

真空中における複合絶縁系の放電特性 に関する研究

孔 飛

真空中における複合絶縁系の放電特性に関する研究

目 次

第 1 章 緒論	1
1. 1 真空電力機器	1
1. 2 真空遮断器の状態診断技術に関する研究動向	4
1. 2. 1 真空遮断器の構造	4
1. 2. 2 真空遮断器の状態診断技術	6
1. 3 真空インタラプタ内部における放電現象および放電パターン	10
1. 3. 1 真空中における放電現象	10
1. 3. 2 真空インタラプタ内部における放電パターン	12
1. 4 本論文の目的および構成	15
1. 4. 1 本論文の目的	15
1. 4. 2 本論文の構成	15
第 1 章の参考文献	17
第 2 章 真空ギャップにおける絶縁破壊	21
2. 1 まえがき	21
2. 2 実験装置と実験方法	21
2. 2. 1 c-a/c-s-a 電極構成	21
2. 2. 2 実験回路と測定系	22
2. 3 c-a 電極系におけるギャップ放電特性	25
2. 3. 1 絶縁破壊時における電圧・電流特性	25
2. 3. 2 絶縁破壊進展時間のギャップ長依存性	26
2. 3. 3 絶縁破壊時におけるシールド電位の推移	30
2. 4 c-s-a 電極系におけるシールドを介するギャップ放電特性	34

2. 4. 1	部分破壊時のシールド電位の推移	34
2. 4. 2	全路破壊時のシールド電位の推移	37
2. 5	まとめ	37
第2章の参考文献		38

第3章 真空中固体絶縁物を介する沿面放電 41

3. 1	まえがき	41
3. 2	実験装置と実験方法	41
3. 2. 1	c-i-a 電極構成	41
3. 2. 2	実験回路と測定系	44
3. 3	c-i-a 電極構成におけるフラッシュオーバー	44
3. 3. 1	沿面放電時における電圧・電流特性	44
3. 3. 2	沿面放電進展時間の沿面距離依存性	49
3. 4	まとめ	52
第3章の参考文献		53

第4章 真空中複合絶縁系における放電特性 55

4. 1	まえがき	55
4. 2	c-s-i-a 複合経路の放電	55
4. 2. 1	c-s-i-a 電極構成	55
4. 2. 2	陰極－シールド接触時における放電過程	55
4. 2. 3	陰極－シールド非接触時における放電過程	58
4. 2. 4	c-s-i-a 電極系における放電特性	61
4. 3	c-i-s-a 複合経路の放電	65
4. 3. 1	c-i-s-a 電極構成	65
4. 3. 2	シールド－陽極接触時における放電過程	68

4. 3. 3 シールドー陽極非接触時における放電過程	68
4. 3. 4 c-i-s-a 電極系における放電特性	70
4. 4 まとめ	76
第4章の参考文献	78

第5章 真空中放電経路の識別手法と実験的検証 79

5. 1 まえがき	79
5. 2 放電進展特性に基づく放電経路の識別手法	79
5. 2. 1 各放電経路における特徴量の抽出	79
5. 2. 2 放電経路識別フロー	83
5. 3 VIモデルにおける検証実験	86
5. 3. 1 検証実験用 VI モデル	86
5. 3. 2 検証実験結果と考察	86
5. 4 まとめ	102

第6章 総括 103

6. 1 まえがき	103
6. 2 本研究で得られた成果	103
6. 2. 1 真空ギャップにおける絶縁破壊特性	103
6. 2. 2 真空中絶縁物を介する沿面放電特性	104
6. 2. 3 真空中複合絶縁系における放電特性	105
6. 2. 4 真空中放電経路の識別手法と実験的検証	105
6. 3 本研究の学術的および工学的意義	106
6. 4 今後の展望	106

謝辞.....	109
本論文に関して発表した論文.....	111

第 1 章 緒論

1. 1 真空電力機器

真空とは通常の大気圧よりも低い圧力の気体で満たされた空間の状態を表し、表 1.1 のように低真空，中真空，高真空，超高真空などに分類される．真空空間においては電流のキャリア源となる気体分子がほとんど存在せず，また電子や気体の平均自由行程が電極間の距離よりも長いという特性より，多くの電子は電極間で気体分子と衝突せず，電子は増殖しない．すなわち，真空は電子を増殖させない媒質であり，優れた電気絶縁媒体として，1 mm のギャップで 20 kV 程度の電圧に比較的容易に耐えることができる^[1-3]．

真空の利用は電気エネルギーの発生と制御に欠かせないものとなっている．真空は優れた電気絶縁媒体であるとともに，高い電流遮断（アーク消弧）能力を持ち，高電圧・放電工学の分野では，真空遮断器（Vacuum circuit breaker: VCB），パルスパワー機器を含む各種の荷電粒子加速器・発生器，人工衛星搭載の太陽電池パネル，電子源を用いる次世代薄型ディスプレイなど，電力，高エネルギー粒子，真空マイクロエレクトロニクス，その他の幅広い分野に適用されている^[4-6]．

現在，電力分野では，産業活動の発展とともに電力の安定供給に対する要求が年々高まっており，電力システムの大容量化，高信頼化を確保しなければならない．この役割を担っているのが開閉器（Switchgear）であり，送配電容量の増加とともに遮断容量が大きくなり，高性能な開閉器の開発が注目されている^[7-10]．VCB は高真空を絶縁・消弧媒体として，図 1.1 に示すように，1890 年に初の特許として提案され，絶縁耐力の高さ，遮断容量の大きさ，保守点検の簡易性などの利点から，1980 年代から中電圧領域（84 kV 以下）で用いられる遮断器として目覚ましい発展を遂げている^[5]．一方，高電圧領域（120 kV 以上）の遮断器で多く使用されている SF₆ ガスが，1997 年の地球温暖化防止京都会議（COP3）で温

Table 1.1 Vacuum classification.

Classification	Pressure range
Low Vacuum	$10^5 \text{ Pa} \sim 10^2 \text{ Pa}$
Medium Vacuum	$10^2 \text{ Pa} \sim 10^{-1} \text{ Pa}$
High Vacuum	$10^{-1} \text{ Pa} \sim 10^{-5} \text{ Pa}$
Ultra-high Vacuum	$10^{-5} \text{ Pa} \sim 10^{-9} \text{ Pa}$
Extreme High Vacuum	$< 10^{-9} \text{ Pa}$

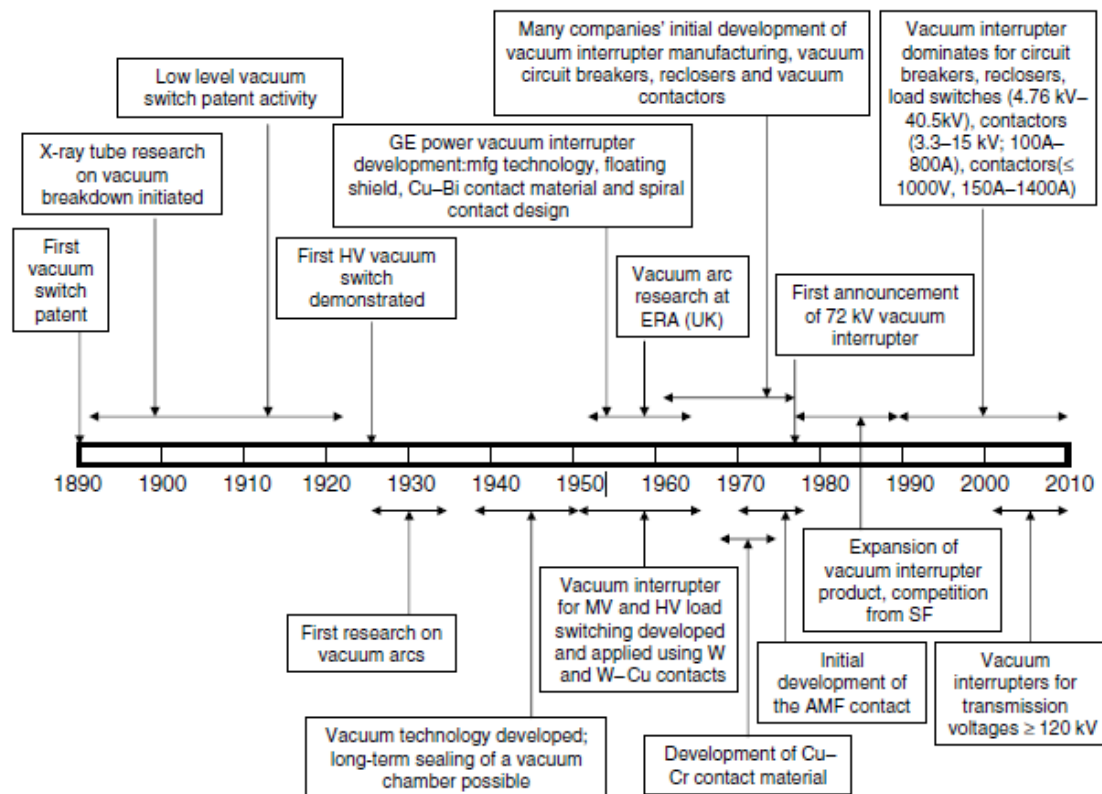


Fig. 1.1 Time-line of the significant developments in vacuum interrupter technology ^[5].

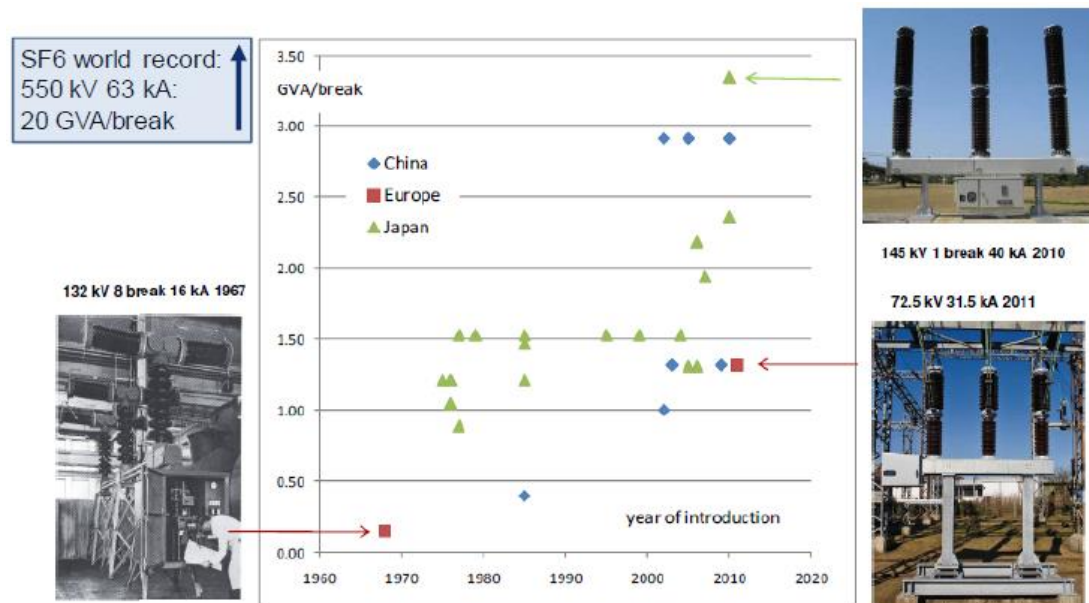


Fig. 1.2 Increase in breaking capacity of HV vacuum circuit breaker ^[12].

暖化ガスに指定された。電気事業連合会では、1998 年 4 月に「電気事業における SF₆ 排出抑制に関する自主行動計画」を策定し、いち早く SF₆ ガス排出の削減に取り組んでいる^[11]。その対策として、VCB の適用拡大による脱 SF₆ ガスへの取り組みが行われており、環境適合型である VCB のさらなる高電圧化・大容量化・高信頼度化が期待されている。図 1.2 に各国の VCB の遮断容量の増加を示す^[12]。2000 年以降、VCB の遮断容量が急激に増加しており、日本では 145 kV/40 kA 一点切りの VCB が開発されている。さらに、多点切りにより VCB の絶縁耐圧を向上させる研究と開発も検討されている^[7-9]。

1. 2 真空遮断器の状態診断技術に関する研究動向

1. 2. 1 真空遮断器の構造

VCB は接点を真空容器内に密閉した真空インタラプタ (Vacuum interrupter: VI) と操作機構などから構成されている。その構成例を図 1.3 に示す^[5]。VI は絶縁物に固定され、その固定軸と可動軸はそれぞれ主回路導体に接続される。

VI の内部構造を図 1.4 に示す。固体絶縁物製の容器の内部を 10^{-4} Pa の高真空に保ち、裸電導体を固体絶縁物で支持する円筒形状をとっている。固体絶縁物には主に不透明なアルミナセラミックが用いられる。電極はそれぞれ固定軸導体と可動軸導体の先端に取り付けられている。可動軸導体と絶縁容器に設けられるフランジとの間に、ベローズが接続されている。このベローズにより、容器の内部を高真空に保持したまま、外部から可動軸導体を軸方向に駆動することができ、接点の開閉動作を行う。

通電中に接点を開極すると真空アークが発生する。真空アークにより生じた金属蒸気が周囲に拡散し、固定絶縁物に付着することで絶縁性能が低下するのを防止するため、接点と固定絶縁物との間に浮遊電極である中間シールドが設置される。一方、金属導体・固定絶縁物・真空ギャップが形成する三重点が電界

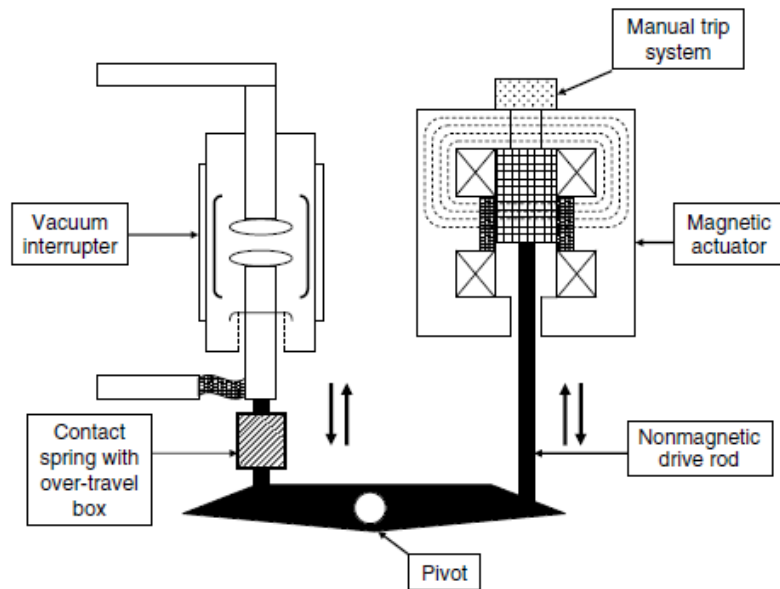


Fig. 1.3 Structure of vacuum circuit breaker [5].

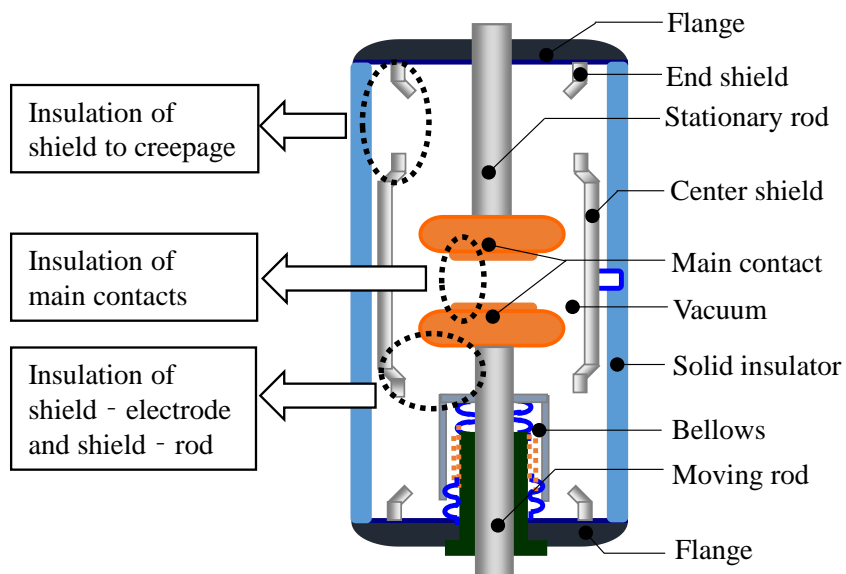


Fig. 1.4 Structure and electrical insulation of vacuum interrupter.

集中による絶縁上の弱点になるため、絶縁円筒端部に電界緩和シールド (End shield) が設置される。

1. 2. 2 真空遮断器の状態診断技術

図 1.4 において、VI 内部の電気絶縁構成は、以下の三つに大別される。

1. 主接点間絶縁
2. 中間シールドー接点間絶縁
3. 固体絶縁沿面および中間シールド周辺絶縁

これらの箇所での絶縁破壊時に起こる放電は、メカニズムにより、ギャップ放電と沿面放電に分けられる。真空遮断器の製品試験・運用時において、これらの絶縁上の弱点により部分放電・絶縁破壊などの故障が発生する可能性がある。そこで、VI の運転状態や絶縁状況を監視するため、絶縁などの状態診断技術に関する研究が行われている^[13-17]。

Hikita らは、モデル VI において低真空度 (3 Pa) の際に部分放電 (Partial discharge: PD) が発生することに対して、各種センサーを用い、電圧・電流・電磁波・音波をそれぞれ取得し、各信号の診断精度を比較した^[16]。その結果、表 1.2 に示すように、検出抵抗・高周波 CT を介する PD 電流信号の取得は容易であるが、電磁波と音波の取得は困難であることを示した。

Kulkarni らは、VI において短絡試験時の中間シールド電位に注目し、中間シールド電位と真空アーク形態の関係を検討した。図 1.5 に示すように、真空アークからイオン、電子、中性金属蒸気などが中間シールドおよび絶縁円筒に向かって拡散する^[18]。これにより、中間シールドと主接点間にシールド電流が流れ、中間シールド電位が変動する。これらの荷電粒子の電流と中間シールド電位はアーク形態と挙動に依存する^[18-22]。図 1.6 に中間シールド電位と遮断電流の関係を示す^[22]。遮断電流の増大とともに、中間シールド電位が負に上昇する。これは遮

Table 1.2 Specification of various measurement sensors ^[16].

Sensor	Measured object	Frequency band	Company	Model	PD detection (@ 3 Pa)
Resistor (1k Ω)	Current	-	-	-	Easy
CT1	Current	140 Hz –35 MHz	Stangenes Industries	0.5-1.0W	Easy
CT2	Current	10 kHz –250 MHz	ETS-LINDGREN	94430-1	Easy
CT3	Current	1 MHz –1 GHz	ETS-LINDGREN	94111-1	Modest
TEV sensor	Voltage	1 MHz –50 MHz	HVPD	CC-SG1	Easy
Horn antenna	Electromagnetic wave	0.75 GHz –5 GHz	SCHWARZBECK	BBHA 9120A	Difficult
AE sensor	Acoustic wave	10 kHz –1 MHz	NF	AE-900S-WB	Difficult

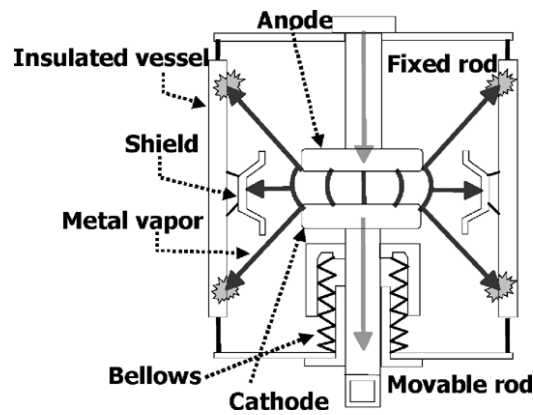


Fig. 1.5 Diffusion of ion and metallic particles from main contact in vacuum interrupter ^[18].

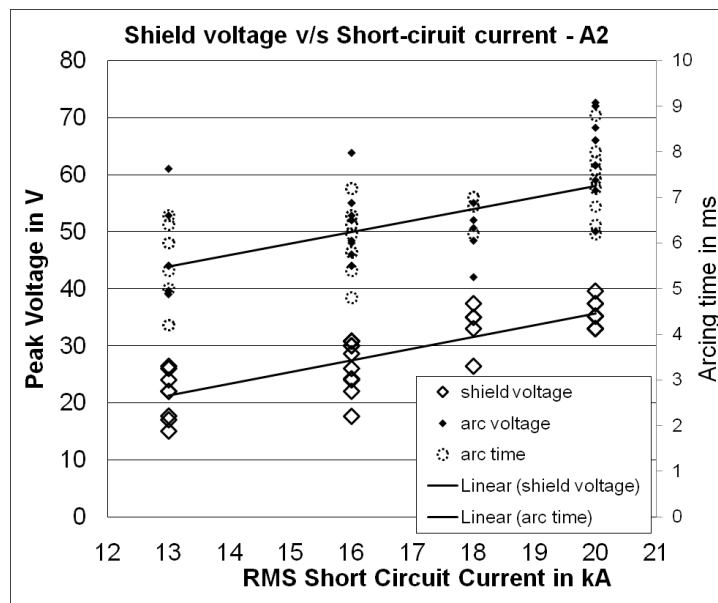


Fig. 1.6 Variation of shield potential with short-circuit current for vacuum interrupter ^[22].

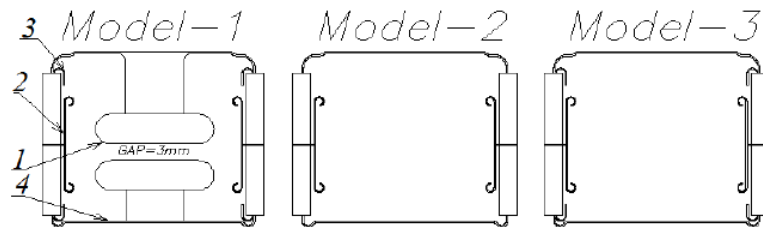


Fig. 1.7 Various VI samples ^[17].
(1-main contact, 2-center shield, 3-end shield, 4-end plate)

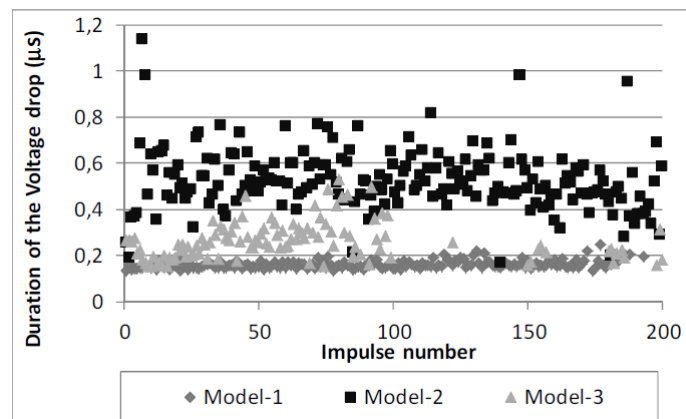


Fig. 1.8 Typical distribution of the durations of the voltage drop for different samples ^[17].

断電流の増大に伴い真空アーク柱が膨張し、中間シールドに到達する荷電粒子量が増加するためと考えられている。以上の結果により、VIにおける短絡試験時のアーク形態と挙動に対して、中間シールド電位は重要な診断パラメータであると考えられる。

Poluyanova らは、高真空度における VI 内部の絶縁破壊に対して、電圧波形と破壊箇所・放電経路の関係について検討を行っている^[17]。図 1.7 に 3 種類の試験用 VI モデルを示す。Model-1 は主接点、中間シールド、端部電界緩和シールドにより構成され、ギャップ間を 3 mm と短くすることで絶縁破壊の発生箇所を主接点間のギャップ放電 (Breakdown: BD) にする。Model-2 は中間シールドは設置するが、主接点および端部シールドは無く、絶縁破壊の発生箇所を絶縁物を介する沿面フラッシュオーバー (Flashover: FO) とする。Model-3 は中間シールドおよび端部シールドを設置するが、主接点はなく、有り得る絶縁破壊の発生箇所は中間シールドを介するギャップ放電あるいは沿面放電複合経路である。3 つの試験用 VI モデルに対して、標準雷インパルス (1.2/50 μ s) 電圧を印加し絶縁破壊を発生させ、電圧波形の立ち下がり時間を考察した。図 1.8 に各モデルにおける電圧波形の立ち下がり時間の分布図を示す。Model-1 における主接点間の BD においては電圧の立ち下がり時間は早く、かつばらつきが小さい。Model-2 における沿面 FO (triple point-center shield- end plate) においては電圧の立ち下がり時間は長くなり、かつばらつきが大きくなる。Model-3 における複合経路 (end shield-center shield- end shield) における電圧の立ち下がり時間は、Model-2 と Model-3 の中間値であることがわかった。この結果から、絶縁破壊または沿面フラッシュオーバー時の電圧波形の立ち下がり時間により、VI 内部の放電状況が示唆されることがわかった。しかしながら、各放電の開始・進展特性および放電メカニズムなどは明確ではない。

1. 3 真空インタラプタ内部における放電現象および放電パターン

1. 3. 1 真空中における放電現象

真空中の2つの放電現象，すなわち，ギャップ放電と沿面放電のメカニズムを以下に述べる．

ギャップ放電は，基本的には向かい合う金属間に発生する．真空中におかれたギャップ間には，放電開始時に電流のキャリアとなるガスがほとんど存在しないため，ギャップ間の絶縁破壊 (BD) は陰極からの電子放出がトリガーとなり，BD に至るメカニズムとしては，陰極加熱説，陽極加熱説，クランプ説などが認められている^[23,24]．BD の発生は電極形状，電極材料，ギャップ長，表面状態と処理の程度，印加電圧波形など多くの因子により影響される^[25-27]．図 1.9 に示すように，陰極加熱過程に基づく BD 発生過程では，陰極の電界電子放出を起点として，その後，電界放出電流によって加熱された微小突起の蒸発によりカソードプラズマが形成され，陽極に向かって拡大するというモデルが考察されている^[28-32]．このモデルにおいて，カソードプラズマは陰極点領域 (Cathode spot region) およびプラズマジェット拡大領域 (Plasma jet expansion) に分けられる．カソードプラズマの拡大速度は陰極の蒸発過程における運動量とエネルギーの変換方程式で決まり， 10^4 m/s 程度であると考察されている^[31-34]．

沿面放電は，電極間に置いた固体絶縁物の表面で発生する．真空中の2つの導体を固体絶縁物によって支持した場合の耐電圧は，絶縁物上の沿面放電の発生により，単純な真空ギャップの場合よりも低くなる^[1]．沿面放電メカニズムとしては，2次電子なだれ (Secondary electron emission avalanche: SEEA) 機構に伴う放出気体中の放電による理論が提唱されている^[4, 35]．図 1.10 に SEEA と放出気体による沿面放電過程を示す^[36]．これは，真空・電極および固体絶縁物から成る陰極三重点の電子放出を放電起点として (図 1.10-1)，固体絶縁物上 SEEA に伴う帯電が形成され^[37, 38]，それとともにガスが放出され (図 1.10-2a, 2b)，最終的

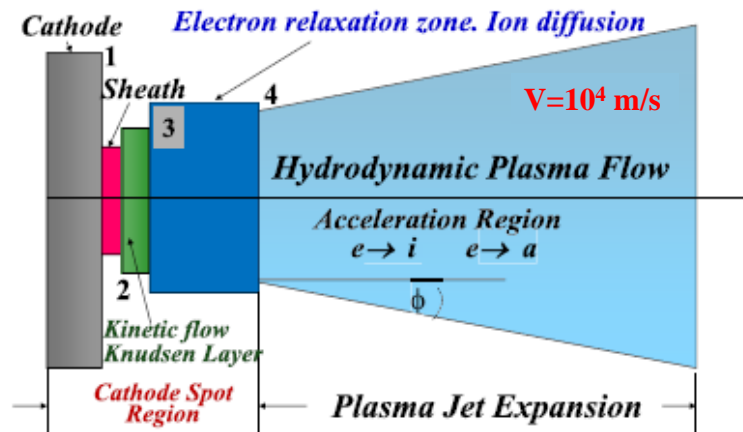


Fig. 1.9 Schematic diagram of the cathode plasma flow in BD process ^[32].

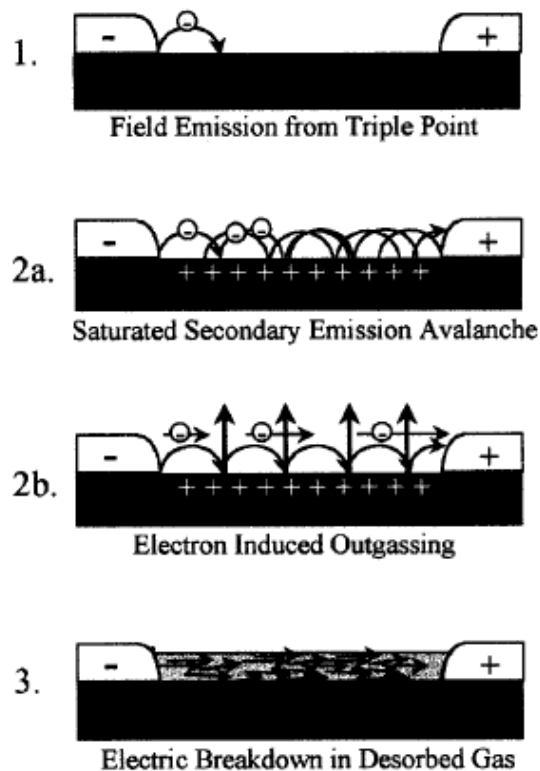


Fig. 1.10 Physical processes involved SEEA and outgassing in surface flashover ^[36].

にガスの電離により導電チャネルが形成される過程（図 1.10-3）である^[39-42]。

1. 3. 2 真空インタラプタ内部における放電パターン

真空インタラプタ内部における放電現象を理解するためには、放電メカニズムに基づき、VI 内部で起こり得る放電パターンを分類することが必要である。

図 1.4 に示した VI 内部の電気絶縁構成において起こり得る放電箇所を図 1.11 に示す。VI は真空、金属、固体絶縁物で構成された複合絶縁系であり、真空ギャップ間の BD、絶縁物を介する沿面放電および両者の組み合わせが考えられる^[43-48]。一般的に、ギャップ間の BD と沿面放電はいずれも陰極上の電子放出を起点として陽極に進展するため、放電は陰極から始まると考えられる。VI 内部の複合絶縁系においては、図 1.12 に示すように、放電パターンは以下の 7 種に分類される。ここでは、陰極 (cathode) を c, 陽極 (anode) を a, 中間シールド (以降、単にシールド (shield) と呼ぶ) を s, 固体絶縁物 (insulator) を i で表す。

真空ギャップ間の絶縁破壊 (BD) 経路：

- (a) 陰極－陽極 (c-a)
- (b) 陰極－シールド－陽極 (c-s-a)

沿面放電 (FO) 経路：

- (c) 陰極－固体絶縁物－陽極 (c-i-a)

複合経路 (BD, FO)：

- (d) 陰極－シールド－固体絶縁物－陽極 (c-s-i-a)
- (e) 陰極－固体絶縁物－シールド－陽極 (c-i-s-a)

部分破壊により陽極に達しない経路：

- (f) 陰極－シールド (c-s)
- (g) 陰極－固体絶縁物－シールド (c-i-s)。

VCB の絶縁耐圧を向上するためには、VI 内部における上記の 7 種の放電パター

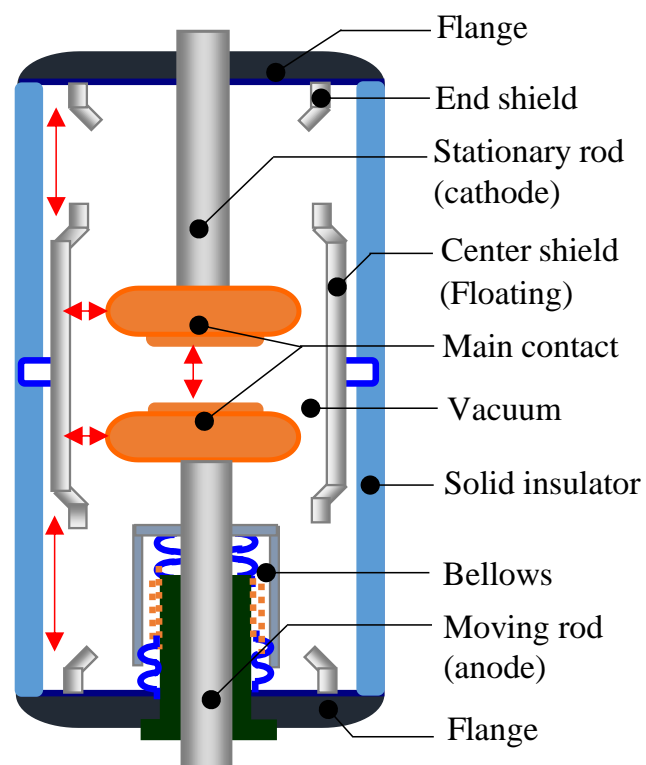


Fig. 1.11 Possible discharge path in vacuum interrupter when the stationary rod electrode is cathode.

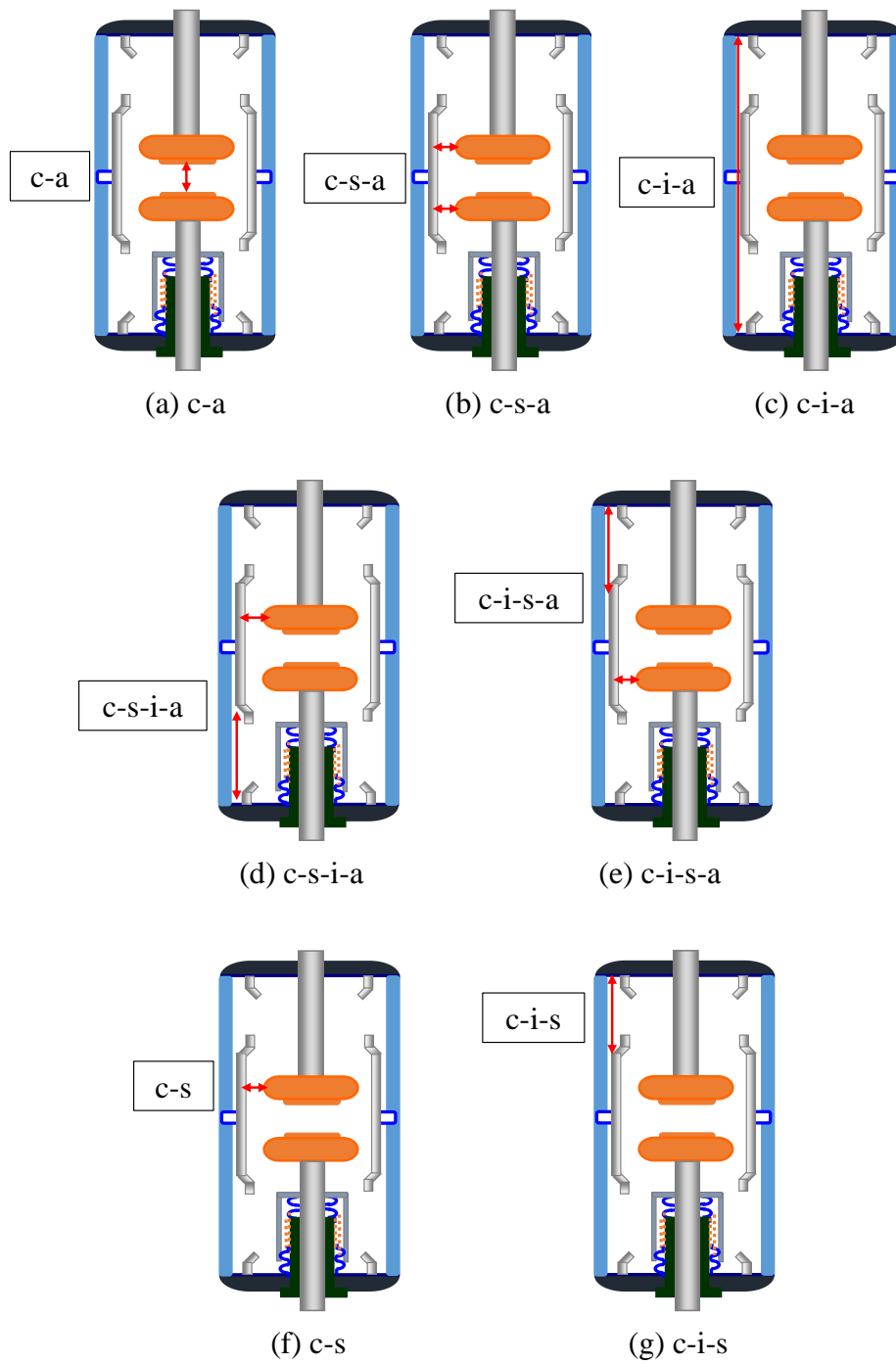


Fig. 1.12 Classification of various discharge paths.

ンに対して、放電メカニズムに基づく放電現象の理解が求められる。

1. 4 本論文の目的および構成

1. 4. 1 本論文の目的

VIにおける絶縁破壊の起点となり得る電気絶縁上の弱点の検出は、VIの絶縁設計や製品試験・実運用において極めて重要な要素である。VI内部の絶縁状況を把握・診断するためには、VI内部における放電形態および放電経路の識別が重要である。しかしながら、固体絶縁物には主に不透明なセラミックが用いられているため、VI内部における放電箇所および放電経路の光学的な直接観測は極めて困難である。したがって、放電形態および放電経路によって異なる放電波形（電圧波形・電流波形など）の特徴量や放電メカニズムとの関係に基づいて、VI外部からVI内部における放電形態および放電経路の同定を行う手法が必要であると考えられる。

本研究では、VI内部の真空中複合絶縁系における各種放電パターンを模擬し、印加電圧・放電電流・シールド電位の推移の特徴やパラメータの抽出を行い、放電形態および放電経路の識別手法の確立に貢献することを目的とする。

1. 4. 2 本論文の構成

本論文は、全6章により構成されている。以下に第2章以降の各章の概要を示す。

第2章 真空ギャップにおける絶縁破壊

本章では、陰極－陽極 (c-a)、陰極－シールド－陽極 (c-s-a) 電極系を構築し、負極性標準雷インパルス電圧を印加した時の真空ギャップ間のBDにおいて、印加電圧、放電電流、シールド電位を測定することにより、BD過程を明らかにする。BD進展時間(T_{BD})を定義し、 T_{BD} の印加電圧依存性およびギャップ長依存

性について検討を行う。

第3章 真空中固体絶縁物を介する沿面放電

本章では、陰極－絶縁物－陽極（c-i-a）電極系において、固体絶縁物を介する沿面放電に着目し、印加電圧、放電電流および絶縁物の表面電位を測定する。沿面放電進展時間（ T_{FO} ）を定義し、 T_{FO} の印加電圧依存性および沿面距離依存性について検討を行う。

第4章 真空中複合絶縁系における放電特性

本章では、シールド（浮遊電極）と固体絶縁物を介する複合絶縁系の放電経路について検討する。構築された陰極－シールド－絶縁物－陽極（c-s-i-a）および陰極－絶縁物－シールド－陽極（c-i-s-a）における放電形態を類別し、放電発生・進展メカニズムについて検討を行う。

第5章 真空中放電経路の識別手法と実験的検証

本章では、前章までに検討された複合絶縁系における放電パターンの特徴量を抽出し、放電進展特性に基づく放電経路の識別手法を提案する。提案された識別手法により、VIモデルにおける放電経路の検証実験を行う。

第6章 総括

本章では、本研究の成果をまとめ総括する。

第 1 章の参考文献

- [1] 電気学会技術報告第 757 号：「真空中での荷電粒子の発生と放電の制御—最近の研究動向と技術解説—」，1999.
- [2] 電気学会技術報告第 1001 号：「高エネルギー密度化に関わる真空中の放電制御技術」，2005.
- [3] 山本，斉藤，大久保，堀田，山内，鶴田：「真空放電の制御と応用」，電気学会論文誌 A，Vol.126，No.8，pp.731-738，2006.
- [4] 電気学会技術報告第 586 号：「真空中での放電の利用とその抑制」，1996.
- [5] Paul G. Slade: “The vacuum interrupter: Theory, Design, and Application”，CRC press, 2007.
- [6] H. Okubo, H. Kojima, K. Kato, N. Hayakawa and M. Hanai: “Advanced Electrical Insulation Techniques for Higher Voltage Vacuum Interrupters”，CIGRE B3/D1 Colloquium, No.218 (2013).
- [7] 大久保：「環境低負荷の真空遮断器(VCB)高電圧化技術動向」，電気学会論文誌 B，Vol.123，No.2，pp.129-132，2003.
- [8] 電気学会技術報告第 1036 号：「次世代中電圧スイッチギヤの技術」，2005.
- [9] Z. Liu, J. Wang, S. Xiu, Z. Wang, S. Yuan, L. Jin, H. Zhou and R. Yang : “Development of High-Voltage Vacuum Circuit Breakers in China”，IEEE Transactions on Plasma Science, Vol.35, No.4, pp.856-865, 2007.
- [10] L. T. Falkingham: “Vacuum Interrupter Design for HV and VHV Applications”，the 22nd International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum, pp.204-207, 2006.
- [11] 斉藤：「真空遮断器の最近の動向」，Journal of the Vacuum Society of Japan, Vol.52, No.7, pp.383-387, 2009.
- [12] “The Impact of the Application of Vacuum Switchgear at Transmission Voltages”，CIGRE WG A3.27, 2012.
- [13] W. F. H. Merck, G. C. Damstra, C. E. Bouwmeester and R. J. B. Gruntjes: “Methods for Estimation of the Vacuum Status in Vacuum Circuit Breakers”，IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol.6, No.4, pp.400-404, 1999.
- [14] W. Li, J. Wu, T. Tian, “Relationship of Potential on Shielding Cover and Vacuum Degree in Arc Extinguish Chamber”，High Voltage Engineering, Vol.33, No.6, 2007.
- [15] M. Kamarol, S. Ohtsuka, M.Hikita, H.Saitou and M. Sakaki: “Determination of Gas Pressure in Vacuum Interrupter Based on Partial Discharge”，IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol.14, No.3, pp.593-599, 2007.
- [16] T. Nakaoka, Y. Tai, M. Kamarol, M. Kozako, M. Hikita, K. Sato, N. Tetsu, H. Urai and K. Tsuchiya: “Development of Partial Discharge Detection and Diagnostic Methods of Vacuum Circuit Breaker”，the 26th International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum, pp.485-488, 2014.

- [17] Irina N. Poluyanovo, Vladimir A. Bugayov and Anton V. Vykhodtsev: "Voltage Shape of Impulse Breakdown in Internal Insulation of VI", the 26th International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum, pp.441-444, 2014.
- [18] S. Suzuki, T. Matsuo, R. Sakuma and S. Yanabu: "Diffusion of Metal Vapor from Electrodes to Vacuum Interrupter Shield and its Dependence on Electrode Construction", IEEE Transactions on Plasma Science, Vol.34, No.2, pp.485-489, 2006.
- [19] H. Toya, T. Hayashi, and H. Sasao: "Voltage/Current Characteristics at the Metal Shield Surrounding High-current Vacuum Arcs", Journal of Applied Physics, Vol.65, No.1, pp.64-69, 1989.
- [20] Z. Zalucki, J. Kutzner and Z. Boruta: "Experimental Investigations of the Currents Collected by Metal Shields in High-Current Vacuum Arcs", IEEE Transactions on Plasma Science, Vol.23, No.6, pp.932-938, 1995.
- [21] 觸澤, 山納, 小林: 「電流零点前の真空アークから拡散する荷電粒子電流の測定」, 電気学会論文誌 A, Vol.130, No.9, pp.805-810, 2010.
- [22] S. Kulkarni, L. Andrews, S. Saravanan, S. Rayudu, and P. Shanker: "Study of Shield Potential to Understand the Arcing Behavior of Vacuum Interrupters during Short-circuit Current Interruption", the 24th International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum, pp.218-220, 2010.
- [23] 細川, 湯本: 「真空中での放電現象—放電機構とその利用—」, 電気学会論文誌 A, Vol. 14, No.2, pp.77-83, 1994.
- [24] F. R. Schwirzke: "Vacuum Breakdown of Metal Surface", IEEE Transactions on Plasma Science, Vol.19, No.5, pp.690-695, 1991.
- [25] G. Djogo, J. D. Cross: "Dependence of Gap Voltage Collapse during Vacuum Breakdown on Geometry and Plasma Dynamics", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol.4, No.6, pp.848-853, 1997.
- [26] 青木, 安川, 小島, 本間, 塩入, 大久保: 「真空中インパルス電圧印加時における電極間微小電流発生メカニズムの検討」, 電気学会論文誌 A, Vol. 130, No.9, pp.781-786, 2010.
- [27] H. Kojima, N. Hayakawa, R. Nishimura, H. Okubo, H. Sato, Y. Noda: "Conditioning Mechanism of Cu-Cr Electrode Based on Electrode Surface State under Impulse Voltage Application in Vacuum", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol.18, No.6, pp.2108-2114, 2011.
- [28] I. D. Chalmers and B. D. Phukan: "Photographic Observations of Impulse Breakdown in Short Vacuum Gaps", J. Phys. D: Appl. Phys., Vol.12, pp.1285-1292, 1979.
- [29] J. D. Cross, B. Mazurek and K. D. Srivastava: "Photographic Observations of Breakdown Mechanism in Vacuum", IEEE Transactions on Electrical Insulation, Vol.EI-18, No.3, pp.230-233, 1983.

- [30] Isak I. Beilis, "State of the Theory of Vacuum Arcs", IEEE Transactions on Plasma Science, Vol.29, No.5, pp.657-670, October, 2001.
- [31] Gennady A. Mesyats and D. I. Proskurovsky: "Pulsed Electrical Discharge in Vacuum", 1st ed., Springer-Verlag, pp.118-135, 1989.
- [32] I. I. Beilis: "Physics of Cathode Phenomena in a Vacuum arc with Respect to a Plasma Thruster Application", IEEE Transactions on Plasma Science, Vol.43, No.1, pp.165-172, 2015.
- [33] E. Hantzsche: "Theory of the Expanding Plasma of Vacuum Arcs", J.Phys.D: Applied Physics, Vol.24, pp.1339-1353, 1991.
- [34] M. B. Bochkarev, Yu. A. Zemskov and I. V. Uimanov: "High Speed and Spectroscopic Investigation of 300kV Pulsed Vacuum Spark in Centimeter Gap", the 24th International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum, pp.72-75, 2010.
- [35] G. Masten, T. Muller, F. Hegeler and H. Krompholz: "Plasma Development in the Early Phase of Vacuum Surface Flashover", IEEE Transactions on Plasma Science, Vol.22, No.6, pp.1034-1042, 1994.
- [36] A. A. Neuber, M. Butcher, H. Krompholz, L. L. Hatfield and M. Kristiansen: "The Role of Outgassing in Surface Flashover under Vacuum", IEEE Transactions on Plasma Science, Vol.28, No.5, pp.1593-1598, 2000.
- [37] J. Zhan, H. Mu, X. Huang and G. Zhang: "Theoretical and Simulation Research on Self-stabilizing Secondary Electron Emission Process across Solid Dielectrics in Vacuum", Journal of Applied Physics, Vol.113, No.1, 2013.
- [38] Y. Nakano, H. Kojima, N. Hayakawa, K. Tsuchiya and H. Okubo: "Pre-discharge and Flashover Characteristics of Impulse Surface Discharge in Vacuum", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol.21, No.1, pp.403-410, 2014.
- [39] R. A. Anderson and J. P. Brainard, "Mechanism of Pulsed Surface Flashover Involving Electron-stimulated Desorption", Journal of Applied Physics, Vol.51, No.3, pp.1414-1421, 1980.
- [40] A. Sivathanu Pillai and Reuben Hackam, "Surface Flashover of Solid Dielectric in Vacuum", Journal of Applied Physics, Vol.53, No.4, pp.2983-2987, 1982.
- [41] E. W. Gray: "Vacuum Surface Flashover: A High Pressure Phenomenon", Journal of Applied Physics, Vol.58, No.1, pp.132-141, 1985.
- [42] H. C. Miller: "Surface Flashover of Insulators", in Vacuum 1980-1990", IEEE Transactions on Electrical Insulation, Vol.24, No.5, pp.765-786, 1989.
- [43] W. Widl: "The Influence of The Shield on The Breakdown Behavior of Vacuum Interrupters", Physica 104C, pp.155-160, 1981.
- [44] H. C. Miller: "Electrical Discharge in Vacuum 1980-1990", IEEE Transactions on Electrical Insulation, Vol.26, No.5, pp.949-1043, 1991.
- [45] A. A. Pertsev, L. A. Rylskaya: "High Voltage Discharge at the Vacuum Interrupter Shield", 17th

- International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum, pp.240-243, 1996.
- [46] V. A. Nevrovsky and L. A. Rylskaya, "Limiting Electric Strength of Vacuum Electrode Systems Including Combined Breakdown", the 20th International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum, pp.190-193, 2002.
- [47] L. T. Falkingham, R. Reeves, C. H. Gill and S. Mistry: "Studies in Inverse Magnetron Discharges of Vacuum Interrupters: Part 1-Variations in Electric Field", the 23th International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum, pp.87-90, 2008.
- [48] L. T. Falkingham, R. Reeves, C. H. Gill and S. Mistry: "Studies in Inverse Magnetron Discharges of Vacuum Interrupters: Part 2-Variations in Magnetic Field", the 24th International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum, pp.214-217, 2010.

第2章 真空ギャップにおける絶縁破壊

2. 1 まえがき

真空インタラプタ (Vacuum interrupter: VI) 内部の主接点間、主接点－中間シールド間における絶縁破壊 (BD) は、純粋なギャップ放電とみなすことができる。一般的に、電極表面に強い電界が加えられると、電子はトンネル効果によってポテンシャル障壁を通過し真空に放出され、ギャップ間で電界電子放出電流が流れる。これとともに電極表面に残留するガスや微小粒子が放出や衝突により電離され、ギャップの電流が増大する。これらは絶縁破壊に進展する前の前駆破壊過程 (Pre-breakdown) と呼ばれる^[1,2]。その後、電界放出電流によって加熱された微小突起の蒸発により生じた導電性プラズマが、陽極に向かって進展する。電極間を導電性プラズマが満たすと、放電経路は導通に至る。BD 過程の開始から放電経路導通までの時間は前駆破壊時間 (T_p) および導電性プラズマ進展時間 (T_c) で決まる^[1]。

本章では、真空ギャップにおける BD 過程に着目し、印加電圧波形・陽極電流波形・発光強度波形と放電過程の関係を明らかにする。また、シールドを介するギャップ放電に関しては、シールド電位の推移により放電過程の検討を行う。具体的に、陰極－陽極 (c-a)、陰極－シールド－陽極 (c-s-a) 電極系を構築し、負極性標準雷インパルス電圧を印加した時の真空ギャップ間の BD において、放電経路が導通に至るまでの BD 進展時間 (T_{BD}) を定義し、 T_{BD} の絶縁破壊電圧およびギャップ長依存性について検討を行う。

2. 2 実験装置と実験方法

2. 2. 1 c-a/c-s-a 電極構成

陰極－陽極間 (c-a) における真空ギャップの放電を模擬するため、真空容器

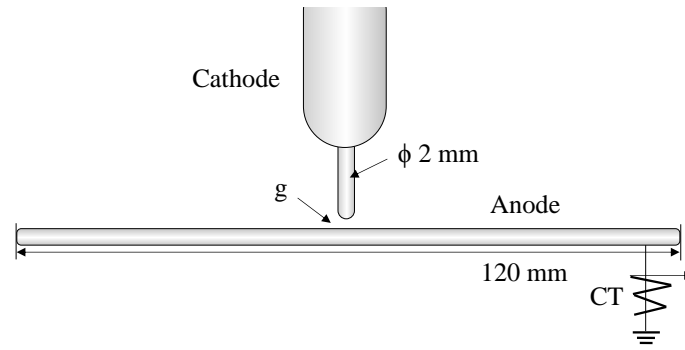
内において、図 2.1 (a) の棒－平板電極構成および (b) の棒－棒電極構成を用いた。同図 (a) の電極構成では、高電圧電極（陰極）に $\phi 2\text{ mm}$ の棒電極、接地電極（陽極）に $120\text{ mm}\times 60\text{ mm}\times 2\text{ mm}^t$ の平板電極を用いた。陰極と陽極間のギャップ長 g は、マイクロメーターによって調整可能である。同図 (b) の電極構成では、陰極および陽極はいずれも $\phi 2\text{ mm}$ の棒電極である。本電極構成では、VI 内部における中間シールドを模擬した浮遊電極 ($120\text{ mm}\times 60\text{ mm}\times 2\text{ mm}^t$) を棒電極からギャップ長 d で設置し、ギャップ放電時の浮遊電極の電位変化の検討を可能とした。陰極－シールド間のギャップ長 d および陰極－陽極間のギャップ長 g は、直線導入器によって調整可能である。

陰極－シールド－陽極 (c-s-a) 電極構成は図 2.1 (c) のように構築した。シールドは陰極と陽極の直下に置き、シールドと陰極および陽極間のギャップ長はいずれも $g_1=g_2=0.25\text{ mm}$ とした。シールド電位の推移を考察することにより 2 つのギャップ間の放電特性を明らかにする。

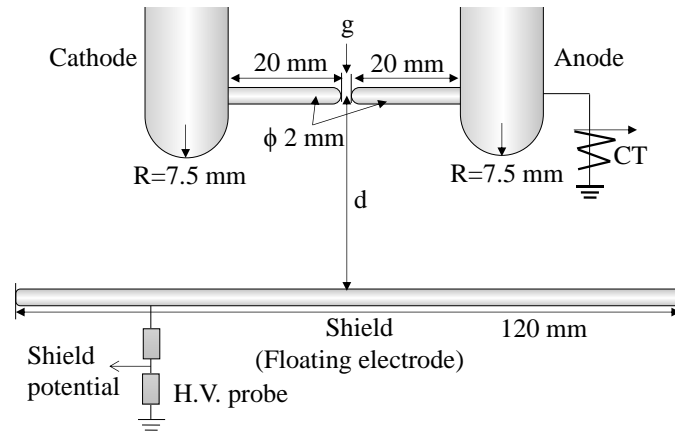
以上の 3 つの電極系の陰極, 陽極, シールドの材質はいずれも SUS304 である。

2. 2. 2 実験回路と測定系

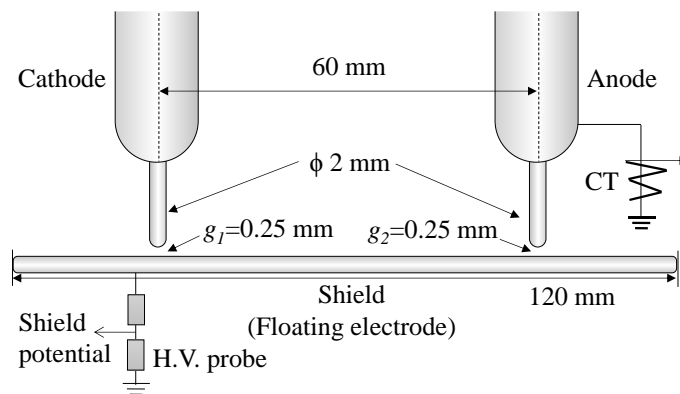
図 2.2 に真空容器の概観を示す。真空容器はステンレス (SUS304) 製で、直径 406 mm 、高さ 300 mm の円筒型であり、内容積は 38 l である。本真空容器には、排気速度 240 l/min のロータリーポンプおよび 550 l/sec のターボ分子ポンプが直列に接続されており、真空容器内の圧力を約 10^{-5} Pa オーダーまで排気することが可能である。真空容器内の圧力測定には 2 種類のキャパシタンスマノメータ（測定範囲： $10^5\sim 10^0\text{ Pa}$ および $10^2\sim 10^{-2}\text{ Pa}$ ）および電離真空計（測定範囲 $10^{-1}\sim 10^{-8}\text{ Pa}$ ）を用いた。また、この真空容器には、2 軸方向に直線導入器が装備されており、各電極を水平方向および垂直方向にそれぞれ移動させることができる。



(a) c-a (Rod-plane)



(b) c-a (Rod - rod)



(c) c-s-a

Fig. 2.1 Electrode configurations for gap breakdown.

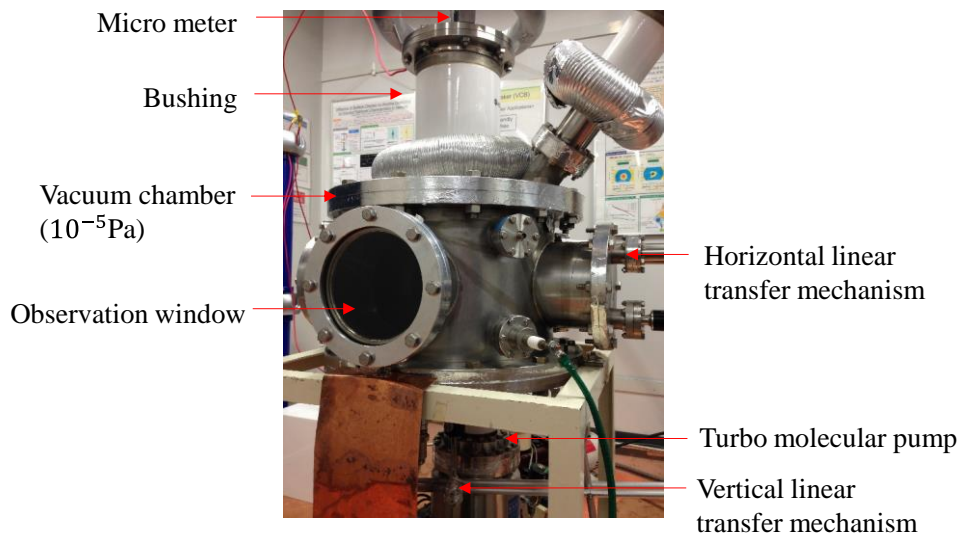


Fig. 2.2 Vacuum chamber.

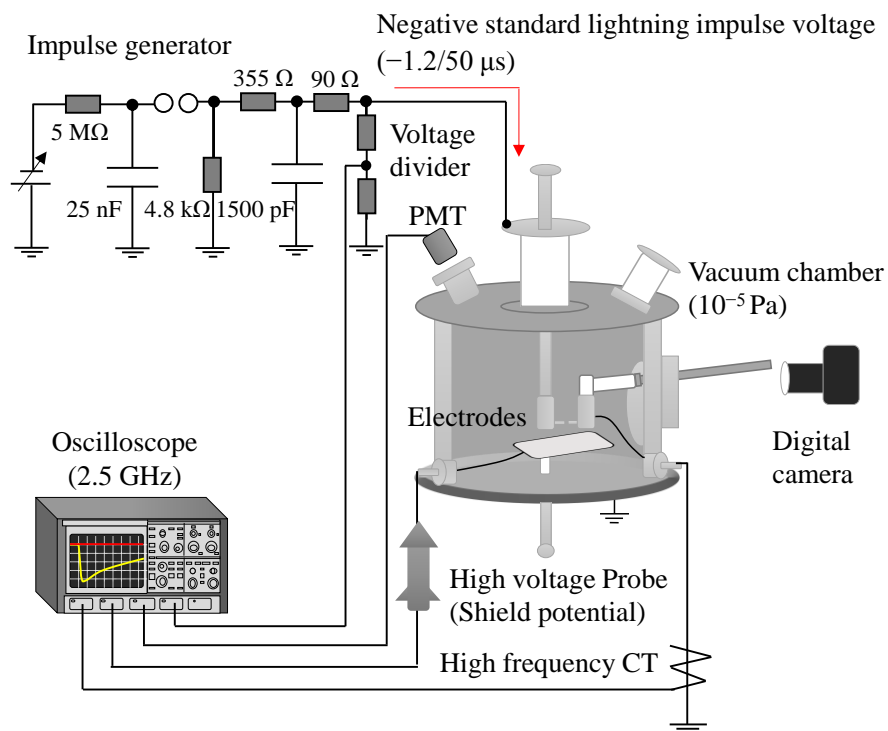


Fig. 2.3 Experimental setup and measurement system for c-a and c-s-a electrode systems.

図 2.3 に実験装置および実験回路を示す．インパルス電圧発生回路により負極性標準雷インパルス電圧を印加し，構築した電極において放電を発生させ，放電に伴う電圧・電流波形などをオシロスコープにより取得した．負極性標準雷インパルス電圧の一例を図 2.4 に示す ($V_a = -25.5 \text{ kV}_{\text{peak}}$)．この時，波頭長 T_1 は $1.43 \mu\text{s}$ となり，波尾長 T_2 は $56.1 \mu\text{s}$ であった．したがって，JEC-0202 で規定される標準雷インパルス電圧波形の定義である波頭長は $1.2 \mu\text{s} \pm 30\%$ ，波尾長は $50 \mu\text{s} \pm 20\%$ の範囲内に収まっている．印加電圧は抵抗分圧器を用いて分圧比 45900:1 で計測し，放電電流は 2 種類の高周波 CT (CT1: 周波数領域 $1 \text{ Hz} \sim 20 \text{ MHz}$ ，変流比: 10:1; CT2: 周波数領域 $400 \text{ Hz} \sim 250 \text{ MHz}$ ，変流比: 1:1) を用いて測定した．シールド電位は高インピーダンス ($100 \text{ M}\Omega$) の高圧プローブを用い，分圧比 1000:1 で測定した．また，光電子増倍管 (波長感度範囲: $300 \sim 900 \text{ nm}$) により放電の発光強度を取得し，デジタルカメラにより放電の静止発光像を取得した．

2. 3 c-a 電極系におけるギャップ放電特性

2. 3. 1 絶縁破壊時における電圧・電流特性

図 2.1 (a) の棒-平板電極構成において， $g=4 \text{ mm}$ の時の c-a 間の絶縁破壊時の静止発光像および印加電圧・陽極電流・発光強度波形の一例を図 2.5 に示す ($V_a = -32.6 \text{ kV}_{\text{peak}}$)．絶縁破壊電圧 V_{BD} は -30.2 kV であった．同図 (a) において，陰極と陽極の間に発光が生じていることがわかる．同図 (b) において，BD が開始するとともに陽極電流が流れ始め，電流の増加により電極間電圧が 0 V まで低下した．発光強度波形については，BD 開始から微弱な発光強度信号が現れ，陽極電流の最初のピーク後，発光強度は急激に増加した．陽極電流の最初のピークはカソードプラズマが陽極に到達し，放電チャネルが形成されるタイミングに相当すると考えられる．ここで，陽極電流が流れ始める BD 開始 (本実験では陽極電流 100 mA 以上) から陽極電流の最初のピークまでの時間を絶縁破壊進展

時間 T_{BD} と定義する.

2. 3. 2 絶縁破壊進展時間のギャップ長依存性

図 2.1 (a) の棒-平板電極構成において, 異なる g に対する T_{BD} と絶縁破壊電圧 V_{BD} との関係を図 2.6 に示す. 絶縁破壊の開始は陰極からの電界電子放出を起点とすることから陰極先端の最大電界 E_{max} に依存すると考えられるため, 異なる g に対する T_{BD} と絶縁破壊開始時の陰極先端の最大電界 E_{max} との関係を図 2.7 に示す. E_{max} は電荷重畳法により求めた. 同図より, 同じ g に対して, T_{BD} と E_{max} には相関性は見られない. 一般的に, 陰極加熱説に基づくギャップ間の BD 過程に関しては, 最初に陰極先端から電界放出電流によってカソードプラズマが生じ, 陽極に向かって拡大することで BD に至り, 絶縁破壊進展時間 T_{BD} はカソードプラズマの拡大速度に依存する. また, 陰極で生じたカソードプラズマの拡大速度は陰極材料のみに依存し^[3, 4], 印加電圧および放電電流の大きさには依存しないため, T_{BD} は V_{BD} および E_{max} に依存しないと考えられる.

図 2.8 に各ギャップ長における T_{BD} の平均値と g との関係を示す. 同図において, g が増加するとともに T_{BD} が長くなることがわかる. Mesyats らは, 電界放出電流によって加熱された微小突起の蒸発過程が陰極点の形成に基礎的な役割を果たし, カソードプラズマの拡大速度は 10^4 m/s 程度であると考察している^[5, 6]. 同図の結果から, 短ギャップ (5 mm 以下) における近似線の傾きの逆数は 3×10^4 m/s であり, カソードプラズマの拡大速度と概ね一致する. 一方で, 長ギャップ領域 (5 mm 以上) では近似線の傾きの逆数が 1×10^5 m/s と増加する傾向が現れた. これは, ギャップ間の電界によってカソードプラズマの拡大速度が加速されたためと考えられる^[3].

図 2.9 に棒-棒電極および棒-平板電極の短ギャップ長 ($g=0 \sim 2$ mm) における T_{BD} の平均値と g との関係を示す. 同図において, いずれの電極構成において

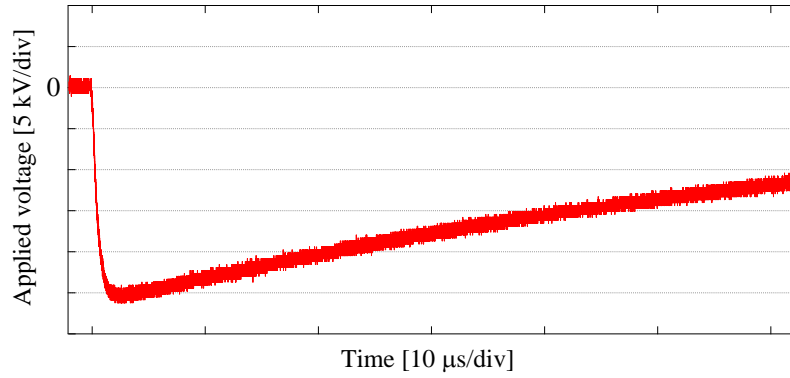
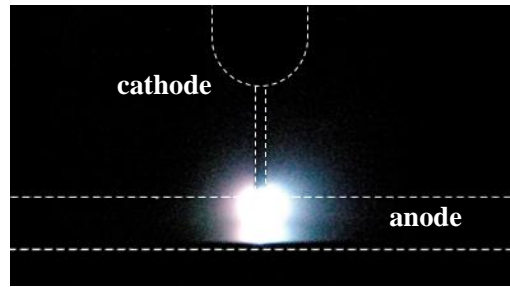
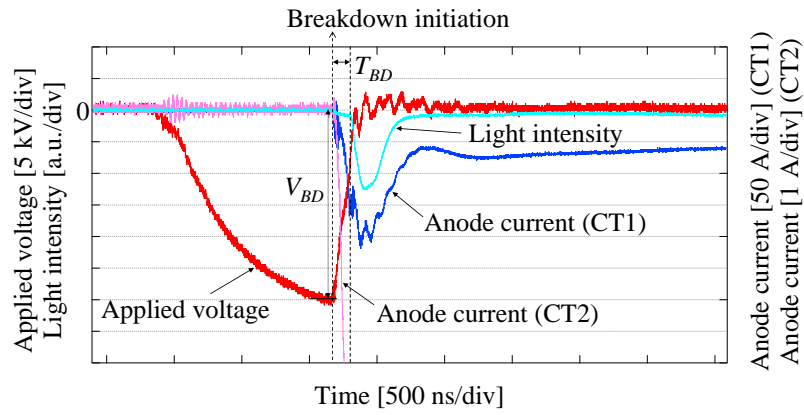


Fig. 2.4 Negative standard lightning impulse voltage waveform.
(Applied voltage: $V_a = -25.5 \text{ kV}_{\text{peak}}$, $T_1 = 1.43 \text{ μs}$, $T_2 = 56.1 \text{ μs}$)



(a) Still image



(b) Waveforms of applied voltage, anode current and light intensity

Fig. 2.5 Still image, applied voltage, anode current and light intensity waveforms of breakdown between c-a (rod-plane).

(Initial conditions: $V_a = -32.6 \text{ kV}_{\text{peak}}$, $g = 4 \text{ mm}$; BD voltage: $V_{BD} = -30.2 \text{ kV}$)

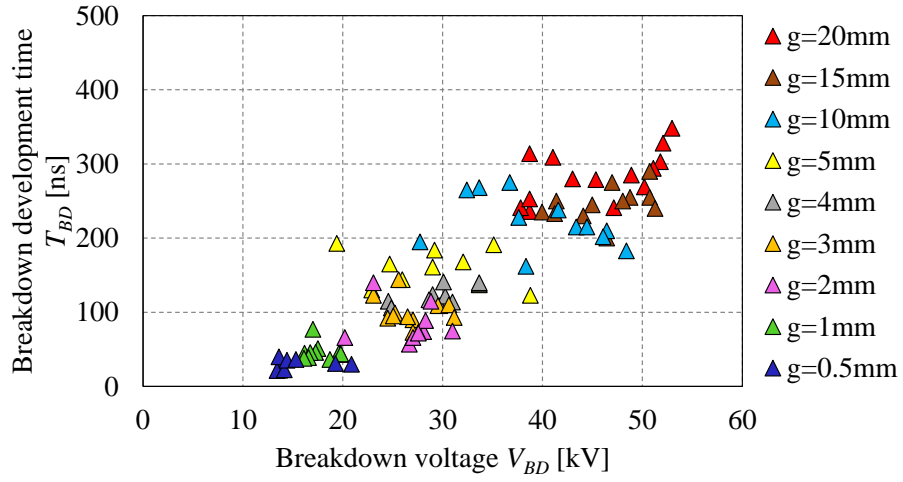


Fig. 2.6 V_{BD} and T_{BD} for various gap lengths of rod-plane electrode.

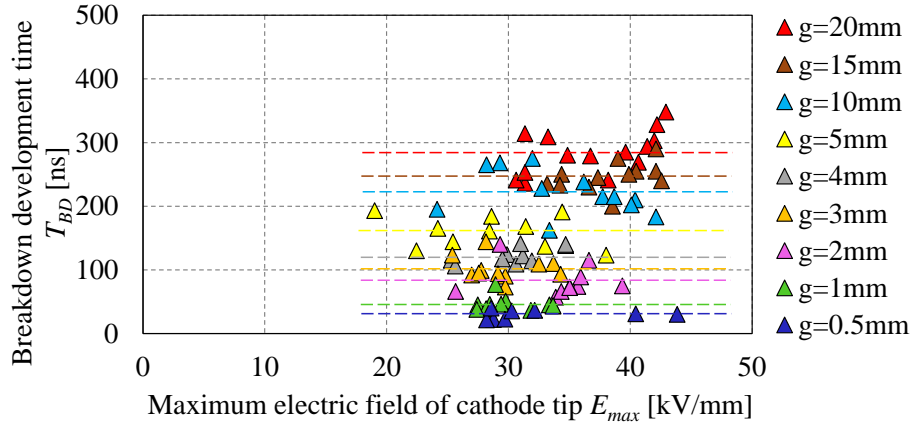


Fig. 2.7 E_{max} and T_{BD} for various gap lengths of rod-plane electrode.

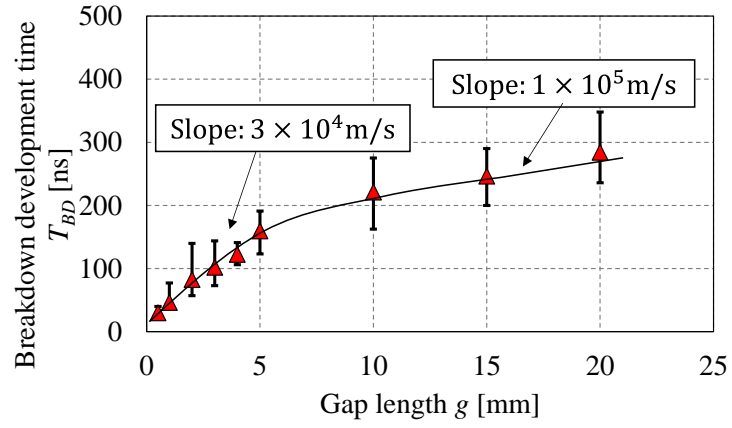


Fig. 2.8 Relation between T_{BD} and g for rod-plane electrode.

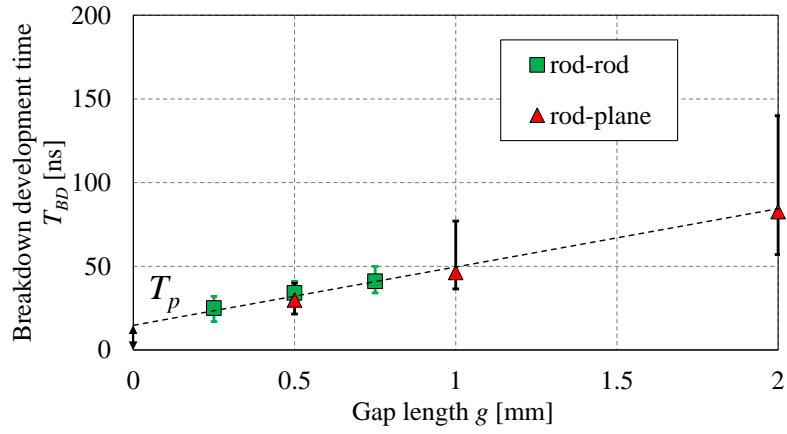


Fig. 2.9 Relation between T_{BD} and gap length g for rod-rod and rod-plane electrodes.

も、 T_{BD} と g は同じ比例関係を持つことがわかる。したがって、短ギャップ ($g=0 \sim 2 \text{ mm}$) においては、絶縁破壊進展時間は陽極形状、すなわちギャップ間の電界分布に依存しないと考えられる。また、近似線の切片 T_p は約 15 ns であり、これは陰極の電子放出からの前駆放電によりカソードプラズマが形成される時間に相当すると考えられる^[1]。

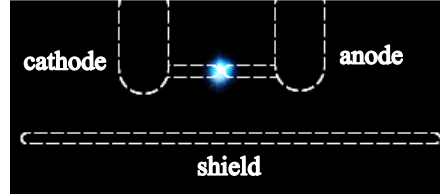
以上の結果より、 2 mm までの短ギャップにおいて T_{BD} が電極構成に依存せず、 g に対して単調増加することから、真空ギャップ長を BD 進展時間から推定できる可能性が示唆された。

2. 3. 3 絶縁破壊時におけるシールド電位の推移

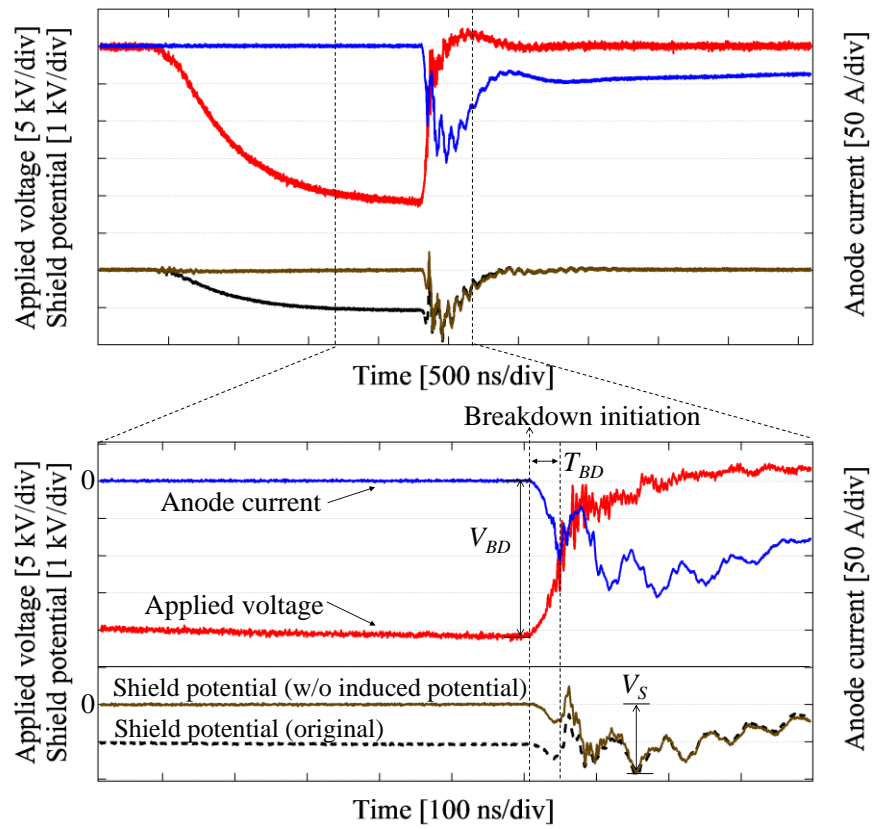
図 2.1 (b) の棒-棒電極構成において、 $g=0.25 \text{ mm}$ 、 $d=28.5 \text{ mm}$ の時の c-a 間の絶縁破壊時の静止発光像および印加電圧・陽極電流・シールド電位・発光強度波形の一例を図 2.10 に示す ($V_a=-20.9 \text{ kV}_{\text{peak}}$, $V_{BD}=-20.8 \text{ kV}$)。同図 (a) において、c-a 間のギャップに発光が発生しており、BD が生じていることがわかる。

ここで、ギャップ間の絶縁破壊に伴い、シールドに現れた電位について考察する。シールド電位には、容量分圧による印加電圧に比例した誘導電位も現れるため、同図 (b) では誘導成分を差し引いた波形を併せて示している。同図 (b) より、絶縁破壊後にシールドに負極性の電位が過渡的に現れていることがわかる。これは、c-a ギャップ間の放電から放出された電子がシールドに到達することで、シールドが負に帯電したためと考えられる^[7-11]。

図 2.11 にシールド電位の最大値 V_s および V_{BD} の相関を示す。同図より、 V_{BD} の増加とともに比例的に V_s が大きくなることがわかる。 V_s をギャップ-シールド間の距離 d に対して表すと図 2.12 のようになる。ここでは図 2.11 の関係から V_s を V_{BD} で規格化している。同図より、 d の増加とともに、 V_s/V_{BD} が低下することがわかる。これは、図 2.13 に示すように、 d が長いほど放電から見たシールド



(a) Still image



(b) Waveforms of applied voltage, anode current, shield potential and light intensity

Fig. 2.10 Still image, applied voltage, anode current, shield potential and light intensity waveforms of c-a breakdown (rod-rod).

(Initial conditions: $V_a = -20.9$ kV_{peak}, $g = 0.25$ mm, $d = 28.5$ mm;
BD voltage: $V_{BD} = -20.8$ kV)

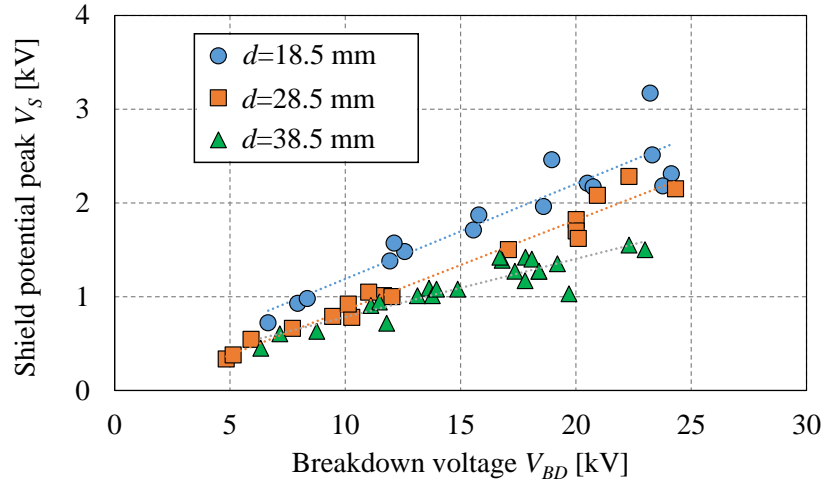


Fig. 2.11 Relation between V_s and V_{BD} for rod-rod electrode.

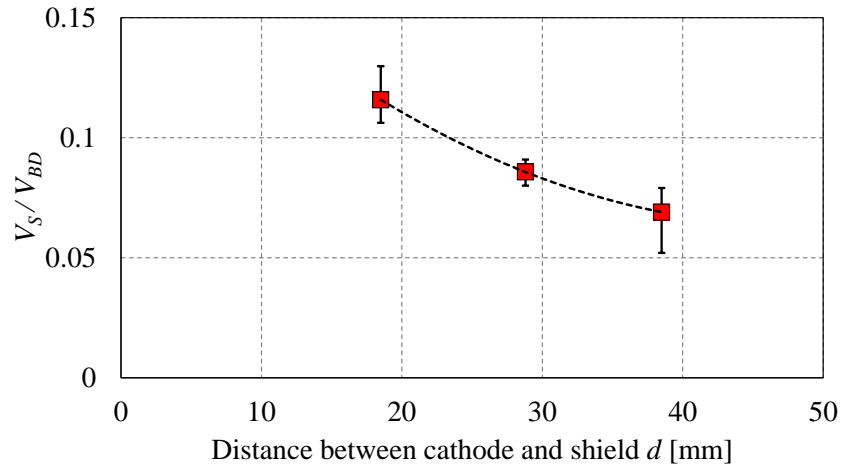


Fig. 2.12 Relation between V_s / V_{BD} and d for rod-rod electrode.

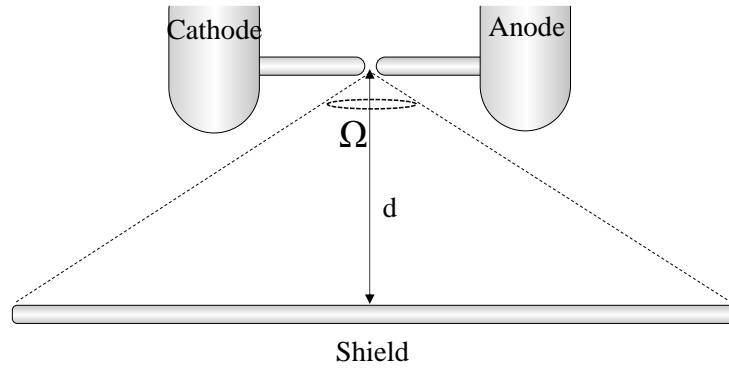


Fig. 2.13 Solid angle Ω between electrodes.

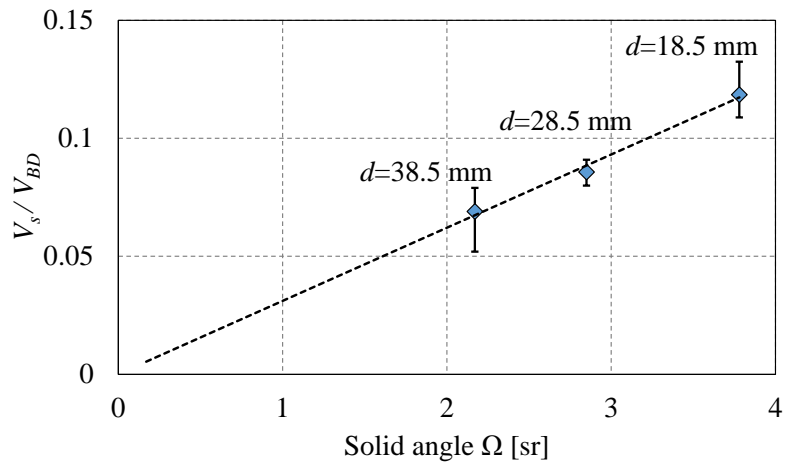


Fig. 2.14 Relation between V_s / V_{BD} and solid angle Ω for rod-rod electrode.

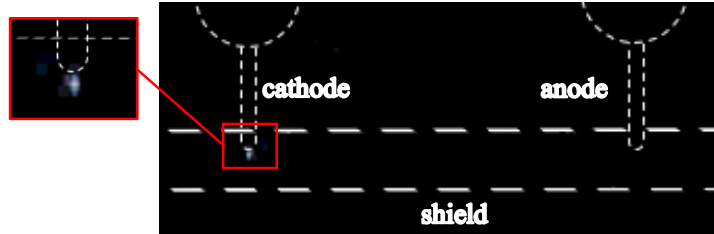
の立体角 Ω が小さくなり、シールドに到達する電荷量が少なくなるためと考えられる．図 2.14 に各 d における V_s/V_{BD} と立体角 Ω の相関を示す．同図より、 V_s/V_{BD} が陰極 - 陽極ギャップ間の放電から見たシールドの立体角に比例していることがわかる．これは、放電に伴う電子放出量が V_{BD} に比例すると仮定すれば、ギャップ間の放電からの電子放出が等方的になされていることを示している^[3]．この結果は、ギャップ間の絶縁破壊の発生位置（シールドからの距離）をシールド電位の推移から推定できる可能性を示唆している．

2. 4 c-s-a 電極系におけるシールドを介するギャップ放電特性

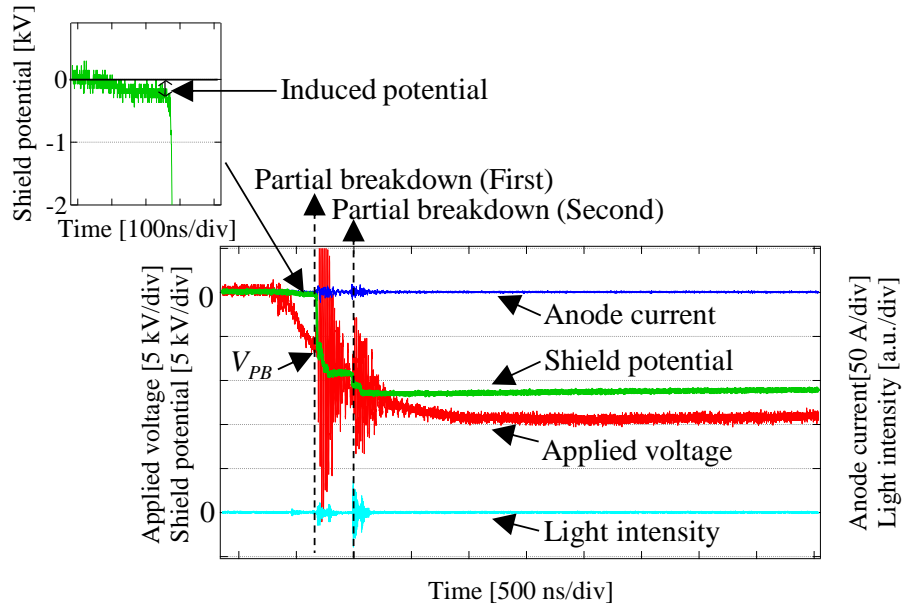
図 2.1(c) の c-s-a 電極構成におけるシールドを介する放電では、2 つの放電パターン（部分破壊、全路破壊）が現れた．

2. 4. 1 部分破壊時のシールド電位の推移

図 2.15 に陰極－シールド（c-s）間の部分破壊（Partial breakdown: PB）発生時の（a）放電発光像、（b）印加電圧・シールド電位・電流波形・発光強度の一例を示す（ $V_a = -15.7 \text{ kV}_{\text{peak}}$, $g_1 = g_2 = 0.25 \text{ mm}$, $V_{PB} = -6.5 \text{ kV}$ ）．同図（a）において、c-s 間にのみ微小な発光が発生しており、PB が生じていることがわかる．同図（b）において、電圧印加に伴いシールドに印加電圧に比例した誘導電位が現れた後、c-s 間の PB に伴う発光強度の立ち上がりと同時にシールド電位が陰極電位と同程度の値まで上昇した．その後、真空放電が不安定になり、PB が消滅した^[12]．1 回目の PB の約 320 ns 後に 2 回目の PB が発生した．c-s 間の PB 発生時にシールド電位がステップ的に上昇して陰極と等電位となり、PB の消滅によってその後の電位はほぼ一定値を維持していることがわかる．なお、陽極には放電電流はほとんど流れておらず、シールドと陽極間では放電チャネルが形成されなかったと考えられる．また、PB の発生に伴い印加電圧波形、発光強度波形に数百 MHz の高周波信号が現れた．これは、PB 発生時に立ち上がり時間が ns オーダーのパ



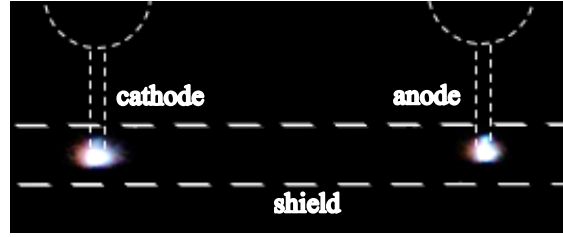
(a) Still image



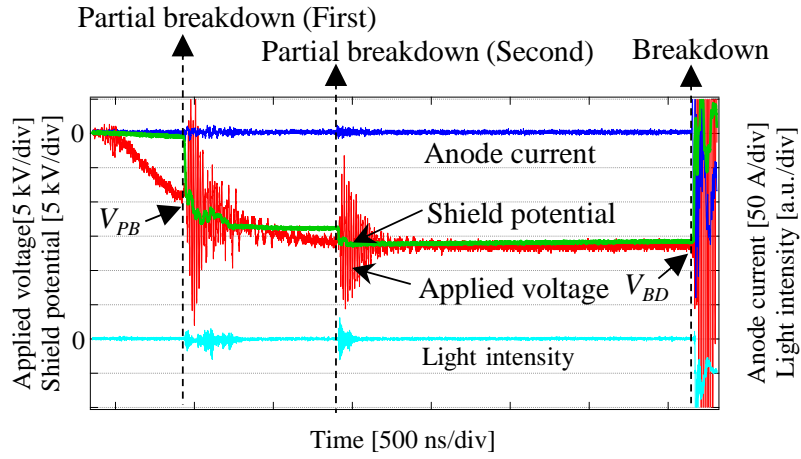
(b) Waveforms of applied voltage, shield potential, anode current and light intensity

Fig. 2.15 Still image and transition of shield potential for partial breakdown via cathode-shield (c-s)

(Initial conditions: $V_a = -15.7 \text{ kV}_{\text{peak}}$, $g_1 = g_2 = 0.25 \text{ mm}$; PB voltage: $V_{PB} = -6.5 \text{ kV}$).



(a) Still image



(b) Waveforms of applied voltage, shield potential, anode current and light intensity

Fig. 2.16 Still image and transition of shield potential for breakdown via cathode-shield-anode (c-s-a)

(Initial conditions: $V_a = -18.1 \text{ kV}_{\text{peak}}$, $g_1 = g_2 = 0.25 \text{ mm}$;
PB voltage: $V_{PB} = -9.4 \text{ kV}$, BD voltage: $V_{BD} = -16.4 \text{ kV}$).

ルス電流が現れるとともに UHF 帯の放射電磁波が発生することにより、印加電圧波形、発光強度波形が高周波放射電磁波の影響を受けたためと考えられる。

2. 4. 2 全路破壊時のシールド電位の推移

図 2.16 に陰極－シールド－陽極 (c-s-a) 間の全路破壊 (BD) 発生時の (a) 放電発光像、(b) 印加電圧・シールド電位・電流波形・発光強度の一例を示す ($V_a = -18.1 \text{ kV}_{\text{peak}}$, $g_1 = g_2 = 0.25 \text{ mm}$, $V_{PB} = -9.4 \text{ kV}$, $V_{BD} = -16.4 \text{ kV}$)。同図 (a) において、陰極－シールド (c-s) 間およびシールド－陽極 (s-a) 間の 2 箇所が発光が見られており、シールドを介して全路破壊が生じていることがわかる。同図 (b) において、c-s 間の PB の発生と消滅を 2 回繰り返すごとにシールド電位が上昇し、印加電圧波形、陽極電流波形と発光強度波形に数百 MHz の高周波信号が現れた。その後、シールド電位が陰極電位と同程度の値に到達した。s-a 間の放電の発生に伴い、最終的に約 100 A 以上の放電電流が流れ、シールド電位と印加電圧が 0 V まで低下していることから、全路破壊 (c-s-a) に至ったと考えられる。

2. 5 まとめ

本章では、真空イントラプタ内部におけるギャップ間の絶縁破壊 (BD) に注目し、c-a および c-s-a 電極構成を用いて絶縁破壊進展時間と電圧、ギャップ長の依存性を検討し、以下のことを明らかにした。

(1) 真空ギャップにおける BD 発生時において、BD 進展時間 T_{BD} は陰極に生じたカソードプラズマが陽極に到達する時間であると考えられる。 T_{BD} は陰極先端の最大電界に依存せず、ギャップ長のみに依存する。この結果により、真空ギャップ長を BD 進展時間から推定できることを示唆した。

(2) ギャップ間の絶縁破壊に伴い、ギャップ間の放電から放出された電子がシールド (浮遊電極) に到達することで、シールドに負極性の電位が過渡的に現

れる．この電子放出は等方的になされ，シールド電位の推移により，ギャップ間の絶縁破壊の発生位置（シールドからの距離）を推定できる可能性がある．

（３）シールドを介するギャップ放電は，部分破壊（c-s）と全路破壊（c-s-a）の２つの放電パターンに分類された．c-s 間の PB に伴い，シールド電位が印加電圧と同程度の値までステップ的に上昇し，印加電圧波形と陽極電流波形に高周波信号が現れる．全路破壊に至るまでに，c-s 間で PB が発生と消滅を繰り返し，最終的に s-a 間の破壊により全路破壊に至る．

第 2 章の参考文献

- [1] Paul G. Slade: “The vacuum interrupter: Theory, Design, and Application”, CRC press, pp.80-81, 2007.
- [2] S. Kobayashi, N. S. Xu, Y. Saito, R. V. Latham: “Distributions of Pre-breakdown Emission Sites on Broad Area Rounded Shaped Copper Cathode of a Vacuum Gap”, the 18th International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum, pp.56–59, 1998.
- [3] E. Hantzsche, “Theory of the Expanding Plasma of Vacuum Arcs”, J.Phys.D: Applied Physics, Vol.24, pp.1339-1353, 1991.
- [4] Isak I. Beilis, “State of the Theory of Vacuum Arcs”, IEEE Transactions on Plasma Science, Vol.29, No.5, pp.657-670, 2001.
- [5] Gennady A. Mesyats and D. I. Proskurovsky, “Pulsed Electrical Discharge in Vacuum”, 1st ed., Springer-Verlag, pp.118-135, 1989.
- [6] M. B. Bochkarev, Yu. A. Zemskov and I. V. Uimanov: “High Speed and Spectroscopic Investigation of 300kV Pulsed Vacuum Spark in Centimeter Gap”, the 24th International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum, pp.72-75, 2010.
- [7] H. Toya, T. Hayashi, and H. Sasao: “Voltage/Current Characteristics at the Metal Shield Surrounding High-current Vacuum Arcs”, Journal of Applied Physics, Vol.65, No.1, pp.64-69, 1989.
- [8] Z. Zalucki, J. Kutzner and Z. Boruta: “Experimental Investigations of the Currents Collected by Metal Shields in High-Current Vacuum Arcs”, IEEE Transactions on Plasma Science, Vol.23, No.6, pp.932-938, 1995.
- [9] S. Suzuki, T. Matsuo, R. Sakuma and S. Yanabu: “Diffusion of Metal Vapor from Electrodes to Vacuum Interrupter Shield and its Dependence on Electrode Construction”, IEEE Transactions on Plasma Science, Vol.34, No.2, pp.485-489, 2006.

- [10] 觸澤, 山納, 小林:「電流零点前の真空アークから拡散する荷電粒子電流の測定」, 電気学会論文誌 A, Vol.130, No.9, pp.805-810, 2010.
- [11] S. Kulkarni, L. Andrews, S. Saravanan, S. Rayudu, and P. Shanker: “Study of Shield Potential to Understand the Arcing Behavior of Vacuum Interrupters during Short-circuit Current Interruption”, the 24th International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum, pp.218-220, 2010.
- [12] S. A. Barengolts, G. A. Mesyats and D. L. Shmelev, “Structure and Time Behavior of Vacuum Arc Cathode Spots”, IEEE Transactions on Plasma Science, Vol.31, No.5, pp.809-816, 2003.

第3章 真空中固体絶縁物を介する沿面放電

3. 1 まえがき

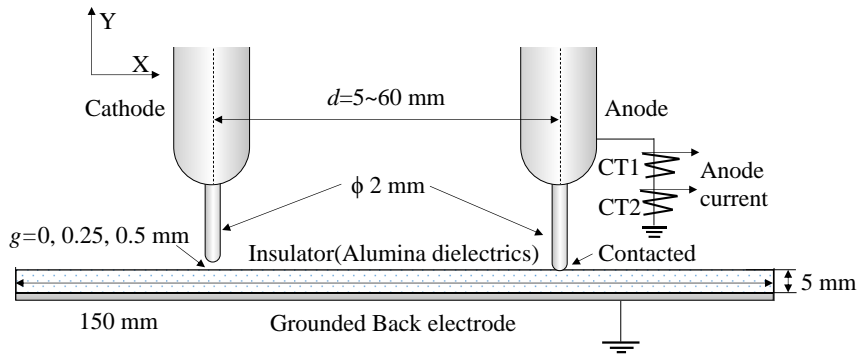
一般的に、真空中の固体絶縁物を介する沿面放電過程は、陰極三重点からの電界電子放出を起点として開始し、固体絶縁物沿面における2次電子なだれ (Secondary electron emission valance: SEEA) が進展するとともにアウトガスが発生し、脱離したガス内部でのさらなる電離によって導電性チャネルが形成されると考えられる^[1-5]。一方、陰極と絶縁物表面が接触しない電極構成における沿面放電過程では、放電の起点となる陰極からの電子放出機構は突発的電子放出 (Explosive electron emission: EEE) 機構であり、絶縁物上には過渡的に帯電が形成され進展する^[6,7]。これまでの研究において、陰極と陽極間の絶縁物上の発光の観測によって沿面放電進展速度は $10^5 \sim 10^7$ m/s であると考察されている^[4, 5]。しかしながら、沿面放電開始からフラッシュオーバーに至るまでの沿面放電進展過程と放電波形との関係は解明されていない。

本章では、真空中絶縁物を介する沿面放電に注目し、電圧波形・陽極電流波形・絶縁物表面電位波形と放電過程の関係を明らかにする。すなわち、本章では、陰極－絶縁物－陽極 (c-i-a) 電極系を構築し、負極性標準雷インパルス電圧 (1.2/50 μ s) を印加した時の沿面放電過程において、フラッシュオーバーに至るまでの放電進展時間 (T_{FO}) を定義し、 T_{FO} の電圧および沿面長依存性について検討を行う。

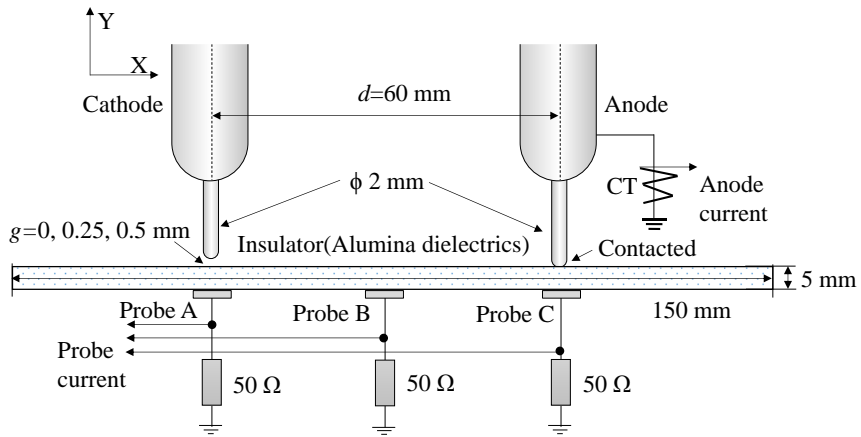
3. 2 実験装置と実験方法

3. 2. 1 c-i-a 電極構成

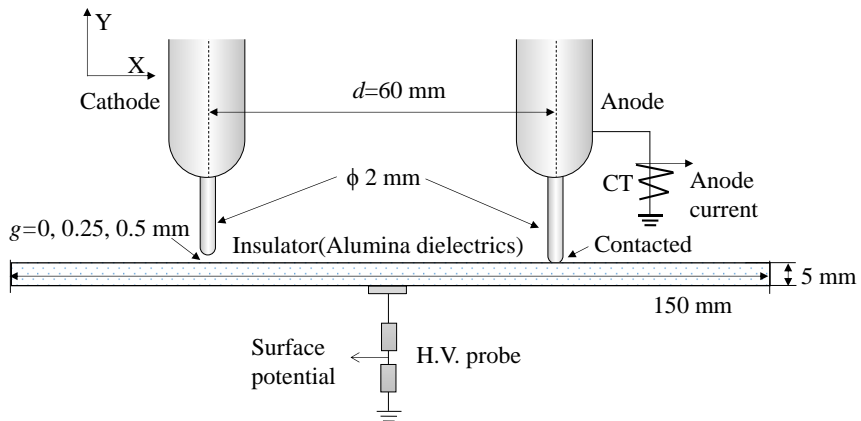
沿面放電を模擬するため、真空容器内に、図 3.1 (a) の棒陰極－絶縁物－棒陽極 (c-i-a) 電極系を構成した。陰極と陽極は第2章と同じくステンレス (SUS304) 製棒電極 ($\phi 2$ mm) であり、固体絶縁物にはアルミナ絶縁物 (純度 92 %, 150 mm



(a) Cathode-insulator-anode (c-i-a) with grounded back electrode



(b) Cathode-insulator-anode (c-i-a) with electrostatic probes



(c) Cathode-insulator-anode (c-i-a) with high voltage probe

Fig. 3.1 Electrode configurations for c-i-a discharge.

Table 3.1 Physical properties of alumina sample.

Series	HA-92
Al ₂ O ₃ content [%]	92
Density [g/cm ³]	3.6
Relative permittivity (1 MHz)	9.0
Dielectric loss (1 MHz)	0.0003
Volume resistivity [Ω • cm]	>10 ¹⁴
Average surface roughness R _a [μm]	0.69

× 150 mm × 5 mm[†]) を用いた。アルミナ絶縁物の物性値を表 3.1 に示す。また、アルミナ絶縁物の裏面に背後接地電極 (150 mm × 100 mm × 1 mm[†]) を配置した。陰極と陽極間の沿面距離を d (5 ~ 60 mm)、陰極と絶縁物間のギャップ長 g を 0, 0.25, 0.5 mm とし、陽極と絶縁物は接触させた。

3. 2. 2 実験回路と測定系

沿面放電進展過程を考察するため、2 種類のプローブ (静電プローブ, 高圧プローブ) を用いて絶縁物の表面帯電状況を測定した。静電プローブを用いる場合には、同図 (b) に示すように、背後接地電極を用いず、絶縁物上の表面電位の変化量を絶縁物背後に設けた静電プローブ (10 × 10 mm²) により誘導電流として測定した。静電プローブを陰極直下から 0, 30, 60 mm の位置に設け、それぞれ A ~ C とした。各静電プローブには同軸ケーブルのインピーダンスとの整合をとるため、50 Ω の整合抵抗を設けた。また、高圧プローブを用いる場合には、同図 (c) に示すように、陰極直下から 30 mm の位置に高インピーダンス (100 MΩ) の高圧プローブを設け、分圧比 1000:1 で絶縁物表面電位を直接測定した。印加電圧・陽極電流・発光強度・発光像の測定方法は前章と同様である。

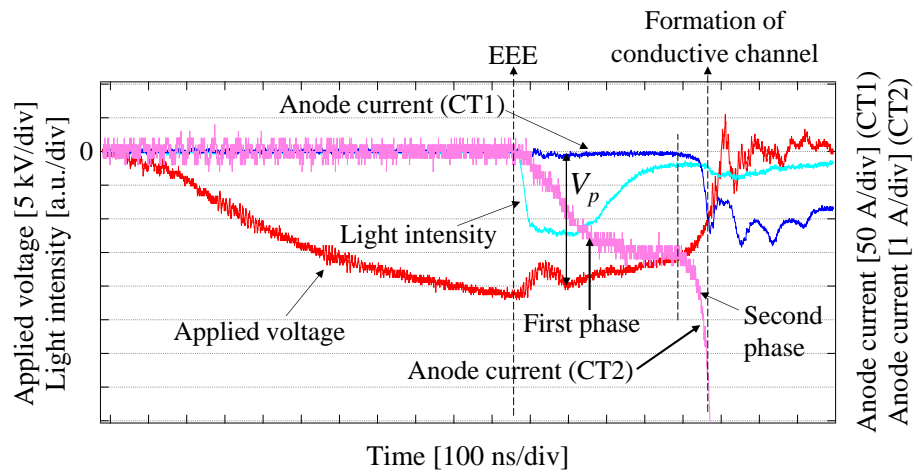
3. 3 c-i-a 電極構成におけるフラッシュオーバー

3. 3. 1 沿面放電時における電圧・電流特性

図 3.1 (a) の c-i-a 電極系において沿面放電が発生する際の静止発光像および印加電圧、発光強度、2 つの CT (CT1, CT2) を用いて測定した陽極電流波形を図 3.2 に示す ($V_a = -24.3$ kV_{peak}, $g = 0.5$ mm, $d = 60$ mm)。沿面放電は陰極表面における突発的電子放出 (EEE) を起点として発生する^[6]。EEE 発生後の陰極電圧のピーク値を V_p と定義する ($V_p = -19.4$ kV)。同図における EEE の発生から導電チャネル形成までの陽極電流の上昇過程に注目すると、2 段階 (First phase, Second



(a) Still image of surface flashover of c-i-a



(b) Waveforms of applied voltage, probe current, anode current and light intensity

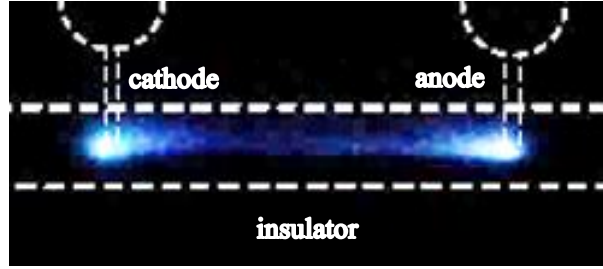
Fig. 3.2 Anode current waveforms measured by two CTs for surface flashover in c-i-a electrode system.

(Initial conditions: $V_a = -24.3 \text{ kV}_{\text{peak}}$, $g = 0.5 \text{ mm}$, $d = 60 \text{ mm}$;
Voltage peak after EEE: $V_p = -19.4 \text{ kV}$)

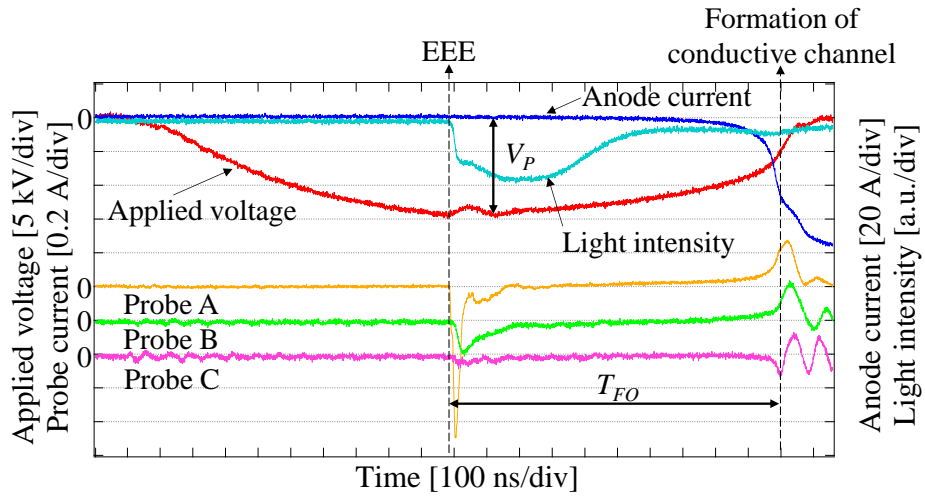
phase) に類別できる^[2]. First phase では、陽極電流が数 A 程度まで上昇した。この段階では、SEEA 機構による電子増倍および固体絶縁物上の吸着ガス放出が起こっていると考えられる。Second phase への転移は、放出されたガス内で電子増倍が生じ、放出ガスに由来する導電性チャネルが形成されるためと考えられ、陽極電流の最初のピークに至り、100 A 程度の電流が流れた。

図 3.1 (b) の電極構成において沿面放電が発生する際の静止発光像および印加電圧、陽極電流、発光強度、静電プローブにより測定した誘導電流を図 3.3 に示す ($V_a = -17.2 \text{ kV}_{\text{peak}}$, $g = 0.5 \text{ mm}$, $d = 60 \text{ mm}$, $V_p = -14.7 \text{ kV}$)。電圧印加に伴い最初に陰極から EEE が発生し、絶縁物上に過渡的に負帯電が形成されるため、陰極直下のプローブ A に電流が流れた^[7]。その後、プローブ B の電流が負のピークに至り、負帯電領域が陽極に向かって広がることがわかる。フラッシュオーバー直前においては、プローブ A, B の電流は負から正に変化していることがわかる。これは、電子が SEEA 機構により進展することで陰極付近の負帯電が減少し、陽極付近における負電荷の増加につながったためであると考えられる^[8]。SEEA が陽極に向かって進展するに伴い絶縁物からガスが放出され、最終的にガス中の電離により導電チャネルが形成されてフラッシュオーバーに至った^[9]。この時、導電チャネルが形成されたことにより陽極付近の電位が大きく低下し、プローブ C の電流が負のピークに至り、陽極に数十 A 程度の電流が流れていることがわかる。

図 3.1 (c) の電極構成において沿面放電が発生する際の静止発光像、印加電圧、陽極電流、発光強度、高圧プローブにより測定した絶縁物表面電位を図 3.4 に示す ($V_a = -21.5 \text{ kV}_{\text{peak}}$, $g = 0.5 \text{ mm}$, $d = 60 \text{ mm}$, $V_p = -18.8 \text{ kV}$)。電圧印加に伴い、高圧プローブには誘導電位が現れた。陰極から EEE が発生すると、絶縁物上に過渡的に負帯電が形成され、絶縁物上表面電位が低下した。その後、沿面放電の進展とともに、最終的に導電性チャネルが形成され、表面電荷が陽極に流入して表面帯電がなくなるため、負極性表面電位の大きさが減少したと考えられる。



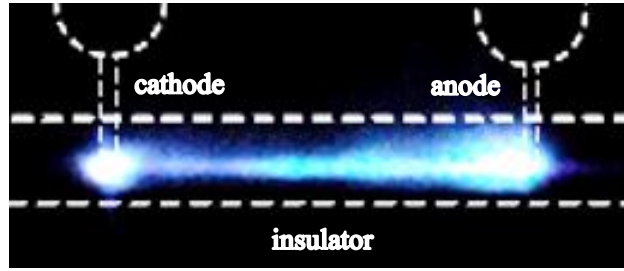
(a) Still image of surface flashover of c-i-a



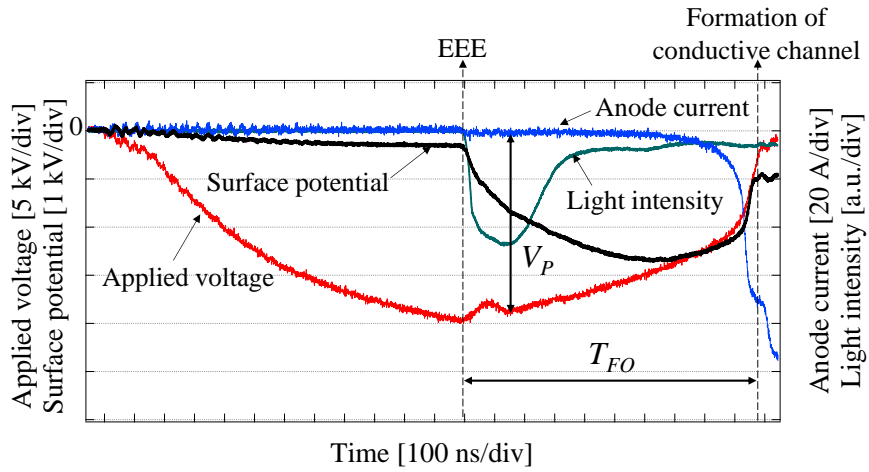
(b) Waveforms of applied voltage, probe current, anode current and light intensity

Fig. 3.3 Still image and discharge waveforms for surface flashover in c-i-a electrode system with electrostatic probes.

(Initial conditions: $V_a = -17.2$ kV_{peak}, $g = 0.5$ mm, $d = 60$ mm;
Voltage peak after EEE: $V_p = -14.7$ kV)



(a) Still image of surface flashover of c-i-a



(b) Waveforms of applied voltage, probe current, anode current and light intensity

Fig. 3.4 Still image and discharge waveforms for surface flashover in c-i-a electrode system with high voltage probe.

(Initial conditions: $V_a = -21.5 \text{ kV}_{\text{peak}}$, $g = 0.5 \text{ mm}$, $d = 60 \text{ mm}$;
Voltage peak after EEE: $V_p = -18.8 \text{ kV}$)

3. 3. 2 沿面放電進展時間の沿面距離依存性

以上の考察より，沿面放電進展過程は，EEE が発生してから，SEEA 機構による電子増倍の進展に伴い，陽極電流が立ち上がり，絶縁物表面電位が負に増加する．また，陰極からの電子放出電流によりインパルス電源からの印加電圧が落ち始める．最終的に絶縁物の沿面上に導電性チャネルが形成されるため，絶縁物沿面上のインピーダンスの変化により陽極電流の増加率が低下し，印加電圧とシールド電位が 0 V まで低下する．EEE 発生（本実験では陽極電流 100 mA 以上）から陽極電流の最初のピーク（導電性チャネル形成）までの時間を沿面放電進展時間 T_{FO} と定義する． T_{FO} は図 3.2 で示した 2 段階の電流（First phase, second phase）上昇時間を含んでいる．

図 3.1 (a) の電極構成において， $d=20\sim60$ mm で変化させ，沿面放電進展過程を考察する．図 3.5 に各沿面距離 d における沿面放電進展時間 T_{FO} と EEE 発生後の印加電圧ピーク値 V_p の相関を示す．同図より，同一の d に対して， V_p の増加とともに， T_{FO} が短くなることがわかる．平行平板電極系におけるガス放出モデル^[10, 11]によると，沿面放電進展時間はガス放出粒子および電離確率に依存し，この 2 つの要因は絶縁物上の電界の影響を大きく受け， T_{FO} は絶縁物上の帯電によって形成された垂直電界 E_y の 2 乗に反比例する ($T_{FO} \propto E_y^{-2}$)^[10]．本実験の棒-平板電極系においては，図 3.6 に示すように，絶縁物上の垂直電界 E_y は主に外部印加電圧 V_p によって形成されるため， T_{FO} が V_p^{-2} に比例したと考えられる．

図 3.5 において $V_p = -10, -15, -20, -25$ kV 時の T_{FO} を抽出し，図 3.7 に一定の V_p における T_{FO} と d の関係を示す．同図において，同一の V_p に対して d が長いほど， T_{FO} が単調に増加することがわかる．この結果は， T_{FO} と V_p から沿面放電距離 d を推定できる可能性を示唆している．

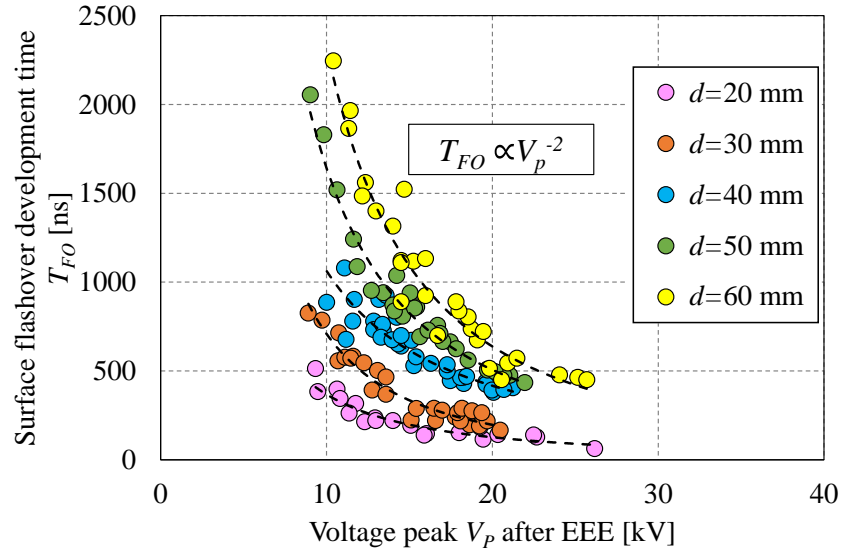


Fig. 3.5 Relation between T_{FO} and V_p for various surface distance.
($g=0, 0.25, 0.5$ mm)

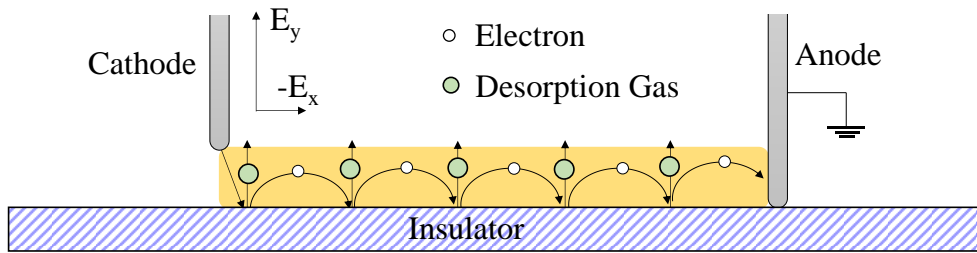


Fig. 3.6 Surface flashover mechanism for c-i-a electrode system.

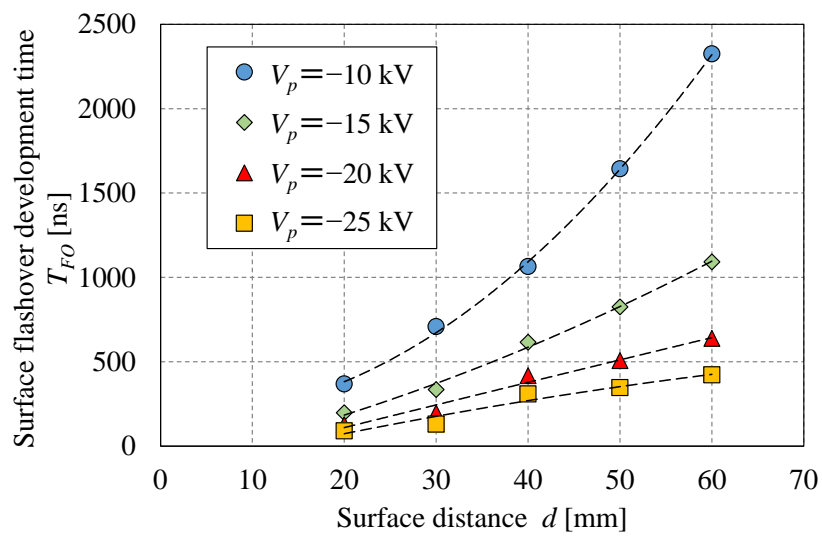


Fig. 3.7 Relation between T_{FO} and d for various V_p .

3. 4 まとめ

本章では，真空インタラプタ内部における絶縁物を介する沿面放電に注目し，c-i-a 電極系を用いて，沿面放電進展時間 T_{FO} と電圧，沿面距離の依存性を検討し以下のことを明らかにした．

- (1) 沿面放電時における陽極電流の上昇は，2 段階に類別される．
- (2) 沿面放電進展時間 T_{FO} は V_p^{-2} (V_p : EEE 発生後の陰極電圧ピーク) に比例する． T_{FO} は EEE 発生から導電性チャネル形成までの時間と考えられ， $T_{FO} \propto V_p^{-2}$ の関係はガス放出モデルによって説明される．
- (3) 沿面距離が長いほど T_{FO} は単調に増加することから， T_{FO} と V_p によって沿面距離を推定できる可能性がある．

第 3 章の参考文献

- [1] R. V. Latham: “High Voltage Vacuum Insulation Basic Concepts and Technological Practice”, Academic Press, 1995.
- [2] Andreas A. Neuber, M. Butcher, H. Krompholz, Lynn L. Hatfield and Magne Kristiansen, “The Role of Outgassing in Surface Flashover under Vacuum”, IEEE Transactions on Plasma Science, Vol.28, No.5, pp.1593-1598, 2000.
- [3] C. Ren, J. Wang, P. Yan, L. Xiao, T. Wang and D. Zhang: “Experimental Study on Gas Desorption in Surface Flashover of Solid in Vacuum”, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol.20, No.4, pp.1189-1194, 2013.
- [4] R. A. Anderson: “Propagation Velocity of Cathode-initiated Surface Flashover”, Journal of Applied Physics, Vol.48, No.10, pp.4210-4214, 1977.
- [5] J. Tang, A. Qiu, L. Yang, W. Jia, H. Wang and J. Li: “Process of Surface Flashover in Vacuum under Nanosecond Pulse”, IEEE Transactions on Plasma Science, Vol.38, No.1, pp.53-58, 2010.
- [6] Y. Nakano, H. Kojima, N. Hayakawa, K. Tsuchiya and H. Okubo: “Pre-discharge and Flashover Characteristics of Impulse Surface Discharge in Vacuum”, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol.21, No.1, pp.403-410, 2014.
- [7] Y. Nakano, H. Kojima, K. Tsuchiya, and N. Hayakawa: “Transient Charging of Impulse Surface Flashover Development in Vacuum”, the 26th International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum, pp.57-60, 2014.
- [8] H. Kojima, N. Hayakawa, T. Ishida, H. Okubo and K. Tsuchiya: “Development Process of Impulse Surface Flashover on Alumina Dielectrics in Vacuum”, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol.18, No.3, pp.918-923, 2011.
- [9] E. W. Gray: “Vacuum Surface Flashover: A High Pressure Phenomenon”, Journal of Applied Physics, Vol.58, No.1, pp.132-141, 1985.
- [10] R. A. Anderson and J. P. Brainard, “Mechanism of Pulsed Surface Flashover Involving Electron-stimulated Desorption”, Journal of Applied Physics, Vol.51, No.3, pp.1414-1421, 1980.
- [11] A. Sivathanu Pillai and Reuben Hackam, “Surface Flashover of Solid Dielectric in Vacuum”, Journal of Applied Physics, Vol.53, No.4, pp.2983-2987, 1982.

第4章 真空中複合絶縁系における放電特性

4. 1 まえがき

第2章および第3章では、真空イントラプタ（VI）内部における単一放電経路として、真空ギャップ間の絶縁破壊（BD）と絶縁物沿面上のフラッシュオーバー（FO）の各放電特性についてそれぞれ検討した。本章では、実際のVI内部を想定した中間シールドと固体絶縁物を介する複合放電経路に注目し、陰極－シールド－絶縁物－陽極（c-s-i-a）および陰極－絶縁物－シールド－陽極（c-i-s-a）の2種類の複合絶縁系を構築し、それぞれの放電形態および放電経路について、放電発生・進展メカニズムに関する検討を行う。

4. 2 c-s-i-a 複合経路の放電

4. 2. 1 c-s-i-a 電極構成

図4.1に陰極－シールド－絶縁物－陽極（c-s-i-a）電極構成を示す。陰極と陽極はステンレス（SUS304）製棒電極（ $\phi 2\text{ mm}$ ）であり、シールドは $120\text{ mm}\times 60\text{ mm}\times 2\text{ mm}^t$ の平板電極を用いた。固体絶縁物は前章と同様のアルミナ絶縁物を用いた。絶縁物を陰極と陽極の直下に固定し、その上にシールド電極を置いた。シールド端と陽極間の沿面距離を $d=60\text{ mm}$ とし、陽極と絶縁物を接触させ、陰極とシールド間の真空ギャップ長を $g=0\text{ mm}$ または 0.5 mm とした。放電経路を制御するため、絶縁物の裏に背後接地電極（ $70\text{ mm}\times 20\text{ mm}$ ）を設けた。シールド電位を高インピーダンス（ $100\text{ M}\Omega$ ）の高圧プローブで計測した。

4. 2. 2 陰極－シールド接触時における放電過程

c-s-i-a 電極系において、前章のc-i-a電極系における沿面放電特性との整合性を確認するため、陰極とシールドを接触させた実験を行った。図4.2に沿面放電

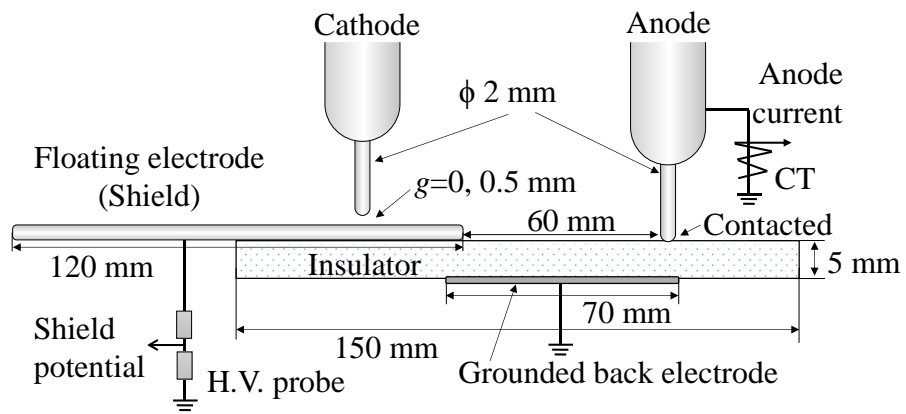
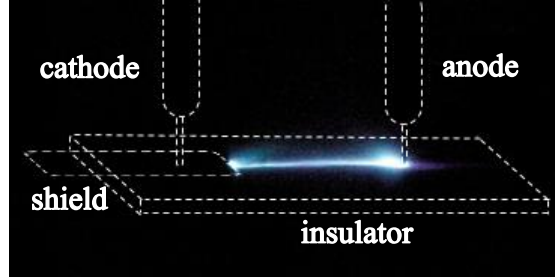
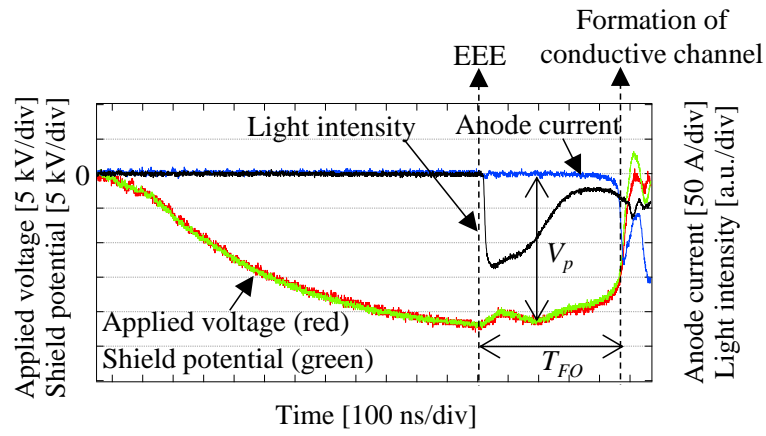


Fig. 4.1 Electrode configuration of c-s-i-a.



(a) Still image



(b) Waveforms of applied voltage, shield potential, anode current and light intensity

Fig. 4.2 Still image and discharge waveforms for surface flashover in c-s-i-a with $g=0$ mm.

(Initial conditions: $V_a=-24.1$ kV_{peak}; Voltage peak after EEE: $V_p=-21.9$ kV)

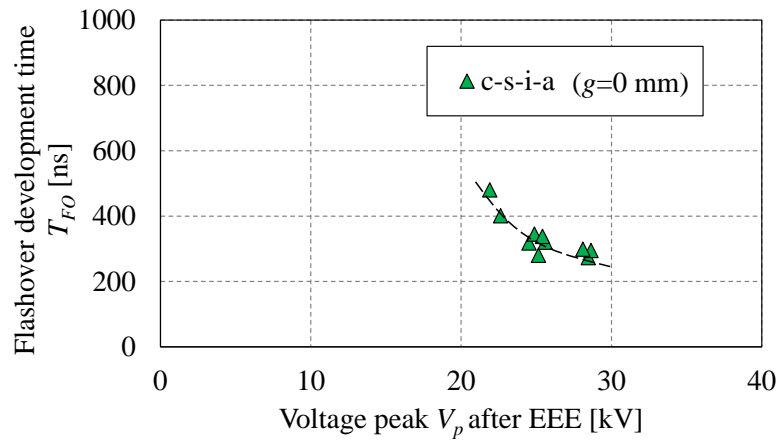


Fig. 4.3 Relation between T_{FO} and V_p in c-s-i-a ($g=0$ mm).

時の静止発光像および印加電圧・シールド電位・陽極電流・発光強度波形の一例を示す ($V_a = -24.1 \text{ kV}_{\text{peak}}$, $g = 0 \text{ mm}$, $V_p = -21.9 \text{ kV}$). 同図 (a) のようにシールド端と陽極の間の絶縁物上にフラッシュオーバによる発光が観測された. 同図 (b) のようにフラッシュオーバ進展時間 T_{FO} および陰極電圧 V_p を第 3 章と同様に定義する. 図 4.3 に示すように, c-s-i-a 電極系においても第 3 章の c-i-a 電極系と同様に, $T_{FO} \propto V_p^{-2}$ の関係があることがわかる.

4. 2. 3 陰極－シールド非接触時における放電過程

c-s-i-a 電極系において, 陰極とシールド間のギャップ長 $g = 0.5 \text{ mm}$ として実験を行った. このギャップ条件において, 2 つの放電パターン (c-s および c-s-i-a) が見られた.

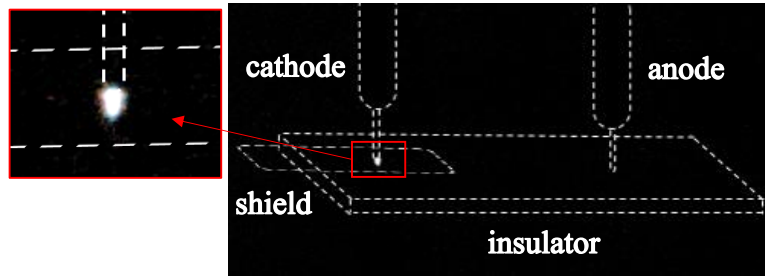
(a) c-s 間の部分破壊

図 4.4 に c-s 間のみの部分破壊 (Partial breakdown: PB) を示す ($V_a = -17.2 \text{ kV}_{\text{peak}}$, $g = 0.5 \text{ mm}$). 同図 (a) のように, c-s 間のみで微弱な発光が観測された. 同図 (b) に示すように, PB 発生直前におけるシールドに誘導電位は -0.6 kV であるため, c-s 間の電位差 $\Delta V = 16.6 \text{ kV}$ であった. c-s 間の PB に伴う発光と同時にシールド電位が陰極電位と同程度の値まで上昇し, PB の消滅によってその後の電位はほぼ一定値を維持していることがわかる. なお, 陽極電流はほとんど流れていないことから, シールドと陽極間では放電チャネルが形成されず, c-s 間の PB のみが発生したと考えることができる.

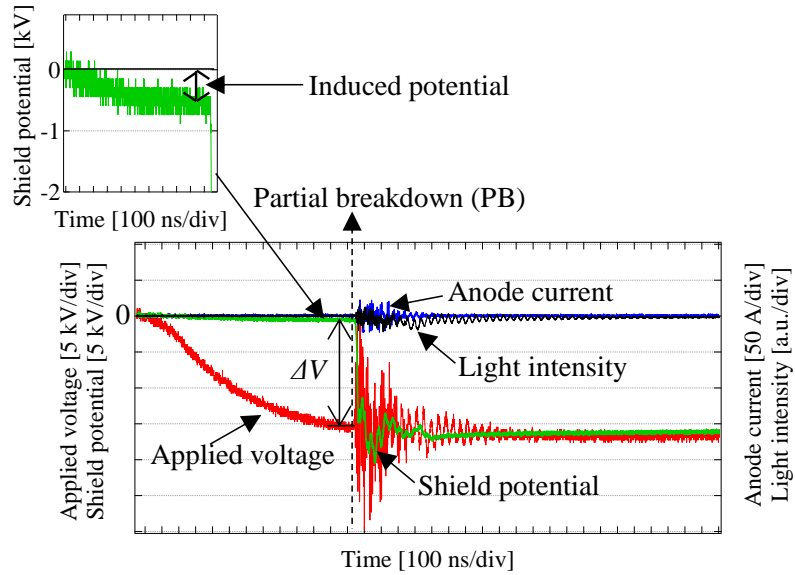
(b) c-s-i-a 間の全路破壊

印加電圧が比較的高い場合, c-s 間の PB が発生した後, 続けて s-i-a 間に沿面放電が発生し, 最終的に c-s-i-a 経路を介する全路破壊に至った. この放電パターンは, さらに 2 つのケース (case-1, case-2) に分けられる.

図 4.5 に c-s-i-a 全路破壊の case-1 を示す ($V_a = -32.7 \text{ kV}_{\text{peak}}$, $g = 0.5 \text{ mm}$, $\Delta V = 14.4$



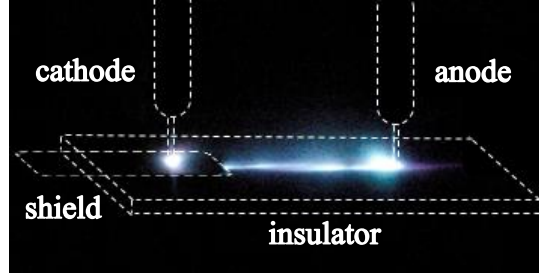
(a) Still image



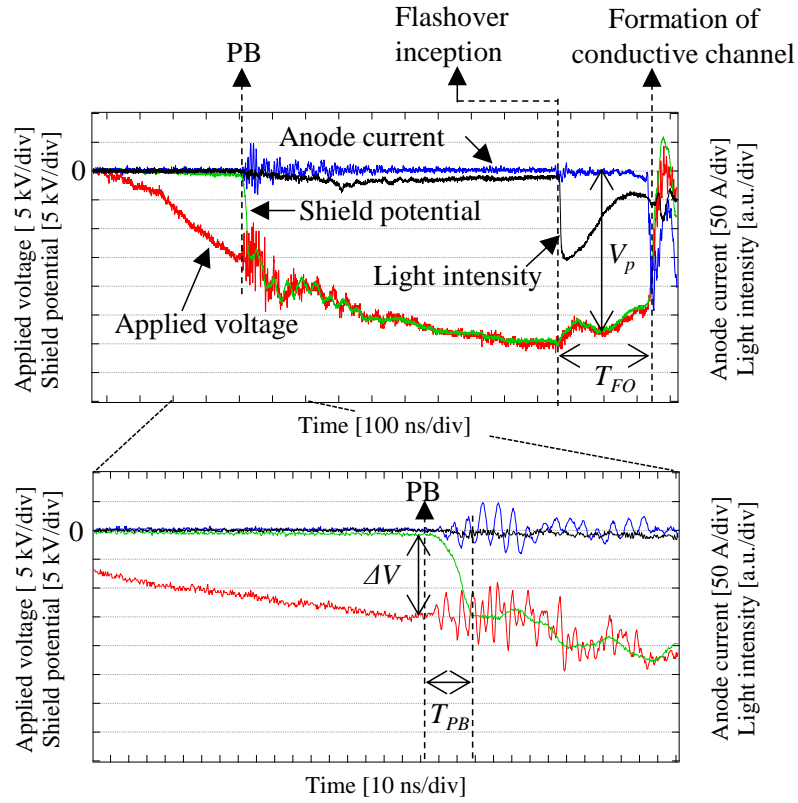
(b) Waveforms of applied voltage, shield potential, anode current and light intensity

Fig. 4.4 Still image and discharge waveforms for c-s partial breakdown in c-s-i-a electrode system.

(Initial conditions: $V_a = -17.2 \text{ kV}_{\text{peak}}$, $g = 0.5 \text{ mm}$;
Potential difference between c-s at PB: $\Delta V = 16.6 \text{ kV}$)



(a) Still image



(b) Waveforms of applied voltage, shield potential, anode current and light intensity

Fig. 4.5 Still image and discharge waveforms for case-1 of c-s-i-a discharge.

(Initial conditions: $V_a = -32.7$ kV_{peak}, $g = 0.5$ mm;

Potential difference between c-s at PB: $\Delta V = 14.4$ kV).

kV). 同図 (a) のように, c-s 間のギャップおよび s-i-a 間の絶縁物上に発光が観測された. case-1 では, 同図 (b) に示すように, c-s 間の PB に伴うシールド電位が陰極電位と同程度の値まで上昇し, その後, 発光が持続していることから, c-s 間の PB が持続していると考えられ, そのためシールド電位と陰極電位が同じ値で推移したと考えられる. 次いで, s-i-a 間の沿面放電開始に伴い SEEA が陽極に進展し, 最終的に導電チャネルが形成されることにより, シールド電位と陰極電位が同時に 0 V まで低下した.

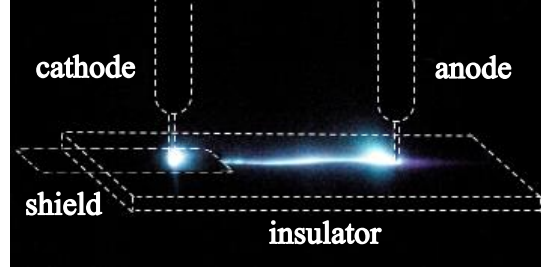
図 4.6 に c-s-i-a 全路破壊の case-2 を示す ($V_a = -31.8 \text{ kV}_{\text{peak}}$, $g = 0.5 \text{ mm}$, $\Delta V_1 = 11.1 \text{ kV}$, $\Delta V_2 = 16.6 \text{ kV}$). case-1 と異なり, c-s 間の PB に伴ってシールド電位が陰極電位と同程度の値まで上昇した後に, 一旦, c-s 間の PB の消滅によって, その後のシールド電位はほぼ一定値を維持した. 次に, s-i-a 間の沿面放電開始に伴い SEEA が陽極へ進展し絶縁物上に電流が流れることによってシールドの電荷が少なくなり, シールド電位は低下した. この時, シールドと陰極間の電位差 ΔV が大きくなるため, c-s 間の放電が再び発生し, シールド電位は陰極電位と同程度の値まで上昇した. 沿面放電がさらに進展して最終的に導電チャネルが形成されることにより, シールド電位と陰極電位が同時に 0 V まで低下した.

4. 2. 4 c-s-i-a 電極系における放電特性

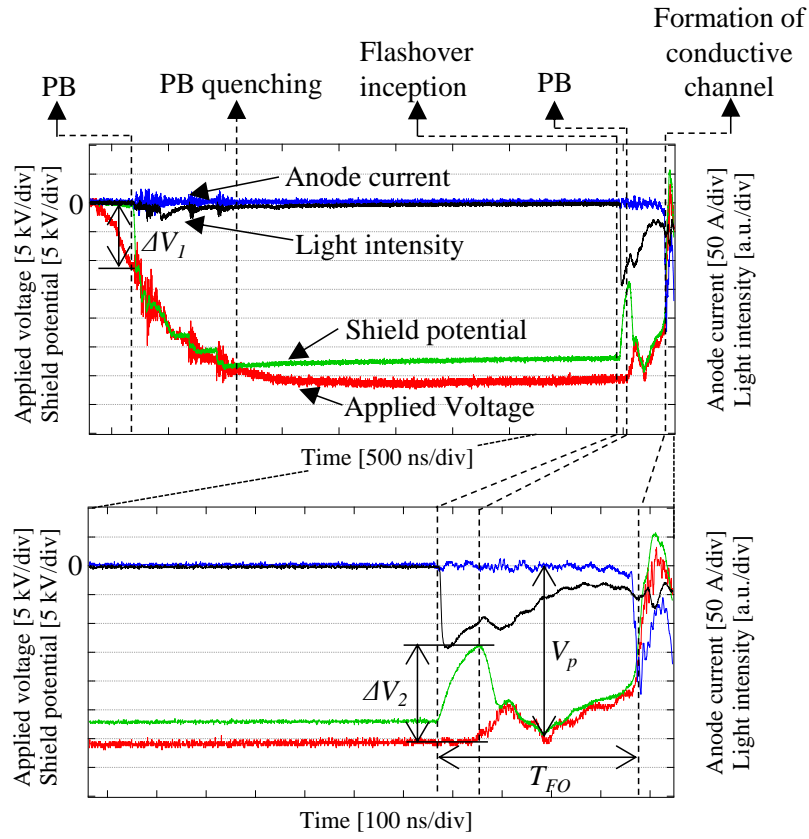
c-s-i-a 電極系における真空ギャップ間の PB 進展特性と絶縁物を介する FO 進展特性をそれぞれ考察する.

(a) c-s 間の PB

全路破壊の case-2 において, 1 回目の c-s 間放電直前の c-s 間の電位差 ΔV_1 と s-i 間の放電後の c-s 間放電直前の電位差 ΔV_2 を図 4.7 に示す (エラーバーは最大, 最小値). 同図より, ΔV_1 および ΔV_2 の平均値は互いのエラーの範囲内にあることから, ほぼ同程度の値であると言える. したがって, c-s 間の放電発生はシール



(a) Still image



(b) Waveforms of applied voltage, shield potential, anode current and light intensity

Fig. 4.6 Still image and discharge waveforms for case-2 of c-s-i-a discharge.

(Initial conditions: $V_a = -31.8 \text{ kV}_{\text{peak}}$, $g = 0.5 \text{ mm}$;

Potential difference between c-s at PB: $\Delta V_1 = 11.1 \text{ kV}$, $\Delta V_2 = 16.6 \text{ kV}$).

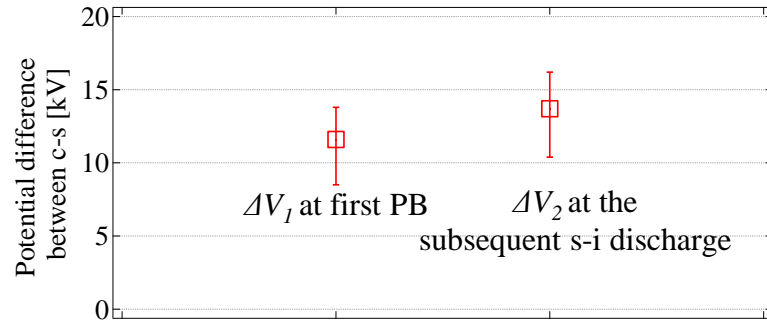


Fig. 4.7 Potential difference between cathode and shield for case-2 of c-s-i-a discharge.

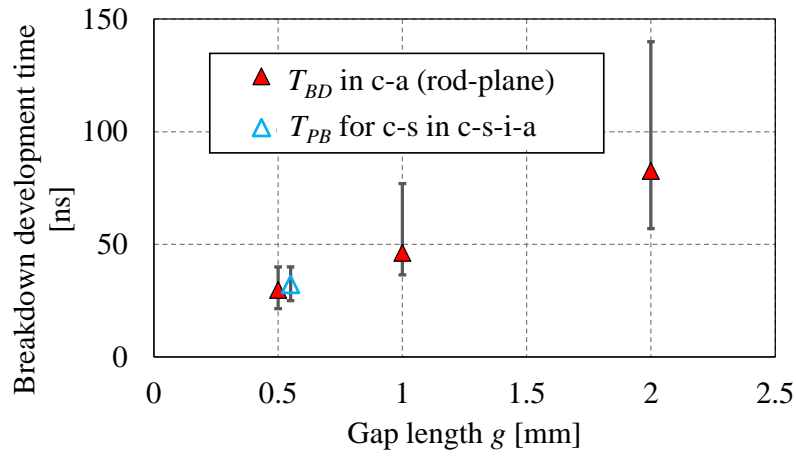


Fig. 4.8 Breakdown development time characteristics for c-a BD in rod-plane electrode system and c-s PB in c-s-i-a electrode system.

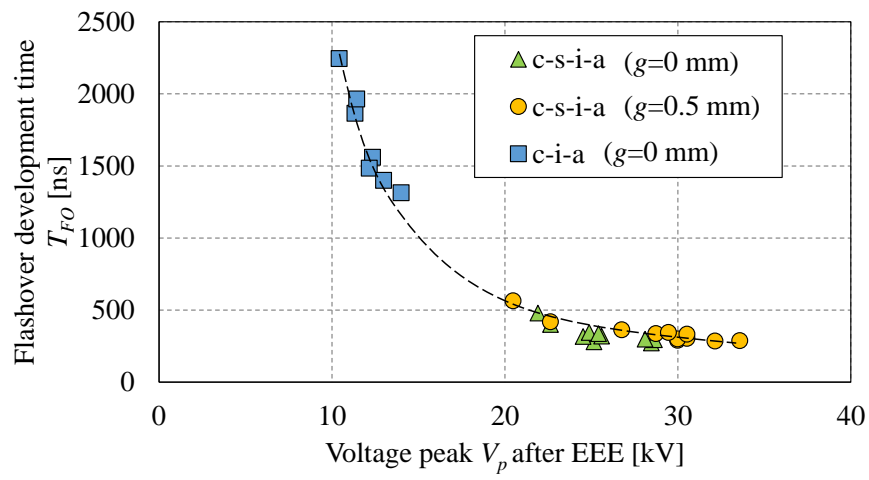


Fig. 4.9 Flashover development time characteristics for c-s-i-a and c-i-a electrode systems ($d=60$ mm).

ド電位に関らず、c-s 間の電位差によって決まると考えられる。

c-s 間の PB と第 2 章の c-a 電極系における BD はいずれもギャップ間の絶縁破壊であるため、図 4.5 (b) に示すように、c-s 間 PB において陰極からの電界電子放出によるシールド電位の立ち上がりからシールド電位が陰極電位と同程度に上昇するまでの時間を c-s 間の絶縁破壊進展時間 T_{PB} と定義する。図 4.8 に c-s-i-a 電極系における c-s 間の絶縁破壊進展時間特性と c-a 電極系における絶縁破壊進展特性 (図 2.9) を比較する。ギャップ長 $g=0.5$ mm において、 T_{PB} と T_{BD} が一致していることがわかる。したがって、c-s-i-a 電極系における短ギャップの c-s 間の PB は c-a 間の BD と同様のメカニズムによると考えられる。

(b) s-i-a 間の FO

第 3 章における c-i-a 電極系の検討と同様に、図 4.5 (b) のように s-i-a 間の沿面放電において、シールドからの電界電子放出に伴うシールド電位の立ち下がりから陽極電流の最初のピーク (s-i-a 間の導電性チャネル形成) までの時間を沿面放電進展時間 T_{FO} と定義する。また、放電時の陰極電圧ピーク値を V_p と定義する。図 4.9 に c-s-i-a における s-i-a 間の沿面放電進展時間特性を示す。図 3.1

(a) の c-i-a 電極系 ($d=60$ mm) において取得した沿面放電進展時間特性 (図 3.5) と比べると、c-i-a 電極系の $V_p - T_{FO}$ 特性の延長線上に c-s-i-a 電極系の $V_p - T_{FO}$ 特性があることがわかる。すなわち、s-i-a 間においても c-i-a 間と同様の沿面放電メカニズムにより、フラッシュオーバーが進展していると考えられ、複合経路の沿面距離 d も $V_p - T_{FO}$ 特性から推定することが可能である。

4. 3 c-i-s-a 複合経路の放電

4. 3. 1 c-i-s-a 電極構成

図 4.10 に陰極－絶縁物－シールド－陽極 (c-i-s-a) 電極系を示す。陰極、陽極、シールド、絶縁物はいずれも前節と同様のものを用いた。絶縁物を陰極と陽極の

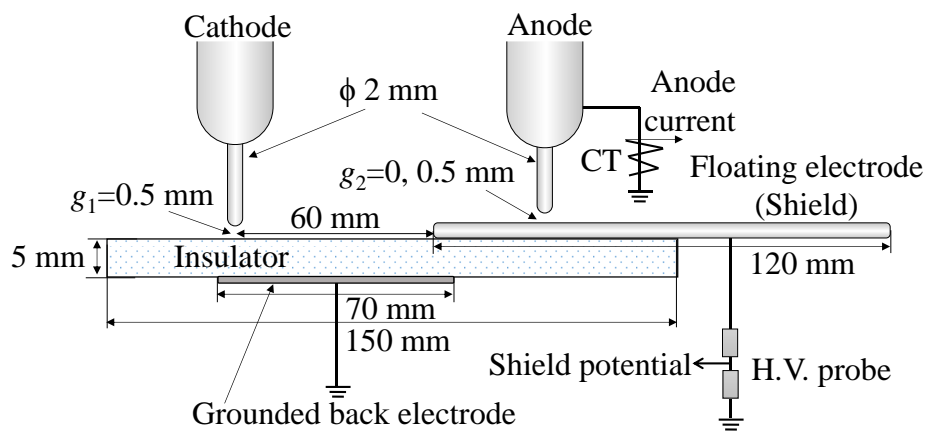
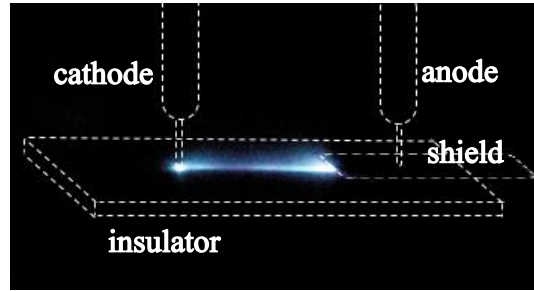
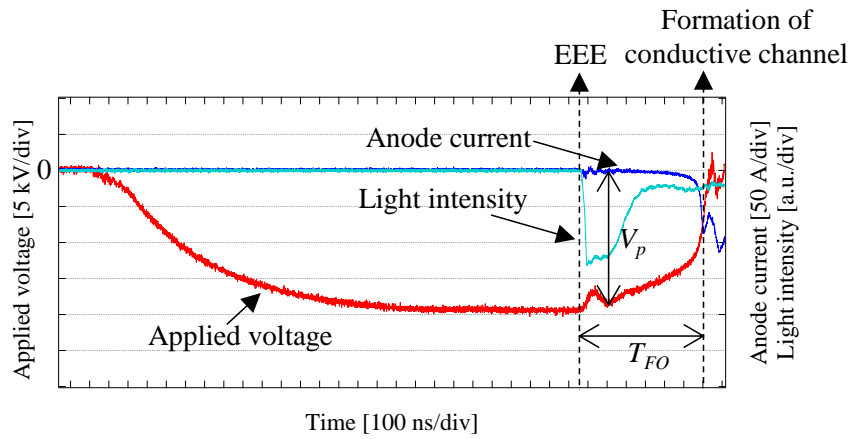


Fig. 4.10 Electrode configuration of c-i-s-a.



(a) Still image



(b) Waveforms of applied voltage, shield potential, anode current and light intensity

Fig. 4.11 Still image and discharge waveforms for surface flashover of c-i-s-a.

(Initial conditions: $V_a = -19.8$ kV_{peak}, $g_2 = 0$ mm;

Voltage peak after EEE: $V_p = -18.6$ kV)

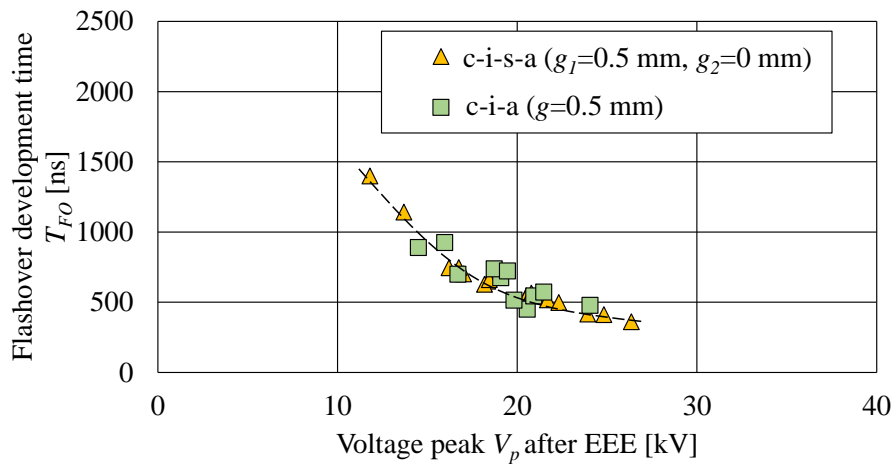


Fig. 4.12 Relation between T_{FO} and V_p of c-i-s-a ($d = 60$ mm).

直下に固定し，その上にシールド電極を置いた．陰極とシールド間の沿面距離を $d=60\text{ mm}$ とし，陰極と絶縁物間のギャップ長を $g_1=0.5\text{ mm}$ とし，絶縁物と陽極間のギャップ長を $g_2=0\text{ mm}$ または 0.5 mm とした．また，放電経路を制御するため，絶縁物の裏に接地電極 ($70\text{ mm}\times 20\text{ mm}$) を設けた．シールド電位を高インピーダンス ($100\text{ M}\Omega$) の高圧プローブで計測した．

4. 3. 2 シールドー陽極接触時における放電過程

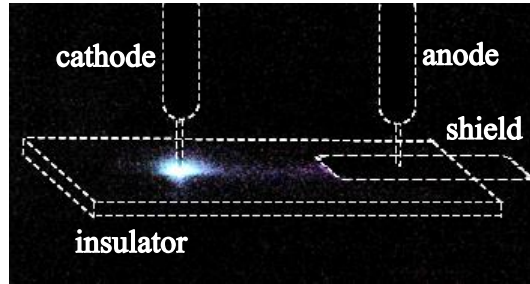
c-i-s-a 電極系において，前章の c-i-a 電極系における沿面放電特性との整合性を確認するため，シールドと陽極を接触させた実験を行った．図 4.11 に沿面放電時の静止発光像，印加電圧・シールド電位・陽極電流・発光強度波形の一例を示す ($V_a=-19.8\text{ kV}_{\text{peak}}$, $g_2=0\text{ mm}$, $V_p=-18.6\text{ kV}$)．同図 (a) のように陰極とシールドの間の絶縁物上にフラッシュオーバによる発光が観測された．同図 (b) に示すように沿面放電進展時間 T_{FO} および陰極電圧 V_p を第 3 章と同様に定義する．図 4.12 に示すように，c-i-s-a 電極系においても図 3.5 の c-i-a 電極系における $d=60\text{ mm}$ 時の $V_p - T_{FO}$ 特性と一致し， $T_{FO}\propto V_p^{-2}$ の関係があることがわかる．

4. 3. 3 シールドー陽極非接触時における放電過程

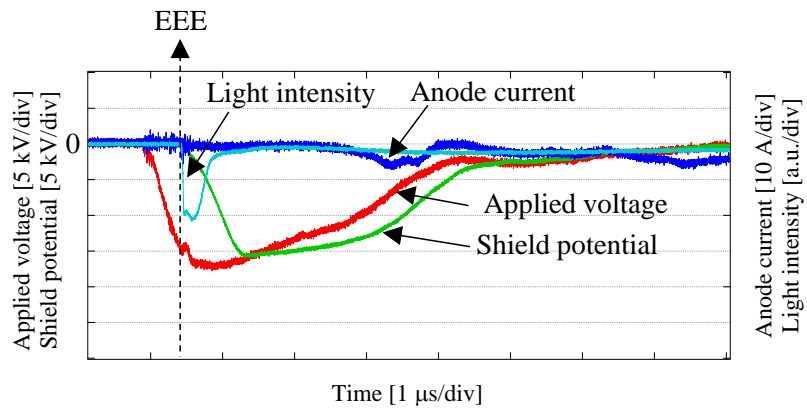
c-i-s-a 電極系において，シールドと陽極間のギャップ $g_2=0.5\text{ mm}$ として実験を行った．このギャップ条件において，2 つの放電パターン (c-i-s および c-i-s-a) が見られた．

(a) c-i-s 間の沿面放電

図 4.13 に c-i-s 間のみの沿面放電を示す ($V_a=-24.9\text{ kV}_{\text{peak}}$, $g_2=0.5\text{ mm}$)．同図 (a) のように，陰極直下付近に発光が広がるが，c-i-s 間の絶縁物上の発光は極めて微弱であり，明確な放電チャネルは形成されていないと考えられる．同図 (b) に示すように，電圧印加に伴い最初に陰極から突発的電子放出 (EEE) が発生し，沿



(a) Still image



(b) Waveforms of applied voltage, shield potential, anode current and light intensity

Fig. 4.13 Still image and discharge waveforms for c-i-s flashover in c-i-s-a electrode system.

(Initial conditions: $V_a = -24.9 \text{ kV}_{\text{peak}}$, $g_2 = 0.5 \text{ mm}$)

面放電がシールドに向かって進展することで、シールド電位が低下した。シールド電位が陰極電位と同程度の値まで至った後、s-a 間の放電チャネルは形成されていないが、シールドに蓄積された電子が絶縁物上に放出されたため、シールド電位が徐々に低下したと考えられる。この時、絶縁物上の放電によって放出された電子が真空空間に飛翔し^[1-3]、一部の電子が陽極に到達するため、陽極で数 A の電流が流れたと考えられる。

(b) c-i-s-a 間の全路破壊

印加電圧が比較的高い場合、c-i-s 間の沿面放電が発生した後、シールド電位の低下に伴い s-a 間の電位差が大きくなり、s-a 間の放電が発生することで、最終的に c-i-s-a 経路を介する全路破壊に至った。この放電パターンは、さらに 3 つのケース(case-1, case-2, case-3)に分けられる。

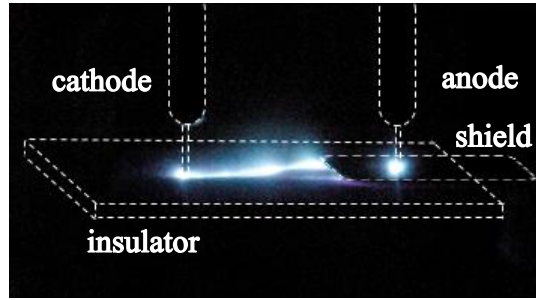
case-1 ($V_a = -44.7 \text{ kV}_{\text{peak}}$, $g_2 = 0.5 \text{ mm}$) を図 4.14 に示す。case-1 では、同図 (b) に示すように、シールド電位が陰極電位と同電位になる前に、s-a 間の放電が発生し、印加電圧が 0 V まで低下した。図 4.15 に示した case-2 ($V_a = -48.1 \text{ kV}_{\text{peak}}$, $g_2 = 0.5 \text{ mm}$) では、シールド電位が陰極電位と同電位になる時に、s-a 間の放電が発生した。また、図 4.16 に示した case-3 ($V_a = -46.4 \text{ kV}_{\text{peak}}$, $g_2 = 0.5 \text{ mm}$) では、シールド電位が陰極電位と同電位になった後に、s-a 間の放電が発生した。

4. 3. 4 c-i-s-a 電極系における放電特性

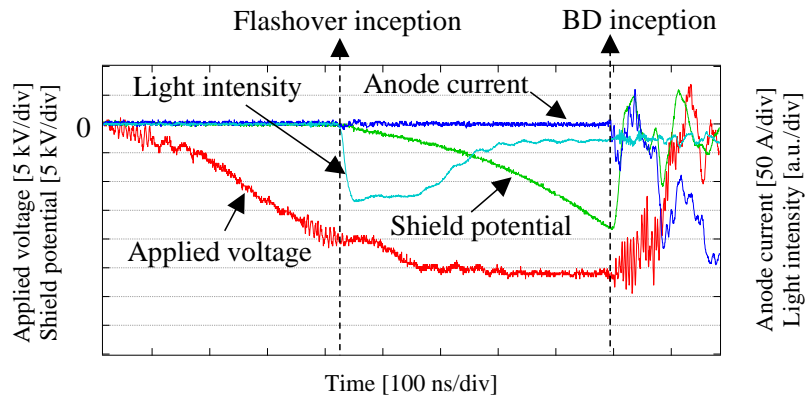
c-i-s-a 電極系における絶縁物を介する FO 進展特性と真空ギャップ間の BD 進展特性をそれぞれ考察する。

(a) c-i-s 間の FO

第 3 章における c-i-a 電極系では、放電開始から導電チャネル形成までを T_{FO} と定義したが、c-i-s 間の放電では、シールド電位が陰極電位と一致したときにアルミナ上の導電チャネルが十分に形成されたと考え、図 4.15 (b) の case-2 に示



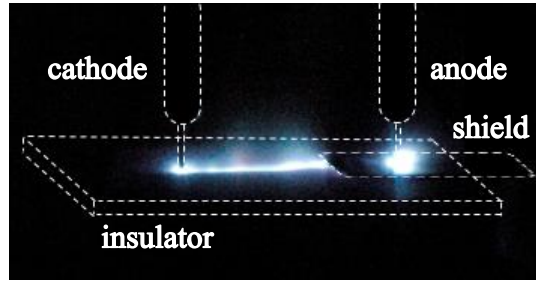
(a) Still image



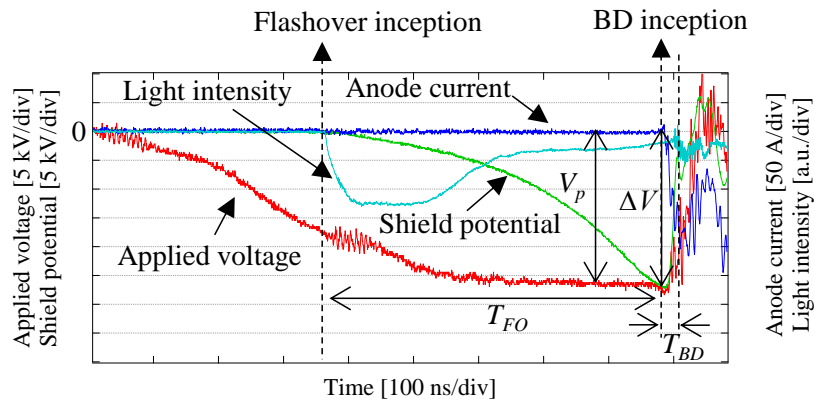
(b) Waveforms of applied voltage, shield potential, anode current and light intensity

Fig. 4.14 Still image and discharge waveforms for case-1 of c-i-s-a.

(Initial conditions: $V_a = -44.7 \text{ kV}_{\text{peak}}$, $g_2 = 0.5 \text{ mm}$)



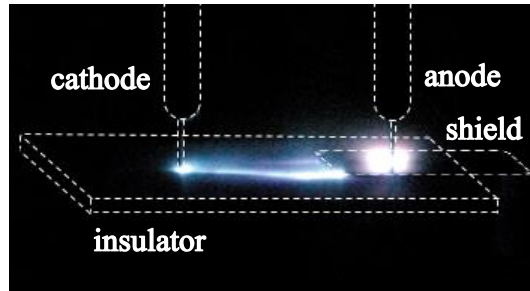
(a) Still image



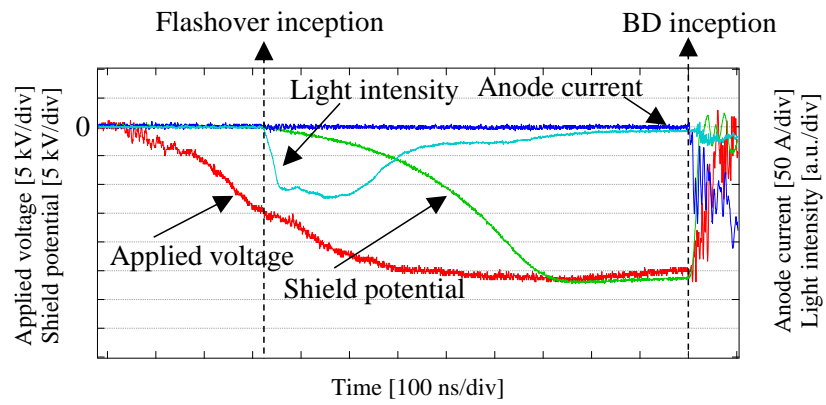
(b) Waveforms of applied voltage, shield potential, anode current and light intensity

Fig. 4.15 Still image and discharge waveforms for case-2 of c-i-s-a.

(Initial conditions: $V_a = -48.1 \text{ kV}_{\text{peak}}$, $g_2 = 0.5 \text{ mm}$)



(a) Still image



(b) Waveforms of applied voltage, shield potential, anode current and light intensity

Fig. 4.16 Still image and discharge waveforms for case-3 of c-i-s-a.
(Initial conditions: $V_a = -46.4 \text{ kV}_{\text{peak}}$, $g_2 = 0.5 \text{ mm}$)

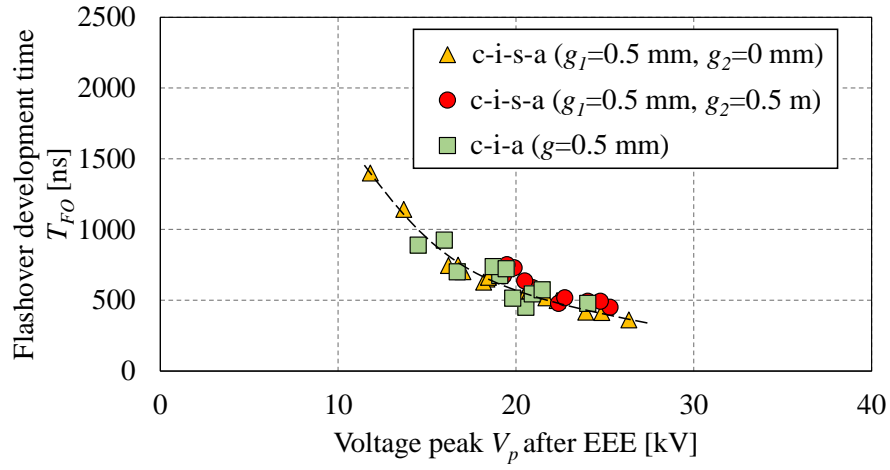


Fig. 4.17 Flashover development time characteristics for c-i-s-a and c-i-a electrode systems ($d=60$ mm).

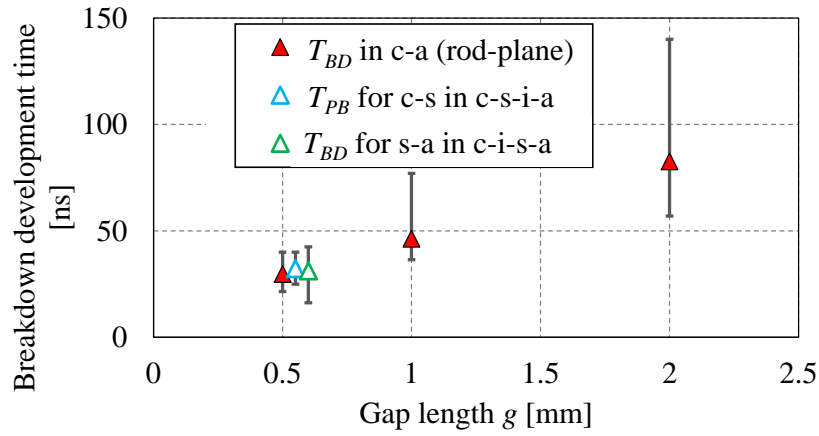


Fig. 4.18 Breakdown development time characteristics for s-a BD in c-i-s-a electrode system, c-a BD in rod-plane electrode system, c-s BD in c-s-i-a electrode system.

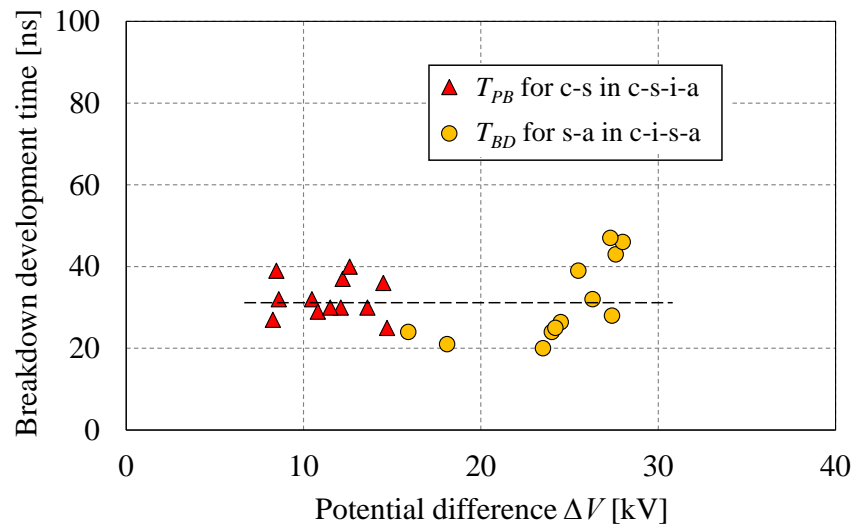


Fig. 4.19 Breakdown development time T_{PB} at various potential difference ΔV between c-s and T_{BD} at various potential difference ΔV between s-a for vacuum gap discharge at gap length of 0.5 mm

すように、c-i 間の放電開始からシールド電位が陰極電位と同程度に上昇するまでの時間を沿面放電進展時間 T_{FO} と定義する．また、c-i 間の放電開始後の陰極電圧ピーク値 V_p を定義する．図 4.17 に c-i-s-a 電極系における c-i-s 間の沿面放電進展時間特性を c-i-a ($d=60\text{ mm}$) における特性と併せて示す．c-i-a 電極系において取得した沿面放電進展時間特性と比べると、陽極側の電極形状に大きくは依存せず、沿面放電進展時間特性が一致していることがわかる．

(b) s-a 間の BD

s-a 間の放電と第 2 章の c-a 電極系における BD はいずれもギャップ間の絶縁破壊であるため、図 4.15 (b) に示すように s-a 間の放電開始から陽極電流の最初のピークまでの時間を絶縁破壊進展時間 T_{BD} と定義する．また、絶縁破壊開始時のシールドと陽極間の電位差を ΔV と定義する．図 4.18 に c-i-s-a 電極系における s-a 間の絶縁破壊進展時間特性を c-a 間（図 2.9）および c-s-i-a 電極系における c-s 間（図 4.8）の特性と併せて示す．同図より、ギャップ長が 0.5 mm の時、電極構成に関らず T_{BD} が一致していることがわかる．この結果より、短ギャップにおいて、陰極と陽極の形状に関わらず、絶縁破壊メカニズムは同様であると考えられる．

図 4.19 に複合絶縁系における絶縁破壊進展時間 (T_{PB}, T_{BD}) とギャップ間の電位差 (ΔV) の関係を示す．第 2 章の c-a 電極系における放電と同様に、複合絶縁系における絶縁破壊進展時間はギャップ間の電位差に関わらず一定であることがわかった．

4. 4 まとめ

本章では、陰極－シールド－絶縁物－陽極 (c-s-i-a) および陰極－絶縁物－シールド－陽極 (c-i-s-a) の 2 種類の電極系において、複合経路の放電発生・進展過程を検討し、以下のことを明らかにした．

● c-s-i-a 電極系：

(1) 印加電圧により，c-s 間の部分破壊と c-s-i-a 間の全路破壊の 2 つの放電パターンが生じる．

(2) c-s 間の部分破壊に関しては，放電開始が c-s 間の電位差に依存し，絶縁破壊進展特性は単一経路のギャップ放電と一致する．

(3) c-s-i-a 間の全路破壊に関しては，c-s 間のギャップ放電と s-i-a 間の沿面放電の 2 つの過程に分類でき，各過程の放電進展特性は単一経路における放電進展特性と一致する．

● c-i-s-a 電極系：

(1) 印加電圧により，c-i-s 間の沿面放電と c-i-s-a 間の全路破壊の 2 つの放電パターンが生じる．

(2) c-i-s 間の沿面放電に関しては，シールド電位は陰極電位と同程度の値まで上昇した後，徐々に降下する．この時，陽極で数 A の電流が流れる．

(3) c-i-s-a 間の全路破壊に関しては，c-i-s 間の沿面放電と s-a 間のギャップ放電の 2 つの過程に分類でき，各過程の放電進展特性は単一経路における放電進展特性と一致する．

以上より，真空中複合絶縁系における放電過程は，ギャップ間の BD と固体絶縁物上の沿面放電との組み合わせであり，放電進展特性は各単一経路の放電進展特性と一致することを明らかにした．したがって，真空インタラプタ内部の複合絶縁系における放電経路に対して，単一経路の放電特性に基づいて放電箇所および放電経路を推定できると期待される．

第 4 章の参考文献

- [1] 福田, 藤井, 奥村, 高橋:「電子ビーム照射による真空中浮遊導体からの ESD」, 31st ISAS Space Energy Symposium, 2012.
- [2] J. R. Harris, A. I. Yilmaz and D. D. Snyder: “Expansion of a Surface Flashover Plasma”, IEEE Transactions on Plasma Science, Vol.41, No.12, pp.3624-3633, 2013.
- [3] J. R. Harris, “Measurements of an Expanding Surface Flashover Plasma”, Journal of Applied Physics, 115, 193302, 2014.

第5章 真空中放電経路の識別手法と実験的検証

5. 1 まえがき

前章までに、真空中のギャップ間放電、固体絶縁物を介する沿面放電および複合経路の放電特性を明らかにした。複合経路における放電進展特性は各単一経路の放電進展特性と一致するため、真空インタラプタ (VI) 内部の複合絶縁系において、単一経路の放電特性に基づいた放電箇所および放電経路の推定が期待できる。本章では、真空インタラプタの製品試験時における絶縁上の弱点の検出に向けて前章までの実験結果から真空中複合絶縁系における放電の特徴量を抽出し、放電進展特性に基づく放電経路の識別手法を提案し、VI モデルにおいて実験的検証を行う。

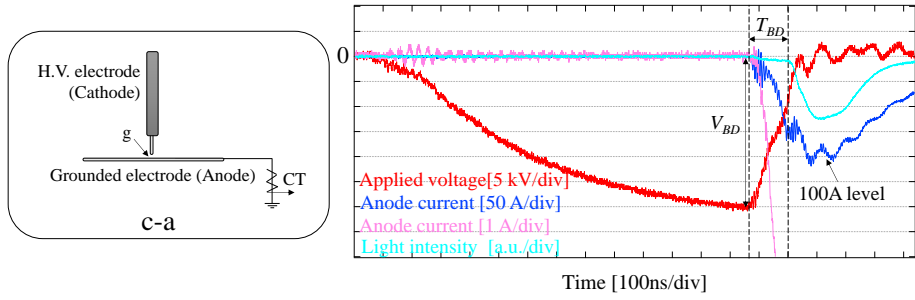
5. 2 放電進展特性に基づく放電経路の識別方法

5. 2. 1 各放電経路における特徴量の抽出

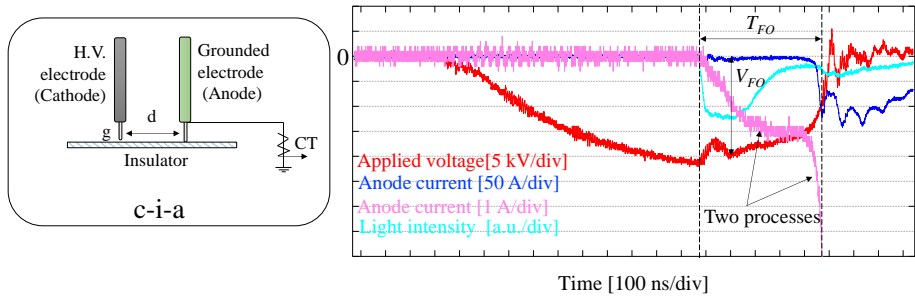
真空中の各放電経路において取得された典型的な波形（電圧波形、電流波形、シールド電位波形、発光強度波形）を図 5.1 (1) ～ (8) にまとめて示す。セラミック絶縁筒を用いた VI では、内部の発光を観測することは困難であるため、VI 内部の放電パターン・放電経路をここで示した電圧波形、電流波形、シールド電位波形から識別することを考える。

各電極系および放電経路における放電パターンの特徴量を抽出し、表 5.1 にまとめて示す。同表において、電圧波形、電流波形、シールド電位波形の特徴と放電経路の相関として、以下のことがわかる。

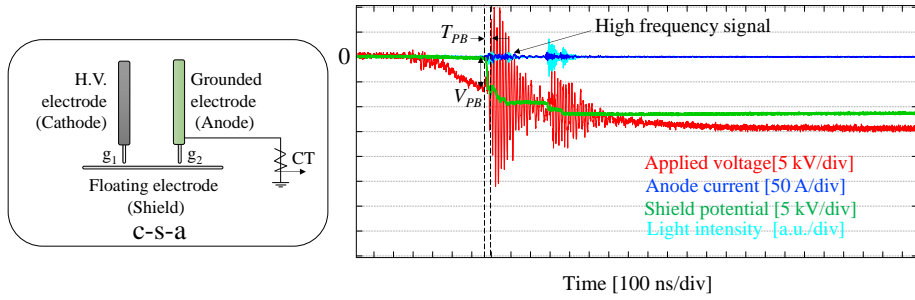
c-a と c-i-a における放電はいずれもシールドを介しないため、シールド電位が陰極電位と同程度の電位にまでは達しない。また、c-i-a における沿面放電の陽極電流は 2 段階で上昇するという特徴を持つ。



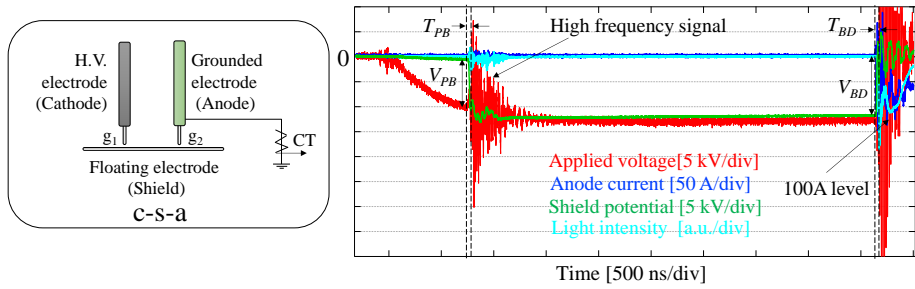
(1) c-a ($g=4$ mm)



(2) c-i-a ($d=60$ mm, $g=0.5$ mm)

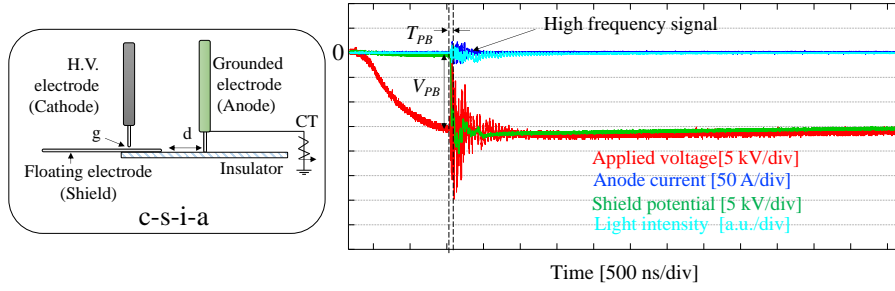


(3) c-s pattern in c-s-a ($g_1=g_2=0.25$ mm)

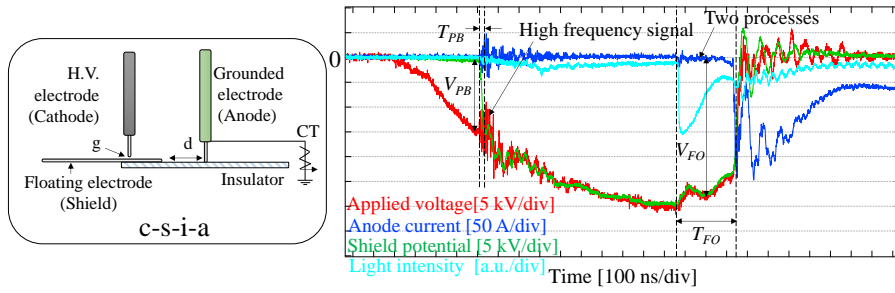


(4) c-s-a ($g_1=g_2=0.25$ mm)

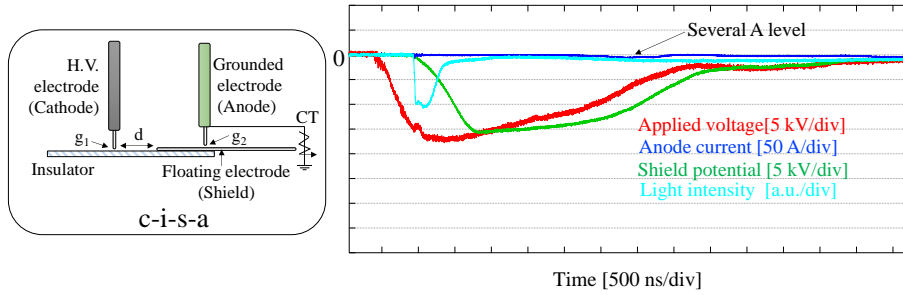
Fig. 5.1 Typical discharge waveforms for various discharge patterns.



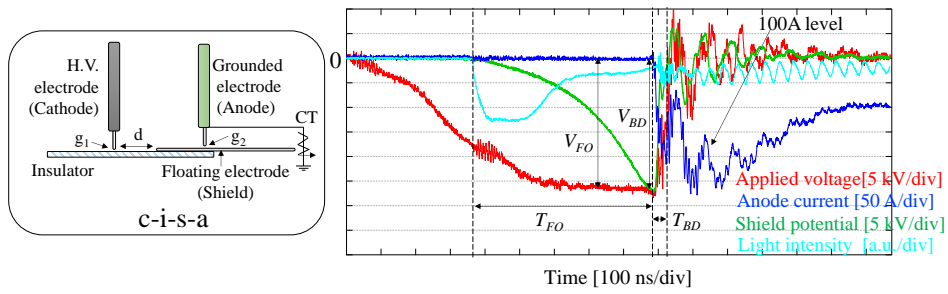
(5) c-s pattern in c-s-i-a ($g=0.5$ mm, $d=60$ mm)



(6) c-s-i-a ($g=0.5$ mm, $d=60$ mm)



(7) c-i-s pattern in c-s-i-a ($g_1=g_2=0.5$ mm, $d=60$ mm)



(8) c-i-s-a ($g_1=g_2=0.5$ mm, $d=60$ mm)

Fig. 5.1 Typical discharge waveforms for various discharge patterns.

Table 5.1 Discharge characteristics of various discharge patterns.

○: With ×: Without

Electrode system	Discharge pattern	Discharge feature							Path length estimation
		Cathode potential		Anode current			Shield potential		Path length dependence for discharge development time
		High frequency signal	Fall down to 0 V	High frequency signal	Rise up to 100 A level	Rise with two processes	Rise up to applied voltage→Holding	Rise up to applied voltage→Fall down	
c-a	BD	×	○	×	○	×	×	×	$T_{BD} \rightarrow g$
c-i-a	FO	×	○	×	○	○	×	×	$T_{FO} \rightarrow d$
c-s-a	c-s (PB)	○	×	○	×	×	○	×	$T_{PB} \rightarrow g$
	BD	○	○	○	○	×	×	○	$T_{BD} \rightarrow g$
c-s-i-a	c-s (PB)	○	×	○	×	×	○	×	$T_{PB} \rightarrow g$
	c-s-i-a (PB+FO)	○	○	○	○	○	×	○	$T_{PB} \rightarrow g$ $T_{FO} \rightarrow d$
c-i-s-a	c-i-s (FO)	×	○	×	×	×	×	○	$T_{FO} \rightarrow d$
	c-i-s-a (FO+BD)	×	○	×	○	×	×	○	$T_{FO} \rightarrow d$ $T_{BD} \rightarrow g$

c-s-a, c-s-i-a, c-i-s-a における放電はシールドを介するため、シールド電位が陰極電位と同程度にまで上昇するという特徴を持つ。また、c-s における PB が発生する時、印加電圧と陽極電流波形に高周波信号が現れ、シールド電位が陰極電位と同程度にまで上昇し維持する。c-s-a における BD (Breakdown) が発生する時は、最初に c-s 間の PB (Partial breakdown) が起こるとともに、印加電圧と陽極電流波形に高周波信号が現れ、シールド電位が陰極電位と同程度の電位にまで上昇した後、s-a 間の破壊に伴い、本実験回路においては陽極に 100 A 程度の電流が流れ、シールド電位と印加電圧は 0 V まで低下する。

c-s-i-a における全路破壊は、最初に c-s 間の PB が起こるとともに、印加電圧と陽極電流波形に高周波信号が現れ、シールド電位が陰極電位と同程度の電位にまで上昇した後、s-i-a 間の沿面放電の開始に伴い陽極電流が 2 段階で上昇し、シールド電位と印加電圧は 0 V まで低下する。

c-i-s-a における c-i-s 間のみで沿面放電が発生する時は、シールド電位が陰極電位と同程度の電位にまで上昇した後、本実験回路においては陽極に数 A 程度の電流が流れ、印加電圧は 0 V まで低下する。

c-i-s-a における全路破壊は、最初に c-i-s 間の沿面放電が発生するとともに、シールド電位が上昇した後、s-a 間の BD の発生に伴い、本実験回路においては陽極に数 100 A 程度の電流が流れ、印加電圧は 0 V まで低下する。

5. 2. 2 放電経路識別フロー

表 5.1 において、各放電パターンで互いにすべての特徴が一致するものはないため、各放電経路を識別できると考えられる。電圧・電流波形の特徴から比較的識別精度が高いと思われる特徴量を用いた各放電パターンの識別フローを図 5.2 に示す。識別フローには 3 つのステップがある。

①シールド電位の推移から放電経路を 3 種類 (シールドを介しない放電, シー

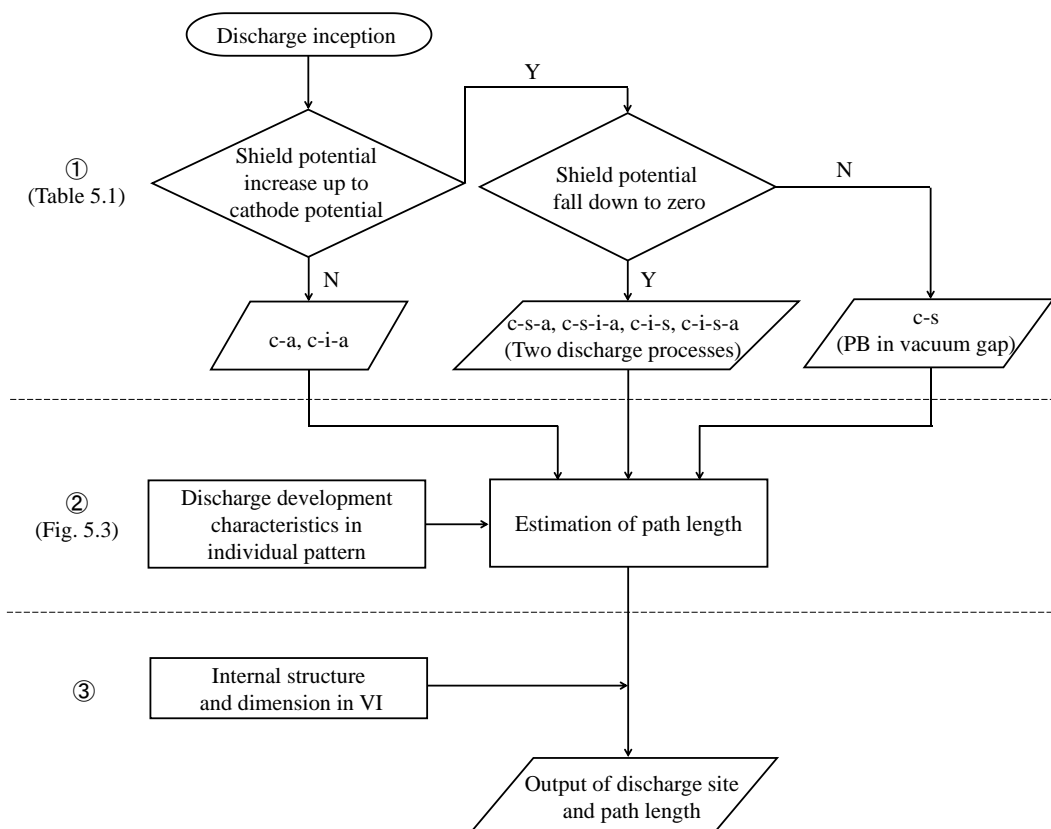


Fig. 5.2 Diagnosis flowchart.

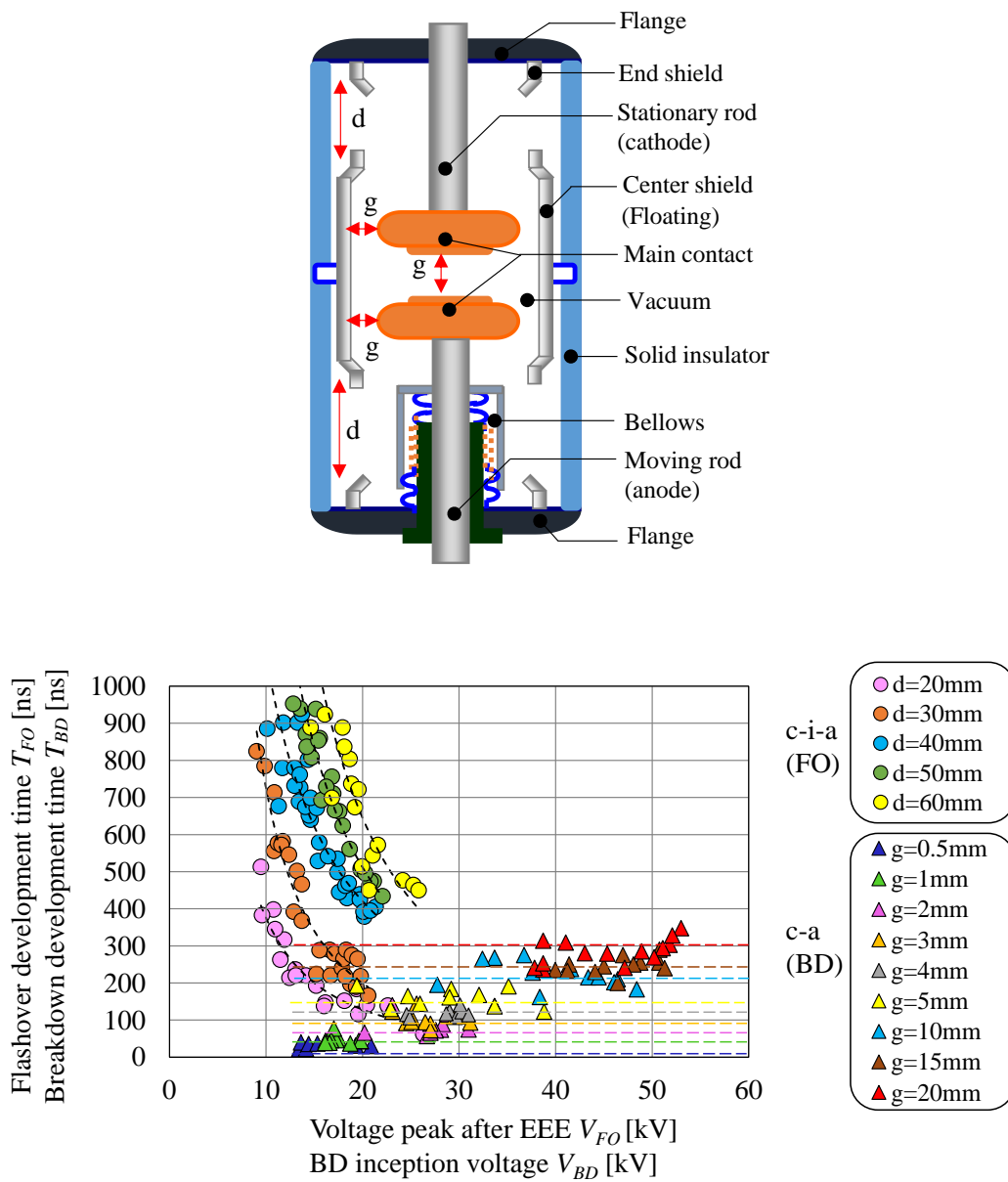


Fig. 5.3 Discharge development characteristics for BD and FO in VI.

ルドを介する放電，c-s 間の PB）に類別する．

②単一経路のギャップ間放電および沿面放電における T_{BD} と T_{FO} の電圧 (V_{FO} , V_{BD}) や沿面距離 (d)，ギャップ長 (g) に対する特性をまとめた図 5.3 に基づいて各放電の経路長を推定する．

③VI 内部の構造・寸法（ギャップ長，沿面距離，など）を考慮して放電の起点や箇所（絶縁弱点）を推測する．

5. 3 VI モデルにおける検証実験

前節で提案した識別手法を検証するため，VI 内部の複合絶縁系を模擬する VI モデルを構築し検証実験を行う．

5. 3. 1 検証実験用 VI モデル

図 5.4 に検証実験用 VI モデルを示す．真空インタラプタの内部構造を模擬し，真空容器内に上部電極 (u) - 陰極 (c) - 陽極 (a) - 下部電極 (l) - シールド (浮遊電極, s) - 固体絶縁物 (i) から成る検証電極系を構築した．上部電極と下部電極はステンレス平板電極であり，VI 端部のフランジを模擬している．陰極と陽極は銅平板電極であり，主接点を模擬している．絶縁円筒を模擬するため，固体絶縁物としてのアルミナ平板 ($150\text{ mm} \times 150\text{ mm} \times 5\text{ mm}^{\text{t}}$) は上部電極および下部電極と接触させた．中間シールドを模擬するため，アルミナ平板の中心にステンレス平板 ($90\text{ mm} \times 90\text{ mm} \times 2\text{ mm}^{\text{t}}$) を設置した．下部電極を接地し，上部電極に負極性標準雷インパルス電圧を印加し，前章と同様に，印加電圧を分圧器，陽極電流を高周波 CT，シールド電位を高圧プローブにより測定した．これらと同時に，デジタルカメラにより放電の静止発光像を取得した．

5. 3. 2 検証実験結果と考察

本実験では，図 5.4 の各ギャップ長 (g_1, g_2, g_3, g_4, g_5) をパラメータとして放電

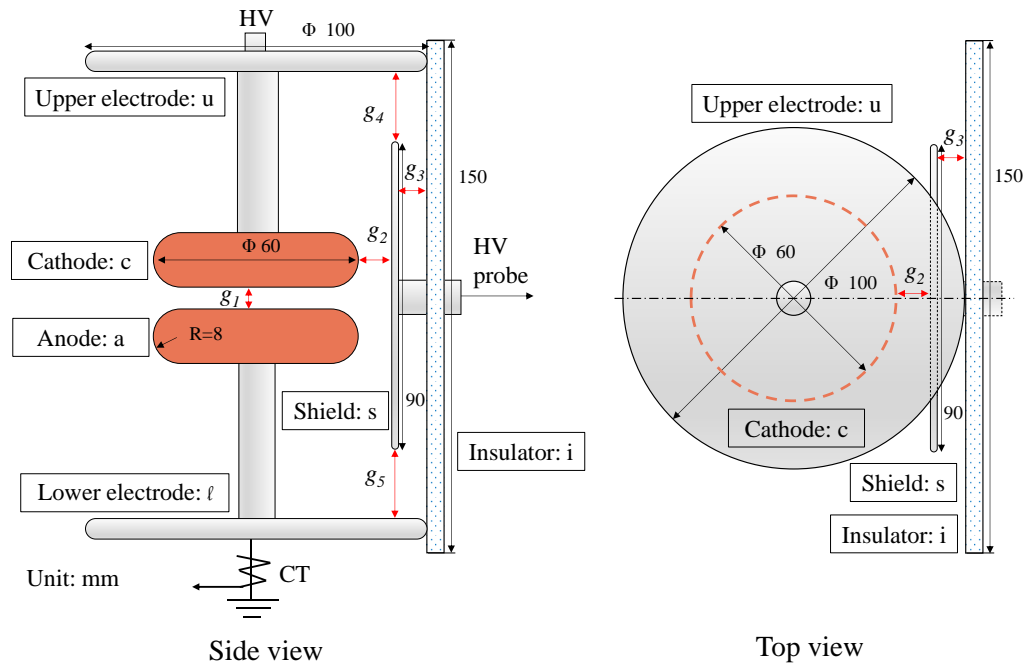


Fig. 5.4 VI model for verification test.

Table. 5.2 Gap setting and experiment results for VI model.

Gap setting [mm]	a	b	c	d
g_1	0.5~1.5	5	50	5
g_2	1			18
g_3	17			0
g_4	23.5			
g_5	23.5			
Discharge path	c-a	1. c-s 2. u-i-s→u-i-l	u-i-s-a	u-i-s-i-l

信号（印加電圧・陽極電流・シールド電位）を取得し、5.2 節で示した識別手法による放電経路と経路長を推定する。さらに、推定結果と静止発光像により確認した放電経路を比較し、推定結果の妥当性を検討する。

表 5.2 に検証を行ったギャップ設定と実験結果の一覧を示す。シールドの端部と上部電極および下部電極間のギャップ長（ g_4, g_5 ）は固定し、 g_1, g_2, g_3 を調整することによって 4 つの実験条件（a, b, c, d）を設定した。

（実験 a） $V_a = -21.5 \text{ kV}_{\text{peak}}, g_1 = 1 \text{ mm}, g_2 = 1 \text{ mm}, g_3 = 17 \text{ mm}$ （c-a 経路）

① シールド電位の推移

図 5.5 に絶縁破壊時に取得された波形を示す。同図に示すように、シールド電位が陰極電位と同程度の電位にまでは達しないため、シールドを介していない放電であると考えられる。

② 放電進展特性の分析

同図に示すように、放電開始時の陰極電圧を V と定義し、放電開始から陽極電流の最初のピークまでの時間を放電進展時間 T と定義する。図 5.3 中に赤色の×印としてプロットしたものを図 5.6 に示す。単一経路の放電進展時間特性と比べ、 T は $g = 1 \text{ mm}$ のギャップ間放電の値とほぼ一致した。

③ 放電経路の推定

①②より、放電経路は c-a ギャップ間の放電であり、経路長は約 1 mm と推定される。

この結果は、図 5.7 の発光像によって確認された放電箇所および放電経路と合致していることがわかる。

（実験 b-1） $V_a = -25.8 \text{ kV}_{\text{peak}}, g_1 = 5 \text{ mm}, g_2 = 1 \text{ mm}, g_3 = 17 \text{ mm}$ （c-s 経路）

① シールド電位の推移

図 5.8 に部分破壊時に取得された波形を示す。同図に示すように、シールド電

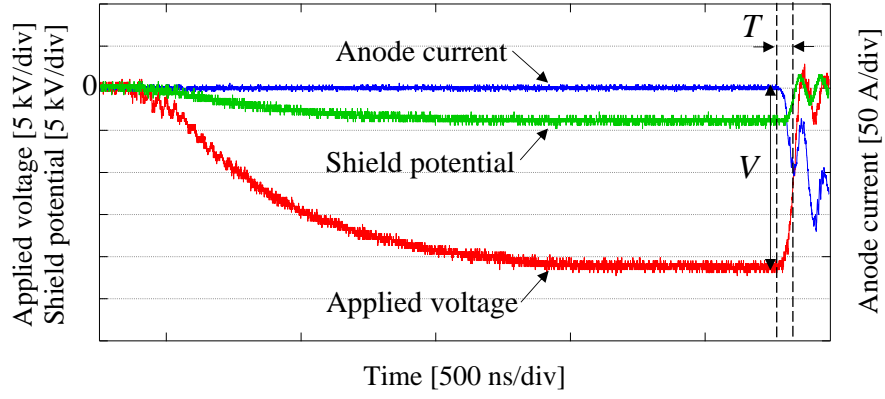


Fig. 5.5 Discharge waveforms for experiment (a).
 $(V_a = -21.5 \text{ kV}_{\text{peak}}, g_1 = 1 \text{ mm}, g_2 = 1 \text{ mm}, g_3 = 17 \text{ mm})$

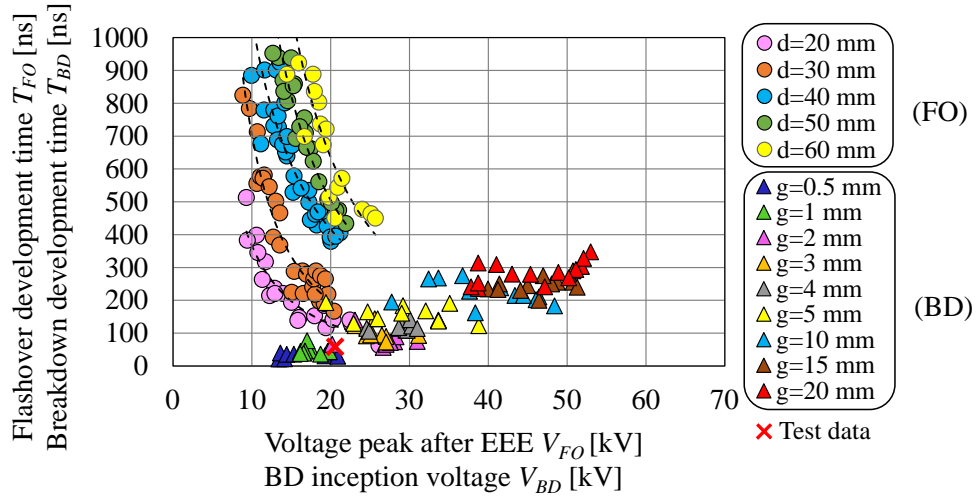


Fig. 5.6 Discharge development characteristics for experiment (a).
 $(V_a = -21.5 \text{ kV}_{\text{peak}}, g_1 = 1 \text{ mm}, g_2 = 1 \text{ mm}, g_3 = 17 \text{ mm})$

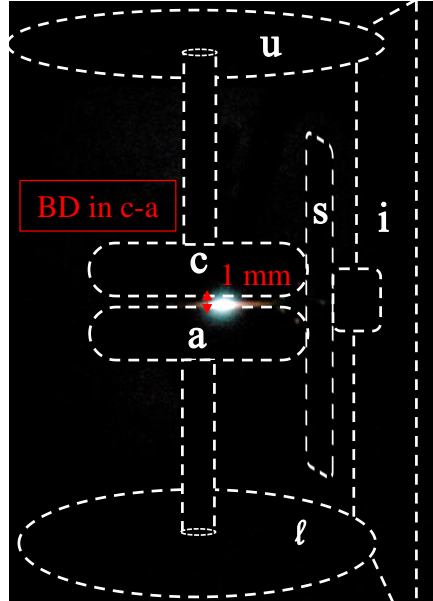


Fig. 5.7 Still image for discharge in experiment (a).
 ($V_a = -21.5 \text{ kV}_{\text{peak}}$, $g_1 = 1 \text{ mm}$, $g_2 = 1 \text{ mm}$, $g_3 = 17 \text{ mm}$)

位は陰極電位と同程度の電位まで上昇し、その後、シールド電位が低下せずに一定の値を維持するため、ギャップ間の PB であると考えられる。

② 放電進展特性の分析

同図に示すように、放電開始時の陰極とシールド間の電位差を V と定義し、放電開始からシールド電位が陰極電位と同程度に上昇するまでの時間を放電進展時間 T と定義する。図 5.3 に赤色の×印としてプロットしたものを図 5.9 に示す。単一経路の放電進展時間特性と比べ、 T は $g=1\text{ mm}$ のギャップ間放電の値とほぼ一致した。

③ 放電経路の推定

①②より、放電経路長は約 1 mm と推定され、放電経路は c-s ギャップ間の PB と推定される。

この結果は、図 5.10 の発光像によって確認された放電箇所および放電経路と合致していることがわかる。

(実験 b-2) $V_a=-34.4\text{ kV}_{\text{peak}}$, $g_1=5\text{ mm}$, $g_2=1\text{ mm}$, $g_3=17\text{ mm}$ (u-i-s→u-i-l 経路)

① シールド電位の推移

図 5.11 に絶縁破壊時に取得された波形を示す。同図に示すように、シールド電位は陰極電位と同程度の電位まで 上昇し、その後、シールド電位と印加電圧が同時に 0 V まで降下する。以上より、これはシールドを介する放電であり、放電は 2 つの過程 (First process, Second process) があると考えられる。

② 放電進展特性の分析 および ③ 放電経路の推定

同図に示すように、シールド電位上昇過程 (First process) において EEE 発生後の陰極電圧ピーク (V_I) と放電進展時間 (T_I) を定義し、シールド電位降下過程 (Second process) においてシールド電位 (V_2) と放電進展時間 (T_2) を定義し、図 5.3 中に赤色の×印としてそれぞれプロットしたものを図 5.12 に示す。シー

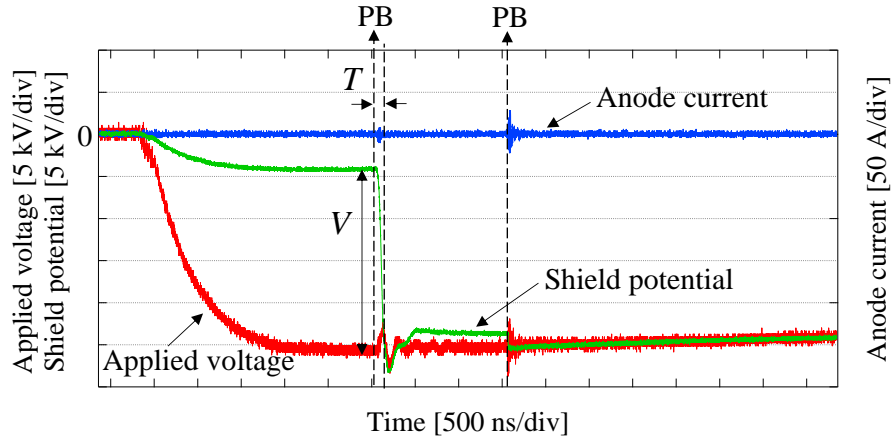


Fig. 5.8 Discharge waveforms for experiment (b-1).
($V_a = -25.8 \text{ kV}_{\text{peak}}$, $g_1 = 5 \text{ mm}$, $g_2 = 1 \text{ mm}$, $g_3 = 17 \text{ mm}$)

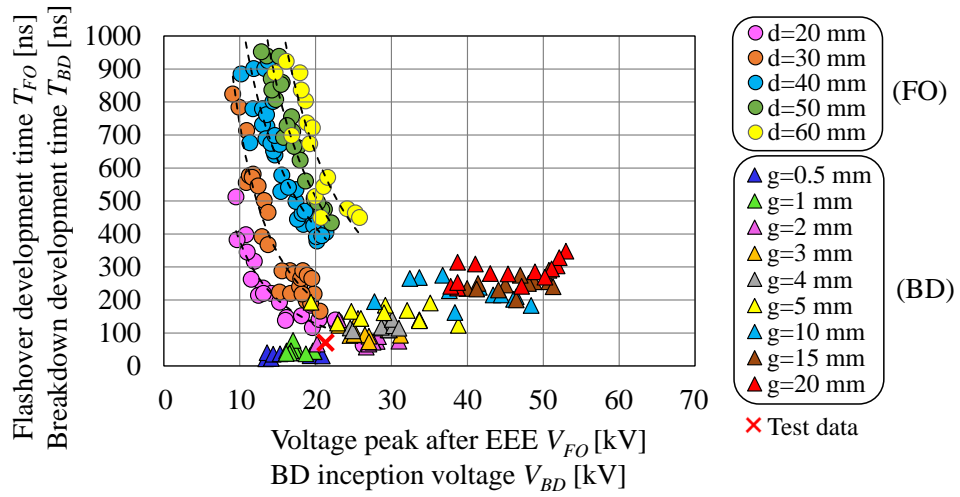


Fig. 5.9 Discharge development characteristics for experiment (b-1).
($V_a = -25.8 \text{ kV}_{\text{peak}}$, $g_1 = 5 \text{ mm}$, $g_2 = 1 \text{ mm}$, $g_3 = 17 \text{ mm}$)

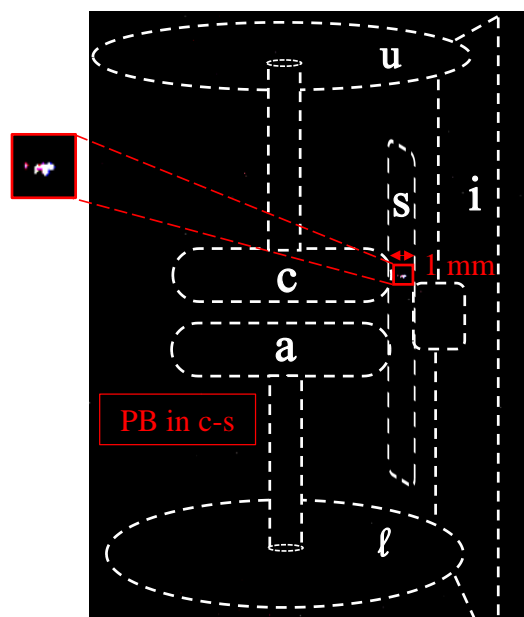


Fig. 5.10 Still image for discharge in experiment (b-1).
 $(V_a = -25.8 \text{ kV}_{\text{peak}}, g_1 = 5 \text{ mm}, g_2 = 1 \text{ mm}, g_3 = 17 \text{ mm})$

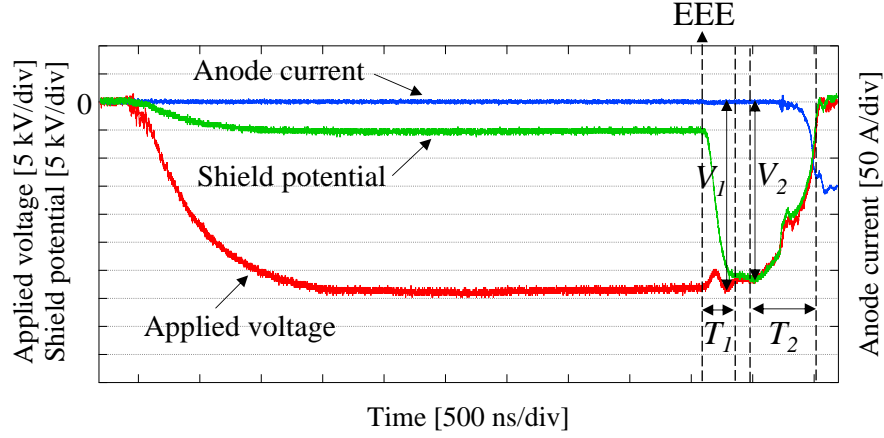


Fig. 5.11 Discharge waveforms for experiment (b-2).
 $(V_a = -34.4 \text{ kV}_{\text{peak}}, g_1 = 5 \text{ mm}, g_2 = 1 \text{ mm}, g_3 = 17 \text{ mm})$

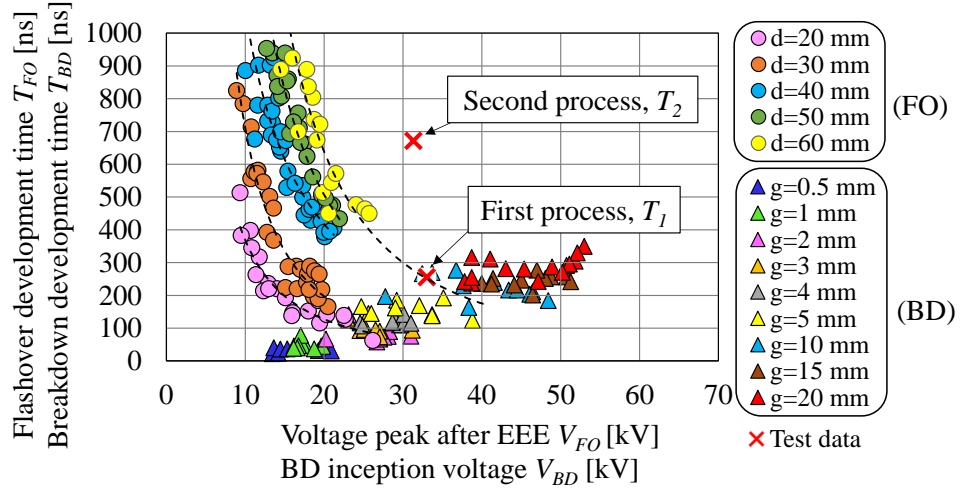


Fig. 5.12 Discharge development characteristics for experiment (b-2).
 $(V_a = -34.4 \text{ kV}_{\text{peak}}, g_1 = 5 \text{ mm}, g_2 = 1 \text{ mm}, g_3 = 17 \text{ mm})$

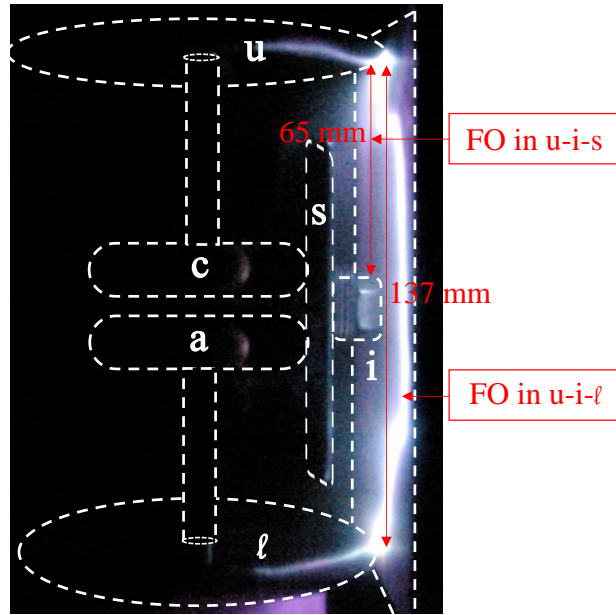


Fig. 5.13 Still image for discharge in experiment (b-2).
 $(V_a = -34.4 \text{ kV}_{\text{peak}}, g_1 = 5 \text{ mm}, g_2 = 1 \text{ mm}, g_3 = 17 \text{ mm})$

ルド電位上昇過程においては、単一経路の放電進展時間特性と比べ、 T_1 は2つの可能性があり、一つは $g=10\sim 20$ mm のギャップ間放電の値と一致し、もう一つは $d=60$ mm の沿面放電における特性を外挿した値と一致した。図 5.4 の VI モデルには、 $g=10\sim 20$ mm のギャップが存在しないため、この放電過程は上部電極とシールド間 (u-i-s) の沿面放電であり、沿面距離は約 60 mm と推定される。シールド電位降下過程においては、 T_2 は $d=60$ mm 以上の沿面放電に相当するため、この放電過程は上部電極と下部電極間 (u-i-l) の沿面放電と推定される。

この結果は、図 5.13 の発光像によって確認された放電箇所および放電経路と合致していることがわかる。

(実験 c) $V_a=-47.3$ kV_{peak}, $g_1=50$ mm, $g_2=1$ mm, $g_3=17$ mm (u-i-s-a 経路)

① シールド電位の推移

図 5.14 に絶縁破壊時に取得された波形を示す。同図に示すように、シールド電位は陰極電位と同程度の電位まで上昇し、その後、シールド電位と印加電圧が同時に 0 V まで降下することからシールドを介する放電であり、放電は2つの過程 (First process, Second process) があると考えられる。

② 放電進展特性の分析 および ③ 放電経路の推定

同図に示すように、シールド電位上昇過程 (First process) において EEE 発生後の陰極電圧ピーク (V_1) と放電進展時間 (T_1) を定義し、シールド電位降下過程 (Second process) においてシールド電位 (V_2) と放電進展時間 (T_2) を定義し、図 5.3 中にそれぞれ赤色の×印としてプロットしたものを図 5.15 に示す。シールド電位上昇過程においては、単一経路の放電進展時間特性と比べ、 T_1 は2つの可能性があり、一つは $g=10$ mm のギャップ間放電の値と一致し、もう一つは $d=60$ mm の沿面放電における特性を外挿した値と一致した。図 5.4 の VI モデルには、約 $g=10$ mm のギャップが存在しないため、この放電過程は上部電極とシ

ールド間 (u-i-s) の沿面放電であり，沿面距離は約 60 mm と推定される．シールド電位降下過程においては， T_2 は $g=1$ mm のギャップ放電の値と一致するため，この放電過程はシールドと陽極 (s-a) のギャップ放電であり，経路長は約 1 mm と推定される．

この結果は，図 5.16 の発光像によって確認された放電箇所および放電経路と合致していることがわかる．

(実験 d) $V_a=-51.6$ kV_{peak}, $g_1=5$ mm, $g_2=18$ mm, $g_3=0$ mm (u-i-s-i- ℓ 経路)

① シールド電位の推移

図 5.17 に絶縁破壊時に取得された波形を示す．同図に示すように，シールド電位は陰極電位と同程度の電位まで上昇し，その後，シールド電位と印加電圧が同時に 0 V まで降下する．以上より，これはシールドを介する放電であり，放電は 2 つの過程 (First process, Second process) があると考えられる．

② 放電進展特性の分析 および ③ 放電経路の推定

同図に示すように，シールド電位上昇過程 (First process) において EEE 発生後の陰極電圧ピーク (V_I) と放電進展時間 (T_I) を定義し，シールド電位降下過程 (Second process) においてシールド電位 (V_2) と放電進展時間 (T_2) を定義し，図 5.3 中にそれぞれ赤色の×印としてプロットしたものを図 5.18 に示す．シールド電位上昇過程においては，単一経路の放電進展時間特性と比べ， T_I は 2 つの可能性があり，一つは $g=1\sim 2$ mm のギャップ間放電の値と一致し，もう一つは $d=20$ mm の沿面放電における特性を外挿した値と一致した．図 5.4 の VI モデルには， $g=1\sim 2$ mm のギャップが存在しないため，この放電過程は上部電極とシールド間 (u-i-s) の沿面放電であり，沿面距離は約 20 mm と推定される．シールド電位降下過程においては，ギャップ放電であれば， T_2 は約 $g=5\sim 10$ mm のギャップ放電の値と一致するが，本電極においてシールドを経由する 5～10 mm

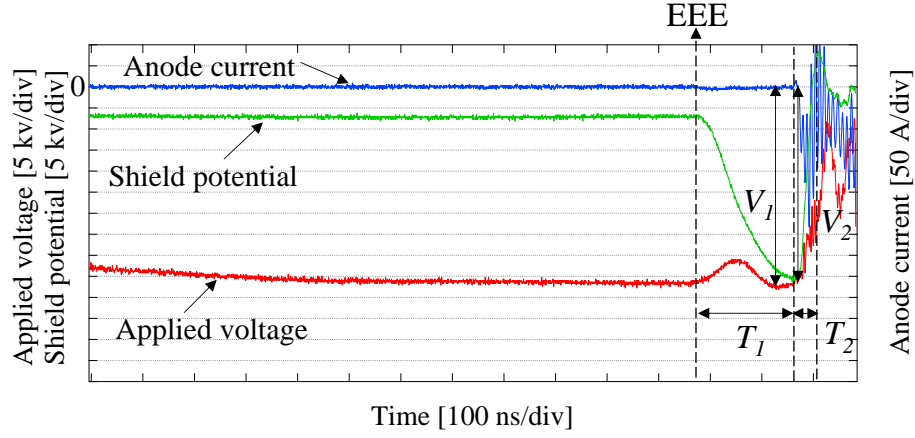


Fig. 5.14 Discharge waveforms for experiment (c).
 $(V_a = -47.3 \text{ kV}_{\text{peak}}, g_1 = 50 \text{ mm}, g_2 = 1 \text{ mm}, g_3 = 17 \text{ mm})$

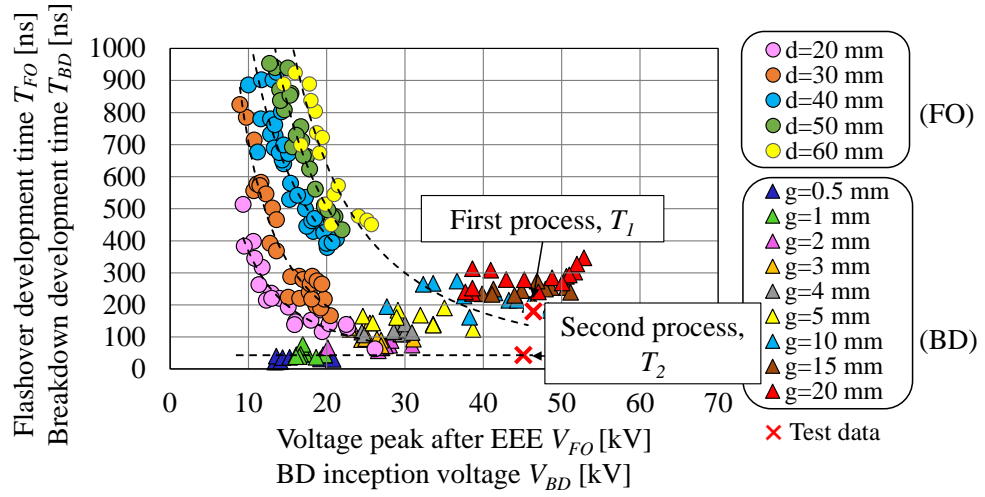


Fig. 5.15 Discharge development characteristics for experiment (c).
 $(V_a = -47.3 \text{ kV}_{\text{peak}}, g_1 = 50 \text{ mm}, g_2 = 1 \text{ mm}, g_3 = 17 \text{ mm})$

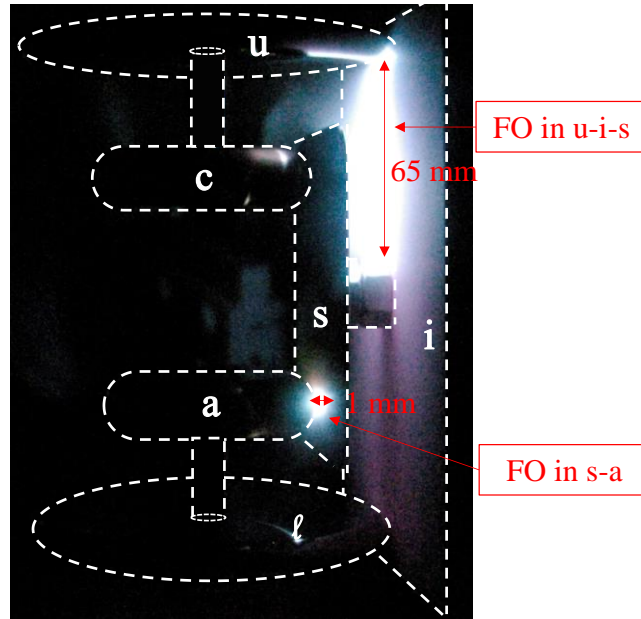


Fig. 5.16 Still image for discharge in experiment (c).
($V_a = -47.3 \text{ kV}_{\text{peak}}$, $g_1 = 50 \text{ mm}$, $g_2 = 1 \text{ mm}$, $g_3 = 17 \text{ mm}$)

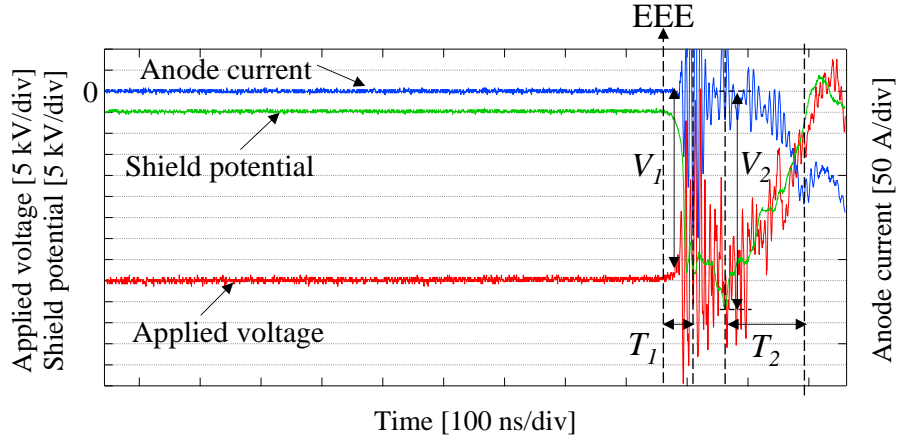


Fig. 5.17 Discharge waveforms for experiment (d).
($V_a = -51.6 \text{ kV}_{\text{peak}}$, $g_1 = 5 \text{ mm}$, $g_2 = 18 \text{ mm}$, $g_3 = 0 \text{ mm}$)

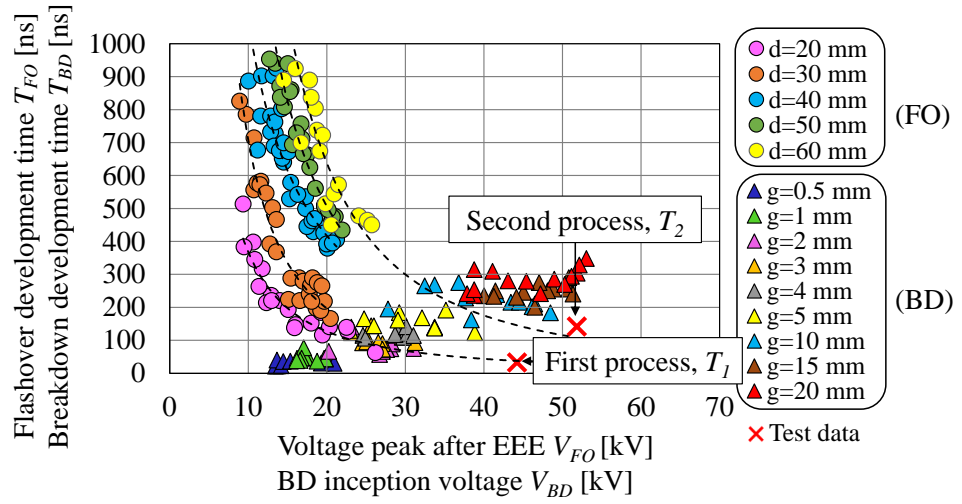


Fig. 5.18 Discharge development characteristics for experiment (d).
($V_a = -51.6 \text{ kV}_{\text{peak}}$, $g_1 = 5 \text{ mm}$, $g_2 = 18 \text{ mm}$, $g_3 = 0 \text{ mm}$)

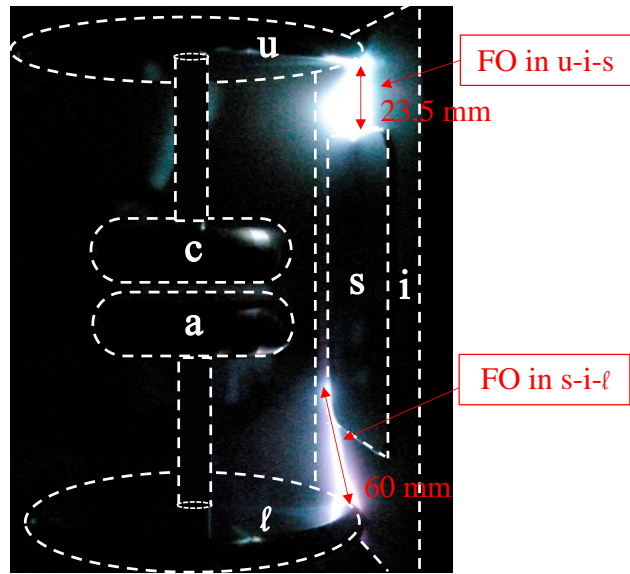


Fig. 5.19 Still image for discharge in experiment (d).
 $(V_a = -51.6 \text{ kV}_{\text{peak}}, g_1 = 5 \text{ mm}, g_2 = 18 \text{ mm}, g_3 = 0 \text{ mm})$

の真空ギャップがないため、この放電過程はギャップ放電ではないと考えられる。一方、 T_2 は $d=60\text{ mm}$ の沿面放電における特性を外挿した付近に位置すると見ることもできるため、この放電過程はシールドと下部電極 (s-i- ℓ) の沿面放電であり、沿面距離 60 mm と推定される。

この結果は、図 5.19 の発光像によって確認された放電箇所および放電経路と合致していることがわかる。

以上のように、各実験条件における様々な放電経路において、提案した識別手法によって推定した放電箇所および放電経路は発光像と合致することを検証した。すなわち、この識別手法が真空インタラプタ内部の複合絶縁系に対して有効であると考えられる。

5. 4 まとめ

本章では、前章までに検討した各放電パターンにおける放電特徴量を抽出し、放電進展特性に基づく放電経路の識別手法を提案するとともに、VI モデルにおける検証実験を行い、以下の成果を得た。

(1) 真空中の各放電パターンにおいて取得された波形(電圧波形, 電流波形, シールド電位波形)から特徴量を抽出した。各放電パターンで互いに特徴が一致するものではなく、各放電パターンを識別することが可能であることを示した。

(2) 各放電パターンにおいて抽出した特徴量と単一経路における放電進展時間の経路長依存性により、放電経路と経路長の識別手法を提案した。

(3) 提案された識別手法により、VI の構成を模擬したモデルにおける検証実験を行い、それぞれの放電経路を識別できた。

第6章 総括

6. 1 まえがき

今日の高度に発達した産業社会において電力の安定供給および電力輸送の大容量化が求められている。電力の輸送制御や電力システムの役割を担っているのが開閉器（Switchgear）であり、送配電容量の増加とともに遮断容量が大きくなり、環境適合型である真空遮断器（VCB）の高電圧化・大容量化・高信頼化が注目されている。電流遮断を行う真空インタラプタ（VI）の製品試験・運用時に内部絶縁不良により絶縁破壊故障が発生してしまうことがある。絶縁破壊の起点となりうる電気絶縁上の弱点の検出は、VIの電気絶縁設計上重要な要素である。VI内部の絶縁状況を把握するためには、VI内部の複合絶縁系における放電形態および放電経路の識別が重要である。しかしながら、固体絶縁物には主に不透明なセラミックが用いられているため、VI内部における放電箇所および放電経路の光学的な直接観測は極めて困難である。

以上の観点から、本研究では、まず、真空中の各放電現象（ギャップ放電、沿面放電、シールドを介する放電、複合経路放電）を分類し、単一放電経路および複合放電経路の放電特性を明らかにした。その上で、放電経路および放電形態によって異なる放電波形（印加電圧波形・陽極電流波形、シールド電位波形）の特徴や放電の物理メカニズムとの関係に基づいて、VI外部からVI内部における放電経路および放電形態の同定を行う手法の提案を行った。

6. 2 本研究で得られた成果

6. 2. 1 真空ギャップにおける絶縁破壊特性

第2章では、真空インタラプタ内部におけるギャップ間の絶縁破壊（BD）に注目し、陰極－陽極（c-a）および陰極－シールド－陽極（c-s-a）電極構成を用い

て絶縁破壊進展時間と電圧，ギャップ長の依存性を検討した．

真空ギャップにおける BD 発生時において，BD 進展時間 T_{BD} は陰極に生じたカソードプラズマが陽極に到達する時間であると考えられ， T_{BD} は陰極先端の最大電界に依存せず，ギャップ長のみに依存する．この結果は，真空ギャップ長を BD 進展時間から推定できることを示唆している．

ギャップ間の絶縁破壊時には，ギャップ間の放電から放出された電子がシールド（浮遊電極）に到達することで，シールドに負極性の電位が過渡的に現れる．この電子放出は等方的になされ，シールド電位の推移により，絶縁破壊の発生位置（シールドからの距離）を推定できる可能性がある．

シールドを介するギャップ放電は，部分破壊 PB（c-s）と全路破壊（c-s-a）2 つの放電パターンに分類される．c-s 間の PB に伴いシールド電位が陰極電位と同程度の値までステップ的に上昇し，印加電圧波形と陽極電流波形に高周波信号が現れる．全路破壊に至るまでに，c-s 間の PB は発生と消滅を繰り返し，s-a 間の破壊に伴い全路破壊に至る．

6. 2. 2 真空中絶縁物を介する沿面放電特性

第 3 章では，真空インタラプタ内部における絶縁物を介する沿面放電に注目し，陰極－固定絶縁物－陽極（c-i-a）電極系を用いて，沿面放電進展時間 T_{FO} と電圧，沿面距離の依存性を検討した．沿面放電時における陽極電流の上昇は，2 段階（SEEA 機構による数 A 程度の電流上昇，放出されるガス中の電離による 100 A 程度の電流上昇）に類別された．沿面放電進展時間 T_{FO} は V_p^{-2} （ V_p : EEE 発生後の陰極電圧ピーク）に比例した． T_{FO} は EEE 発生から導電チャネル形成までの時間と考えられ， $T_{FO} \propto V_p^{-2}$ の関係はガス放出モデルによって説明される．沿面距離が長いほど T_{FO} は単調に増加することから， T_{FO} と V_p によって沿面距離を推定できる可能性を示した．

6. 2. 3 真空中複合絶縁系における放電特性

第4章では、陰極－シールド－絶縁物－陽極（c-s-i-a）および陰極－絶縁物－シールド－陽極（c-i-s-a）の2種類の電極系において、複合経路の放電発生・進展過程を検討した．c-s-i-a と c-i-s-a における複合放電経路はいずれもギャップ間の BD と絶縁物を介する沿面放電の組み合わせであり，それぞれを波形から分離・識別でき，各過程の放電特性は単一経路の放電特性と一致した．

c-s-i-a における c-s 間の部分破壊 PB では，放電開始が c-s 間の電位差に依存し，PB 進展時間 T_{PB} は c-s 間の電位差に依存しない．c-s-i-a と c-i-s-a における全路破壊時のギャップ間絶縁破壊進展過程では，絶縁破壊進展時間（ T_{PB} , T_{BD} ）は電極間の電圧に依存せずに，ギャップ長の増加とともに大きくなる．c-s-i-a と c-i-s-a における全路破壊時の沿面放電進展過程では，沿面放電進展時間 T_{FO} は V_p^{-2} （ V_p : EEE 発生後の陰極電圧ピーク）に比例し，沿面距離の増加とともに大きくなる．以上より，真空インタラプタ内部の複合放電経路においても，単一経路の放電進展特性に基づいて放電箇所および放電経路を推定できると期待される．

6. 2. 4 真空中放電経路の識別手法と実験的検証

第5章では，前章に検討した真空中複合絶縁系における放電特徴量を抽出し，放電進展特性に基づく放電経路の識別手法を確立し，VI モデルにおける検証実験を行った．真空中の各放電経路において取得された波形（印加電圧波形，陽極電流波形，シールド電位波形）の特徴を抽出した．各放電経路で互いに特徴が一致するものはないことから，各放電経路を識別できた．各放電経路を識別し，さらに放電進展時間の経路長依存性に基づいて各放電経路の経路長を推定できた．

6. 3 本研究の学術的および工学的意義

本研究では、真空インタラプタ内部の絶縁状態診断に向けて、放電開始・進展メカニズムに基づいて、外部から放電経路を識別する手法を提案することを目的とした。

本研究では、真空中複合絶縁系における放電パターンを分類し、各放電過程の開始・進展メカニズムに着目し、インパルス電圧印加時のギャップ間放電や沿面放電の進展特性を明らかにした。また、この過程で、真空中各放電の進展特性解明のため、放電波形と放電過程の関係を明らかにし、ギャップ間の放電過程におけるカソードプラズマの拡大による放電進展メカニズムと、沿面放電過程におけるガス放出による放電進展メカニズムを明らかにした。これは、真空中の放電現象の理解を深める学術的な意義がある。

本研究で得られた成果は、真空中複合絶縁系における各放電の特性とメカニズムの学術的解明と放電経路識別手法への応用的提案およびその実験的検証である。これらの研究成果は、真空インタラプタの絶縁診断に向けた絶縁設計に資する有効な指針を与えると同時に、真空環境下で用いる各種機器の高性能化、高信頼度化に貢献するものと考えられる。

6. 4 今後の展望

実器の真空インタラプタの製品試験時においては、絶縁上の弱点による部分放電・絶縁破壊の発生に伴う放電箇所・放電経路の検出が重要である。本研究では、真空中複合絶縁系における放電特性に基づく放電経路の識別手法を提案したが、その中で浮遊電極であるシールド電位の推移が重要である。しかしながら、実器への適用時にシールドが外部に露出せずにシールド電位を直接に測定できない場合がある。そこで、高圧プローブでの直接測定ではなく、新たな非接触測定技術の開発が必要である。例えば、絶縁円筒の外部に電位測定プローブを設置

し、容量分圧によりシールド電位の推移を取得することが考えられる。

また、工業応用の観点から、提案した放電経路の識別フローを実器内部の絶縁状態および放電箇所・経路の推定に適用・検証するとともに、自動的に検出する実用的なレベルへ発展させることが期待される。

謝辞

本研究の遂行ならびに本論文の作成にあたり，論文の構成から内容の詳細に至るまで，終始懇切丁寧な御指導と御鞭撻を頂いた 名古屋大学大学院工学研究科教授 早川 直樹先生に深く感謝するとともに厚く御礼申し上げます。

本論文の作成にあたり，有益なる御助言と御鞭撻を賜った 名古屋大学大学院工学研究科教授 松村 年郎先生に厚く感謝いたします。

本論文の作成にあたり，有益なる御教示と御鞭撻を賜った 埼玉大学理工学研究科准教授 山納 康先生に深く感謝いたします。

本研究の推進および論文の作成にあたり，平素適切なお助言を賜り，直接ご指導を頂いた 名古屋大学大学院工学研究科准教授 小島 寛樹先生に心より感謝いたします。

本研究を開始するにあたり，研究の指針を与えて頂いた 名古屋大学名誉教授・愛知工業大学工学部電気学科教授 大久保 仁先生に感謝の意を表すると共に厚く御礼申し上げます。

本研究においてご協力頂いた 三菱電機株式会社 月間 満氏，木村 俊則氏に厚く御礼申し上げます。

本研究開始当初から，共に実験や有意義な議論をし，切磋琢磨した 中野 裕介氏（現 ダルムシュタット工科大学 在外研究員），脇本 亨氏，仲田 佑希氏（現 JAXA），伊吹 憲哉君，高橋 達也君，張 逸凡君に感謝いたします。

また研究室の生活において種々のご協力を頂いた 名古屋大学大学院工学研究科 電子情報システム専攻 早川研究室 先輩諸兄，同輩，後輩諸君，秘書様に感謝の意を表します。

渡日留学の機会を与え，支えていただいた日本国文部科学省と中国国家留学基金管理委员会に感謝いたします。

最後に、研究活動と留學生活に対して、ご理解とご支持をいただいた家族に深謝します。

本研究に関して発表した論文

章	論文題目	掲載雑誌	共著者
2-3	Discharge Characteristics for Various Discharge Patterns under Negative Lightning Impulse Voltage in Vacuum	IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation (掲載決定)	Y. Nakano, H. Kojima, N. Hayakawa, T. Kimura, M. Tsukima
4	Discharge Characteristics of Composite Insulation System with Floating Electrode and Solid Insulator in Vacuum	IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation (掲載決定)	Y. Nakano, H. Kojima, N. Hayakawa, T. Kimura, M. Tsukima
	Breakdown and Flashover Characteristics for Discharge via Floating Electrode and Solid Insulator in Vacuum	19 th International Symposium on High Voltage Engineering, OD-223, Aug. 23-28, 2015	Y. Nakano, H. Kojima, T. Kimura, M. Tsukima, N. Hayakawa
5	真空中の複合絶縁系における放電パターンの識別	電気学会論文誌 A (投稿中)	小島 寛樹, 木村 俊則, 月間 満, 早川 直樹