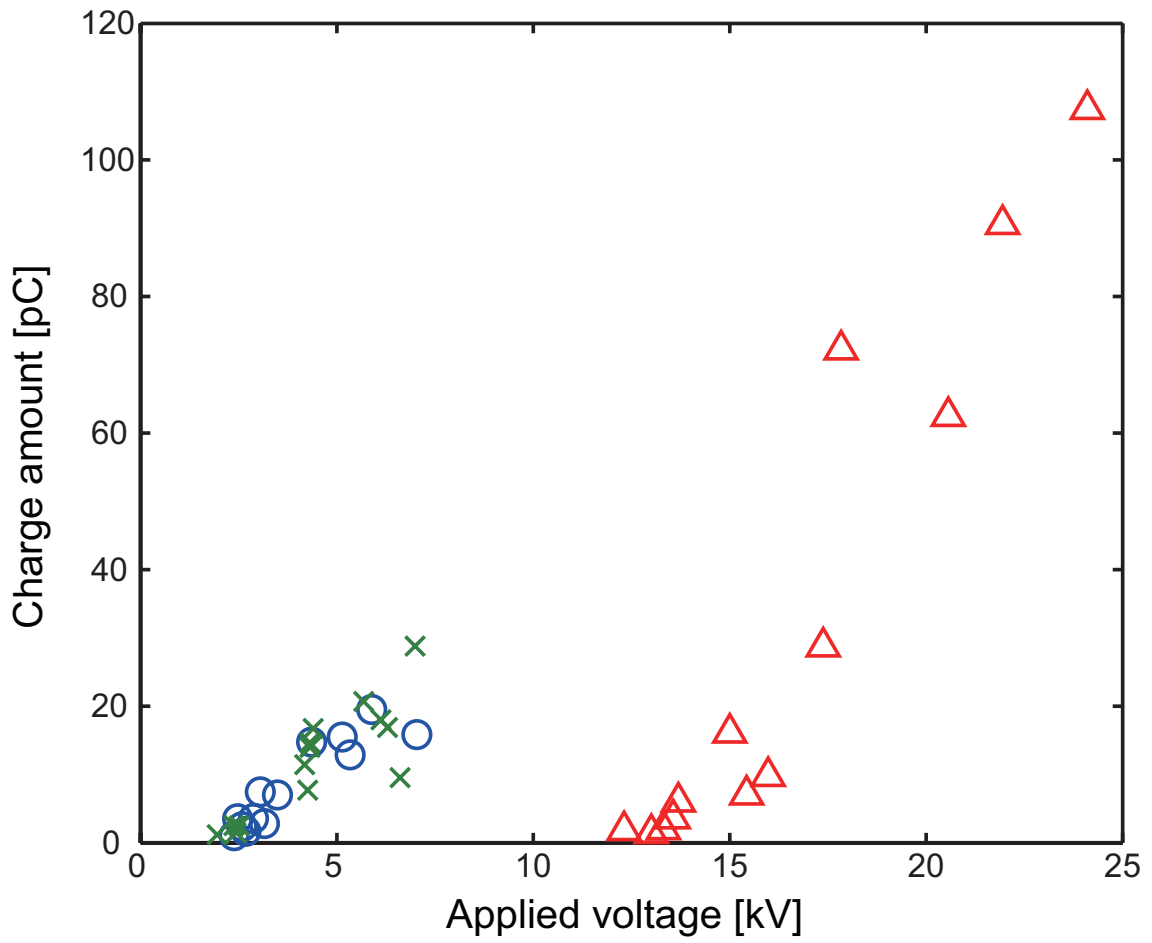


図 4.44 各環境下における  $Q - V$  図 (ケーブルモデル II サンプル 2, 直流)

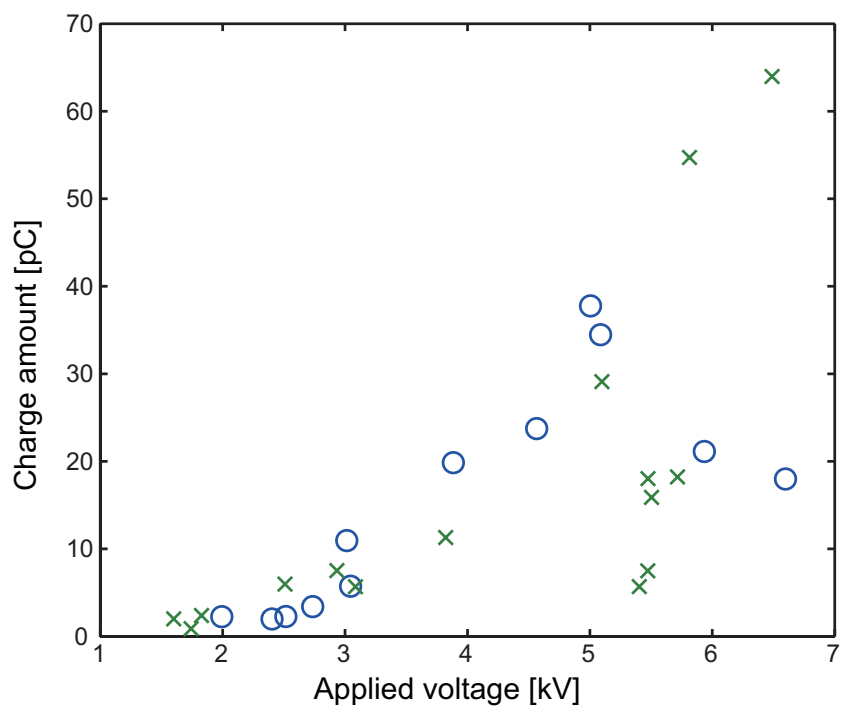


図 4.45  $Q - V$  図、(ケーブルモデル II サンプル 3 大気圧空気&気体窒素環境下、直流)

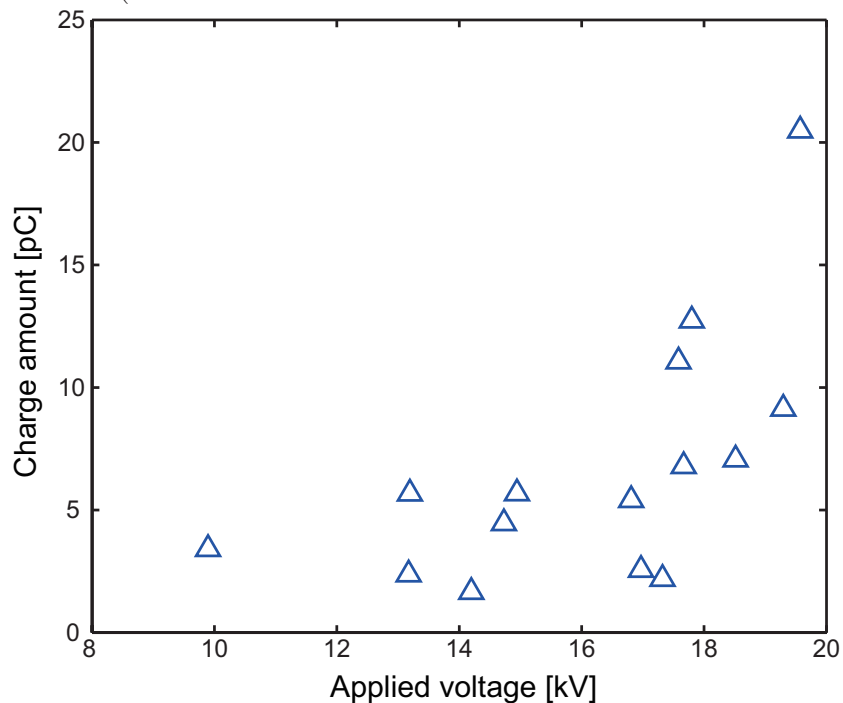


図 4.46  $Q - V$  図、(ケーブルモデル II サンプル 3 液体窒素環境下、直流)

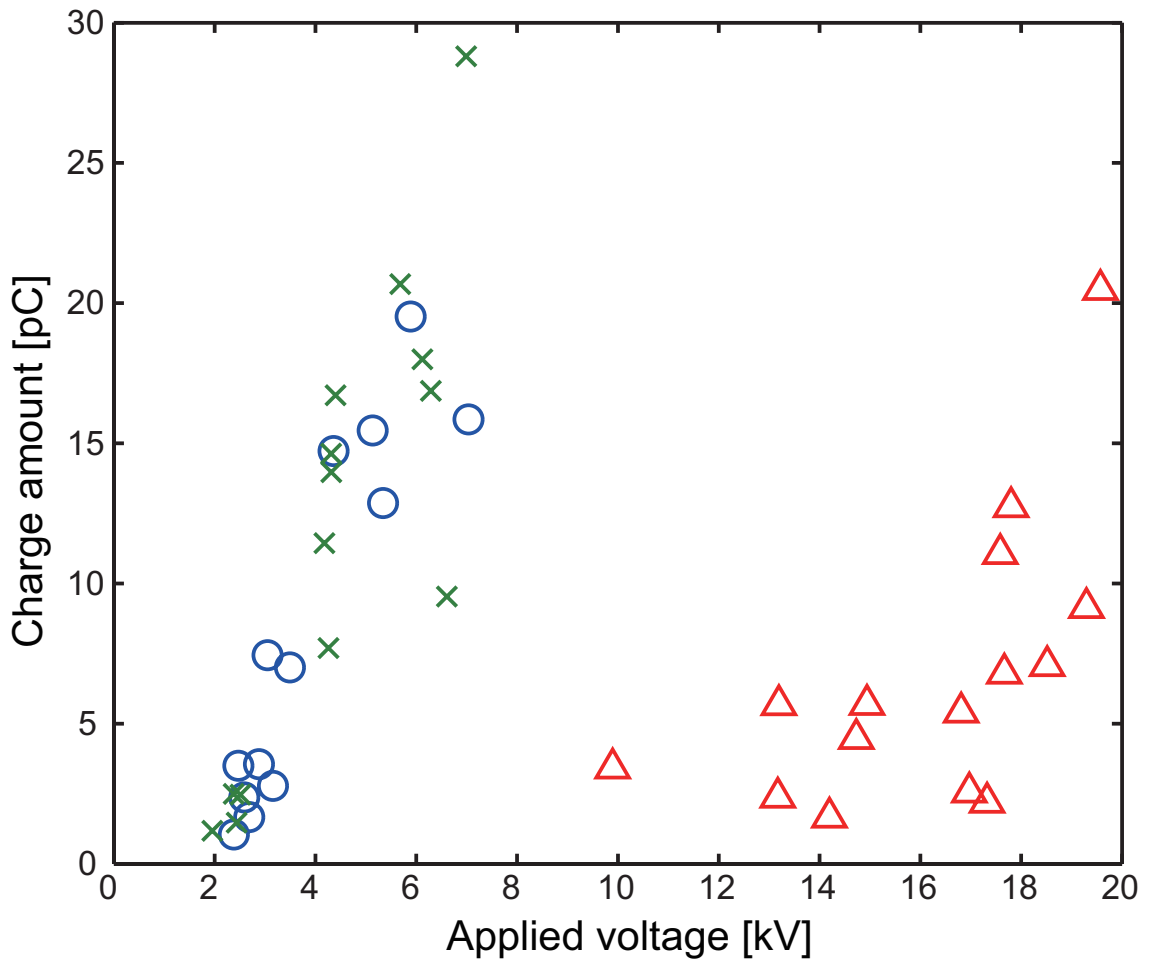


図 4.47 各環境下における  $Q - V$  図 (ケーブルモデル II サンプル 3, 直流)



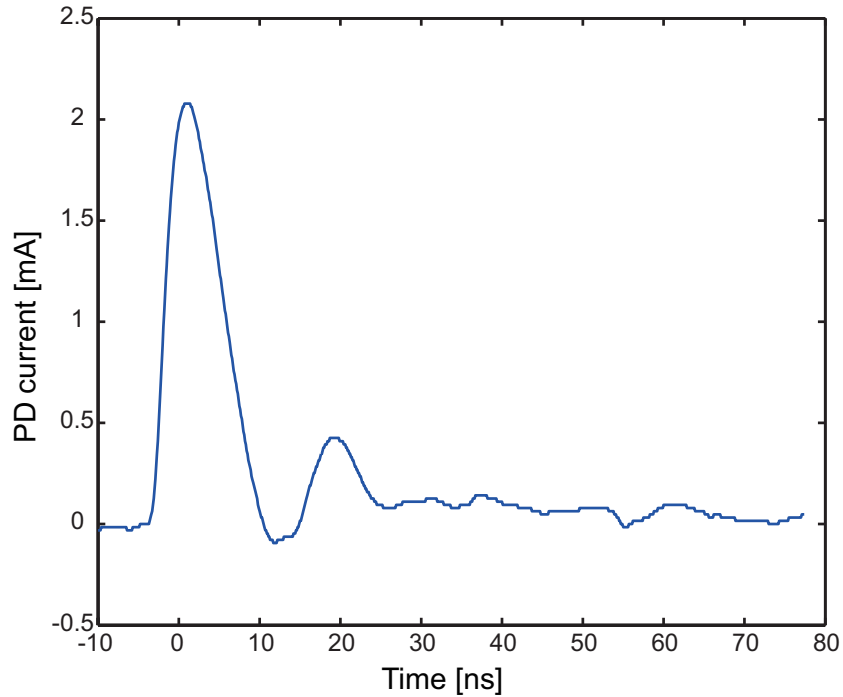


図 4.48 部分放電電流波形 (ケーブルモデル II、空気中、交流)

### 4.2.3 交流電界下

ケーブルモデル II の交流印加では、直流印加時と同様に大気圧空気環境下、気体窒素環境下、液体窒素環境下においてデータを取得した。オシロスコープで観測される電流波形のピーク値が 3mV から 500mV にわたる間で 15 ~ 20 回程度測定を行い、電流波形と  $Q - V$  図を取得した。

#### 大気圧空気環境下

ケーブルモデル II を大気圧空気で満たされたチャンバにつめ交流を印加し部分放電電流波形を取得した。

その時に得られた代表的な部分放電電流を図 4.48 に示す。

部分放電電流は 10ns 程度の信号として観測された。直流と比較すると波形自体は酷似している。

#### 気体窒素環境下

ケーブルモデル II を気体窒素で満たされたチャンバにつめ交流を印加し部分放電電流波形を取得した。

その時に得られた代表的な部分放電電流波形を図 4.49 に示す。

部分放電電流は 10ns 程度の信号として観測された。直流と比較すると波形自体は酷似しており、また大気圧空気環境下で得られた波形とも似ている。

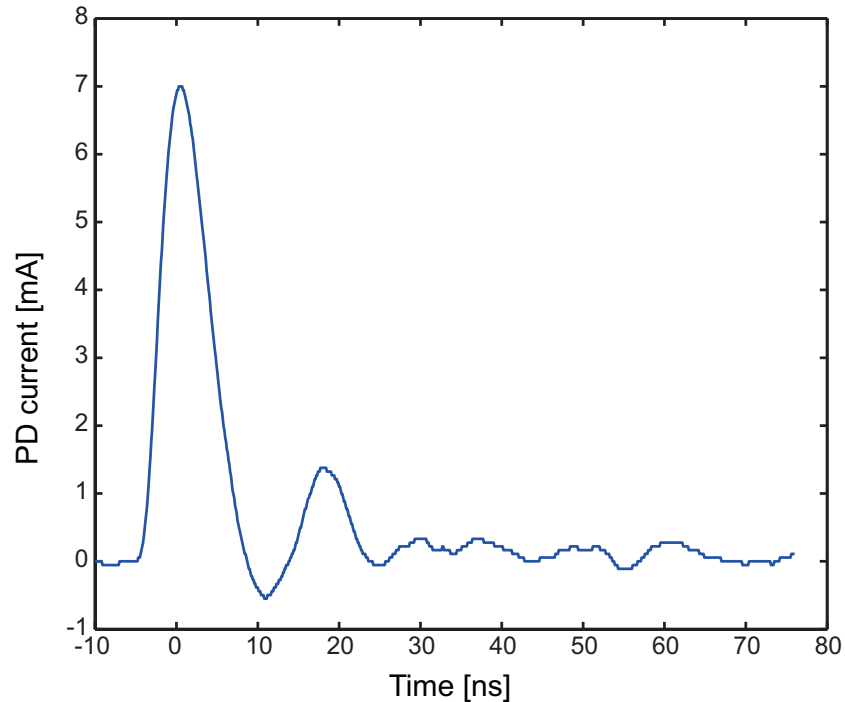


図 4.49 部分放電電流波形 (ケーブルモデル II、気体窒素、交流)

#### 液体窒素環境下

ケーブルモデル II を液体窒素で満たされたチャンバに設置し交流電圧を印加し部分放電電流波形を取得した。

その時に得られた代表的な部分放電電流波形を図 4.50 に示す。

部分放電電流は 10ns 程度の信号として観測された。直流印加時と比較すると波形は酷似しておりまたその他環境下で得られた波形とも似ている。部分放電電流波形は各環境下においてほとんど変わらない。

#### 4.2.4 交流電界下の $Q - V$ 図とまとめ

部分放電電荷量と部分放電印加電圧の関係を比較する。大気圧空気環境下、気体窒素環境下で観測された部分放電波形の電荷量とその時の印加電圧の関係を図 4.51 に示す。なお縦軸をログスケールにしたものをあわせて図 4.52 に示す。

交流印加時においては、直流印加時よりもばらつきが少ない。また図 4.51 を見ると、部分放電印加電圧と電荷量の間に関係が見られる。また部分放電印加電圧は気体窒素環境下の方が大気圧空気環境下よりも低いという結果がでた。電子増倍が抑制されない気体窒素中の方が印加電圧は低くなるという理論通りの結果がでた。

液体窒素環境下における  $Q - V$  図を図 4.53 に示す。また縦軸をログスケールにしたものを図 4.54 に示す。大気圧空気中、気体窒素環境下と同様に部分放電印加電圧と電荷量の相関性が強く

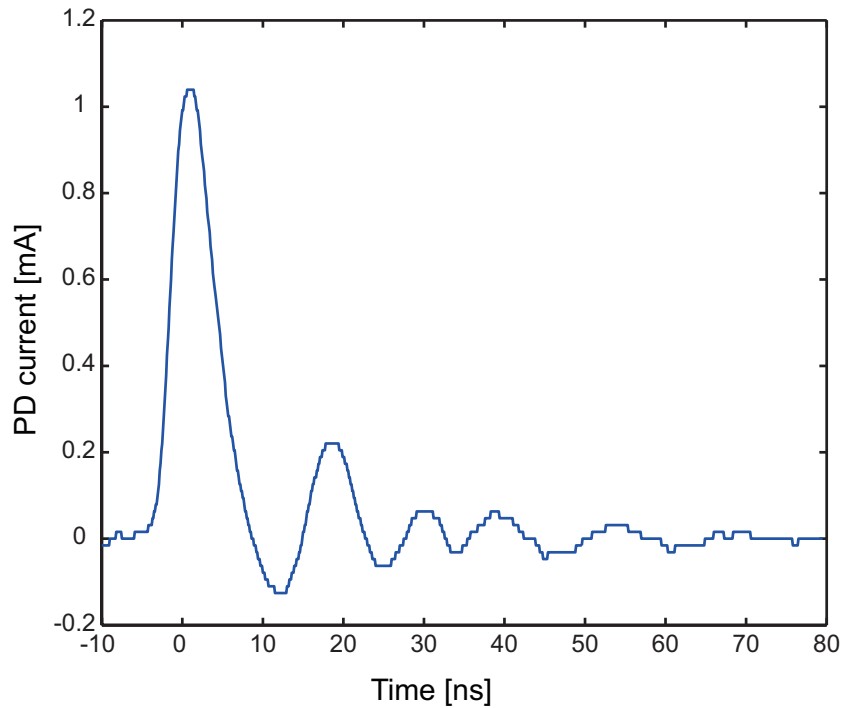


図 4.50 部分放電電流波形 (ケーブルモデル II、液体窒素中、交流)

出た結果となった。

全ての環境下において部分放電電荷量は、部分放電印加電圧が上昇するにつれて、大幅に上昇する傾向が見られる。

ログスケールのグラフを見ると  $Q - V$  のプロットは直線に近い形となっており、部分放電印加電圧が上昇すると指数関数的に電荷量が上昇する結果となった。

更に、全環境下における  $Q - V$  図を一つのグラフにまとめたものを図 4.55 に示す。

部分放電印加電圧は液体窒素環境下が大きく、ついで大気圧空気環境下、気体窒素環境下となっている。また全ての環境下において部分放電印加電圧の上昇とともに、指数関数的に電荷量の上昇するという傾向がみられた。

なおケーブルモデル II も 3 本で同様の実験を行った。サンプル 2 の大気圧空気環境下、気体窒素環境下の  $Q - V$  特性を図 4.56 に液体窒素環境下の  $Q - V$  特性を図 4.57 に全環境下における  $Q - V$  特性を図 4.58 に示す。またサンプル 3 の大気圧空気環境下、気体窒素環境下の  $Q - V$  特性を図 4.59 に液体窒素環境下の  $Q - V$  特性を図 4.60 に、全環境下における  $Q - V$  特性を図 4.61 に示す。

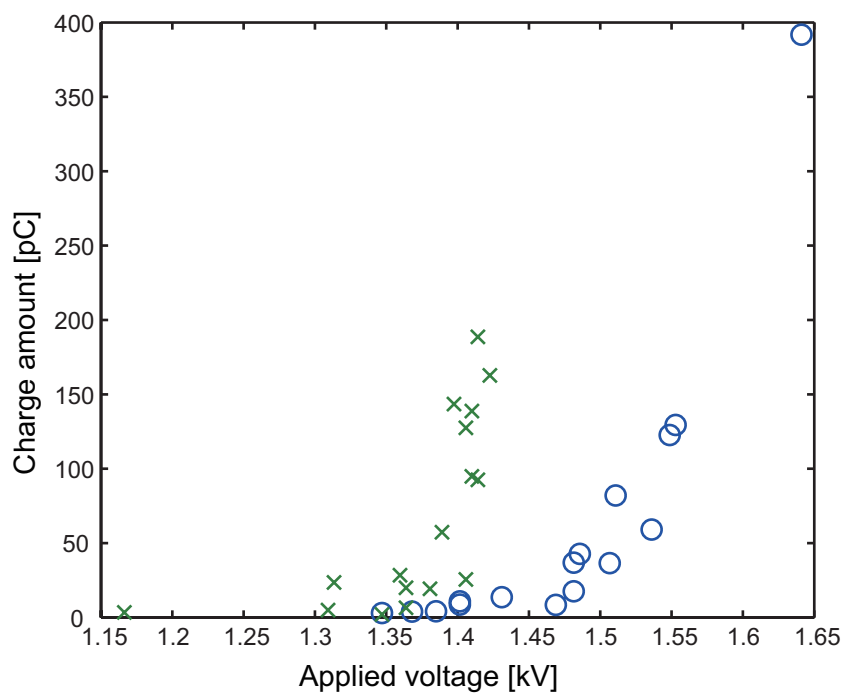


図 4.51  $Q - V$  図、(ケーブルモデル II 大気圧空気&気体窒素環境下、交流)

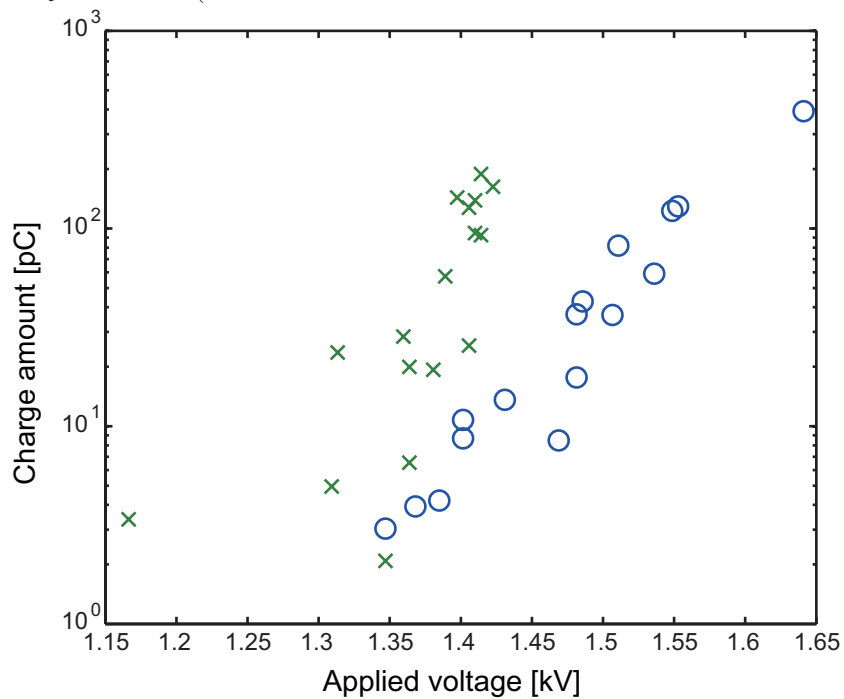


図 4.52  $Q - V$  図、(ケーブルモデル II 大気圧空気&気体窒素環境下、交流)

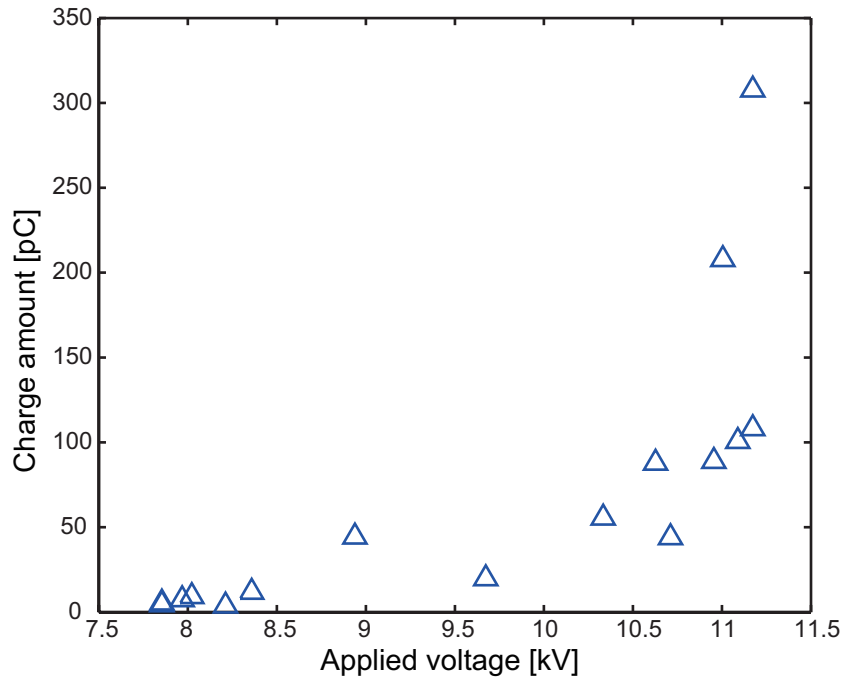


図 4.53  $Q - V$  図、(ケーブルモデル II サンプル 1、液体窒素環境下、交流)

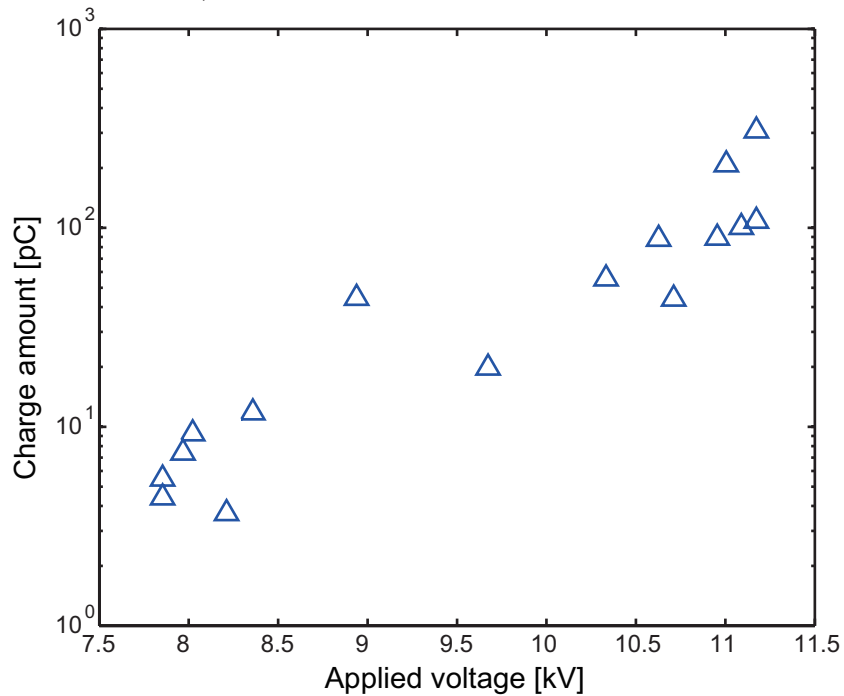


図 4.54  $Q - V$  図、(ケーブルモデル II サンプル 1、液体窒素環境下、交流)

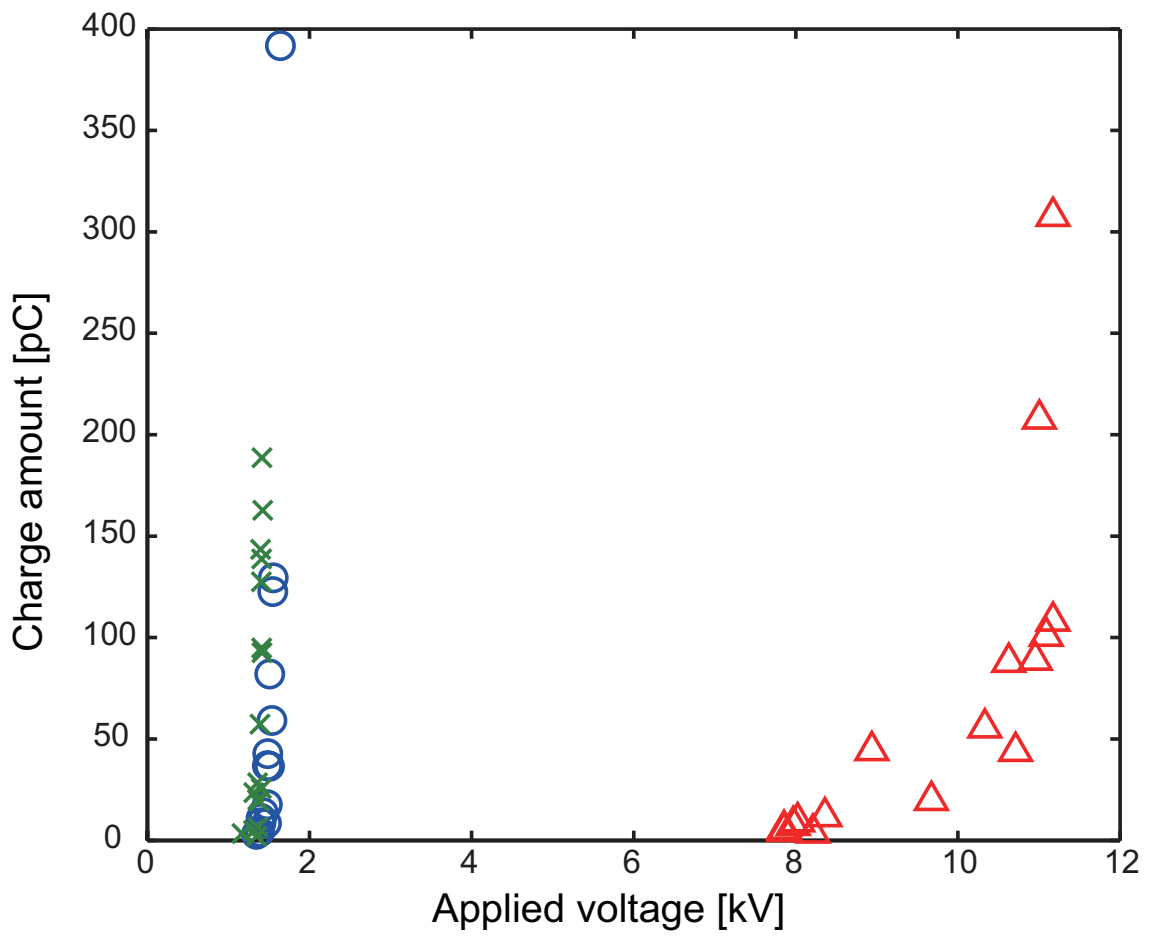


図 4.55 各環境下における  $Q - V$  図 (ケーブルモデル II サンプル 1, 交流)

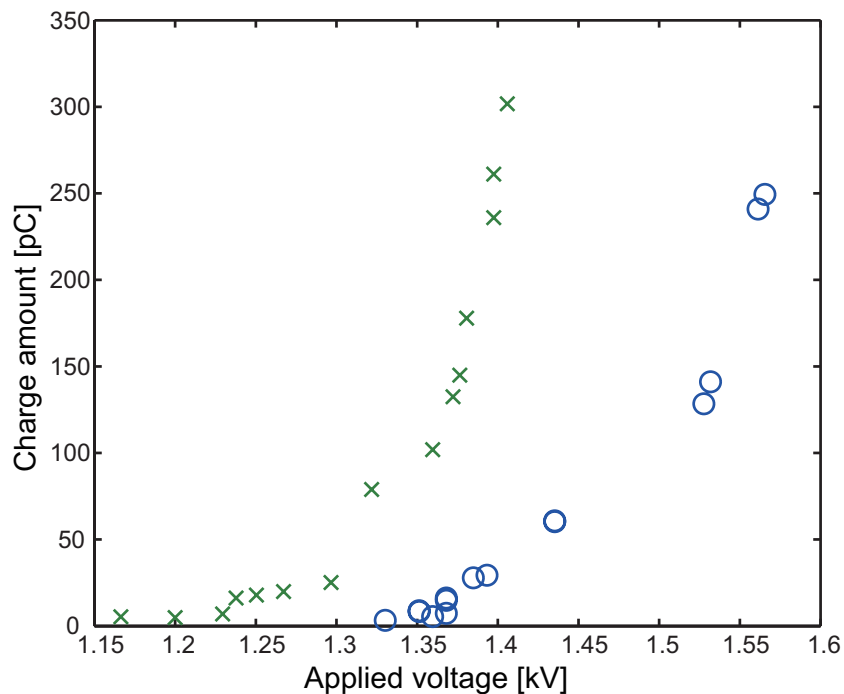


図 4.56  $Q - V$  図、(ケーブルモデル II サンプル 2 大気圧空気&気体窒素環境下, 交流)

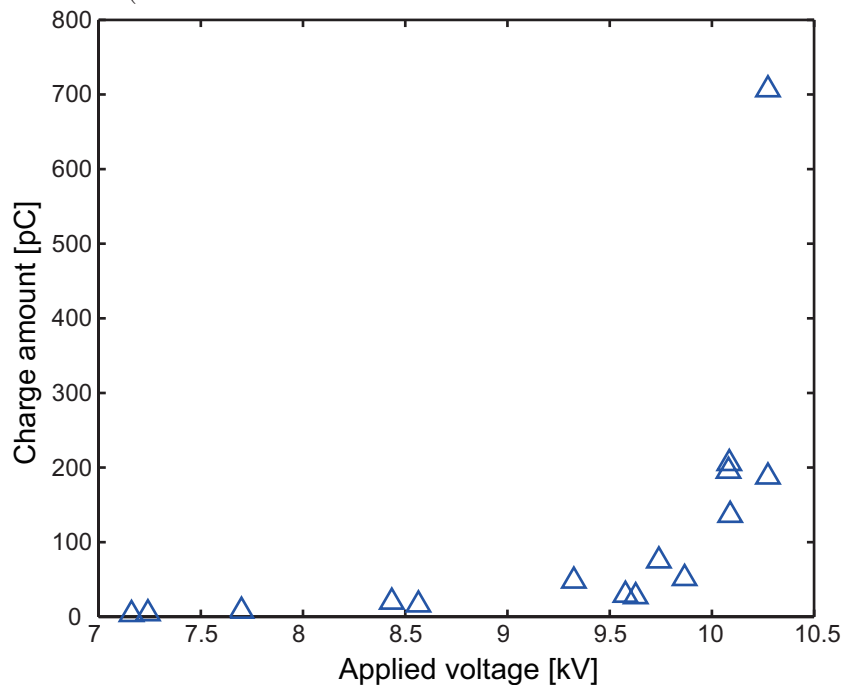


図 4.57  $Q - V$  図、(ケーブルモデル II サンプル 2 液体窒素環境下, 交流)

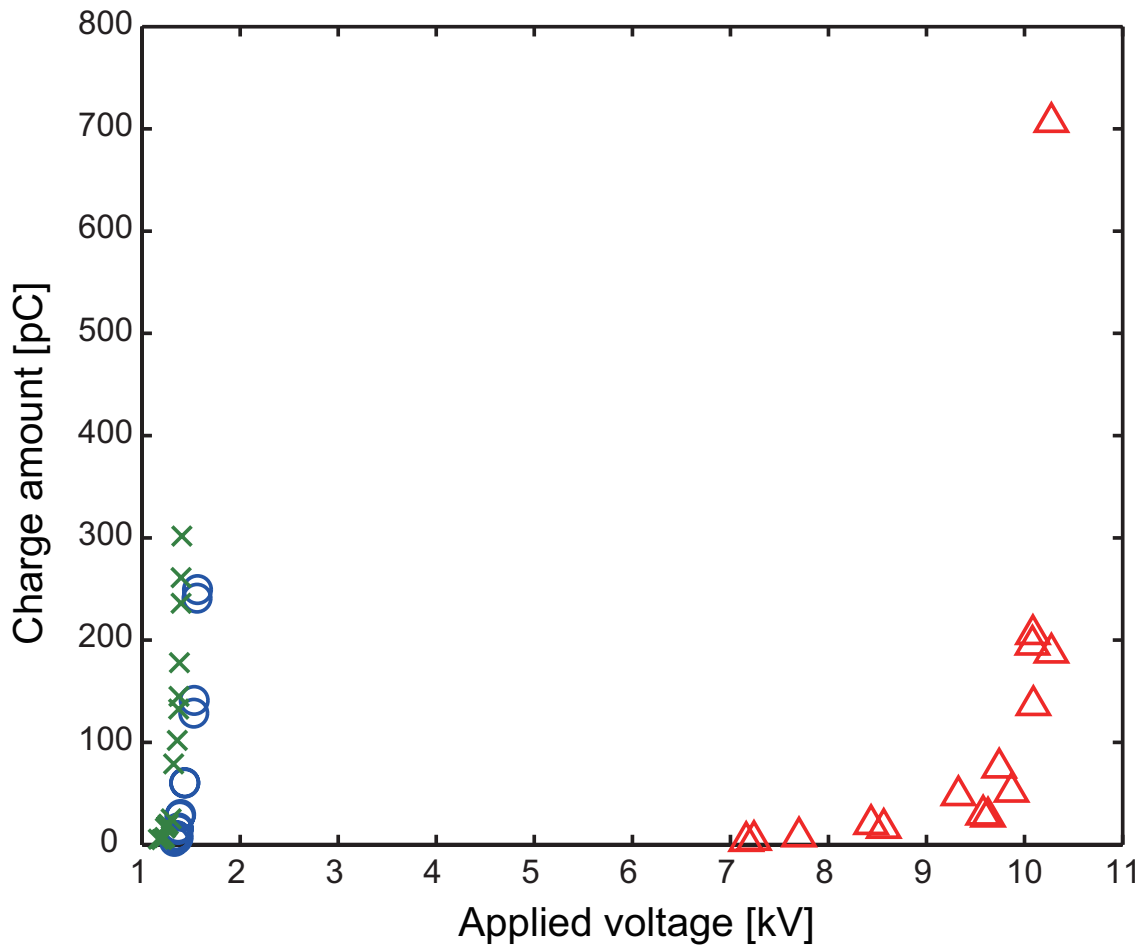


図 4.58 各環境下における  $Q - V$  図 (ケーブルモデル II サンプル 2, 交流)



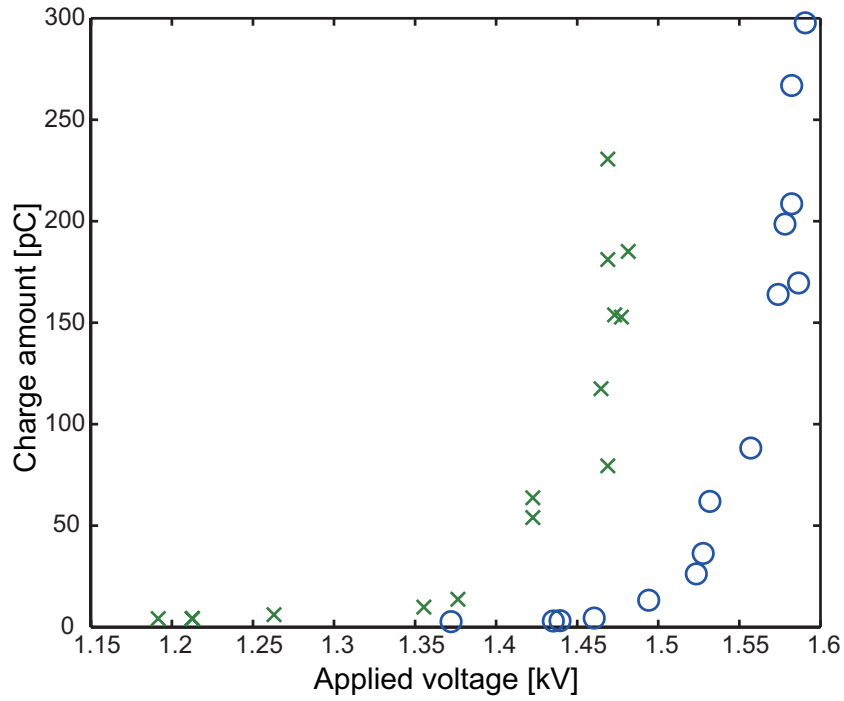


図 4.59  $Q - V$  図、(ケーブルモデル II サンプル 3 大気圧空気&気体窒素環境下, 交流)

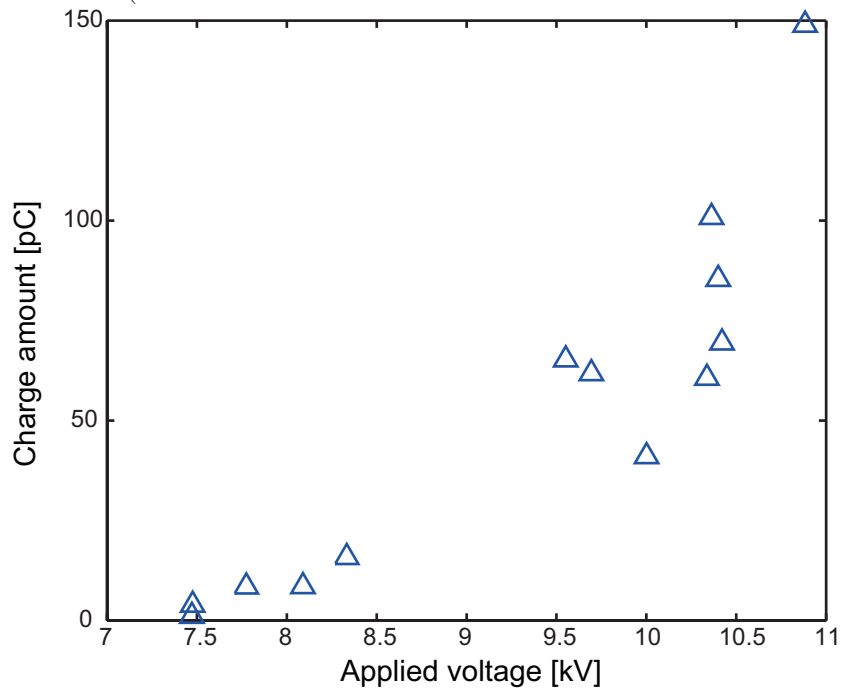


図 4.60  $Q - V$  図、(ケーブルモデル II サンプル 3 液体窒素環境下, 交流)

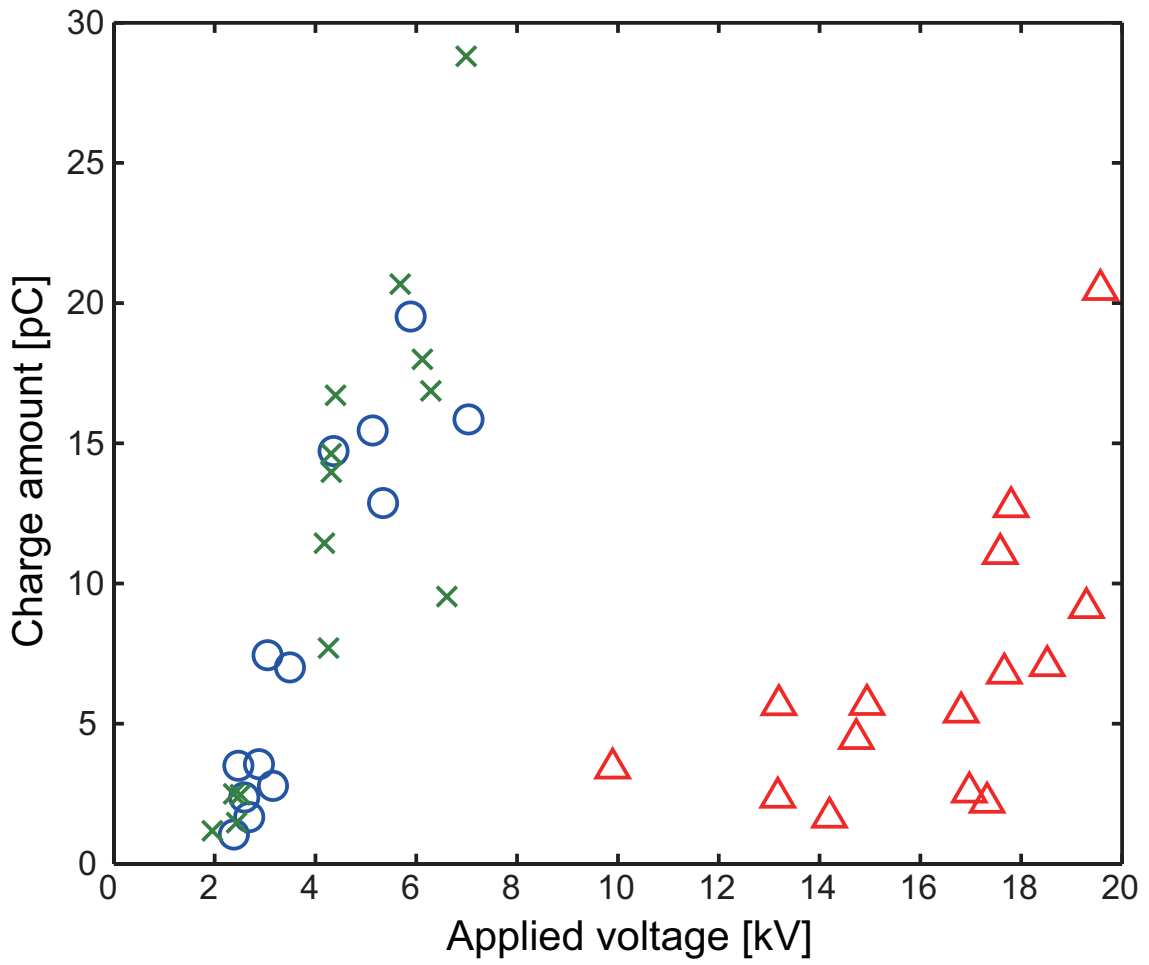


図 4.61 各環境下における  $Q - V$  図 (ケーブルモデル II サンプル 3, 交流)

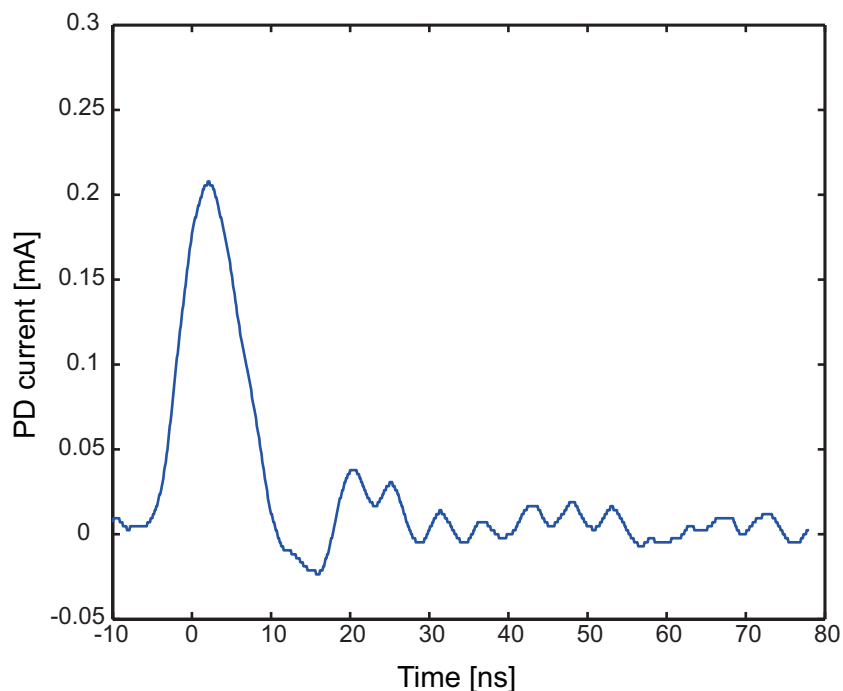


図 4.62 部分放電電流波形 (ケーブルモデル III、大気圧空気、直流)、測定抵抗  $50\Omega$

## 4.3 ケーブルモデル III -中間層のみにバットギャップを有するモデル-

### 4.3.1 直流電界下

直流印加時ではケーブルモデル I、II 同様大気圧空気中、気体窒素環境下、液体窒素環境下で試験を行った。印加電圧は、絶縁破壊抑制を考慮し大気圧空気環境下、気体窒素環境下においては 7kV まで、液体窒素環境下では 25kV まで印加を行い、電荷量と部分放電印加電圧の関係を取得した。

#### 大気圧空気環境下

チャンバに大気圧空気 (室温) をつめ、その環境下におけるケーブルモデル内の部分放電の測定を行った。その時に観測された代表的な波形を図 4.62 に示す。

時間幅で 10ns 程度の信号が観測された。波形もその他部分放電電流波形と酷似している。

#### 気体窒素環境下

チャンバに大気圧空気 (室温) をつめ、その環境下におけるケーブルモデル III 内の部分放電の測定を行った。その時に観測された代表的な波形を図 4.63 に示す。

時間幅で 10ns 程度他環境下での部分放電と酷似している信号が観測された。

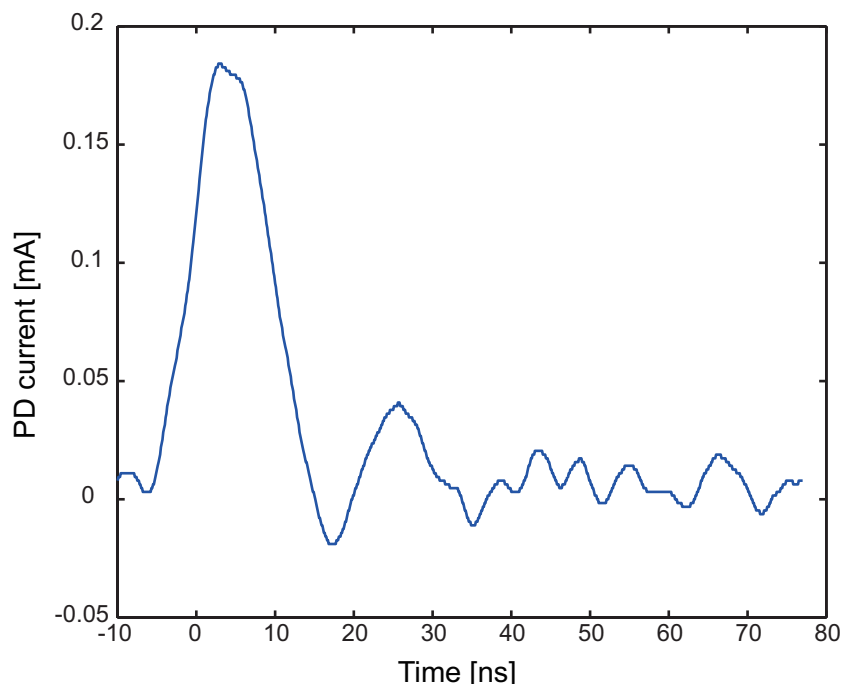


図 4.63 部分放電電流波形 (ケーブルモデル III、気体窒素、直流)、測定抵抗  $50\Omega$

#### 液体窒素環境下

チャンバに大気圧空気 (室温) をつめ、その環境下におけるケーブルモデル III 内の部分放電の測定を行った。その時に観測された代表的な部分放電電流波形を図 4.64 に示す。

時間幅で 10ns 程度の信号が観測された。波形も大気圧空気環境下、気体窒素環境下で得られる信号と酷似している。

#### 4.3.2 直流電界下の $Q - V$ 図まとめ

観測された部分放電電流波形は各環境下で非常に酷似している。電荷量と部分放電印加電圧の関係を比較する。

大気圧空気環境下、気体窒素環境下で観測された部分放電波形の電荷量とその時の印加電圧の関係を図 4.65 に示す。なお縦軸をログスケールにしたものをあわせて図 4.66 に示す。

電荷量のばらつきが大きい結果がでた。また再現性も低い。図 4.65 を見ても、部分放電印加電圧と電荷量の間には小さな相関が見られるに過ぎない結果となった。

液体窒素環境下における  $Q - V$  図を図 4.67 に示す。また縦軸をログスケールにしたものを図 4.68 に示す。大気圧空気中、気体窒素環境下に比較して部分放電印加電圧と電荷量の相関性が強く出た結果となった。

更に、全環境下における  $Q - V$  図を一つのグラフにまとめたものを図 4.70 に示す。

部分放電印加電圧は大きい順に、液体窒素環境下、大気圧空気環境下、気体窒素環境下となっ

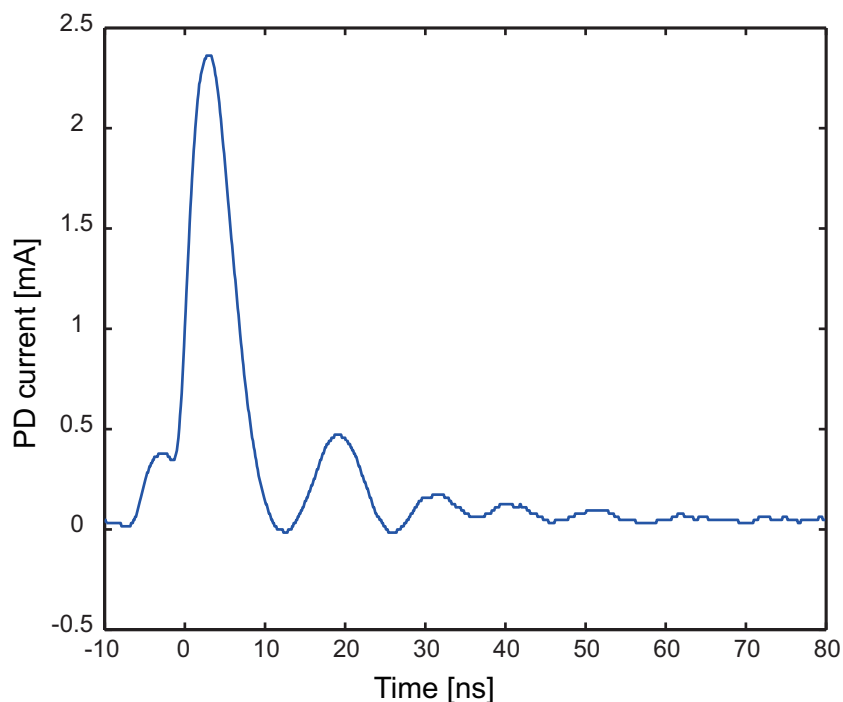


図 4.64 部分放電電流波形 (ケーブルモデル III、液体窒素中、直流)、測定抵抗  $50\Omega$

た。大気圧空気環境下、気体窒素環境下では  $7\text{kV}$  印加時まで観測される部分放電電荷量に大きな上昇は見られなかった。一方液体窒素環境下では、部分放電印加電圧の上昇と共に、電荷量の増大といった傾向が見られた。

なおケーブルモデル III も 3 本で同様の実験を行った。サンプル 2 の大気圧空気環境下、気体窒素環境下の  $Q - V$  特性を図 4.71 に液体窒素環境下の  $Q - V$  特性を図 4.72 に全環境下における  $Q - V$  特性を図 4.73 に示す。またサンプル 3 の大気圧空気環境下、気体窒素環境下の  $Q - V$  特性を図 4.74 に液体窒素環境下の  $Q - V$  特性を図 4.75 に、全環境下における  $Q - V$  特性を図 4.76 に示す。

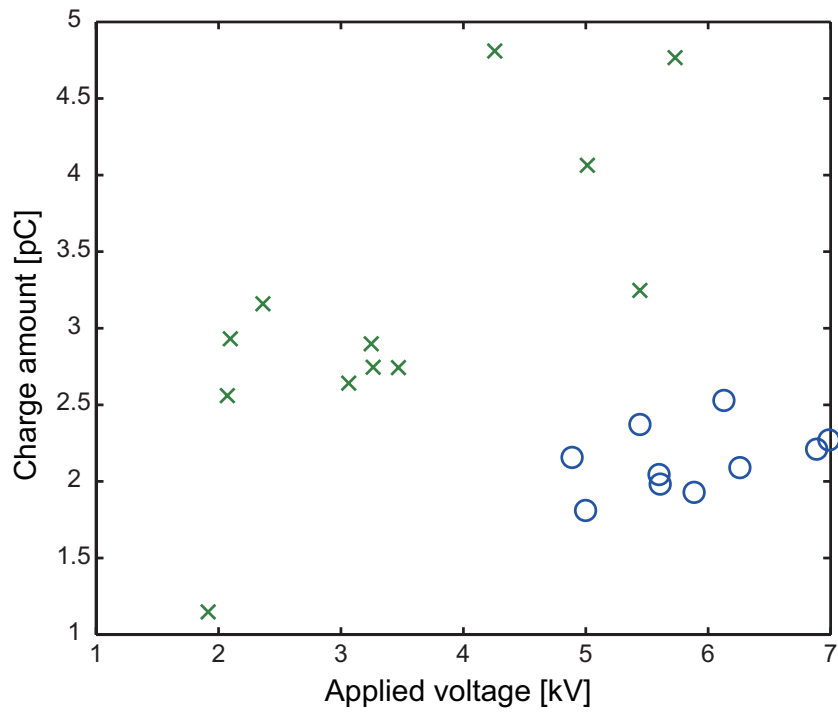


図 4.65  $Q - V$  図、(ケーブルモデル III 大気圧空気&気体窒素環境下、直流)

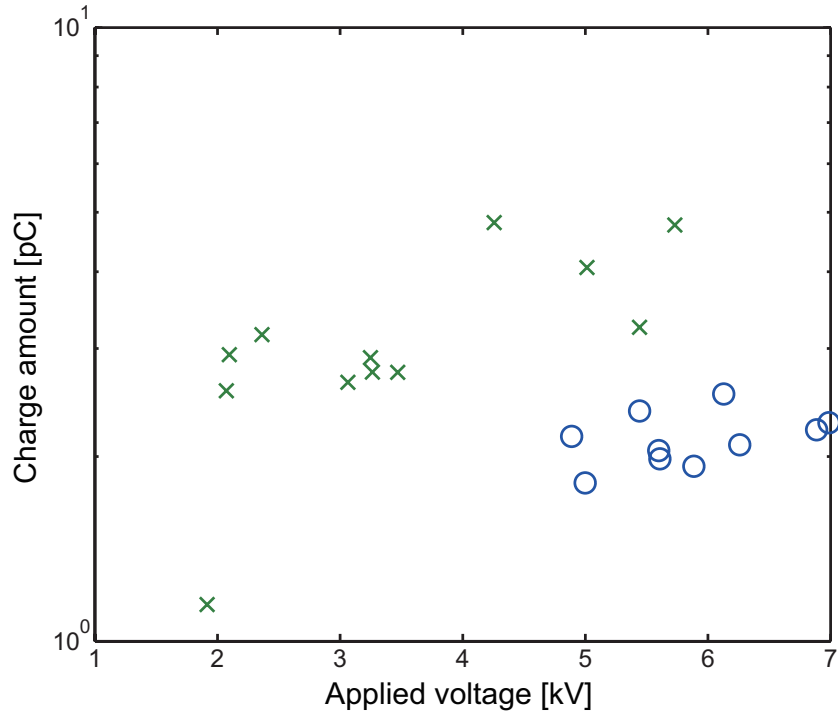


図 4.66  $Q - V$  図、(ケーブルモデル III 大気圧空気&気体窒素環境下、直流)

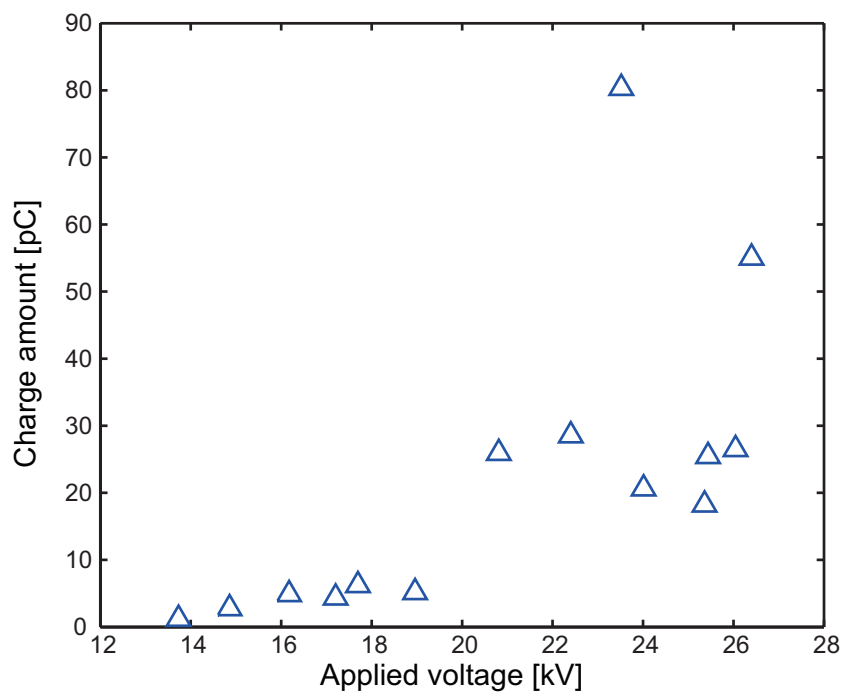


図 4.67  $Q - V$  図、(ケーブルモデル III、液体窒素環境下、直流)

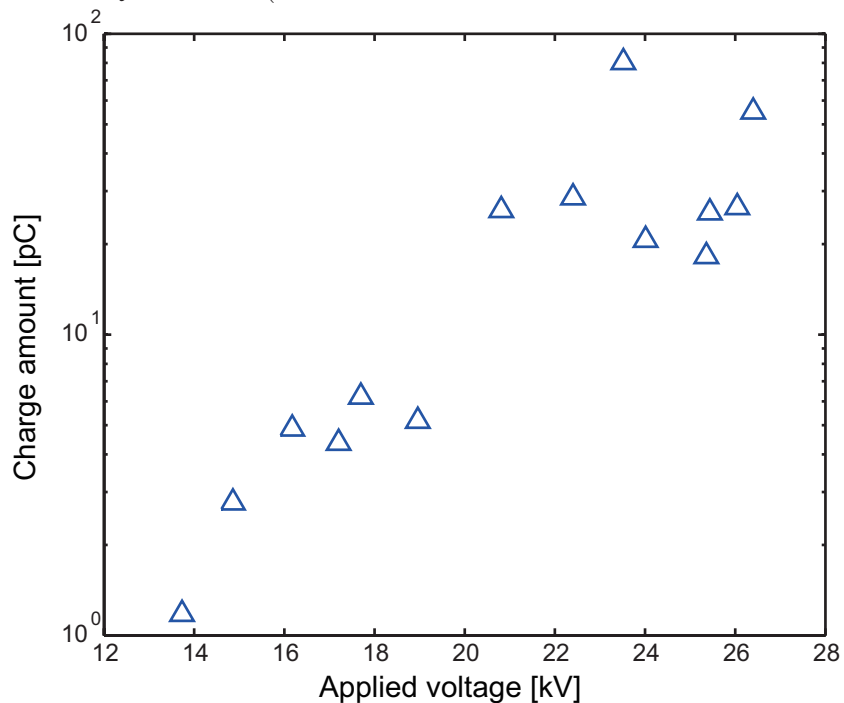


図 4.68  $Q - V$  図、(ケーブルモデル II、液体窒素環境下、直流)

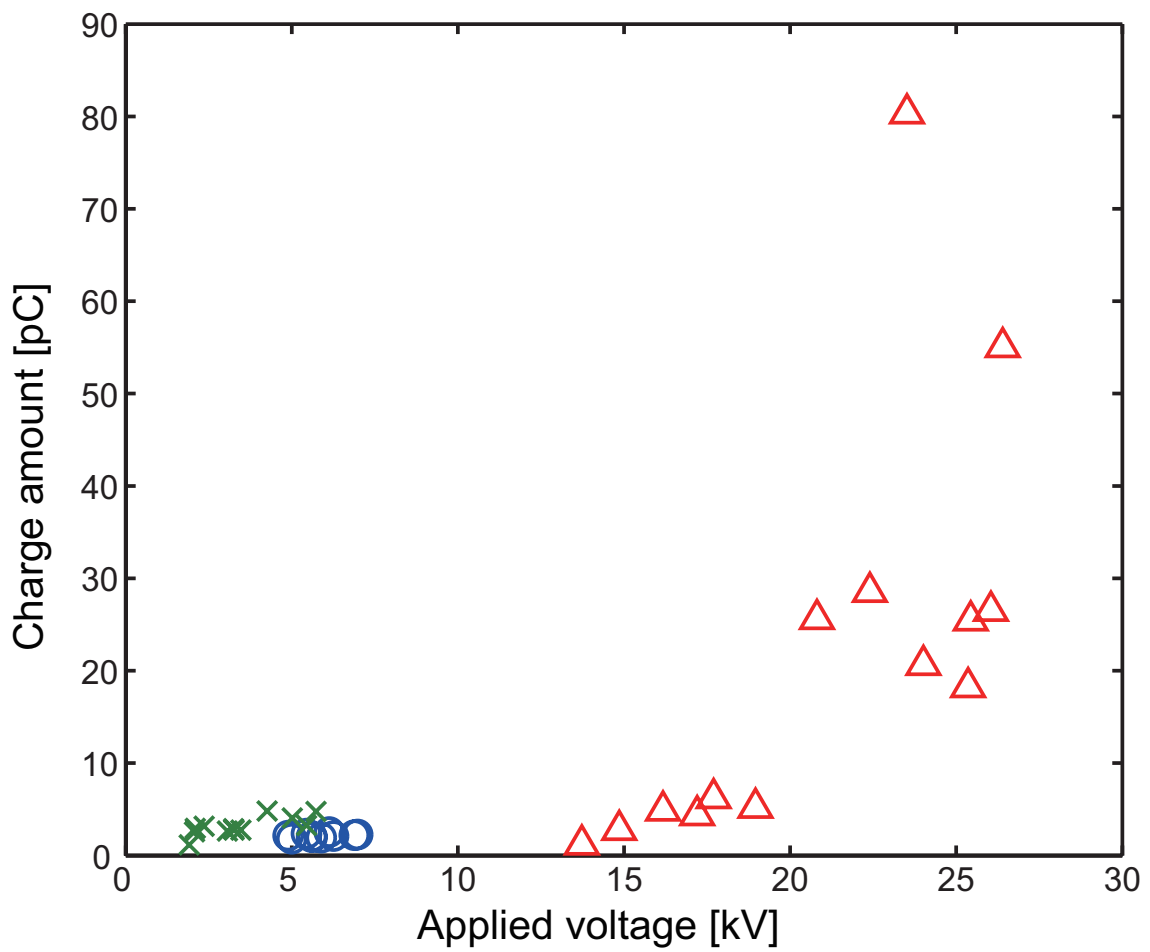


図 4.69 各環境下における  $Q - V$  図 (ケーブルモデル 3 サンプル 1, 直流)



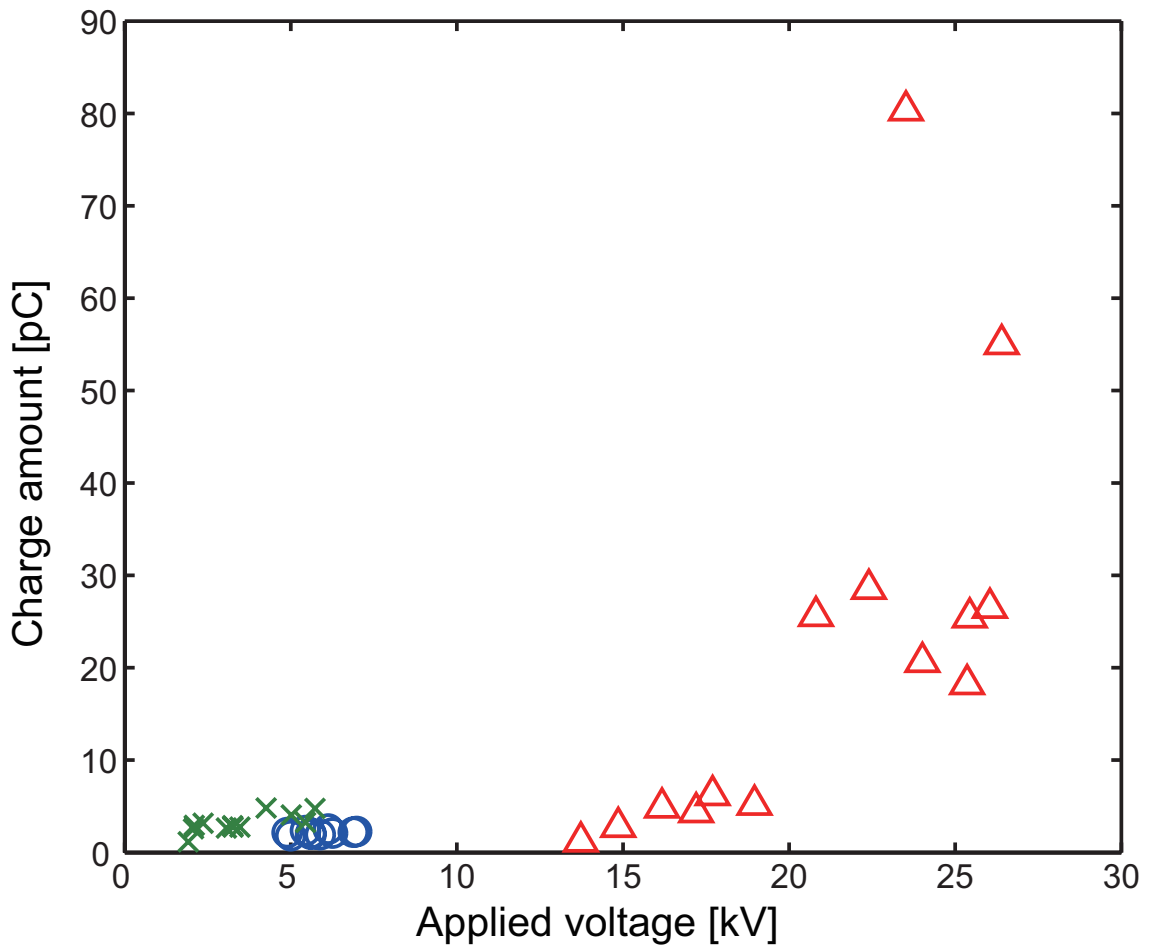


図 4.70 各環境下における  $Q - V$  図 (ケーブルモデル III サンプル 1, 直流)

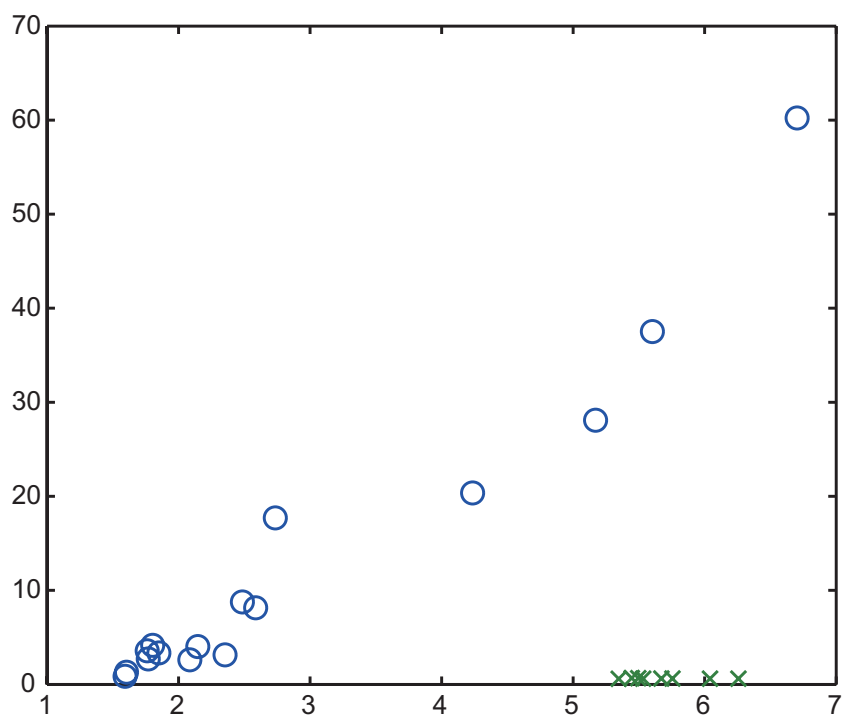


図 4.71  $Q - V$  図、(ケーブルモデル III サンプル 2 大気圧空気&気体窒素環境下、直流)

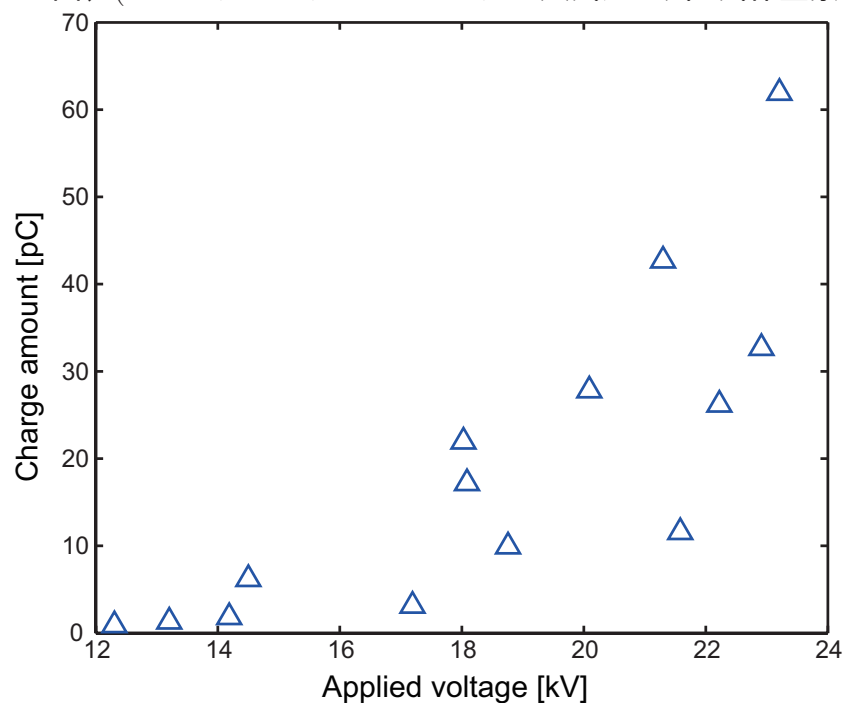


図 4.72  $Q - V$  図、(ケーブルモデル III サンプル 2 液体窒素環境下、直流)

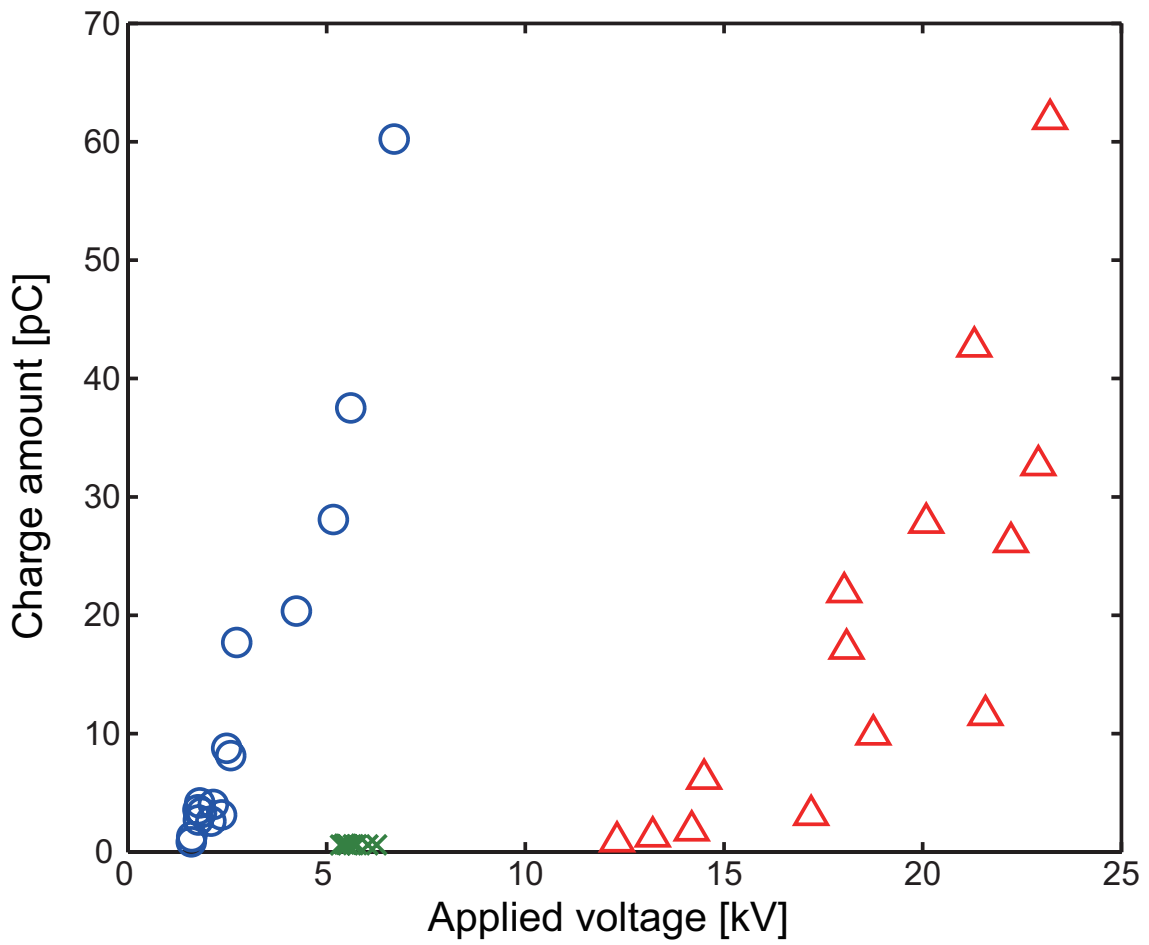


図 4.73 各環境下における  $Q - V$  図 (ケーブルモデル III サンプル 2, 直流)

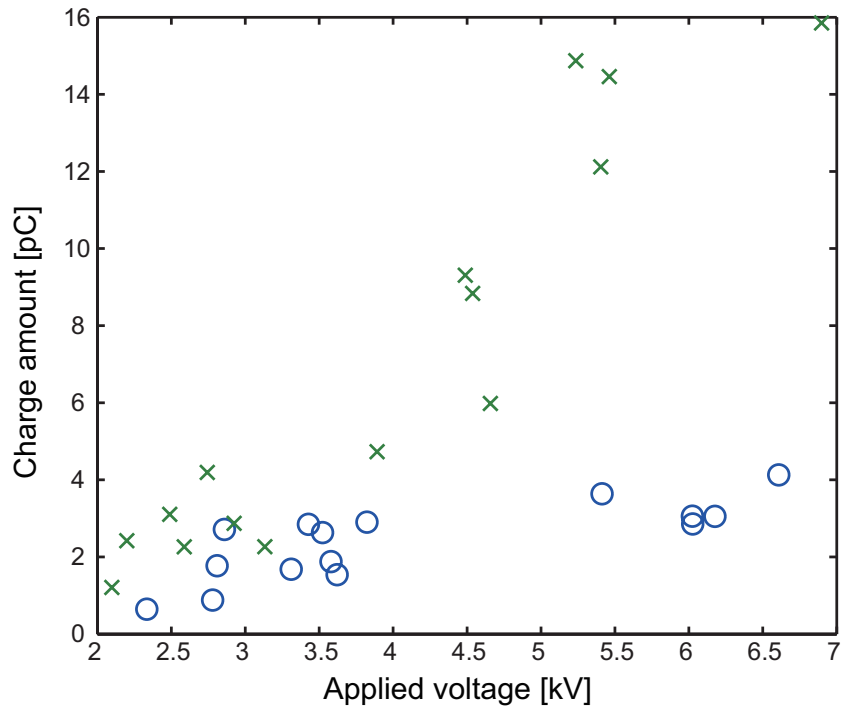


図 4.74  $Q - V$  図、(ケーブルモデル III サンプル 3 大気圧空気&気体窒素環境下、直流)

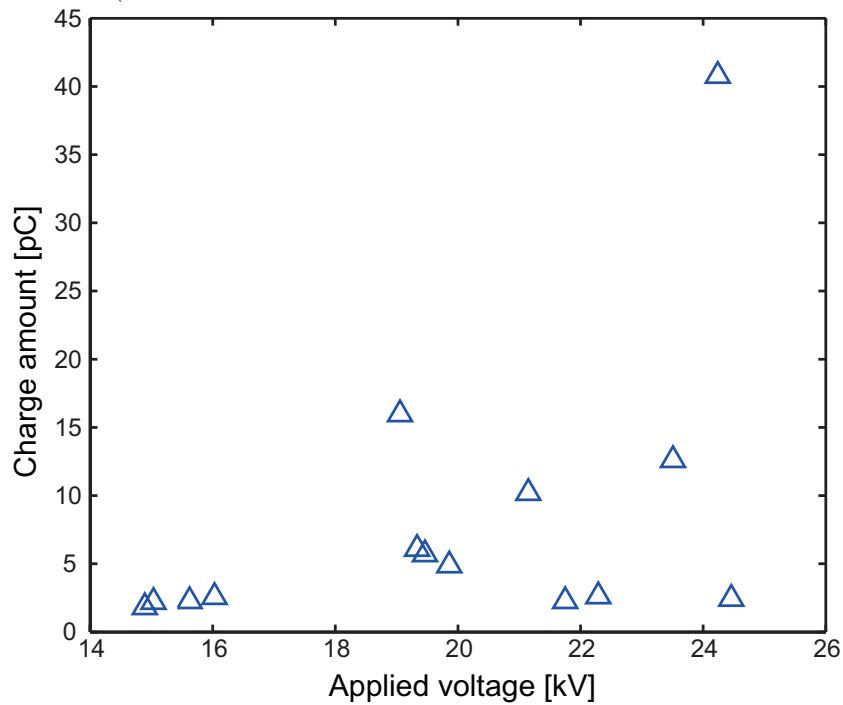


図 4.75  $Q - V$  図、(ケーブルモデル III サンプル 3 液体窒素環境下、直流)

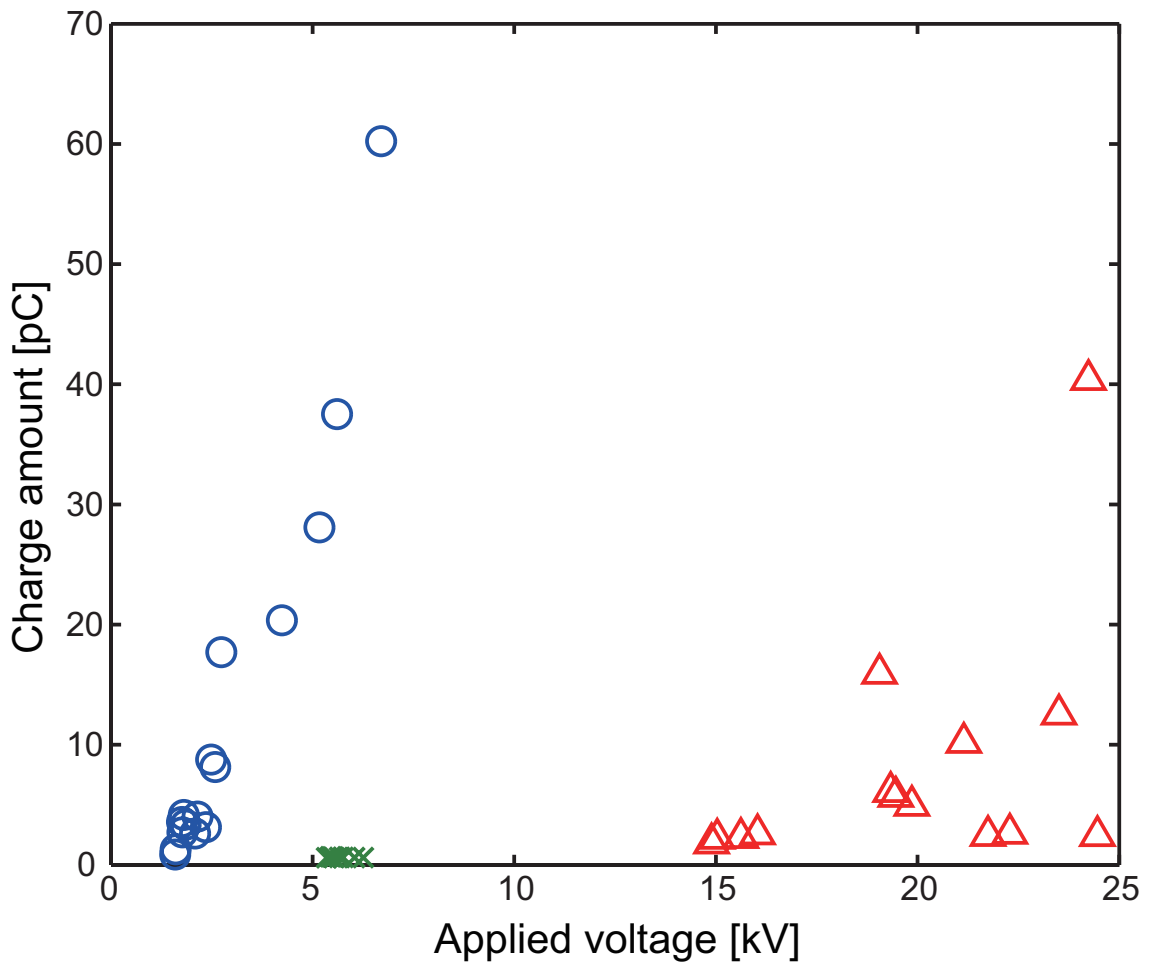


図 4.76 各環境下における  $Q - V$  図 (ケーブルモデル III サンプル 3, 直流)

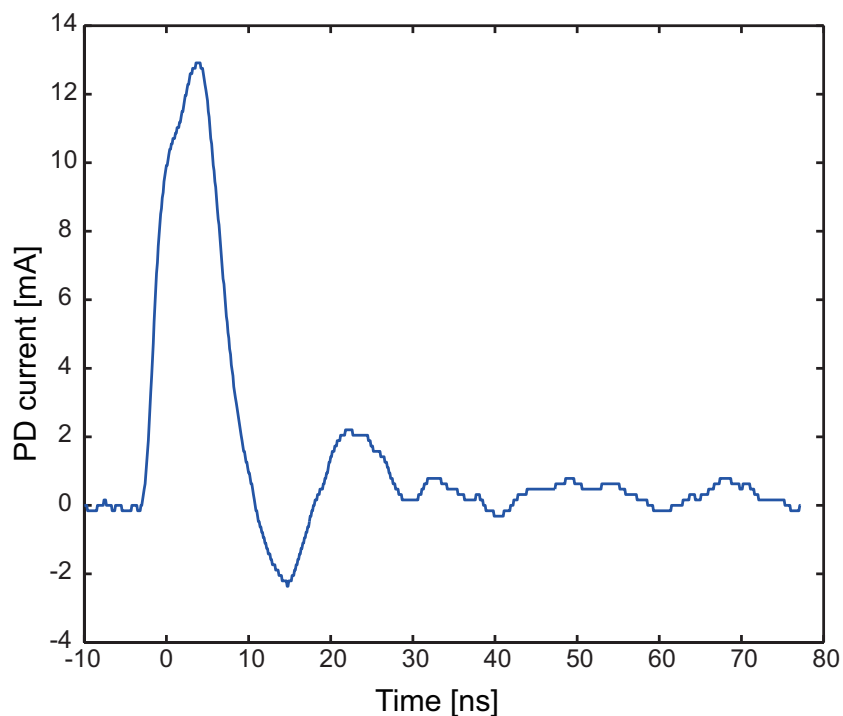


図 4.77 部分放電電流波形 (ケーブルモデル III、空気中、交流)

### 4.3.3 交流電界下

ケーブルモデル III の交流印加時では、直流印加時と同様に大気圧空気環境下、気体窒素環境下、液体窒素環境下においてデータを取得した。オシロスコープで観測される電流波形のピーク値が 3mV から 500mV にわたる間で 15 ~ 20 回程度測定を行い、電流波形と  $Q-V$  図を取得した。

#### 大気圧空気環境下

ケーブルモデル III を大気圧空気で満たされたチャンバにつめ交流を印加し部分放電電流波形を取得した。

その時に得られた代表的な部分放電電流波形を図 4.77 に示す。

部分放電電流は 10ns 程度の信号として観測された。ケーブルモデル I、ケーブルモデル II で観測される部分放電電流波形と酷似している。

#### 気体窒素環境下

ケーブルモデル III を気体窒素で満たされたチャンバにつめ交流を印加し部分放電電流波形を取得した。

その時に得られた代表的な部分放電電流波形を図 4.78 に示す。

部分放電電流は 10ns 程度の信号として観測された。その他ケーブルモデル・環境下で観測された波形と酷似している。

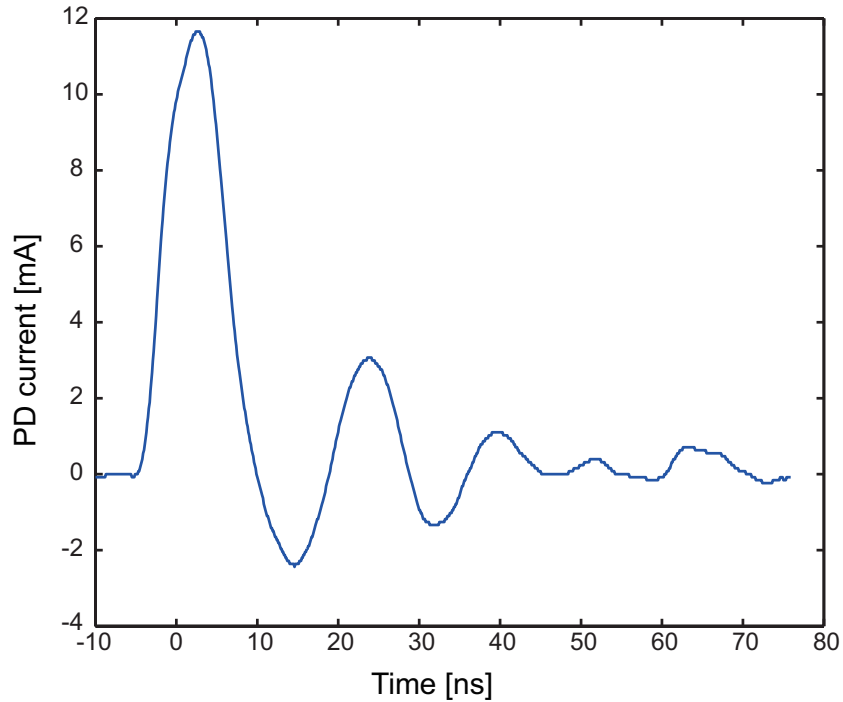


図 4.78 部分放電電流波形 (ケーブルモデル III、気体窒素、交流)

#### 液体窒素環境下

ケーブルモデル I を液体窒素で満たされたチャンバに設置し交流電圧を印加し部分放電電流波形を取得した。

その時に得られた代表的な部分放電電流波形を図 4.79 に示す。

部分放電電流は 10ns 程度の信号として観測された。その他環境下で得られた波形と似ており、部分放電電流波形は各環境下において変わらない。またケーブルモデル I、ケーブルモデル II、ケーブルモデル III 全てにおいても部分放電電流波形の差はほとんど無い。

#### 4.3.4 交流電界下の $Q - V$ 図とまとめ

部分放電電荷量と部分放電印加電圧の関係を比較する。大気圧空気環境下、気体窒素環境下で観測された部分放電波形の電荷量とその時の印加電圧の関係を図 4.80 に示す。なお縦軸をログスケールにしたものをあわせて図 4.81 に示す。

交流印加時においては、直流印加時のようなばらつきが少ない。また図 4.80 を見ると、部分放電印加電圧と電荷量の間に関係が見られる。また部分放電印加電圧は気体窒素環境下の方が大気圧空気環境下よりも低いという結果がでた。負性気体の酸素を含んでいる空気中の方が一般的に放電は起こりにくいと予想されるので、理論通りの結果となった。

液体窒素環境下における  $Q - V$  図を図 4.82 に示す。また縦軸をログスケールにしたものを図 4.83 に示す。大気圧空気中、気体窒素環境下と同様に部分放電印加電圧と電荷量の相関性が強く

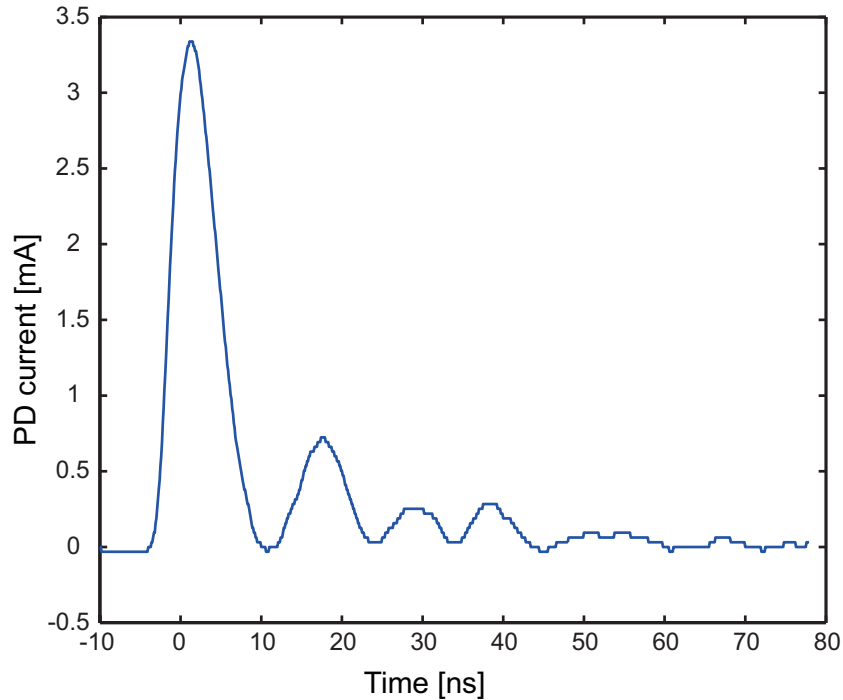


図 4.79 部分放電電流波形 (ケーブルモデル III、液体窒素中、交流)

出た結果となった。

全ての環境下において部分放電電荷量は、部分放電印加電圧が上昇するにつれて、大幅に上昇する傾向が見られる。

ログスケールのグラフを見ると  $Q - V$  のプロットは直線に近い形となっており、部分放電印加電圧が上昇すると指数関数的に電荷量が上昇する結果となった。

更に、全環境下における  $Q - V$  図を一つのグラフにまとめたものを図 4.84 に示す。

部分放電印加電圧は液体窒素環境下が大きく、ついで大気圧空気環境下、気体窒素環境下となっている。また全ての環境下において部分放電印加電圧の上昇とともに、指数関数的に電荷量の上昇するという傾向がみられた。

なおケーブルモデル III も 3 本で同様の実験を行った。サンプル 2 の大気圧空気環境下、気体窒素環境下の  $Q - V$  特性を図 4.85 に液体窒素環境下の  $Q - V$  特性を図 4.86 に全環境下における  $Q - V$  特性を図 4.87 に示す。またサンプル 3 の大気圧空気環境下、気体窒素環境下の  $Q - V$  特性を図 4.88 に液体窒素環境下の  $Q - V$  特性を図 4.89 に、全環境下における  $Q - V$  特性を図 4.90 に示す。



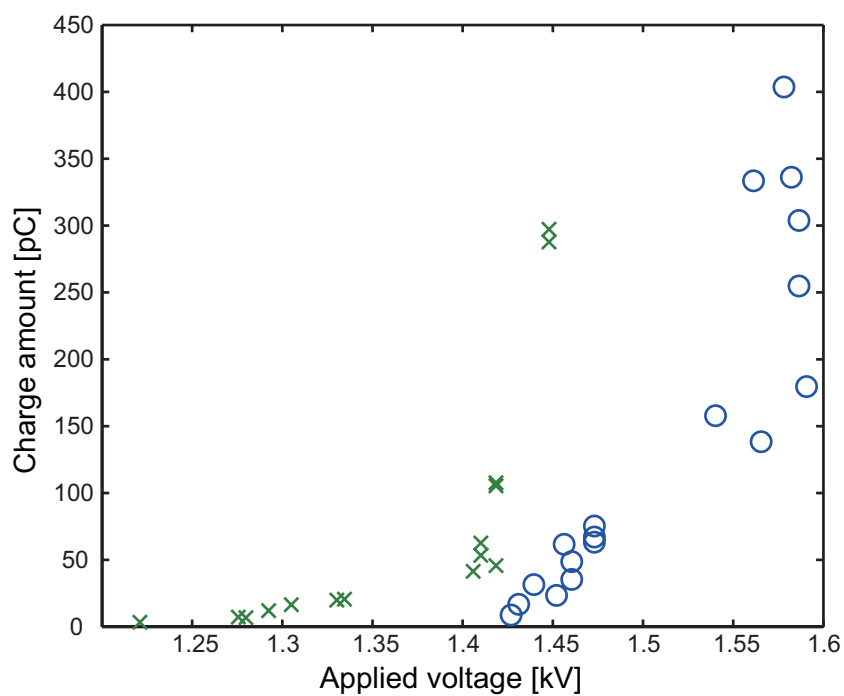


図 4.80  $Q - V$  図、(ケーブルモデル III 大気圧空気&気体窒素環境下、交流)

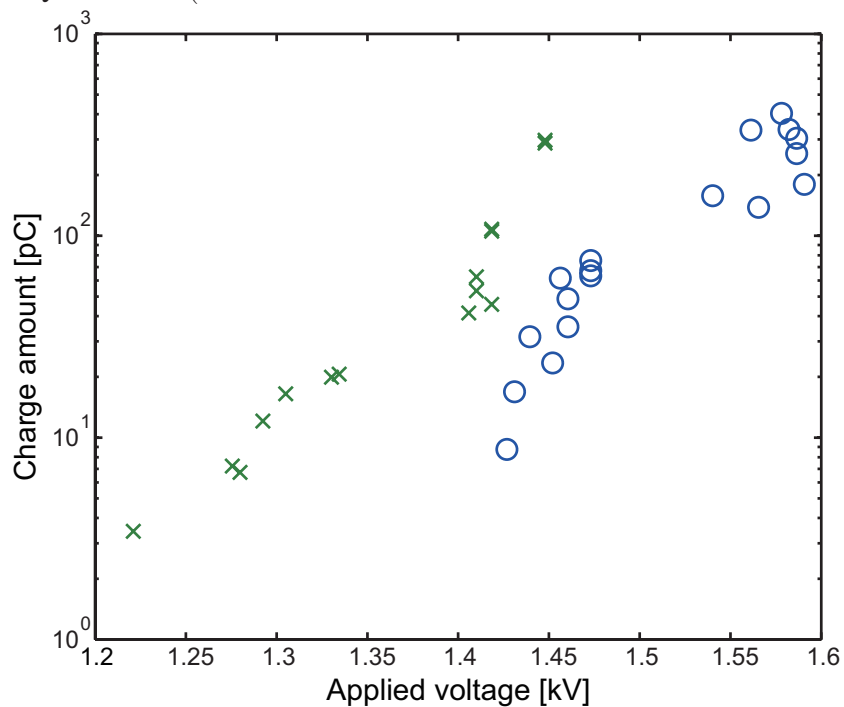


図 4.81  $Q - V$  図、(ケーブルモデル III 大気圧空気&気体窒素環境下、交流)

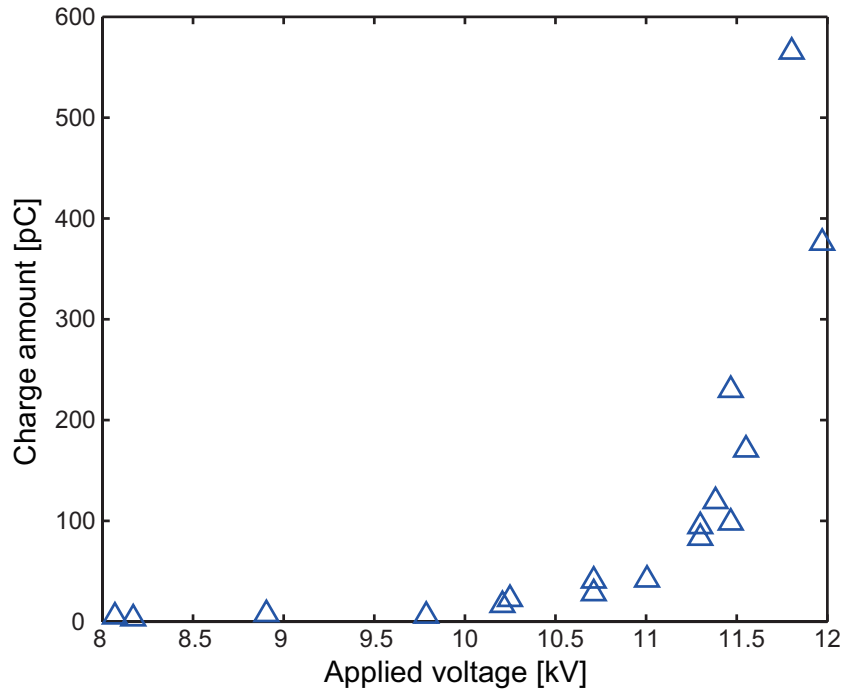


図 4.82  $Q - V$  図、(ケーブルモデル III、液体窒素環境下、交流)

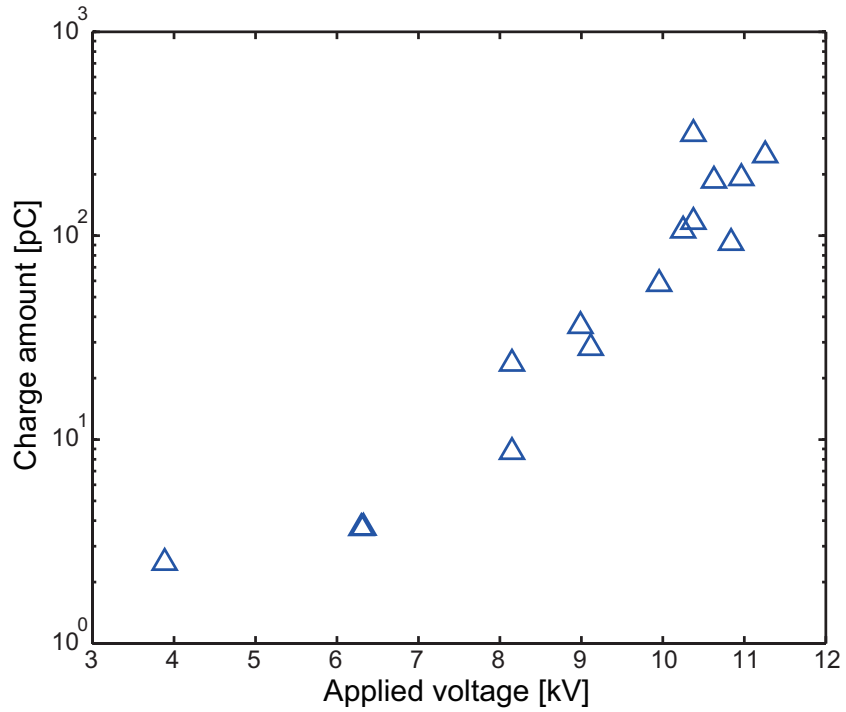


図 4.83  $Q - V$  図、(ケーブルモデル III、液体窒素環境下、交流)

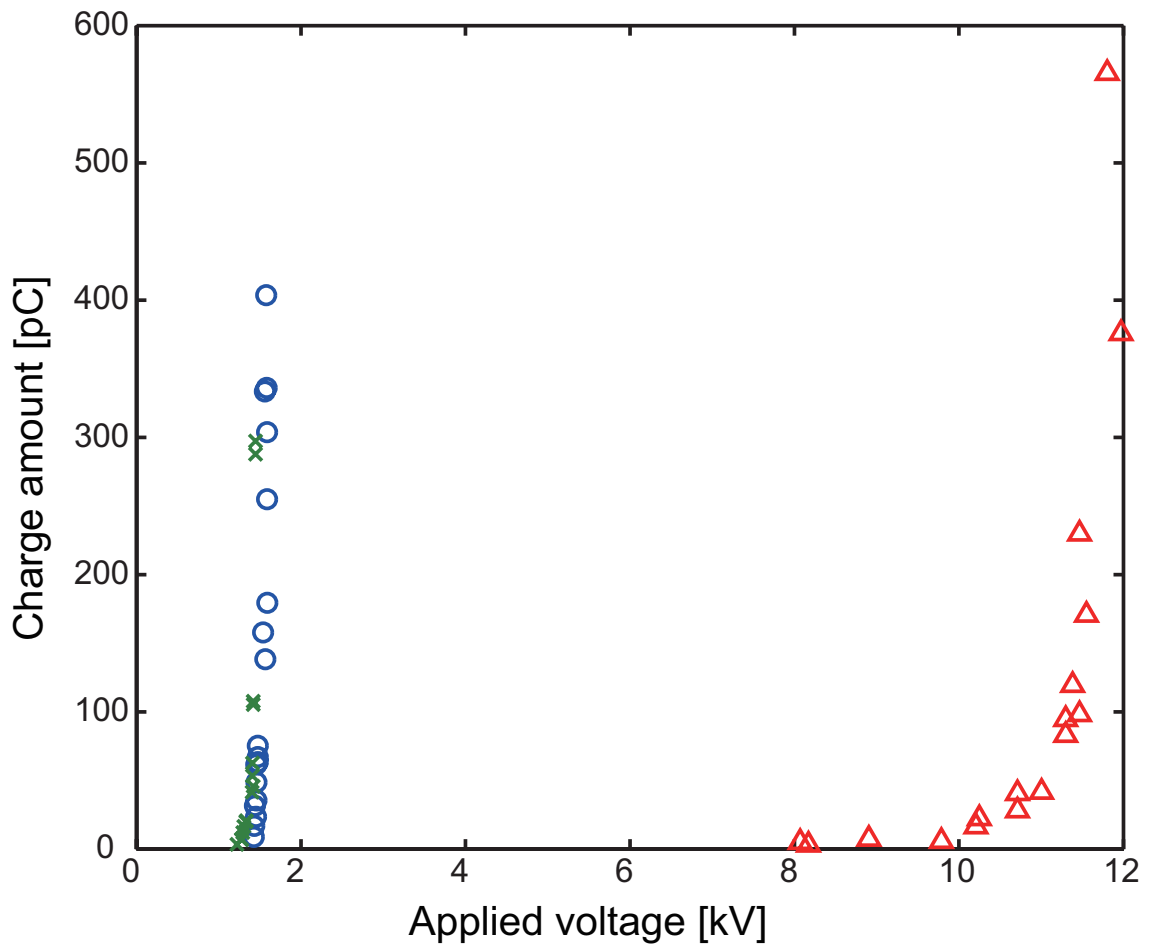


図 4.84 各環境下における  $Q - V$  図 (ケーブルモデル III サンプル 1, 交流)

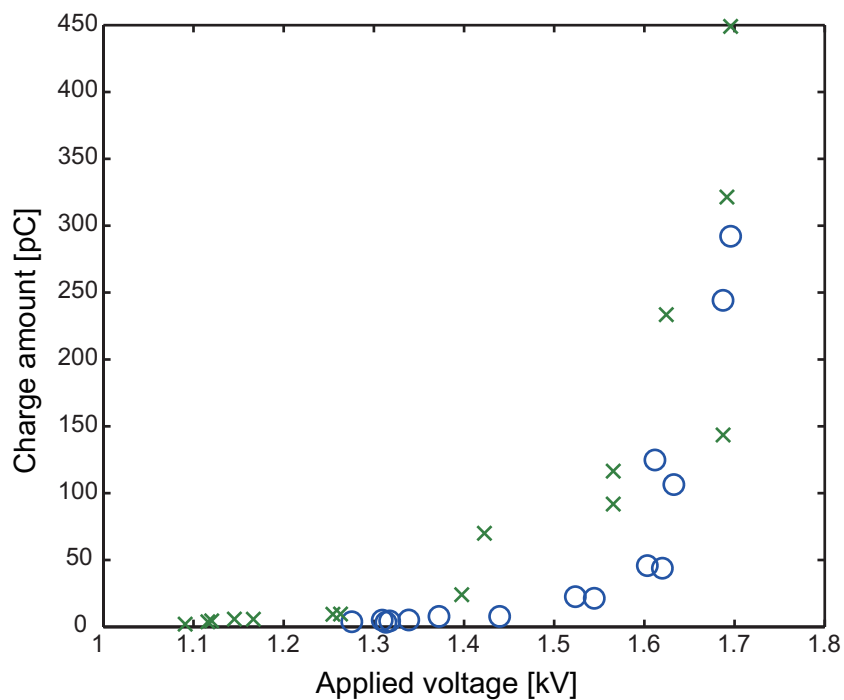


図 4.85  $Q - V$  図、(ケーブルモデル III サンプル 2 大気圧空気&気体窒素環境下, 交流)

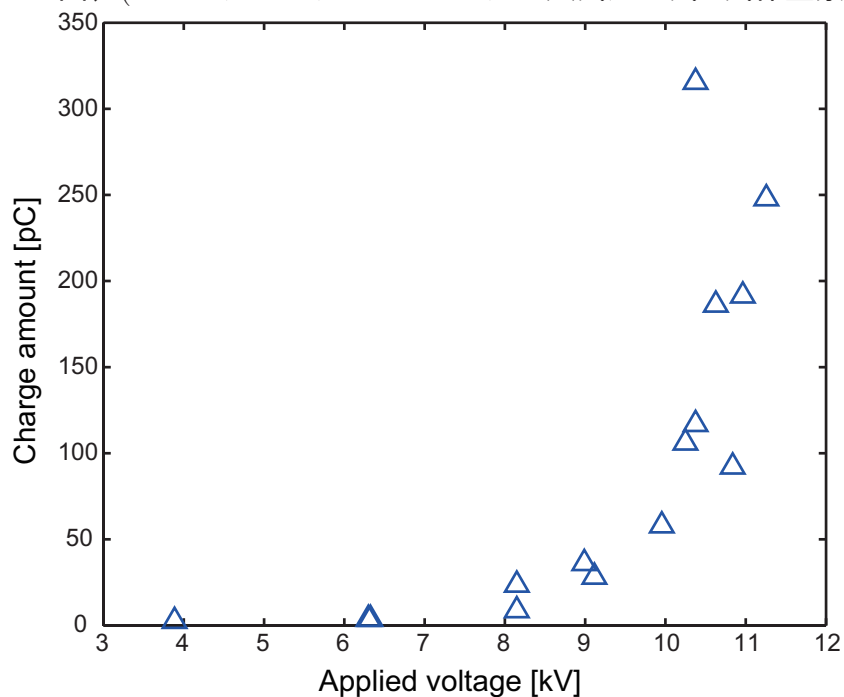


図 4.86  $Q - V$  図、(ケーブルモデル III サンプル 2 液体窒素環境下, 交流)

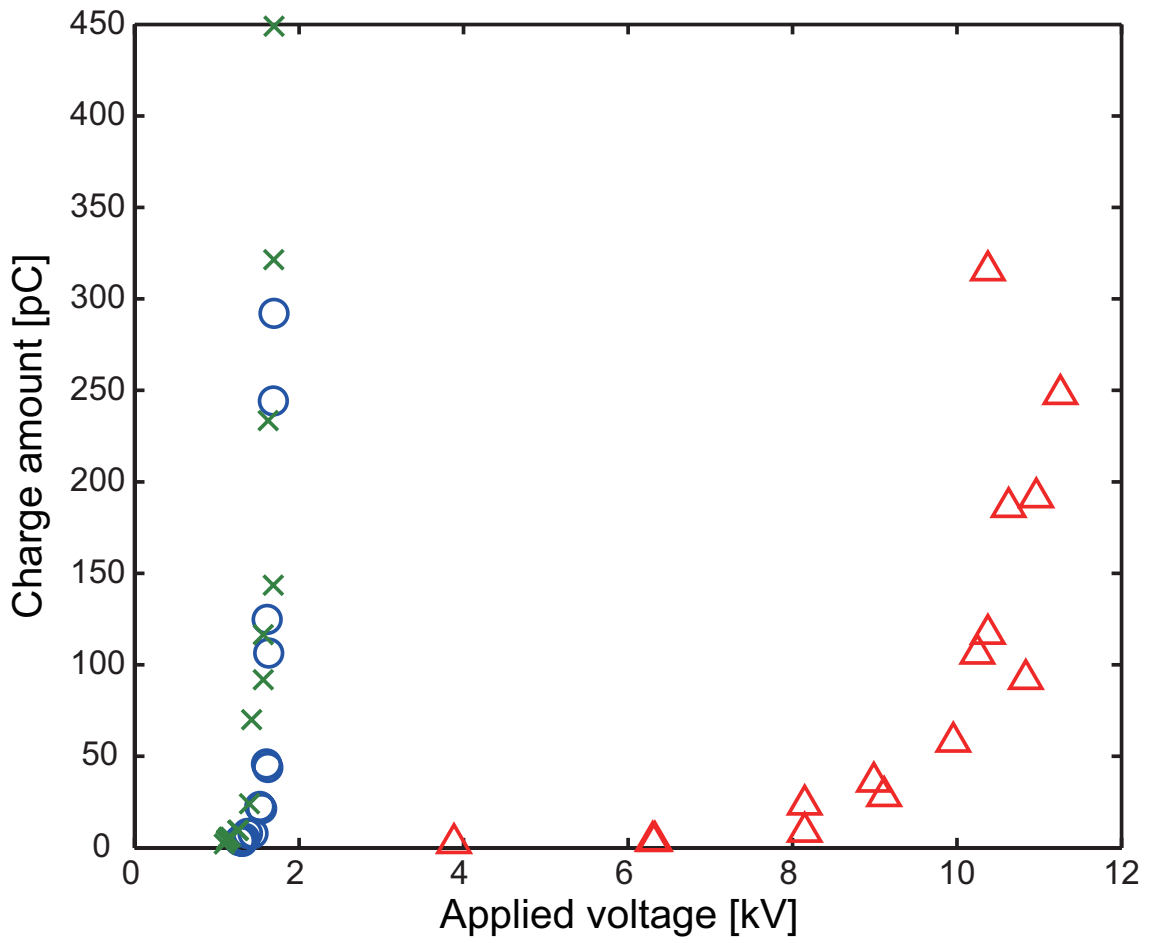


図 4.87 各環境下における  $Q - V$  図 (ケーブルモデル III サンプル 2, 交流)

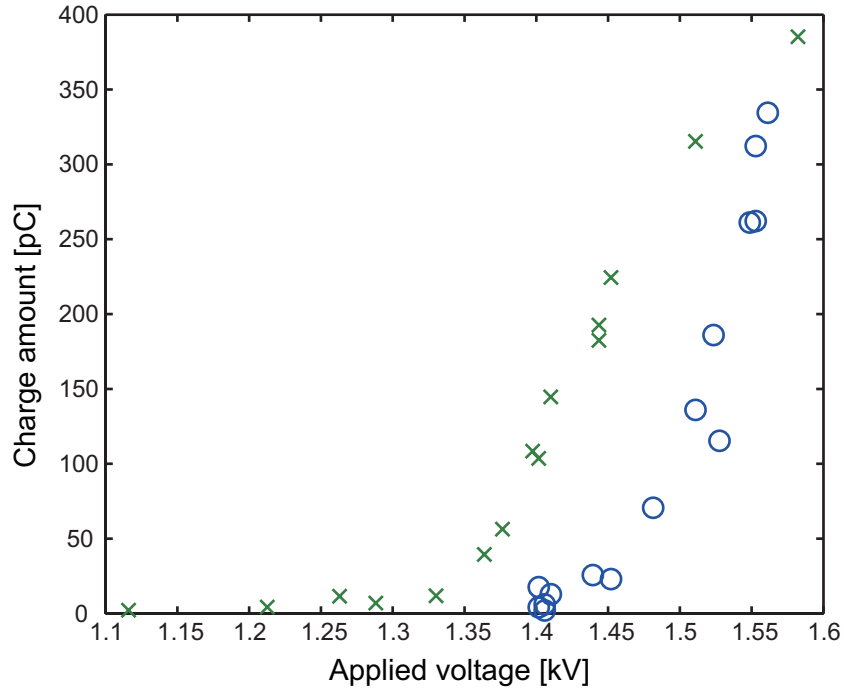


図 4.88  $Q - V$  図、(ケーブルモデル III サンプル 3 大気圧空気&気体窒素環境下, 交流)

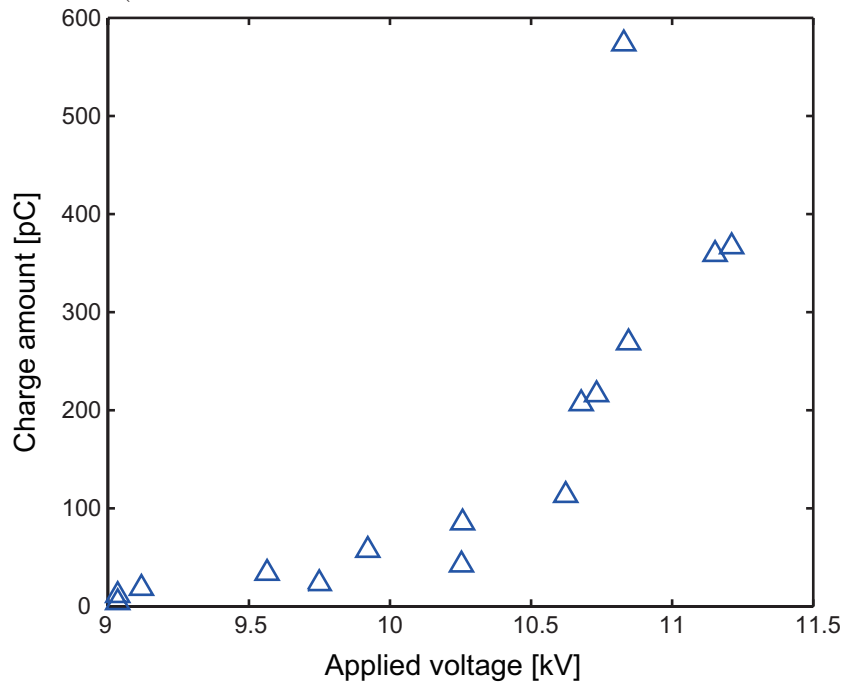


図 4.89  $Q - V$  図、(ケーブルモデル III サンプル 3 液体窒素環境下, 交流)

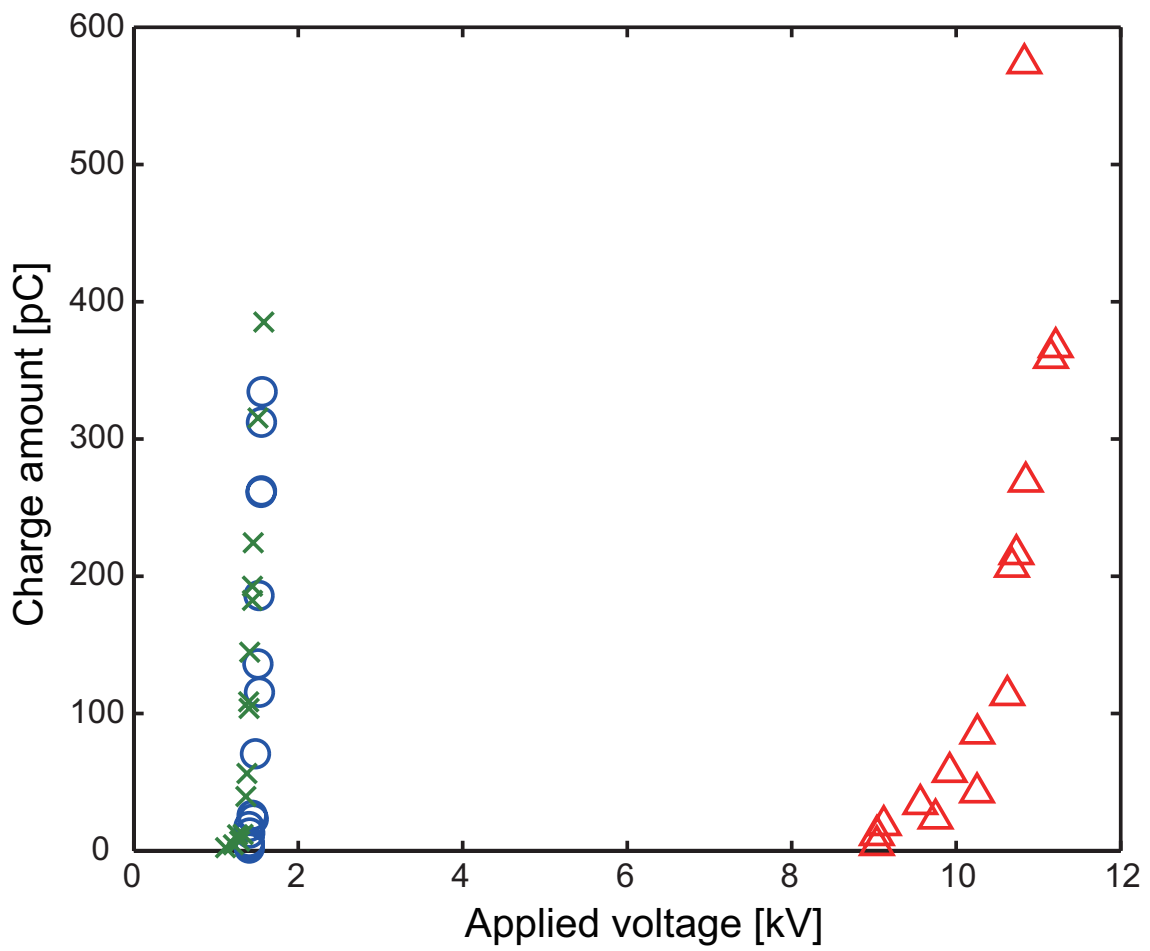


図 4.90 各環境下における  $Q - V$  図 (ケーブルモデル III サンプル 3, 交流)

---

## 第 5 章

### まとめ・考察

#### 5.1 直流電界下における部分放電現象

本研究では液体窒素環境下における部分放電の挙動をコストの観点からその他環境下において推測できる手法を提案することが目的である。具体的には液体窒素環境下での部分放電電圧を推測することが目的である。

印加電圧は本研究では直流と交流に変化させ測定を行った。直流印加時においては、部分放電電荷量のばらつきが大きく、電荷量の変化に対して部分放電電圧の変化量が大きい。そのため各環境下間の部分放電電圧を比較することは難しいと考えられる。直流印加時においては、ギャップ内の電界が一方向のみであり、部分放電が発生するとその残留電荷によって発生する電界の影響を受け、部分放電電圧が安定せず、再現性も低くなるのではないかと考えられる。

その点、交流印加時に得られたデータは、双方向の電界が周期的にかかり電源電圧によって発生する電圧に影響を与えるような電荷が残留しないため、直流印加時に比較し部分放電電圧が安定し再現性も高いのではないかと考えられる。そのため電荷量の増減に対する部分放電電圧の変化量が小さい。直流と比較すると、部分放電電圧を精度よく定義することができる。

部分放電の試験としては交流印加時が直流印加時に比較して適しており、以後交流印加時に得られたデータに対して考察をしていく。

#### 5.2 交流電界下における $Q - V$ 特性

部分放電電圧の上昇に伴い、部分放電電荷量も大幅に変化してくる。そのため、一意に部分放電電荷量を各環境下で比較することは難しい。

そこで部分放電電荷量毎の印加電圧を比較することで、液体窒素中の部分放電電圧を推測することとする。

図 4.23 等に示した  $Q - V$  特性測定結果において、部分放電電荷量  $Q$  は部分放電電圧  $V$  に対して指数関数的に上昇する傾向が見られる。そこで電荷量  $Q$  と部分放電電圧  $V$  は (5.1) 式であらわ



される関係が成り立つ。最小 2 乗法で A と B を求める。各電荷量毎の部分放電電圧は (5.2) 式であらわされる。(5.3) 式のように、電荷量の関数として部分放電電圧の比  $R_{LN_2/Air}$ , 及び  $R_{LN_2/N_2}$  を定義する。この部分放電電圧比  $R$  に着目して、各種環境下における部分放電特性の比較を行う。

$$Q = Ae^{BV} \quad (5.1)$$

$$\begin{aligned} V_{LN_2} &= \frac{1}{B_{LN_2}} \log \frac{Q}{A_{LN_2}} \\ V_{air} &= \frac{1}{B_{air}} \log \frac{Q}{A_{air}} \\ V_{N_2} &= \frac{1}{B_{N_2}} \log \frac{Q}{A_{N_2}} \end{aligned} \quad (5.2)$$

$$\begin{aligned} R_{LN_2/air} = V_{LN_2}/V_{air} &= \frac{B_{air}(\log Q - \log A_{LN_2})}{B_{LN_2}(\log Q - \log A_{air})} \\ R_{LN_2/N_2} = V_{LN_2}/V_{N_2} &= \frac{B_{N_2}(\log Q - \log A_{LN_2})}{B_{LN_2}(\log Q - \log A_{N_2})} \end{aligned} \quad (5.3)$$

### 5.2.1 ケーブルモデル I

ケーブル I の実験結果に最小 2 乗法により求めた近似式を重ねたものを、大気圧空気環境下&気体窒素環境下と液体窒素環境下にわけそれぞれ図 5.1 と図 5.2 に示す。尚最小 2 乗法により計算された  $Q-V$  特性の係数 A と B を各環境下毎にサンプル 2 とサンプル 3 もあわせて、表 5.1、表 5.2、表 5.3 にまとめた。

近似式は電荷量が 300pC を越えたあたりから、精度が悪くなってくる。部分放電電圧の比較は比較的精度がよく実験結果をよく表している 50pC から 300pC の間で行うこととする。

部分放電電荷量が 50pC から 300pC の間における大気圧空気環境下での部分放電電圧に対する液体窒素環境下での部分放電電圧の比を求めたものを図 5.3 に気体窒素環境下での部分放電電圧に対する液体窒素環境下での部分放電電圧の比を求めたものを図 5.4 にそれぞれ示す。下図 (b) は上図 (a) の縦軸を拡大したものである。

50pC から 300pC の間では、電圧の比は大きく変化することなく、液体窒素環境下での部分放電電圧は気体窒素環境下の部分放電電圧の 7.4 倍 ~ 7.7 倍で推移している。

同様に 50pC から 300pC の間で、液体窒素環境下での部分放電電圧は大気圧空気環境下の部分放電電圧の 7.69 倍 ~ 7.71 倍で推移している。

部分放電電荷量は部分放電電圧の上昇に伴い大幅に増加するが、各環境下で同一の特徴を有し、同一電荷量での比較においては部分放電電圧の比は一定である。

表 5.1 ケーブルモデル I 大気圧空気環境下における近似式の係数

	A	B
sample1	$7.35 \times 10^{-9}$	14.8
sample2	$1.45 \times 10^{-6}$	12.8
sample3	$1.33 \times 10^{-9}$	17.7

表 5.2 ケーブルモデル I 気体窒素環境下における近似式の係数

	A	B
sample1	$9.11 \times 10^{-5}$	10.1
sample2	$2.51 \times 10^{-5}$	11.2
sample3	$2.39 \times 10^{-5}$	11.0

表 5.3 ケーブルモデル I 液体窒素環境下における近似式の係数

	A	B
sample1	$4.17 \times 10^{-4}$	1.22
sample2	$1.40 \times 10^{-5}$	1.63
sample3	$1.85 \times 10^{-5}$	1.45

同様の考察をケーブルモデル I のサンプル 2、サンプル 3 についても行い、液体窒素中の部分放電電圧の大気圧空気環境下、気体窒素環境下での部分放電電圧に対する比を求めた。

図 5.5 に全サンプルの電荷量別液体窒素環境下での部分放電電圧の大気圧空気環境下での部分放電電圧に対する比を、図 5.6 に全サンプルの電荷量別液体窒素環境下での部分放電電圧の気体窒素環境下での部分放電電圧に対する比を示す。

液体窒素環境下の部分放電電圧は大気圧空気環境下の 6.3 倍～7.7 倍となる。また気体窒素環境下の 7.1 倍～7.7 倍となる。電圧比は電荷量に対してほぼ一定のままで推移している。

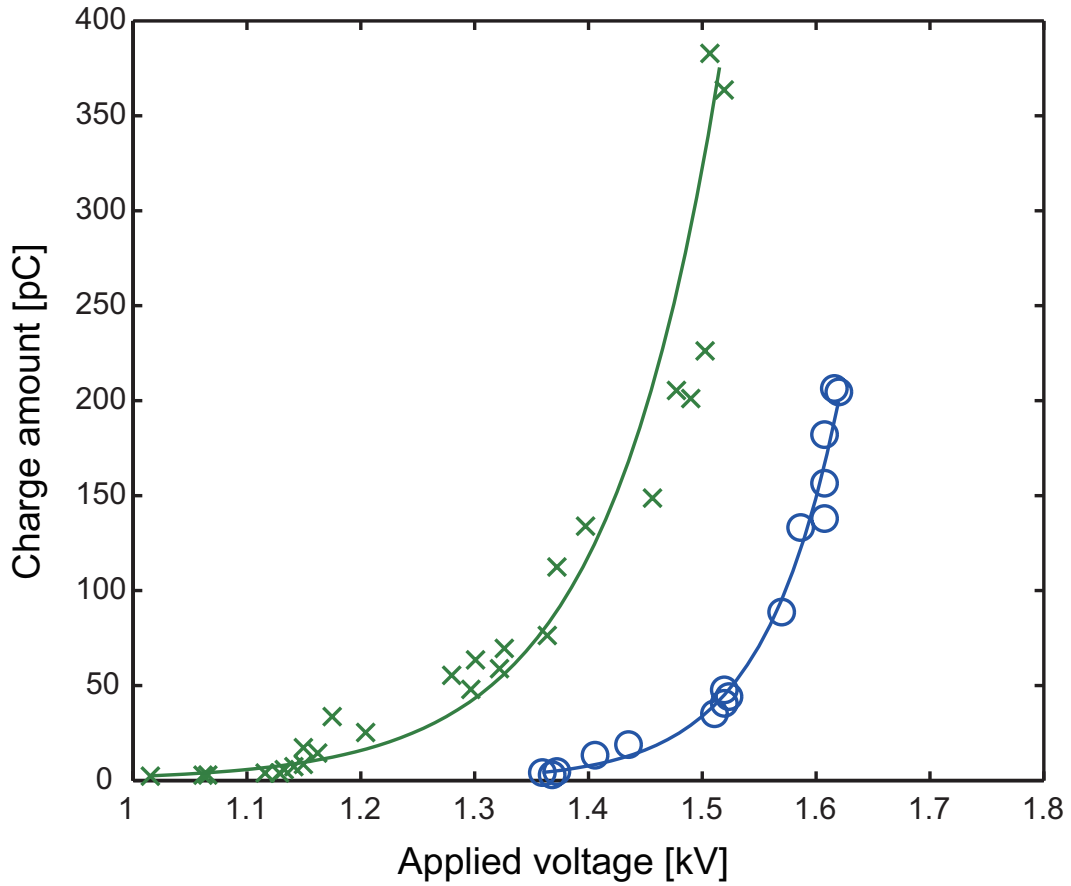


図 5.1 大気圧空気環境下と気体窒素環境下における  $Q - V$  特性

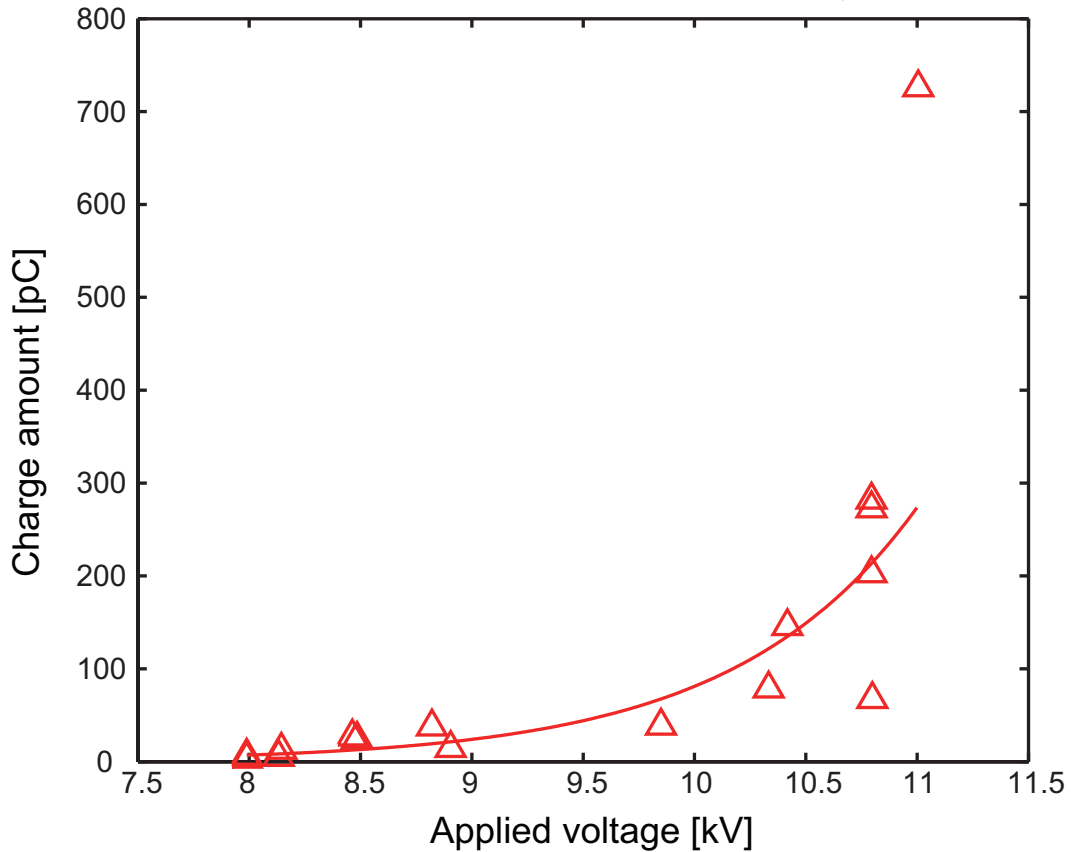
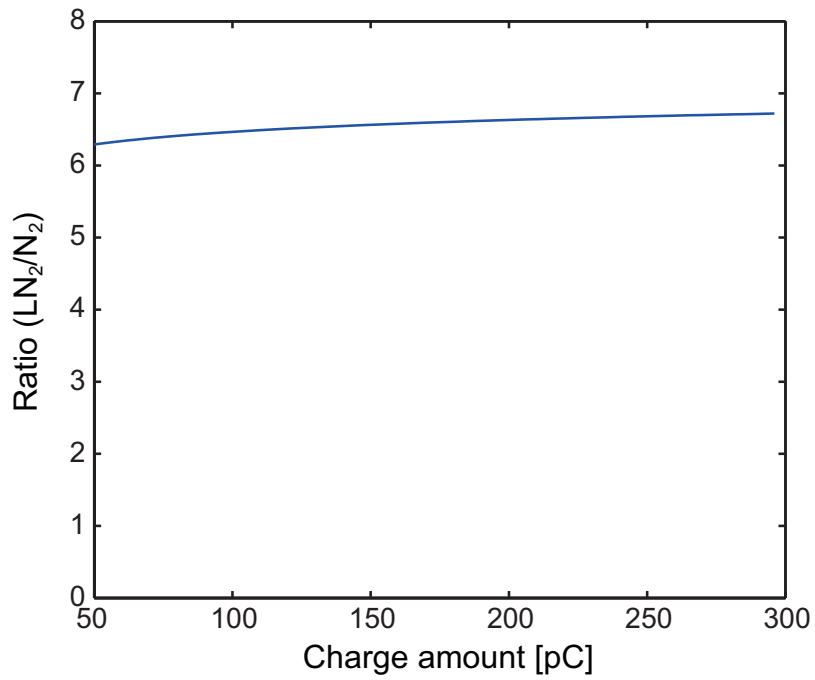
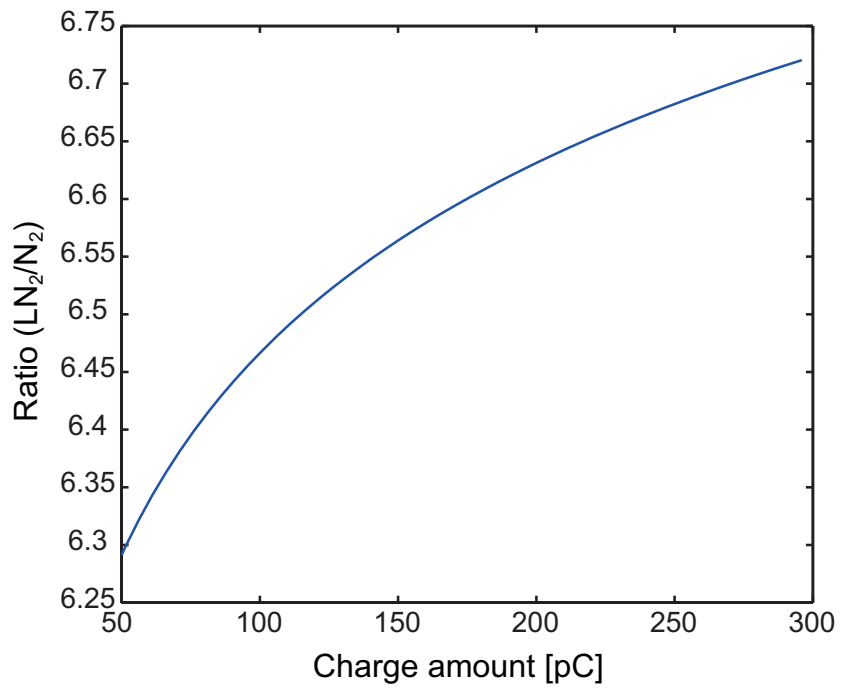


図 5.2 液体窒素環境下における  $Q - V$  特性

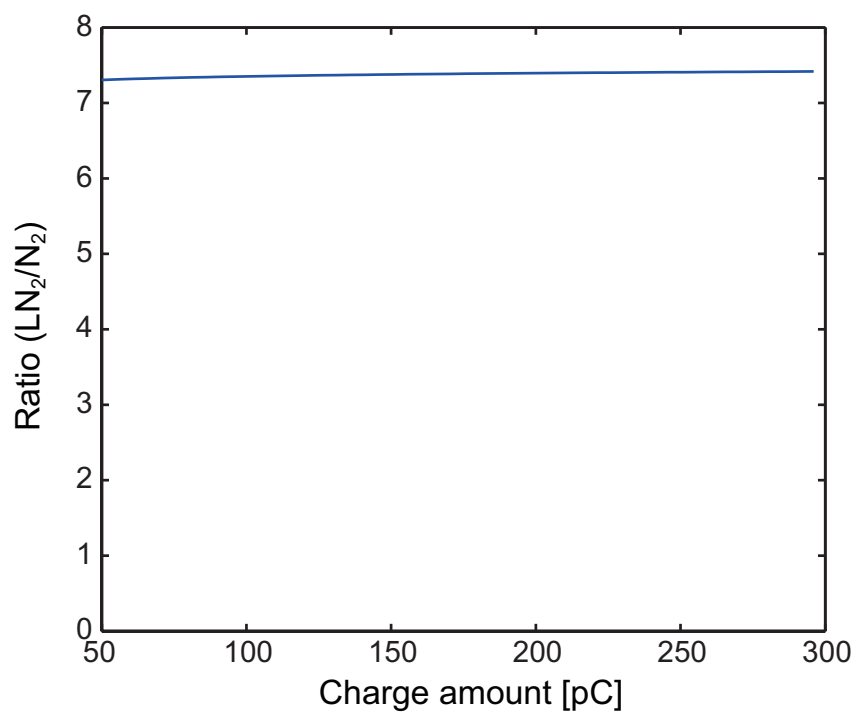


(a) 全体図

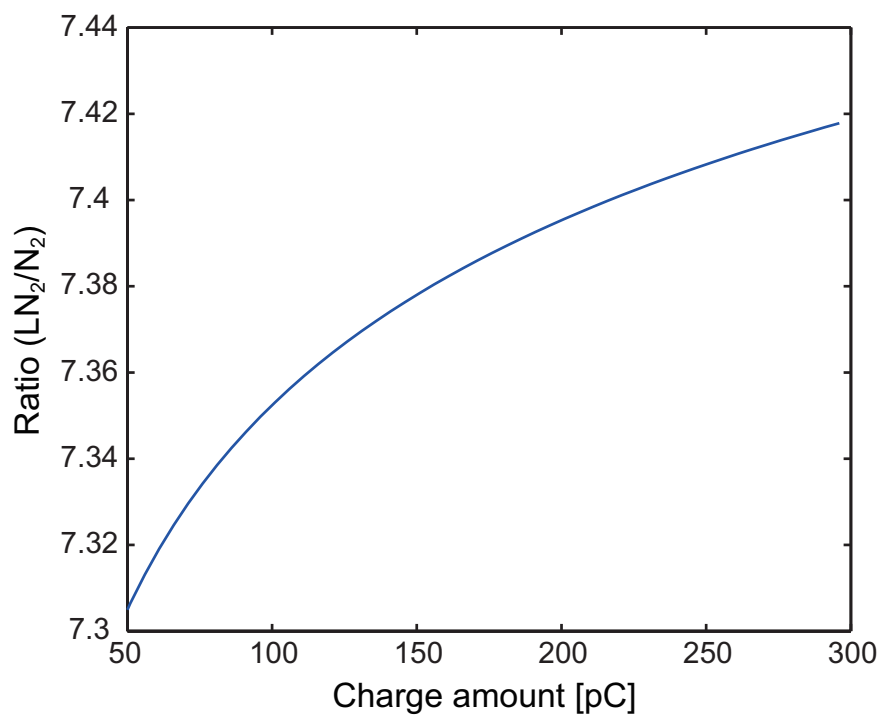


(b) 拡大図

図 5.3 ケーブルモデルIサンプル1の  $R_{LN_2/air}$  (a) 全体図、(b) 拡大図

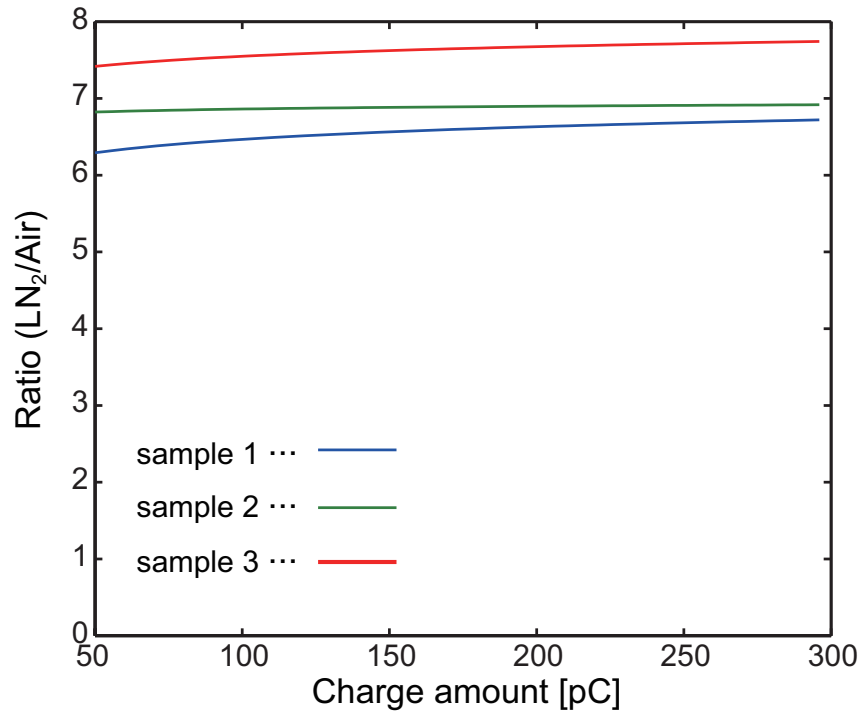


(a) 全体図

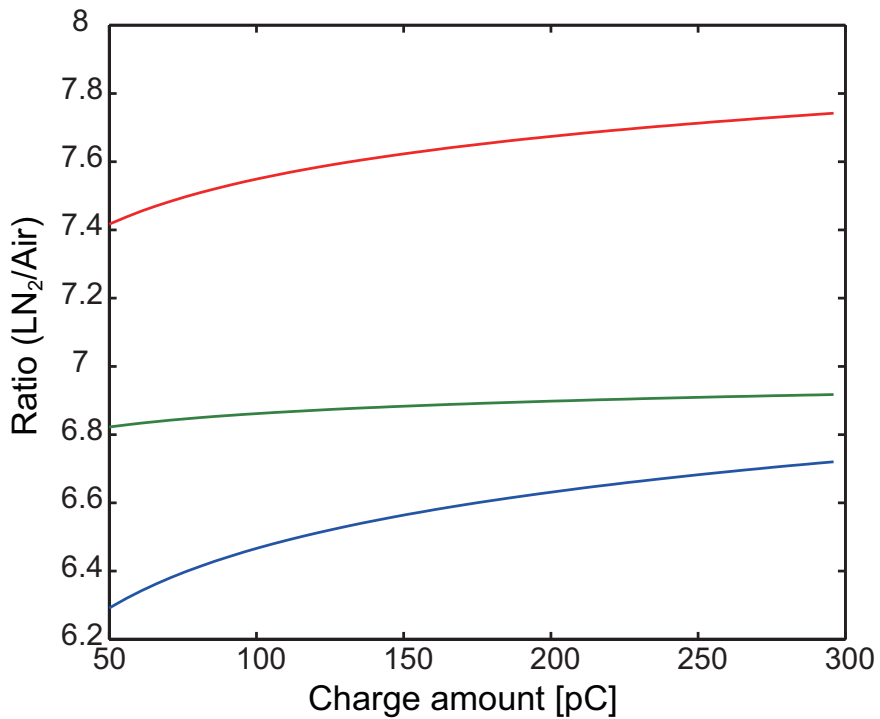


(b) 拡大図

図 5.4 ケーブルモデルIサンプル1の  $R_{LN_2/N_2}$  (a) 全体図、(b) 拡大図

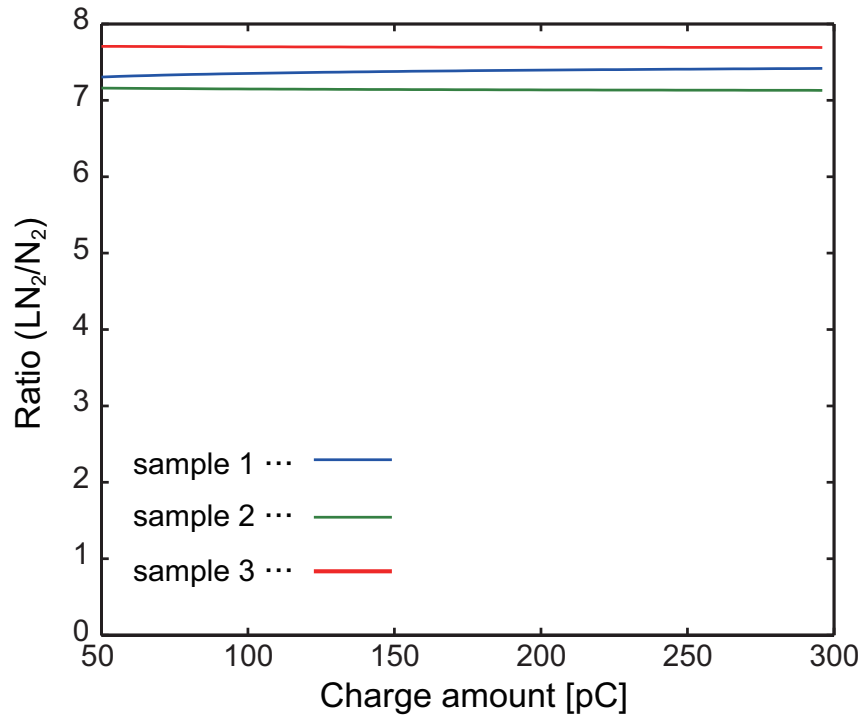


(a) 全体図

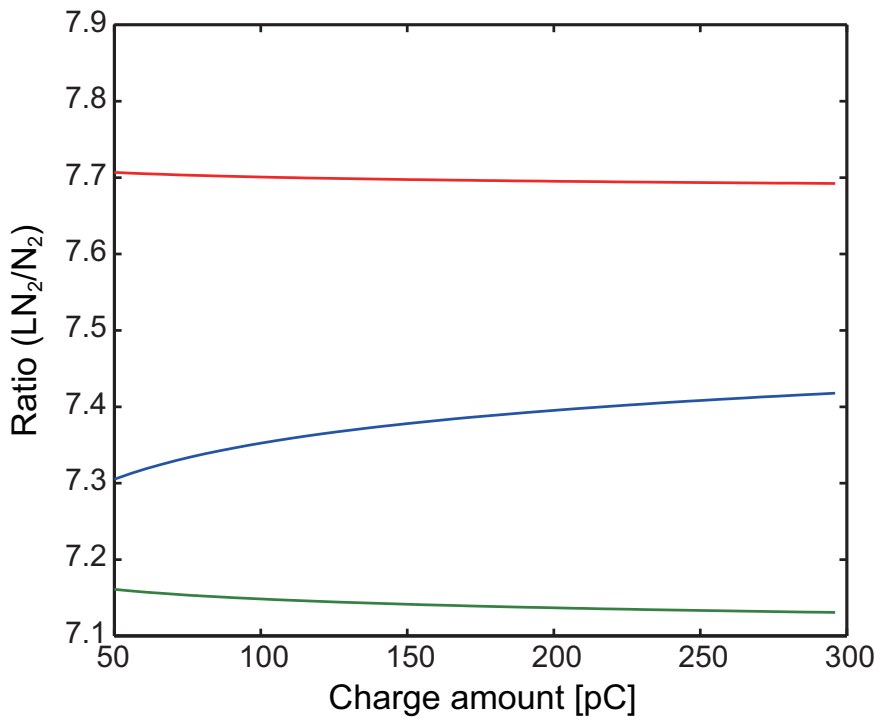


(b) 拡大図

図 5.5 ケーブルモデルIの  $R_{LN_2/air}$  (a) 全体図、(b) 拡大図



(a) 全体図



(b) 拡大図

図 5.6 ケーブルモデルIの  $R_{LN_2/N_2}$  (a) 全体図、(b) 拡大図

表 5.4 ケーブルモデル II 大気圧空気環境下における近似式の係数

	A	B
sample1	$2.40 \times 10^{-10}$	25.5
sample2	$5.48 \times 10^{-16}$	9.87
sample3	$2.55 \times 10^{-9}$	16.3

表 5.5 ケーブルモデル II 気体窒素環境下における近似式の係数

	A	B
sample1	$2.52 \times 10^{-9}$	17.0
sample2	$1.78 \times 10^{-7}$	13.8
sample3	$2.09 \times 10^{-9}$	18.2

表 5.6 ケーブルモデル II 液体窒素環境下における近似式の係数

	A	B
sample1	$3.00 \times 10^{-3}$	0.96
sample2	$3.13 \times 10^{-4}$	1.29
sample3	$1.00 \times 10^{-3}$	1.10

### 5.2.2 ケーブルモデル II

同様の検討をケーブルモデル II においても行った。ケーブルモデル II は半導電層のみにバットギャップが存在するケーブルモデルである。

ケーブルモデル II の液体窒素の大気圧空気環境下に対する部分放電電圧の比  $R_{LN_2/air}$  を図 5.7 に、液体窒素環境下の気体窒素環境下に対する部分放電電圧の比  $R_{LN_2/N_2}$  を図 5.8 に示す。

50pC から 300pC までの範囲で見ると液体窒素環境下では、大気圧空気中の 6.1 倍～7.4 倍、気体窒素環境下の 6.6 倍～8.1 倍の電圧で部分放電が発生することがわかった。サンプル毎にみると、部分放電電圧が上昇すると電荷量も大きく増加するが、各環境下において電荷量毎の電圧の比は一定に推移している。

### 5.2.3 ケーブルモデル III

ケーブルモデル III においても同様の検討を行った。ケーブルモデル III は PPLP の真ん中の層のみにバットギャップが存在するケーブルモデルである。

ケーブルモデル III の  $R_{LN_2/air}$  を図 5.9 に、 $R_{LN_2/N_2}$  を図 5.10 に示す。



表 5.7 ケーブルモデル III 大気圧空気環境下における近似式の係数

	A	B
sample1	$9.52 \times 10^{-10}$	16.7
sample2	$9.14 \times 10^{-6}$	9.87
sample3	$2.32 \times 10^{-15}$	25.4

表 5.8 ケーブルモデル III 気体窒素環境下における近似式の係数

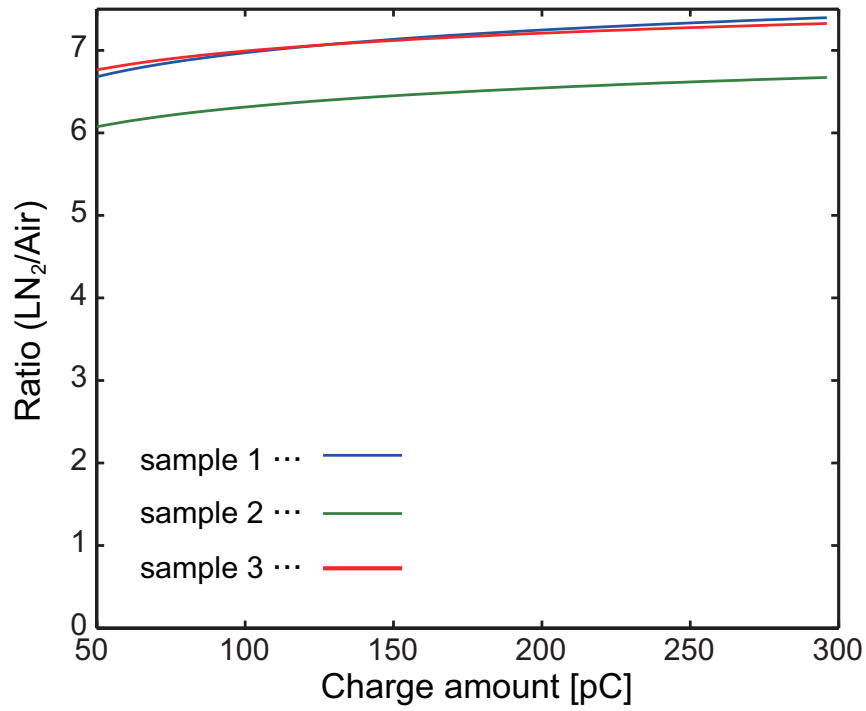
	A	B
sample1	$1.53 \times 10^{-9}$	17.5
sample2	$7.32 \times 10^{-4}$	7.64
sample3	$3.75 \times 10^{-7}$	13.6

表 5.9 ケーブルモデル III 液体窒素環境下における近似式の係数

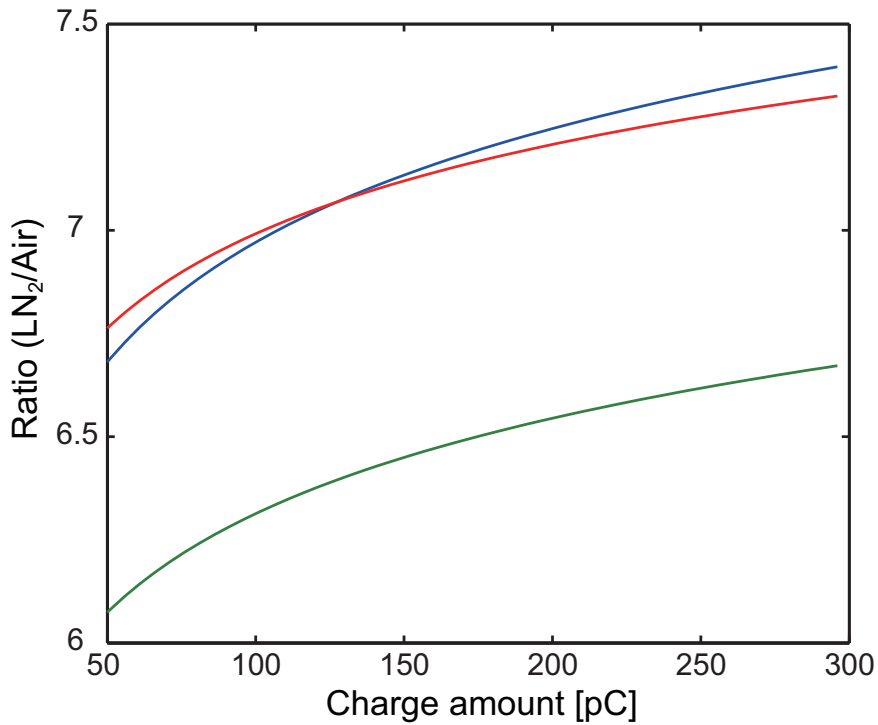
	A	B
sample1	$1.31 \times 10^{-4}$	1.20
sample2	$5.82 \times 10^{-2}$	0.72
sample3	$5.92 \times 10^{-7}$	1.83

50pC から 300pC までの範囲で見ると液体窒素環境下では、大気圧空気中の 5.9 倍～7.7 倍、気体窒素環境下の 6.4 倍～8.2 倍の電圧で部分放電が発生することがわかった。このことかサンプル毎にみると、部分放電電圧が上昇すると電荷量も大きく増加するが、各環境下電荷量毎の電圧の比は一定に推移している。

表 5.10 に 50pC、100pC、200pC、300pC の各ケーブルモデル別の部分放電発生時の  $R_{LN_2/air}$  の 3 サンプルの平均と分散を表 5.11 に 50pC、100pC、200pC、300pC の部分放電発生時の  $R_{LN_2/N_2}$  の 3 サンプルの平均と分散をそれぞれ示す。

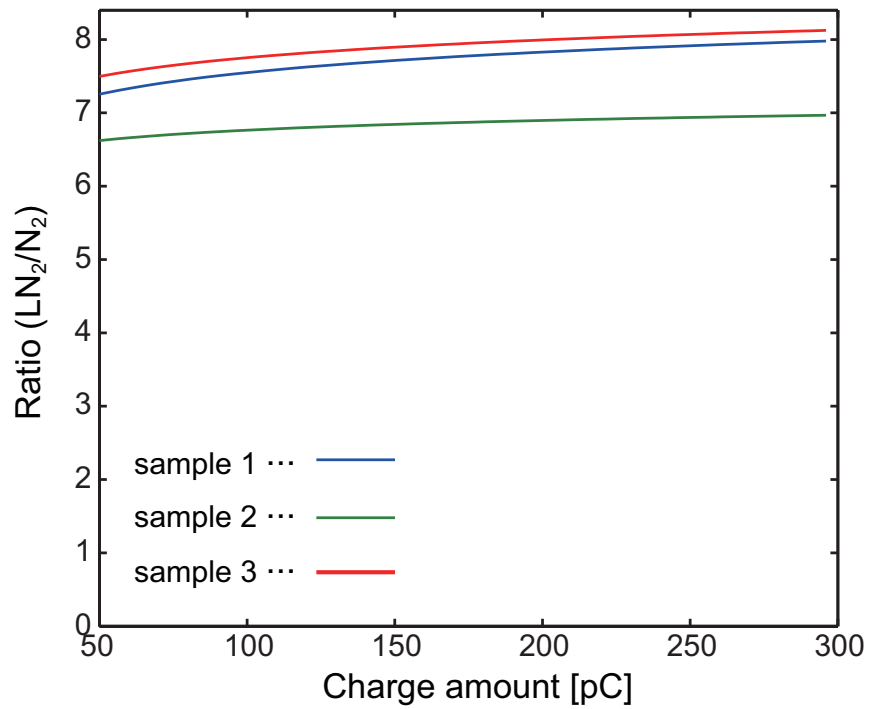


(a) 全体図

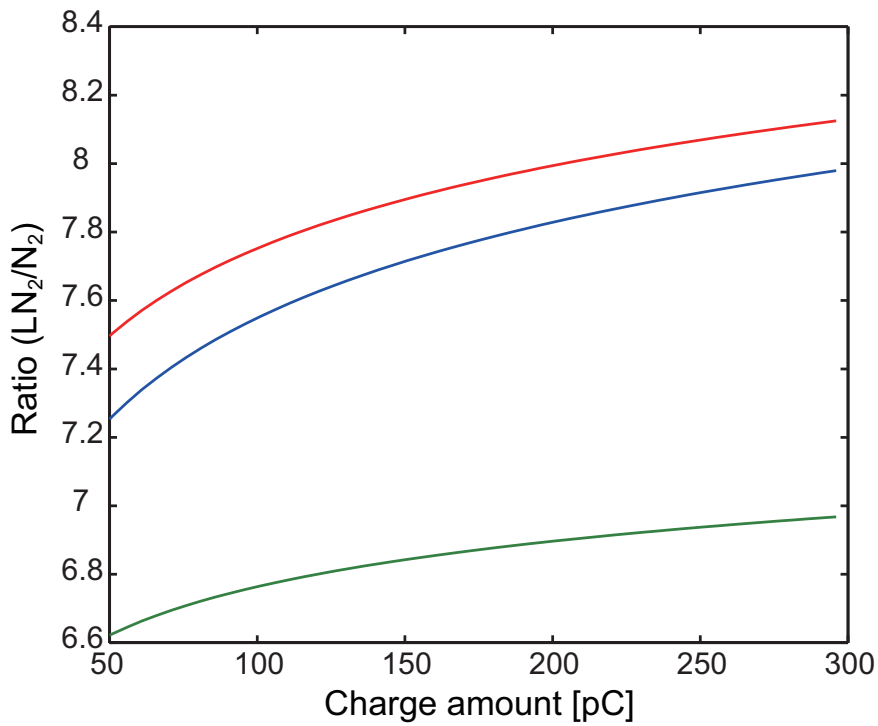


(b) 拡大図

図 5.7 ケーブルモデル II の  $R_{LN_2/air}$  (a) 全体図、(b) 拡大図

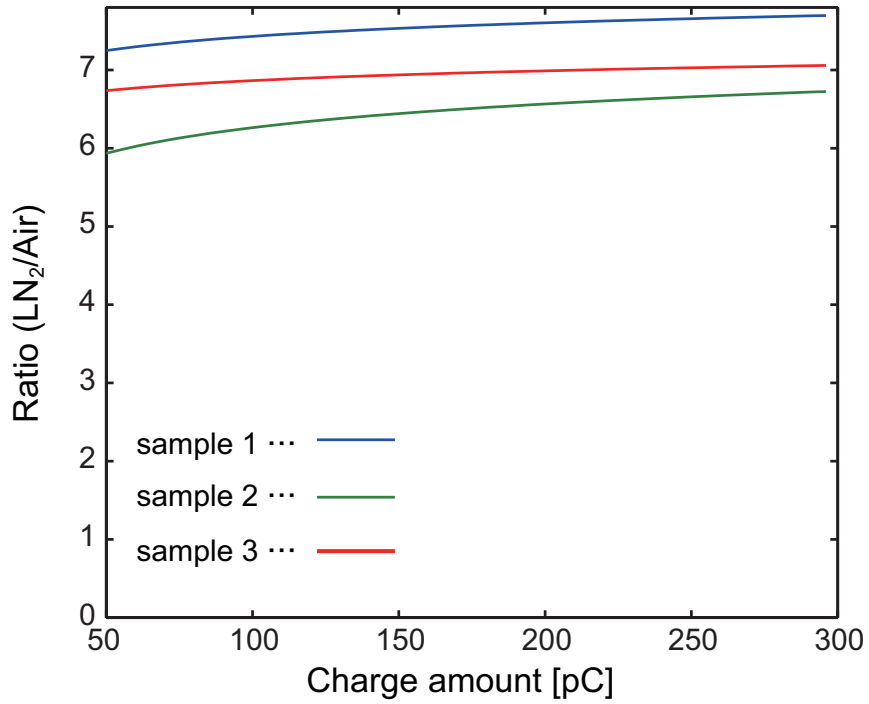


(a) 全体図

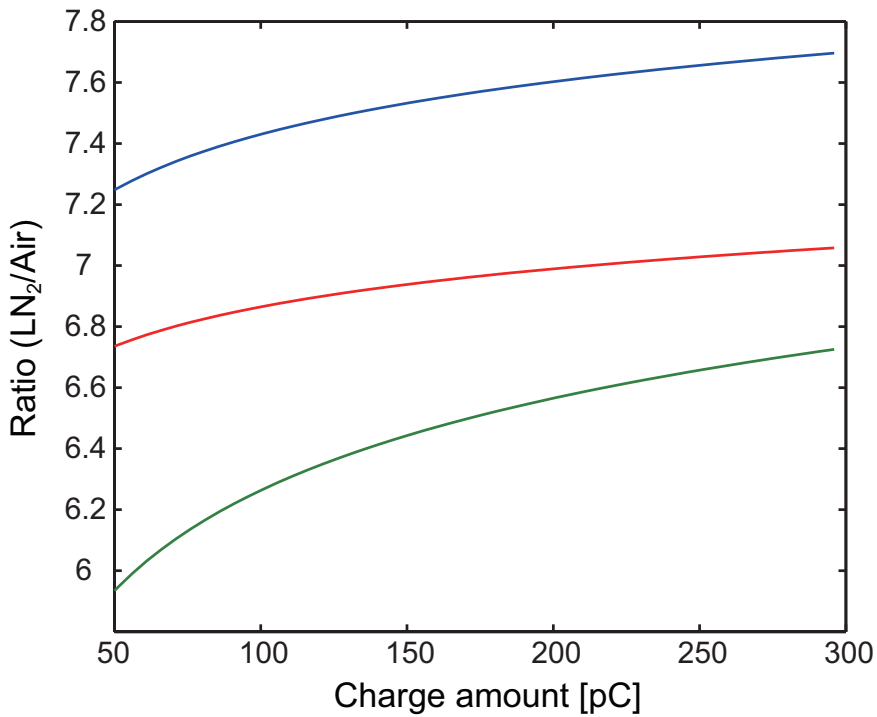


(b) 拡大図

図 5.8 ケーブルモデル II の  $R_{LN_2/N_2}$  (a) 全体図、(b) 拡大図

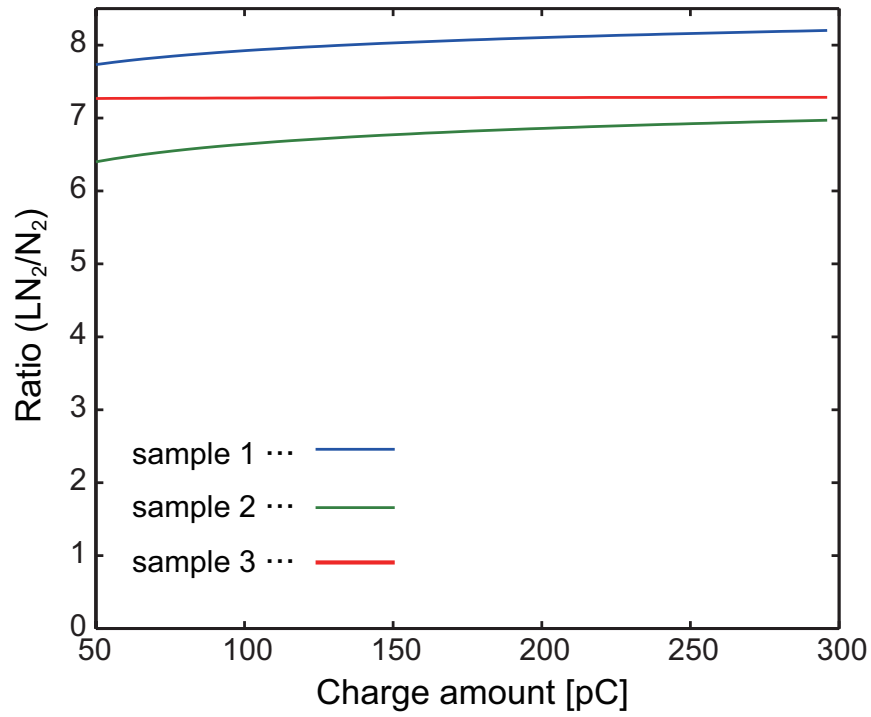


(a) 全体図

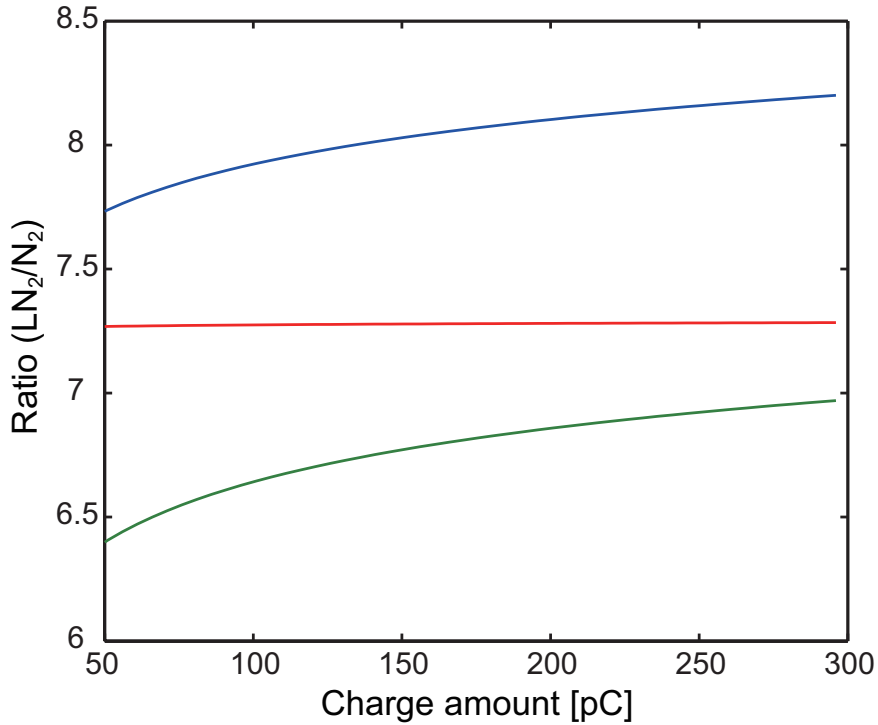


(b) 拡大図

図 5.9 ケーブルモデル III の  $R_{LN_2/air}$  (a) 全体図、(b) 拡大図



(a) 全体図



(b) 拡大図

図 5.10 ケーブルモデル III の  $R_{LN_2/N_2}$  (a) 全体図、(b) 拡大図

表 5.10 各ケーブルモデルの  $R_{LN_2/air}$  の平均と分散

	50pC	100pC	200pC	300pC
ケーブル I	6.84 ± 0.56	6.96 ± 0.55	7.07 ± 0.54	7.13 ± 0.54
ケーブル II	6.51 ± 0.38	6.76 ± 0.39	7.00 ± 0.39	7.14 ± 0.40
ケーブル III	6.64 ± 0.66	6.85 ± 0.58	7.05 ± 0.52	7.16 ± 0.49

表 5.11 各ケーブルモデルの  $R_{LN_2/N_2}$  の平均と分散

	50pC	100pC	200pC	300pC
ケーブル I	7.39 ± 0.28	7.40 ± 0.28	7.4 ± 0.28	7.41 ± 0.28
ケーブル II	7.12 ± 0.45	7.36 ± 0.52	7.57 ± 0.59	7.69 ± 0.63
ケーブル III	7.13 ± 0.68	7.28 ± 0.64	7.41 ± 0.63	7.49 ± 0.64

この表から液体窒素環境下と大気圧空気環境下の電圧比  $R_{LN_2/air}$  及び  $R_{LN_2/N_2}$  はケーブルモデルのタイプによらず一定であることがわかる。

また 100pC から 200pC の範囲でみると電圧比  $R_{LN_2/air}$  と  $R_{LN_2/N_2}$  はそれぞれ 6.8 ~ 7.2 倍、7.3 ~ 7.7 倍の間で推移している。

表 5.12 ケーブルモデル I 及び II におけるバットギャップ内電界 (1kV 印加時)

	ケーブルモデル I [kV/mm <sup>2</sup> ]	ケーブルモデル II [kV/mm <sup>2</sup> ]
大気圧空気	3.93, 3.76, 3.85	3.93
液体窒素環境下	3.57, 3.44, 3.85	3.56

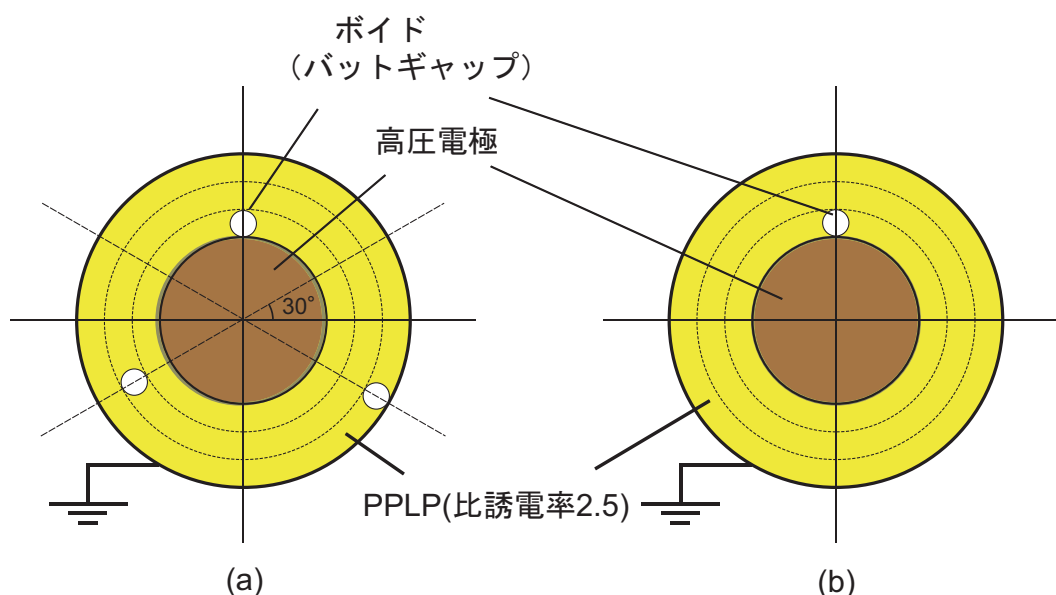


図 5.11 電界計算時の電極及びボイドの配置 (a) ケーブルモデル I、(b) ケーブルモデル II

### 5.3 バットギャップ内の電界による評価

本研究では、部分放電電圧を絶縁層全体にかかる電圧 (交流はピーク値) で定義してきた。バットギャップに印加される電界での評価をするために、ケーブルモデルに印加した電圧とバットギャップ内の電界の関係を電荷重畳法による数値計算を用いて求めた。図 5.11 のようにケーブルモデルを模擬しケーブルモデル I 及び II において数値電界計算を行った。

高圧電極に 1kV 印加したときのボイドでの電界を表 5.12 に示す。なおケーブルモデル I の電界は順に内側から一層目、二層目、三層目のバットギャップ中の電界である。この表からケーブルモデルにかかる電圧による評価からバットギャップにかかる電界での評価に換算することができる。

### 5.4 理論値との比較

部分放電の電圧比  $R_{LN_2/air}$  と  $R_{LN_2/N_2}$  を実験的に求めてきた。ここで理論計算との比較を行う。

空気中の衝突電離係数  $a$  を  $E/p$  [V/cmTorr] の値により  $31.6 \leq E/p \leq 60.0$  の時 (5.4) 式、 $60.0 \leq E/p \leq 100$  の時 (5.5) 式、 $100 \leq E/p$  の時 (5.6) 式と表し、気体窒素に関しては  $E/p$  の値により、 $E/p \leq 122$  の時 (5.7) 式、 $122 \leq E/p$  の時 (5.8) 式と与えた [14]。これらの式と (5.9) 式のシューマ

ンの条件式から部分放電開始電圧を推定する。なおシューマンの条件式の  $K$  の値はおよそ 10 から 20 と言われており、10 と 20 でそれぞれ計算した。液体窒素中に関しては電離係数  $a$  の値の計算式がないため、1MV/cm で放電が開始される [10] という経験則を用いた。この条件からギャップ内電界を計算した結果を表 5.13 に示す。この結果を表 5.12 によって電圧に換算すると、表 5.14 のようになる。この結果と実験値を比較すると、空気中に関しては一致しているが気体窒素に関しては理論値の方が数割程度高い部分放電電圧となった。液体窒素に関しては 5 割程度理論値の方が高い。液体窒素環境下では容器を密閉し圧力をかけた状態での試験ではないため、放電によって液体窒素が蒸発してしまい、バブル気相中の放電になっている可能性がある。また理論値は破壊電圧から算出しているため高く出ることが予想される。その点を考慮するとある程度理論値と実験値は一致していると考えられることができる。

$$a - \eta = p \times 10^{-4} \times \{1.047 \times (E/p - 28.5)^2 - 12.6\} \quad (5.4)$$

$$a - \eta = 1 - 6.74755 \times (E/p - 60.0) \times p \times 10^{-4} \times \{1.047 \times (E/p - 28.5)^2 - 12.6\} \quad (5.5)$$

$$a - \eta = 14.6 \times p \times \exp\left(-\frac{365}{E/p}\right) \quad (5.6)$$

$$a = 7.5 \times p \times \exp\left(-\frac{285}{E/p}\right) \quad (5.7)$$

$$a = 12 \times p \times \exp\left(-\frac{342}{E/p}\right) \quad (5.8)$$

$$\int_0^d a dx = K \quad (5.9)$$



表 5.13 PD 開始電界

	理論値 [kV/mm]	
	$K = 10$	$K = 20$
大気圧空気	5.3	7.2
気体窒素中	5.4	7.5
液体窒素環境下	59	

表 5.14 PD 開始電圧

	理論値 [kV]	
	$K = 10$	$K = 20$
大気圧空気	1.41	1.91
気体窒素中	1.44	1.99
液体窒素環境下	17.2	

表 5.15 部分放電電圧比  $R_{LN_2/air}$  と  $R_{LN_2/N_2}$  まとめ

	$R_{LN_2/air}$	$R_{LN_2/N_2}$
ケーブルモデル	6.8 ~ 7.2	7.3 ~ 7.7

## 5.5 まとめ

本研究に関する成果を以下にまとめる。

- 代替試験に使用する電圧は直流よりも交流のほうが再現性の点等で適している。
- 代替試験の手法として  $Q - V$  特性を取得して、その近似式から電荷量毎の部分放電電圧を求め比較する手法を提案した。
- ケーブルモデルはバットギャップの位置で 3 種類用意したが、部分放電開始電圧の比は各ケーブルで差がないことが判明した。
- 交流印加時では液体窒素環境下における部分放電電圧は、大気圧空気中、気体窒素中の部分放電電圧と比較すると表 5.15 のようになる。(100pC から 300pC での比較)

## 5.6 今後の課題

本研究では各ケーブルモデルでサンプル数を 3 として測定を行っていたが、体系化するために、サンプル数及び測定回数を増やす必要がある。

電荷量の比較で 50pC から 300pC でその間の部分放電電圧を比較してきたが、各電荷量の部分放電の発生時間と劣化の関係性を求め、ケーブルに大きな劣化を及ぼす可能性のある部分放電と、そうでない部分放電の分岐点となる電荷量を求め、その電荷量を下に部分放電電圧を比較するといった手法を行う方が部分放電試験としての精度が上がると考えられる。

---

# 謝辞

本研究を進めるにあたり、非常に多くの方のご指導・ご支援を頂きました。ここに僅かながらも感謝の意を述べたいと思います。

指導教員である日高邦彦教授は卒業論文、修士課程論文を通じ三年間お世話になりました。研究に対するアドバイスや取り組み方のみならず、人生の師として非常に多くのことを学ばせて頂きました。常に的確なアドバイスを頂き、その深い考察は常に研究を昇華させ、私の修士課程論文を完成させるに至りました。感謝の念に堪えません。

熊田亜紀子准教授は、日頃から頻繁に相談させて頂きました。どんな些細な質問にも懇切丁寧に答えて頂き、研究全般にわたり大変お世話になりました。何事も迅速にこなす様にはとても感銘を受け私の研究に対する姿勢を引き締めて頂きました。

松岡成居助教には、実験装置の工作时に熱意ある指導を頂きました。また日々コミュニケーションを多くとって頂き、研究生活を非常に充実したものとしてくれました。

工作室の渋谷氏には、工作时に非常に多くのアドバイスを頂き、実験装置作成をスムーズに進めることができました。

博士課程2年の松本洋和氏、研究室の最上学年として研究室を統率し大変お世話になりました。博士課程2年の Deng Junbo 氏は中国からの留学生であり国際交流の楽しさを学ばせて頂きました。博士課程1年の武田敏信氏は、研究の些細なことでも相談させて頂き多くの問題を解決して頂きました。

修士課程2年の田中大樹氏は卒論生の時から3年間苦楽を共にし、研究の相談のみならず、プライベートでも仲良くして頂きました。山口祐樹氏は、席が近いこともあり非常に多く会話させて頂きました。日々ニコニコしている彼の存在は僕を癒し、研究のモチベーションを高めてくれました。

修士課程1年の岡崎洋平君は、昼休みにキャッチボールをする等研究以外の面でもお世話になりました。老田友紀君は研究室のムードメーカーであり、常に研究室を盛り上げて頂きました。道念大樹君は熱心に研究に打ち込んでおり常に鼓舞されておりました。

卒論生の宇尾寛志君は研究室の雑用を積極的に引き受け気持ちよく研究に打ち込むことができました。米澤寛君は、プライベートでも接することが多く、研究室生活を充実させてくれました。また共同研究者でもある fatemeh さんは、実験を効率よく進めることができ、また研究に対する

---

意識の高さに日々驚かされ多くの事を学ばせて頂きました。

最後になりましたが、住友電気工業株式会社の増田孝人氏、滝川裕史氏、西村崇氏には非常にお世話になりました。また実験装置の提供など多くのご支援があり本研究を遂行することができました。厚く御礼申し上げます。

日高熊田研究室では卒業論文、修士課程論文と3年間在籍致しました。この3年間で学んだものは私の宝物であり、胸をはって社会に飛び立とうと思います。再度本研究を遂行するにあたりお世話になった方々にお礼を申し上げ私の謝辞とさせていただきます。

皆様誠にありがとうございました。

## 参考文献

- [1] A.C. ローズ・インネス, E.H. ロディリック, 「超電導入門」, 産業図書
- [2] 松葉博則, 「超電導工学」, 東京電機大学出版局
- [3] 増田孝人他, 「高温超電導ケーブルの技術とその開発動向」, SEI テクニカルレビュー, 第 165 号, pp.15-19, 2004
- [4] Alexander Bulinski and John Densley, “High Voltage Insulation for Power Cables Utilizing High Temperature Superconductivity”, IEEE Electrical Insulation Magazine, Vol.15, Issue2, Part2, 2005, pp.14-22
- [5] 畑良輔, 「ポリプロピレンラミネート紙の絶縁特性向上と大容量電力ケーブルへの適用」, 東京大学博士論文, 2006
- [6] 放電ハンドブック (下), p.121, 初版 (1998), 電気学会
- [7] 久保、宮崎、松田他: 「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 52-A53 (1977)
- [8] 畑、久保、宮崎他: 「275kV ポリプロピレンラミネート紙絶縁 OF ケーブルの開発」, 住友電気・第 115 号、昭和 54 年 8 月号
- [9] K.Matsuura, H.Kubo, T.Miyazaki, ”DEVELOPMENT OF POLYPROPYLENE LAMINATED PAPER INSULATED EVH POWER CABLES”, IEEE Underground Transmission and Distribution Conference, Atlantic City (1976)
- [10] 放電ハンドブック (上), p.47, 初版 (1998), 電気学会
- [11] <http://nihon-keisokuki.com/index.htm>, (株) 日本計測器製造所ホームページ
- [12] 松本淳平, 「高温超電導ケーブル絶縁における部分放電計測」, 東京大学修士論文, 2006
- [13] 西村崇, 「高温超電導における PPLP バットギャップ内の部分放電特性」, 東京大学修士論文, 2007
- [14] J. Dutton: ”A Survey of Electron Swarm Data” J.Phys.Chem.Ref.Data, vol.4, No.3, p607 (1975)

## 発表文献

- [1] 鈴木雄斗, 松岡成居, 熊田亜紀子, 日高邦彦, 「CF<sub>3</sub>I ガスのカー効果」放電学会年次大会, 2007, 11 月
- [2] 鈴木雄斗, 松岡成居, 熊田亜紀子, 日高邦彦, 「気体 Kerr 効果を使用した高電圧測定器」放電・開閉保護・高電圧合同研究会, 2007, 11 月
- [3] 安井 遼, 鈴木雄斗, 松岡成居, 熊田亜紀子, 日高邦彦, 「気体 Kerr 効果を用いた大気中イオン流場における空間電界測定」, 電気学会全国大会, 2008, 3 月
- [4] 西村崇, 鈴木雄斗, 熊田亜紀子, 日高邦彦, 滝川裕史, 増田孝人, 「室温空気、窒素及び液体窒素環境下における PPLP バットギャップ内の部分放電計測」, 電気学会全国大会, 2008, 3 月
- [5] Y.Suzuki, S.Matsuoka, A. Kumada, K. Hidaka, H.Takigawa, T.Masuda, ‘Partial Discharge in high temperature superconducting cables impregnated with air, nitrogen gas and liquid nitrogen.’, International Workshop on High Voltage Engineering , 2008, October

## 受賞

- 2007年放電学会年次大会優秀論文発表賞