

大気中固体誘電体沿面のインパルスフラッシュオーバー現象に関する研究

嶋崎, 俊行

<https://doi.org/10.11501/3088212>

出版情報 : 九州大学, 1991, 博士 (工学), 論文博士
バージョン :
権利関係 :



大氣中固体誘電体沿面のインパルス
フラッシュオーバー現象に関する研究

1991

嶋崎俊行

①

大気中固体誘電体沿面のインパルス
フラッシュオーバー現象に関する研究

1 9 9 1

嶋 崎 俊 行

目 次

本論文で使用した記号

第 1 章	序 論	1
1.1	研究の背景と沿面フラッシュオーバー現象に対するこれまでの研究状況	1
1.1.1	研究の背景	1
1.1.2	インパルス沿面フラッシュオーバー現象に対するこれまでの研究	2
1.2	本論文の目的と構成	6
第 2 章	正および負インパルス沿面フラッシュオーバー先駆過程とバックディスチャージ	10
2.1	まえがき	10
2.2	実験装置および方法	11
2.3	正極性電圧印加時の沿面フラッシュオーバー先駆過程	13
2.4	負極性電圧印加時の沿面フラッシュオーバー先駆過程	21
2.5	フラッシュオーバー時の放電過程	27
2.6	バックディスチャージ	29
2.7	結 論	32
第 3 章	固有容量の小さい沿面の正インパルスフラッシュオーバー過程と特性	34
3.1	まえがき	34
3.2	実験装置および方法	35
3.3	50%沿面コロナ開始電圧および50%沿面フラッシュオーバー電圧	37
3.4	50%フラッシュオーバー電圧印加時の沿面フラッシュオー	

バ過程	45
3.4.1 A領域の沿面フラッシュオーバー過程	45
3.4.2 C'領域の沿面フラッシュオーバー過程	51
3.4.3 B領域の沿面フラッシュオーバー過程	54
3.5 沿面フラッシュオーバー特性と沿面フラッシュオーバー過程	56
3.5.1 A領域	57
3.5.2 C'領域	57
3.5.3 B領域	59
3.6 結 論	60
第4章 固有容量の大きい沿面の正インパルスフラッシュオーバー過程と特性	62
4.1 まえがき	62
4.2 実験装置および方法	63
4.3 電荷図形の形状と大きさ	65
4.4 50%沿面コロナ開始電圧と50%沿面フラッシュオーバー電圧	70
4.5 50%フラッシュオーバー電圧印加時の沿面フラッシュオーバー過程	76
4.5.1 A'領域の沿面フラッシュオーバー過程	77
4.5.2 C'領域の沿面フラッシュオーバー過程	80
4.6 固体誘電体表面上の電界とストリーマの進展	81
4.6.1 電界計算方法	82
4.6.2 電界および電位の計算例	85
4.6.3 V_{CS0} 印加時の固体誘電体上の電界強度とストリーマの進展	93
4.7 フラッシュオーバー特性および過程に対する C_0 の影響	95
4.8 結 論	99

第5章	固有容量の小さい沿面の負インパルスフラッシュオーバー過程と特性	102
5.1	まえがき	102
5.2	実験装置および方法	103
5.3	50%沿面コロナ開始電圧および50%沿面フラッシュオーバー電圧	105
5.4	50%フラッシュオーバー電圧印加時の沿面フラッシュオーバー過程	110
5.4.1	C'領域の沿面フラッシュオーバー過程	110
5.4.2	A領域の沿面フラッシュオーバー過程	113
5.5	沿面フラッシュオーバー機構	117
5.5.1	C'領域	118
5.5.2	A領域	118
5.6	沿面放電と気中放電との比較	120
5.7	結 論	123
第6章	固有容量の大きい沿面の負インパルスフラッシュオーバー過程と特性	125
6.1	まえがき	125
6.2	実験装置および方法	126
6.3	電荷図形および静止写真	127
6.4	50%沿面コロナ開始電圧と50%沿面フラッシュオーバー電圧	132
6.5	50%フラッシュオーバー電圧印加時の沿面フラッシュオーバー過程	139
6.5.1	A'領域の沿面フラッシュオーバー過程	139
6.5.2	C'領域の沿面フラッシュオーバー過程	143
6.6	沿面フラッシュオーバー特性および過程に対する C_0 の影響	145

6.7	負ストリーマの形成進展機構	146
6.8	結論	156
第7章	総括	158
7.1	本論文のまとめ	158
7.2	今後の研究課題	163
	参考文献	165
	謝辞	170

本論文で使用した記号

C	静電容量
C ₀	固有容量(板状固体誘電体の両面に仮想した電極の間に形成される 1 cm ² 当たりの静電容量)
d	沿面距離
d _c	異なった領域の境界となる沿面距離
dV/dt	電圧上昇峻度
D	棒電極の直径
E	誘電体表面上の電界強度
$\bar{E}$	印加電圧波高値と沿面距離との比
E ₀	棒電極先端の極く近傍の電界強度
GC	グロー状のチャネル
I	リーダへ供給される全電流
I _s	ストリーマによってリーダへ供給される電流
I _d	リーダと背後電極間に形成された静電容量に充電される電流
k	V ₅₀ -d 特性における直線の勾配
k ₁	V ₅₀ -d 特性における直線の勾配
k ₂	V ₅₀ -d 特性における直線の勾配
k ₃	V ₅₀ -d 特性における直線の勾配
Ka	l _g とV _g の関係式における定数
Kb	V _b とdとの関係式における定数
Kc	l _g とV _g の関係式における定数
Kd	V _b とdとの関係式における定数
ℓ	最初に発生進展するストリーマの進展長
l _g	Gleitbüschelの長さ
ℓ(z, r)	棒電極先端のある点から電気力線に沿った固体誘電体上のまでの距離
LW	発光波

n	円周上単位長さ当りのストリーマの枝数
n_e	電子なだれ頭部の電子数
N_+	1個のなだれに伴う正イオン数の線密度
N_-	1個のなだれに伴う負イオン数の線密度
N_n	N_+ から N_- を減じた数
N_e	n_e の最大値
NG	負グロー
NL	負リーダ
NS	負ストリーマ
P	仮想電荷 Q および 影像電荷 Q' と計算点との間の電位係数
P'	影像電荷 Q' と計算点との間の電位係数
PET	ポリエチレンテレフタレート
PL	正リーダ
PPS	1次正ストリーマ
Q	仮想電荷
Q'	影像電荷
Q''	影像電荷
r	誘電体表面上における棒電極からの距離
R	環状電極内側部分の曲率半径
SPS	2次正ストリーマ
t	時間
t_c	第1コロナ進展開始時間
t_f	電圧印加後フラッシュオーバーまでの時間
v	印加電圧瞬時値
v_L	リーダの進展速度
v_c	第1コロナ進展開始時における印加電圧瞬時値
V	印加電圧波高値
V_b	絶縁破壊電圧

V_g	Gleitbüschelの長さに対するその時の印加電圧
V_{50}	50%沿面フラッシュオーバー電圧
V_{C50}	50%沿面コロナ開始電圧
z	棒対平板ギャップにおいて棒電極先端表面とギャップ軸との交点を原点とした時のギャップ軸上における原点からの距離
z_m	棒対平板ギャップにおいて原点を出発してギャップ軸上を進む電子なだれによる正イオンの線密度が極大となる z の値
z_p	負極性電圧印加時において、第1コロナ進展前に形成される発光域の中心となる z の値
z_A	有限長線電荷の z 座標
z_B	有限長線電荷の z 座標
α	電子の衝突電離係数
ϵ_A	誘電体の誘電率
ϵ_B	誘電体の誘電率
ϵ_S	誘電体の誘電率
θ	棒電極先端における位置を示す角度
η	電子の付着係数
ϕ	棒電極の電位
τ	誘電体の厚さ

第1章 序 論

1.1 研究の背景と沿面フラッシュオーバー現象に対する これまでの研究状況

1.1.1 研究の背景

近年、電力需要の増加と電源立地の消費地からの遠隔化に伴い、送電電圧はますます上昇し、我が国においては、500kV級 EHV (Extra High Voltage) 送電線に続き、1000kV級 UHV (Ultra High Voltage) 送電線の建設が進みつつあり、これまで以上に電力設備に対する高い絶縁信頼性が要求されている。電気設備の絶縁は、種々の誘電体の組合わせである複合絶縁系を形成しており、その弱点部は異種の絶縁物間の界面に現れる場合が多い。特に、相の異なる絶縁媒質、例えば、気体－固体、気体－液体、液体－固体を含む絶縁系に高電圧が印加されると、その界面でいわゆる沿面放電が発生して絶縁破壊を起こす確率が極めて高くなる。したがって、電力設備の絶縁耐力は沿面フラッシュオーバー特性に深く結び付いており、沿面フラッシュオーバーの機構と特性の解明は、電力系統の外部絶縁設計は勿論、他の高電圧機器の内部絶縁設計や絶縁信頼性の向上策をたてるために極めて重要である。

フラッシュオーバー機構の解明には、詳細な沿面放電現象の時間的分解観測が必要であるが、沿面放電現象は高速で進行する上、実験条件によって複雑に変化するため、特定の放電相や特定の実験条件における観測結果だけでは、その条件における放電過程の正確な解釈さえも難しい。これまでに報告されてきた観測結果は、放電光、放電電荷の時間的積分値および狭い範囲の実験条件におけるものが多く、実験条件を幅広く変化し、沿面

放電に伴う発光、電流および電荷の時間的变化、並びにそれらとフラッシュオーバー特性との関係づけに関する体系的研究は少ない。

沿面放電によるフラッシュオーバー特性は、誘電体背後の電極の存在により著しく影響を受けるため、沿面放電は背後電極が存在する場合と存在しない場合、すなわち、電界の方向が複合誘電体の境界面と交差するか、あるいは平行であるかに区別して取り扱われる場合が多い。実際には、誘電体に背後電極が存在しない場合としては碍子、絶縁棒、ガス絶縁機器のスペーサなどがこれに相当し、誘電体に背後電極が存在する場合としては、ブッシング、回転機のコイル端末、ケーブル端末などがこれに相当する。背後電極が存在しない場合の沿面フラッシュオーバー特性は、一般に空気中のそれと類似するが、背後電極が存在する場合には誘電体の厚み、誘電率、固有静電容量(板状固体誘電体の両面に仮想した電極の間に形成される 1 cm^2 当たりの静電容量、以下、固有容量と呼ぶ)などの多くの因子が、沿面フラッシュオーバー特性に著しい影響を与える。そのため種々の条件に対する数多くの研究結果が報告されてきたが、従来の報告では特定の実験条件に限られ、また条件の変化範囲が比較的狭いため、その中で得られた現象を関連づけることが困難な場合が多く、実用的にも応用範囲が限定されている。

1.1.2 インパルス沿面フラッシュオーバー現象に対する これまでの研究

沿面放電の発光、放電電荷ならびに放電に伴う電界などを調べる方法としては、古くから用いられた硫黄と光明丹の混合粉末を絶縁板上に散布する電荷図法、あるいは写真乾板を用いるリヒテンベルグ図法⁽¹⁾⁻⁽⁴⁾があり、また最近では液晶図形法^{(5),(6)}、熱可塑性を利用した図形法^{(7),(8)}

や霜図形法⁽⁹⁾などによっても研究が行なわれている。電荷図法では、誘電体表面に残留した電荷の極性や分布を付着した粉末の種類から判別でき、また、写真乾板上のリヒテンベルグ図法では、微弱な発光を明瞭に捉らえることができるため、気中ギャップの放電機構の解明の方法としても多用されている⁽¹⁰⁾⁻⁽¹²⁾。しかし、これらの図形は放電の開始から終了までのそれぞれの情報の集積を示す図形であるため、放電に伴う諸量の時間的な推移を明らかにすることは困難である。また、気中ギャップの放電機構をこれらの方法を使って解明するには、気中ギャップ放電と沿面放電との関係を、あらかじめ明らかにしておく必要がある。しかし、それらの関連性については十分に明らかにされていない。

放電の時間的变化を知る方法としては、電圧裁断法と写真図法によって得た放電図形とを対比させる方法がある⁽¹³⁾。しかし、この方法では裁断時にバックディスチャージが生じてそれ以前の放電をマスクするため⁽¹⁴⁾、正確に放電の推移を理解することは難しい。最近、光電変換技術の進歩により、極めて微弱な高速度の発光現象が観測できるイメージコンバータカメラおよびイメージインテンシファイヤが開発され、放電現象の観測に対して適用されている⁽¹⁵⁾⁻⁽²⁰⁾。これらの装置は、フラッシュオーバ先駆現象のような極めて微弱な発光現象の短時間内における複雑な変化を、現象そのものになんら影響を与えずに観測できるため、放電の進展過程を解明する装置として最適である。そのため、沿面放電の進展過程の観測への利用も試みられ、例えば、川島らはこの方法で沿面リーダの進展過程を論じている⁽²¹⁾。しかし、この場合にはイメージコンバータカメラのみによる観測のため、光感度が悪く、発光が弱い沿面ストリーマなどの進展過程は不明確である。また、特定の条件下における観測であるため、沿面距離や

固体誘電体の固有容量が沿面放電の進展に与える影響などについては、明らかにされていない。

絶縁設計を行う立場からは、沿面フラッシュオーバー電圧が大切なデータになるが、これは固体誘電体の固有容量およびその表面抵抗の影響を著しく受ける。そのため、固有容量の影響について、厚みおよび比誘電率の異なった種々の固体誘電体を用いて、沿面フラッシュオーバー電圧に対するそれらの影響が調べられている⁽²²⁾⁻⁽²⁶⁾。しかし、固体誘電体の固有容量の大きさは数pF/cm²程度までのものが多く、固有容量をさらに増加した場合の影響を検討した例は⁽²⁷⁾は少ない。

ToeplerによるとGleitbüschelの長さ l_g と固有容量 C_0 の関係は、 l_g (cm) および印加インパルス電圧 V_g (kV) が比較的大なる場合には、

$$l_g = K_a V_g^4 C_0^{3/2} \quad (1-1)$$

また、 l_g および V_g が比較的小なる場合には、

$$l_g = K_c V_g^5 C_0^2 \left(\frac{dV}{dt} \cdot \frac{1}{300 \times 10^6} \right)^{1/4} \quad (1-2)$$

で与えられる^{(28)・(29)}。GrunewaldおよびElsnerらは、これらの l_g を使って沿面フラッシュオーバー電圧を推定している^{(30)・(31)}。ここで、 dV/dt (kV/s) は電圧上昇峻度、 K_a と K_c は定数で、正極性インパルスの場合それぞれ 3.4×10^{-6} 、 0.16×10^{-6} 、負極性インパルスの場合の K_c は 0.14×10^{-6} である。また、大木は⁽³²⁾、種々の誘電体に対する沿面フラッシュオーバー電圧を実測してGrunewaldらの式を検討し、(1-1) および (1-2) 式における l_g が電極間の距離 d に等しくなったときの電圧 V_g が、沿面フラッシュオーバー電圧 V_b を与えるとしている。すなわち、沿面フラッシュオーバー電圧を V_b (V)、固有容量を C_0 (F/m²)、電極間距離を d (m)、電圧峻度を dV/dt (V

/s)とすれば、沿面フラッシュオーバー電圧 V_b および電極間距離 d が比較的大なる場合には、

$$V_b = \frac{K_b}{C_0^{3/8}} \cdot d^{1/4} \quad (1-3)$$

ただし、 K_b は定数で正極性インパルスに対しては73.6、負極性インパルスに対しては74.25、である。また、 V_b および d が比較的小なる場合には、

$$V_b = \frac{K_d}{C_0^{2/5} \cdot (d \cdot V/dt)^{1/20}} \cdot d^{1/5} \quad (1-4)$$

ただし、 K_d も定数で正極性インパルスに対しては135.5、負極性インパルスに対しては139.5、である。なお、高木⁽³³⁾によると(1-3)式は、 $1.7\mu s$ 程度の波頭長では良く実測値と一致するが、短波頭波領域では適用できない。また、上述のToeplerの実験式は背後電極が細長いリボン状の場合に対するものであって、固体誘電体の全面に背後電極が存在するような一般的な場合には、放電は放射状に進展するので、これを適用できるとは限らない。しかし、背後電極が誘電体全面に存在するような電極配置における沿面フラッシュオーバー電圧の詳細な測定は行なわれていない。

沿面フラッシュオーバー電圧に対する固体誘電体の表面抵抗の影響は、表面が塩分などによって汚損湿潤して抵抗が著しく減少した場合に顕著となり、表面抵抗の減少と共に沿面フラッシュオーバー電圧が著しく低下する。この問題については主として種々の濃度の電解質水溶液などを使って、気体-液体の複合誘電体の沿面放電として研究が行なわれているが⁽³⁴⁾⁻⁽⁴¹⁾、これらの研究を行う場合にも、本研究で述べている高抵抗表面における沿面フラッシュオーバー過程の解明が基礎になる。

沿面放電に関するその他の研究として、 ns 方形波の電圧を用いて沿面

ストリーマの進展速度と進展距離の気体圧力依存性を明らかにしたものや⁽⁴²⁾⁻⁽⁴⁵⁾、酸素および窒素中、あるいは高気圧空気中でのPolbüschelやGleitbüschelの進展特性に関するもの^{(46), (47)}などがある。また、沿面ストリーマの電荷密度分布からその進展形成機構を論じたもの⁽⁴⁸⁾⁻⁽⁵⁰⁾、および放電初期の過程であるPolbüschelおよびGleitbüschelの進展特性に関する研究報告⁽⁵¹⁾⁻⁽⁵⁵⁾は多いが、破壊直前のリーダおよびアークの進展過程に関する研究報告は極めて少ない。

また、絶縁設計で大切となるフラッシュオーバー電圧特性に関して、(1-3)、(1-4)式のように固有容量と沿面距離を使った実験式の提案が行われてきたが、適用できる固有容量と沿面距離の範囲が狭く、また、フラッシュオーバー過程とフラッシュオーバー特性の関係づけに関する体系的研究はほとんど行われていない。

1.2 本論文の目的と構成

本研究では、固有容量および沿面距離を広い範囲にわたって変化し、次のことを目的として、一連の研究を行った。

- (1) 沿面フラッシュオーバー過程の詳細を解明する。
- (2) 沿面フラッシュオーバー機構を解明すると共に、沿面フラッシュオーバー特性との関係を明らかにする。
- (3) 従来主要な放電機構の解明手段であったリヒテンベルグ図と電荷図の形成過程を明らかにして、図形解釈の基礎を明確にする。
- (4) 気中放電と沿面放電との関連性を明らかにする。

すなわち、固体誘電体の全面に背後電極が存在するような電極配置で、固

体誘電体として、種々の厚さのメタクリル酸メチルエステルよりなる合成樹脂 (PMMA) 板、通称アクリル樹脂 (以下、アクリルと呼ぶ) 板とポリエチレンテレフタレート (PET) フィルムを用い、正および負極性雷インパルス電圧印加時の 50% 沿面フラッシュオーバー電圧を測定すると共に、その時の沿面フラッシュオーバー過程をイメージインテンシファイヤを装着したイメージコンバータカメラで観測した。それらの結果から、固有容量の広い範囲における 50% 沿面フラッシュオーバー電圧印加時の沿面フラッシュオーバー過程およびその機構を明らかにすると共に、沿面距離に対する 50% 沿面フラッシュオーバー電圧や 50% 沿面コロナ開始電圧、および沿面ストリーマの進展長とその発生時の瞬時電圧の関係などのフラッシュオーバー諸特性を定式化し、それらとフラッシュオーバー過程との関連づけを行った⁽⁵⁶⁾⁻⁽⁶²⁾。また、これらの結果を気中ギャップの放電の場合⁽⁶³⁾⁻⁽⁶⁷⁾と比較検討し、リヒテンベルグ図や電荷図を気中ギャップ放電の解明に使用する場合の基礎を与えた^{(67), (68)}。本論文は、これらの研究成果をまとめたもので、7 章から構成され、内容を要約すると次の通りである。

第 1 章では、上記のように本研究の背景、関連するこれまでの研究ならびに本研究の目的と意義を述べている。

第 2 章では、固体誘電体の固有容量を一定にして、沿面フラッシュオーバー先駆過程を解明すると共に、電荷図とリヒテンベルグ図の形成過程を調べ、それらの図形を解釈するための基礎を与えた。特に、正極性電圧印加時の沿面放電過程は気中放電の場合と似ているが、負極性では負リーダが沿面放電の成長に重要な役割を果たしていることを指摘した。さらに、リヒテンベルグ図で従来知られていた Polbüschel は、正放電では 1 次正ストリーマ、負放電では負ストリーマであり、Gleitbüschel は、正放電では 1 次正

ストリーマから正リーダまでの集積、負放電では負ストリーマから負リーダまでの集積、また、バックディスチャージの多くは電圧減衰過程で発生して、高電界電極近傍の沿面上における電荷を中和することを示した。

第3章では、正極性電圧印加時の小さい固有容量における沿面フラッシュオーバー過程を実験的に明らかにすると共に、沿面フラッシュオーバー電圧を固有容量と沿面距離で定式化した。また、沿面フラッシュオーバー電圧および沿面フラッシュオーバー時間が、沿面距離によって3つに分類できることを指摘し、これらの特性と沿面フラッシュオーバー過程の関係を解明した。すなわち、沿面フラッシュオーバー現象は、長い沿面距離では1次正ストリーマ、2次正ストリーマ、リーダ、アークの順で発生するのに対し、短い沿面距離では2次正ストリーマから直ちにアークに至り、中間の沿面距離では、1次ストリーマの発生時間に依存して前記のいずれかの過程を経ることを示した。さらに、2次ストリーマ中の電界は 18 kV/cm 程度と高いのに対してリーダ中の電界が低いので、2次ストリーマのみによってフラッシュオーバーする短い沿面距離の領域においては、高いフラッシュオーバー電界になることを指摘した。

第4章では、 2.6 pF/cm^2 以上の大きい固有容量の領域における正極性沿面フラッシュオーバー現象を調べ、誘電体表面が乾燥している場合、沿面フラッシュオーバー過程は固有容量に強く依存し、フラッシュオーバー電圧は固有容量のある臨界値(2.6 pF/cm^2)を境として異なる実験式で表されることを示した。また、誘電体の厚みを減少すると、固有容量が増加するため、正リーダと背後電極間に大きな充電電流がリーダチャンネルを通して流れ、正リーダの加熱と導電率上昇が促進されて、リーダ先端からのストリーマがほとんどなくてもリーダが連続的に成長を続け得ることを指摘した。さらに、

正ストリーマの進展長は高電界電極近傍の電界傾度に依存し、固有容量が大きくなると電界傾度が大きくなり、正ストリーマが伸びにくくなることを指摘した。

第5章では、負極性電圧印加時の小さい固有容量における沿面フラッシュオーバー過程を明らかにすると共に、沿面フラッシュオーバー電圧を固有容量と沿面距離で定式化した。また、沿面フラッシュオーバー特性および過程は沿面距離によって2つに分類できることを指摘した。すなわち、沿面距離が短い場合には、負ストリーマ先端が電極間を横断した直後に正リーダの発生を伴って破壊し、フラッシュオーバー電界が固有容量に無関係になるのに対し、沿面距離が長い場合には、負ストリーマに続いて先端にリーダコロナを持つリーダの連続成長および負リーダ内の高速発光波を伴って破壊し、負リーダの成長が固有容量に依存することから沿面フラッシュオーバー電圧が固有容量の関数になることを示した。

第6章では、負極性で 2.6pF/cm^2 以上の大きい固有容量における沿面フラッシュオーバー特性、フラッシュオーバー過程およびそれらの関係を解明し、正極性の場合と同様に固有容量が約 2.6pF/cm^2 を境にして、これらの特性と過程が著しく変化することを示した。また、放電初期過程における電子増倍過程を解析して、電荷図の形成過程とその形状決定因子を明らかにした。

第7章では、本研究で得られた成果を要約すると共に、今後の研究課題を述べて、総括とした。

第2章 正および負インパルス沿面フラッシュオーバー先駆 過程とバックディスチャージ

2.1 まえがき

沿面フラッシュオーバー機構の解明には、詳細な沿面放電現象の時間的な分解観測が必要であるが、これまでの観測方法は、主として電荷図やリヒテンベルグ図によるものである。電荷図は、誘電体板表面に残留した電荷の極性を誘電体に付着した粉末の種類から判別でき、また、リヒテンベルグ図は、微弱な発光を明瞭に捉えることができるため多用されてきたが、これらの図形は、放電の開始から終了までのそれぞれの情報の集積された図形であるため、放電過程の時間的推移を明らかにすることは、困難である。そのため、沿面フラッシュオーバー先駆過程については、明らかでない点も多い。

本章では、本研究で用いるイメージコンバータカメラで観測される発光現象と、従来の主な研究手法である電荷図およびリヒテンベルグ図で観測される現象の対応関係を明確にすると共に、沿面フラッシュオーバー先駆現象の動的過程を詳細に調べることを目的として、固有容量を一定(2.6 pF/cm^2)として、正および負極性のインパルス電圧を印加して実験研究を行い、次のような結果が得られたことについて述べる。

- (1) 正極性電圧印加の場合には、先ず正電極から1次正ストリーマが開始され、同じ進展特性の1次正ストリーマの再度の開始に続いて、その幹部から1次正ストリーマより進展速度が1桁以上低い2次正ストリーマが成長を始める。この2次正ストリーマは正リーダに転換して長く伸びる。正リーダの先端には1次正ストリーマと同じ進展形態を

示す正リーダコロナを伴う。

(2) 負極性電圧印加の場合には、負電極から進展した負ストリーマ幹部に負リーダが形成され成長する。負リーダ先端には間欠的に発生する負ストリーマ(負リーダコロナ)を伴う。

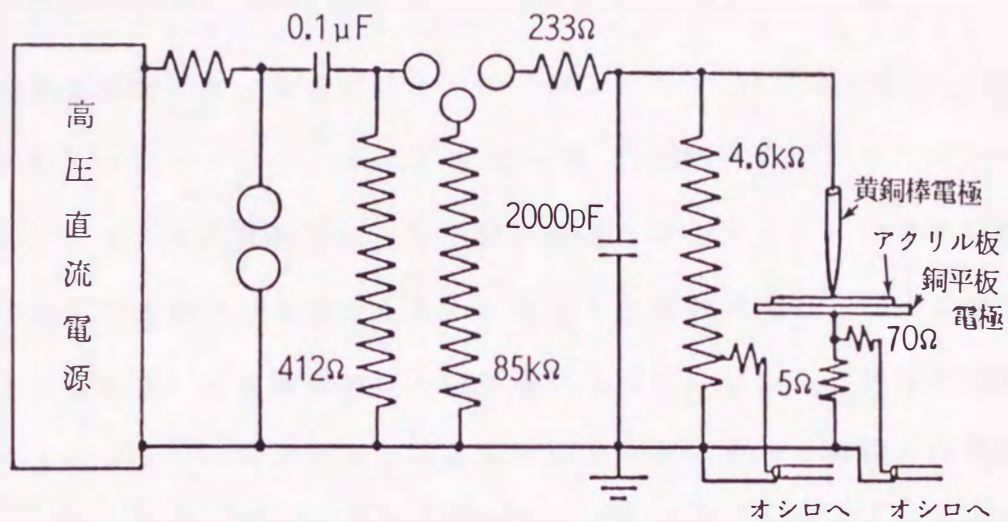
(3) リヒテンベルグ図および電荷図におけるPolbüschelは、上記の1次正ストリーマおよび負ストリーマであり、Gleitbüschelは正放電では1次正ストリーマから正リーダまでの集積、また負放電では負ストリーマから負リーダまでの集積したものに対応する。

(4) 正極性電圧印加時の沿面放電過程は気中放電の場合と似ているが、負極性では負リーダが沿面放電の成長に重要な役割を果たしている。

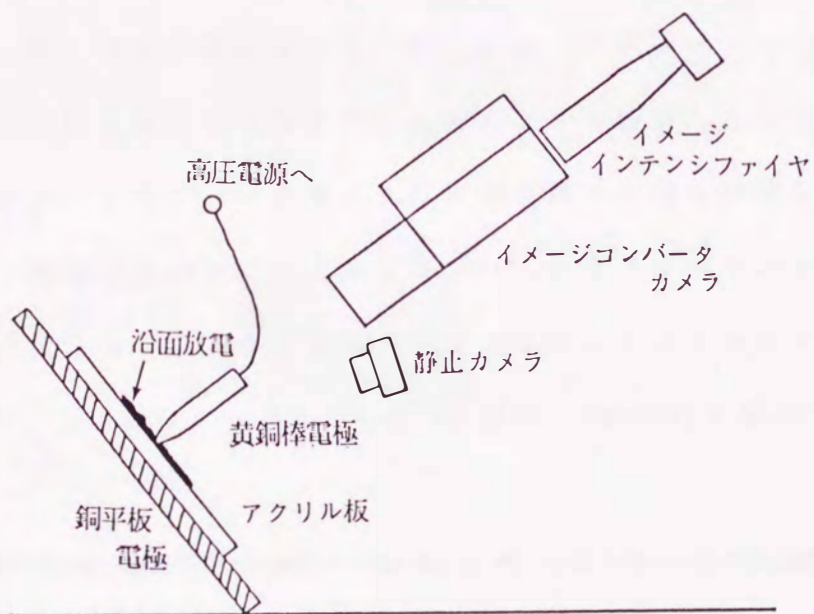
(5) バックディスチャージの多くは電圧減衰過程で発生して、高電界電極近傍の沿面上における電荷を中和する。

2.2 実験装置および方法

第2-1図に実験回路を、第2-2図に実験装置の配置を示す。実験はすべて大気中にて行なった。高圧側電極としては、直径が5mmで、先端の曲率半径が0.28mmの砲弾型の黄銅棒を、接地した背後電極としては、一辺が30cmの正形状の銅平板を使用した。電極系は第2-2図に示すようにイメージコンバータカメラおよび静止カメラの方に傾け、平板電極の面とカメラの軸がほぼ垂直となるように配置した。印加電圧は、1.5/40 μ sの正および負極性雷インパルス波形とし、固体誘電体板としては、厚さ1mm、一辺が約20cmの正形状の亚克力板(三菱レイヨン製、アクリライト)を使用した。なお、亚克力板は、デシケータ内にて15時間以上乾燥した清浄



第 2 - 1 図 実験回路図



第 2 - 2 図 電極配置と観測装置

なものを、電圧印加毎に取り替えた。また、リヒテンベルグ図は、アクリル板上に幅が70mmのX線間接撮影用フィルム(富士フィルム製)を置くことによって得た。

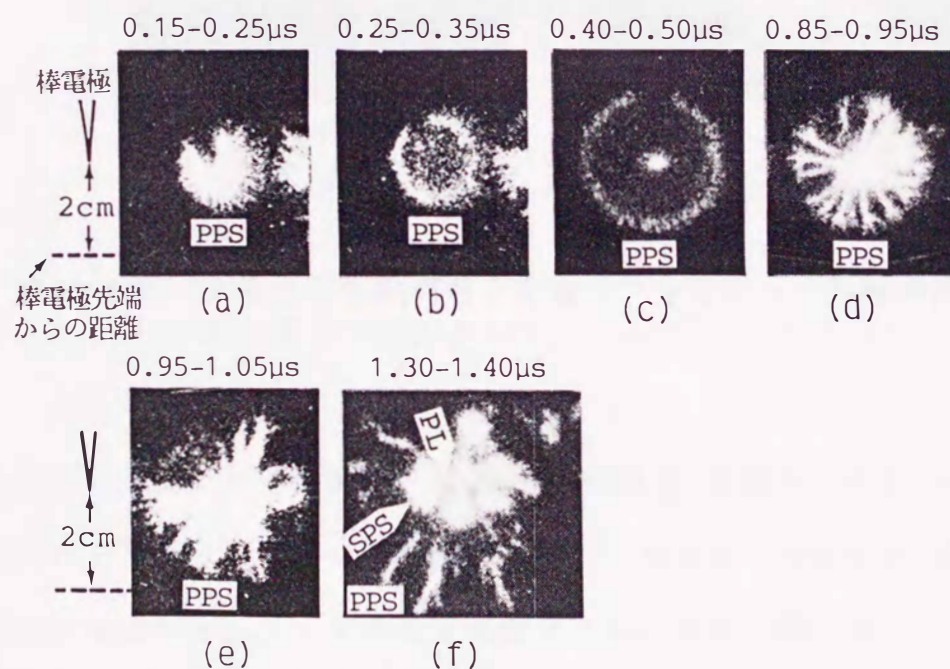
放電過程の観測には、イメージインテンシファイヤ(日立電子製HS-690)を装着したイメージコンバータカメラ(TRW製 1D3S20)を用いた。イメージコンバータカメラの観測方法としては、沿面コロナストリーマおよび沿面リーダなどが放射状に進展するため、撮影した図形が重ならないように主として3駒あるいは5駒の駒撮り撮影を行なった。しかし、駒撮り写真では、イメージコンバータカメラの各駒の露出時間に比べて駒間の時間間隔が長いので、放電の連続的な変化を詳細に知ること、およびそれらの進展速度を観測することは難しい。そこで、イメージコンバータの対物レンズ側ガラス管面に約5mmのスリットを取り付け、高圧側電極先端から一方向の部分のみが視野に入るようにして、低速度の流し撮り写真およびイメージコンバータカメラの始動時間を主な観測対象の放電相まで遅延させた、高速度の流し撮り写真の撮影を行なった。また、イメージコンバータカメラによる観測結果と対比するために、石英レンズを装着したカメラによる静止写真をイメージコンバータカメラによる写真と同時に撮影した。

電圧波形、電流波形およびイメージコンバータカメラのモニターパルスなどの観測には、2ビームオシロスコープ(ソニー・テクトロニクス製、7844)およびデジタルメモリスコープ(岩通製、DM-902)を使用した。

2.3 正極性電圧印加時の沿面フラッシュオーバー先駆過程

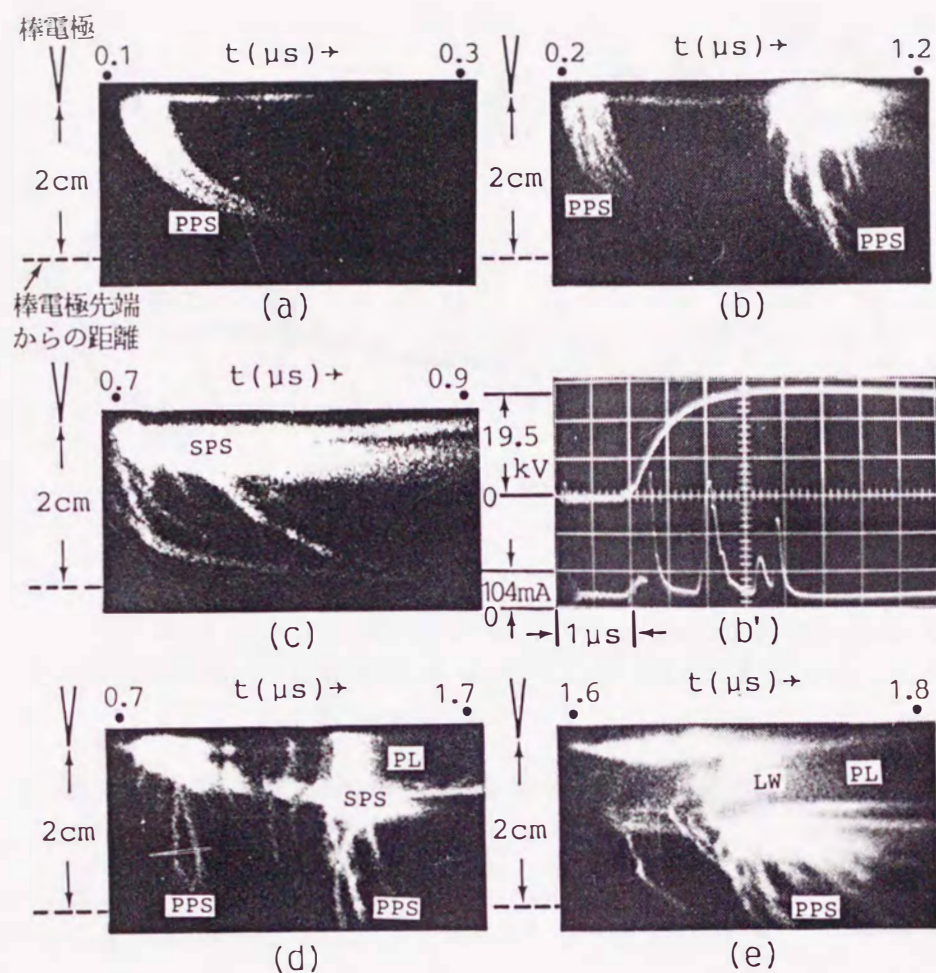
イメージコンバータカメラによる印加電圧 $V = 19.5 \text{ kV}$ (波高値) の場合の

観測結果を、第2-3図および第2-4図に示す。第2-3図(a)~(f)は、イメージコンバータカメラの始動時間（電圧印加後からイメージコンバータカメラ始動までの時間）を各写真の上部に記したように変化させて観測した駒撮り写真である。第2-4図において(a)~(e)は流し撮り写真、図(b')は流し撮り写真に対応する電圧-電流オシログラムである。なお、この第2-3図の駒撮り写真上部にはカメラの露出時間を示しており、写真の上側の発光のない所は棒電極により影になった部分である。第2-5図は、第2-3図および第2-4図と同様な多数の写真により得た正極性電圧印加時の放電進展状況の概念図を示したもので、上部は駒撮り写真形式、下部は放射状に広がる放電の一方向部分のみを流し撮り写真形式で示したものである。



$$\{V(\text{波高値}) = 19.5 \text{ kV}\}$$

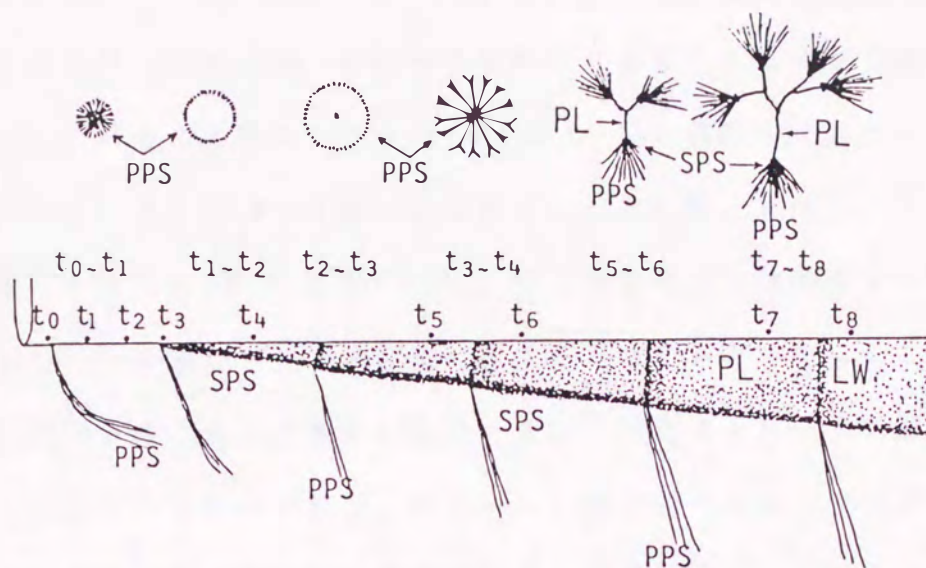
第2-3図 正極性電圧印加時の沿面フラッシュオーバ先駆過程の駒撮り写真



(V = 19.5 kV)

第 2-4 図 正極性電圧印加時の沿面フラッシュオーバ先駆過程の
流し撮り写真とオシログラム

この場合には、電圧印加後、まず正極(棒電極)先端から多数のフィラメント状の正ストリーマがほぼ同時に発生し、放射状に進展する(第 2-3 図(a))。この正ストリーマの進展速度は、発生直後は速いが、その後急速に低下する(第 2-4 図(a))。第 2-3 図(a)~(c)はイメージコンバータカメラの露出時間を 100 ns にして撮影したものであるが、同図(a)は正ストリーマ発生直後の写真で、進展速度が速いので正ストリーマは放射状に



PPS : 1 次正ストリーマ PL : 正リーダ
SPS : 2 次正ストリーマ

第 2 - 5 図 正極性電圧印加時の沿面フラッシュオーバー先駆過程の概念図

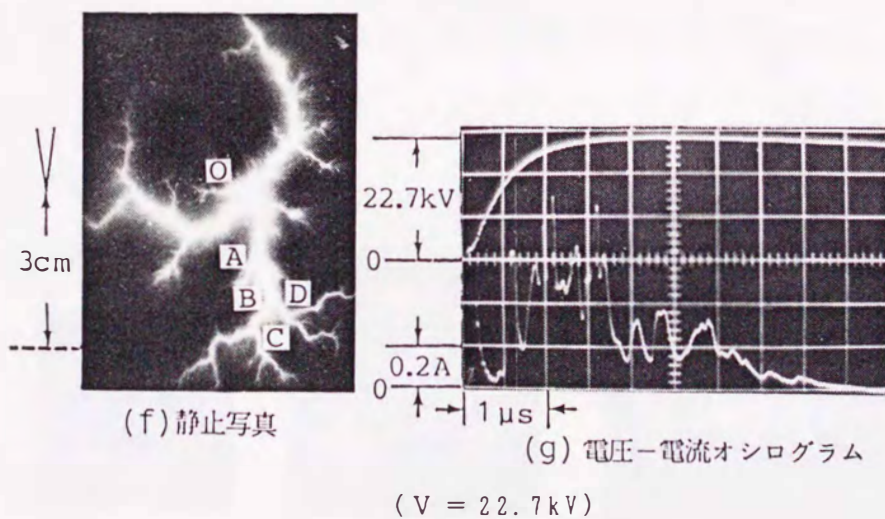
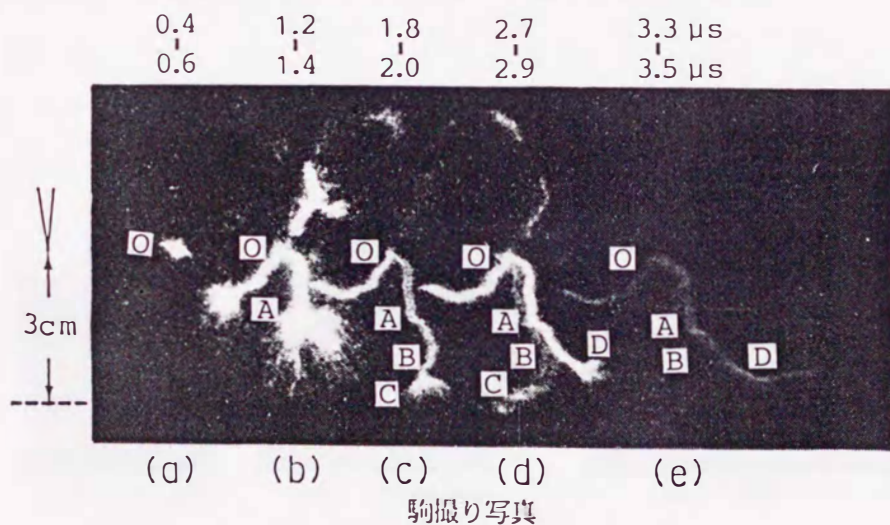
広がっている。しかし、同図(b)および(c)では正ストリーマの進展速度が低下しているので、その間の正ストリーマの進展距離が小さく円環状に見える。また、この正ストリーマの発生直後から進展を停止するまでの平均速度は $1.5 \times 10^7 \text{ cm/s}$ 程度である。その後、最初に正極から発生した正ストリーマが進展を停止するころ、再び、正極先端から正ストリーマが発生し、先行の正ストリーマの長さ以上に進展する(第 2 - 3 図(d)、第 2 - 4 図(b))。この正ストリーマは、最初に発生した正ストリーマのように、すべての方向にほぼ同時に進展するとは限らず、また発生する正ストリーマの数が少なく、そのチャネルの径もやや大きい(第 2 - 3 図(e))。後発の正ストリーマの進展開始後、そのチャネル幹部の正極近傍は持続的な発光をするようになり、端子電圧の上昇と共に、この持続的な発光域は次第

に進展する{第2-3図(e)、第2-4図(b)、(c)}。持続的な発光域は、先行の正ストリーマチャンネルに沿ってそれよりも著しく低速度で進展することから、これを2次正ストリーマ(SPS)⁽⁶⁸⁾、前記の正ストリーマを1次正ストリーマ(PPS)と呼ぶことにする。その後、2次正ストリーマ幹部は細くしぼられ{第2-3図(f)}、流し撮り写真では見かけの発光が弱くなる{第2-4図(d)}。この細くしぼられたチャンネルを、ここでは正リーダ(PL)と呼ぶことにする。正リーダは1次正ストリーマ幹部に形成された2次正ストリーマが移行したもので、2次正ストリーマが正リーダに移行してしまうか、あるいは途中で衰退した後は正リーダ頭部に2次正ストリーマは存在しなくなる。その後、正リーダ頭部から間欠的に1次正ストリーマが発生し、1次正ストリーマチャンネルに沿って、さらに2次正ストリーマおよび正リーダが進展する{第2-4図(d)}。また、1次正ストリーマが発生進展すると、その直後に、その発生点から発光波(LW)が正極に向かって進展する{第2-4図(e)}。そのため正リーダは、その頭部から1次正ストリーマが進展する度に、正リーダ全長にわたって発光を繰返しながら進展する。

第2-6図は、イメージコンバータカメラによる $V = 22.7\text{kV}$ の場合の5駒の駒撮り写真、静止写真および電圧-電流オシログラムである。印加電圧が高くなると、ほぼ連続的に数発以上の電流パルスが発生し{第2-6図(g)}、正リーダは発光を繰返しながら進展する。2発目の電流パルスが発生したころの同図(a)の駒撮り写真では、正リーダはまだ発生していないが、同図(b)では端子電圧の上昇と共に、次の電流パルスが発生し、正リーダはかなり進展して強く発光している。しかし、同図(c)では正リーダの進展距離はさらに増加しているが、同図(b)で強く発光していた正リ

ーダ(O-A)の発光は弱くなっている。同図(d)ではB点で分枝し、その先端(B-D)は同図(c)での正リーダ(B-C)と異なった経路を進展しているが、正リーダは再び強く発光している。同図(e)では再び正リーダの発光は弱くなっている。

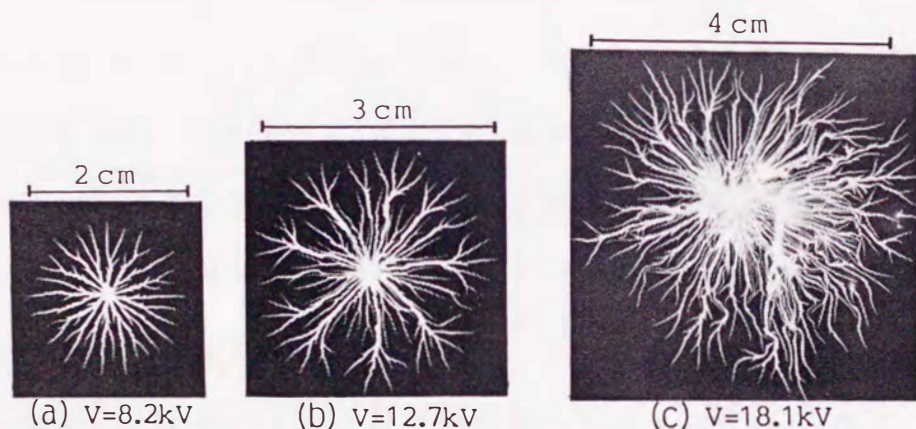
以上のように、正リーダは間欠的に発光を繰返しながら進展する。これは前述のように、1次正ストリーマが正リーダから発生する度に、その発生点から発光波が正極に向かって進展し、正リーダの全長にわたってその発



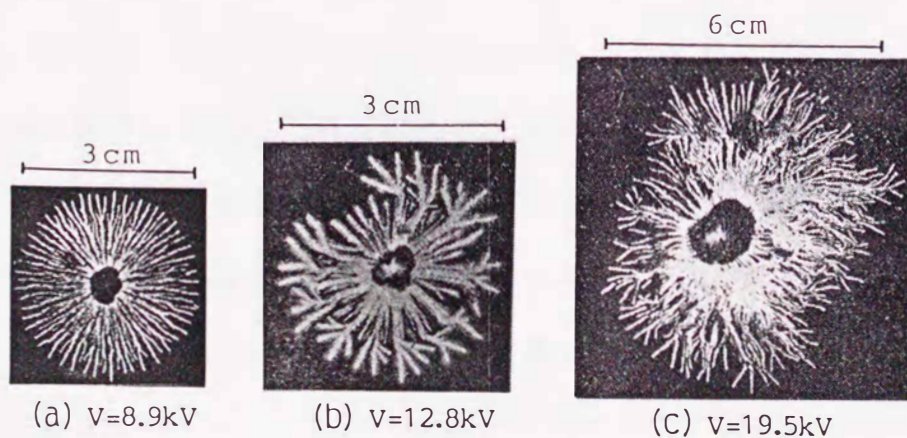
第2-6図 正極性電圧印加時の沿面フラッシュオーバ先駆過程の駒撮り写真、静止写真およびオシログラム

光を強めるものと考えられる。秋田⁽⁶⁹⁾によれば、このような発光波は電離電圧波であると報告されている。正極性雷インパルス電圧印加時の沿面放電の進展過程は以上述べたようになるが、これは棒対平板ギャップにおける気中放電の場合⁽⁷⁰⁾とほぼ同様の過程である。

次に、イメージコンバータカメラによる観測結果の解析によって得られた沿面放電の進展過程とリヒテンベルグ図および電荷図とを対比して述べる。第2-7図および第2-8図に、種々の電圧を印加した場合のリヒテンベルグ図および電荷図を示す。第2-7図(a)および第2-8図(a)は、電



第2-7図 正インパルス電圧印加時のリヒテンベルグ図

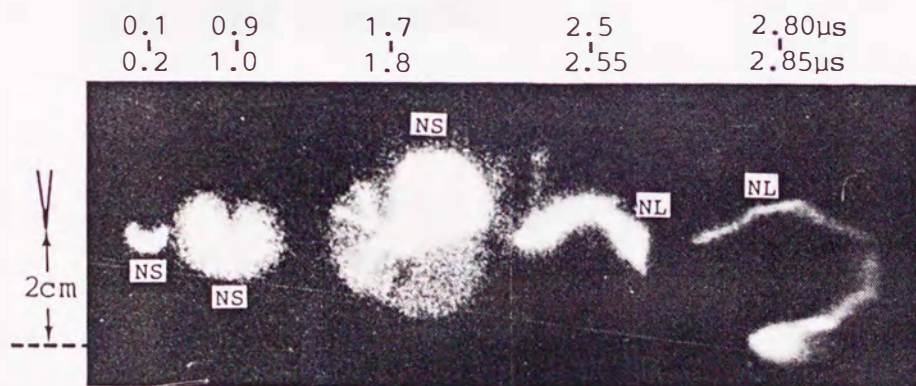


第2-8図 正インパルス電圧印加時の電荷図

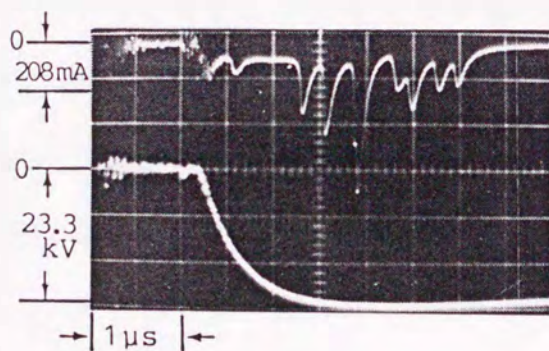
圧印加後棒電極先端から最初に発生進展する1次正ストリーマのみのリヒテンベルグ図および電荷図であり、これらは、第2-3図(a)に示したイメージコンバータカメラによる駒撮り写真を撮影したときと同じ条件の下で得られている。このことは電流波形は1発のパルスのみで、ToeplerによるPolbüschel⁽³⁰⁾に対応していることを示している。第2-7図(b)および第2-8図(b)は、1次正ストリーマが棒電極先端から2度発生した場合のリヒテンベルグ図および電荷図で、やや短く、ストリーマのチャンネルの径が小さい方が、電圧印加後最初に進展した1次正ストリーマである。2発目の1次正ストリーマは、最初に進展した1次正ストリーマチャンネルを避けるようにして、その間を進展し、最初の1次正ストリーマを追い越すと分枝する。これは第2-3図(a)および(d)に相当する別個の1次正ストリーマが同時に写っているもので、電流波形では2発のパルスが現われる。また、中心部で特に強く発光しているのは、主として2次正ストリーマとこれから移行した正リーダであって、正リーダは棒電極先端から2度目に進展した1次正ストリーマの幹部に形成されている。第2-7図(c)および第2-8図(c)は、電流波形では3発以上のパルスが現われ、正リーダがかなり進展している場合で、Gleitbüschelと呼ばれているもの⁽³⁰⁾である。印加電圧が高くなると、正リーダ頭部から1次正ストリーマが間欠的に発生進展するが、この1次正ストリーマは先に進展した1次正ストリーマを横切って進展することがあり、正リーダも先に進展した1次正ストリーマチャンネルを横切って種々の方向へ進展する。なお、電荷図中心部分のダストの付着していない部分は、後述するバックディスチャージによるものである。

2.4 負極性電圧印加時の沿面フラッシュオーバ先駆過程

$V = 23.3 \text{ kV}$ の場合の観測結果を第 2-9 図～第 2-11 図に示す。第 2-9 図は 5 駒の駒撮り写真と、そのときの電圧-電流オシログラムおよび静止写真、第 2-10 図は別個の放電を撮影した駒撮り写真、第 2-11 図はスリットを付けていない場合の流し撮り写真と同図(b)に対応する電圧-電流オシログラムである。また、第 2-12 図にこの場合の放電の進展状況の概念図を示す。



(a) 駒撮り写真



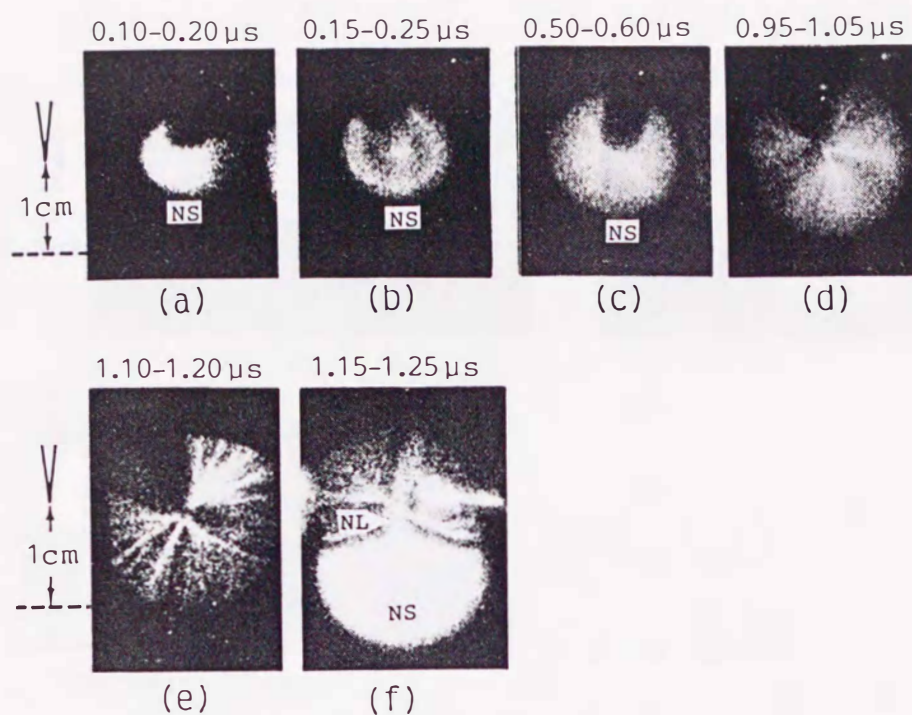
(b) 電圧-電流オシログラム



(c) 静止写真

($V = 23.3 \text{ kV}$)

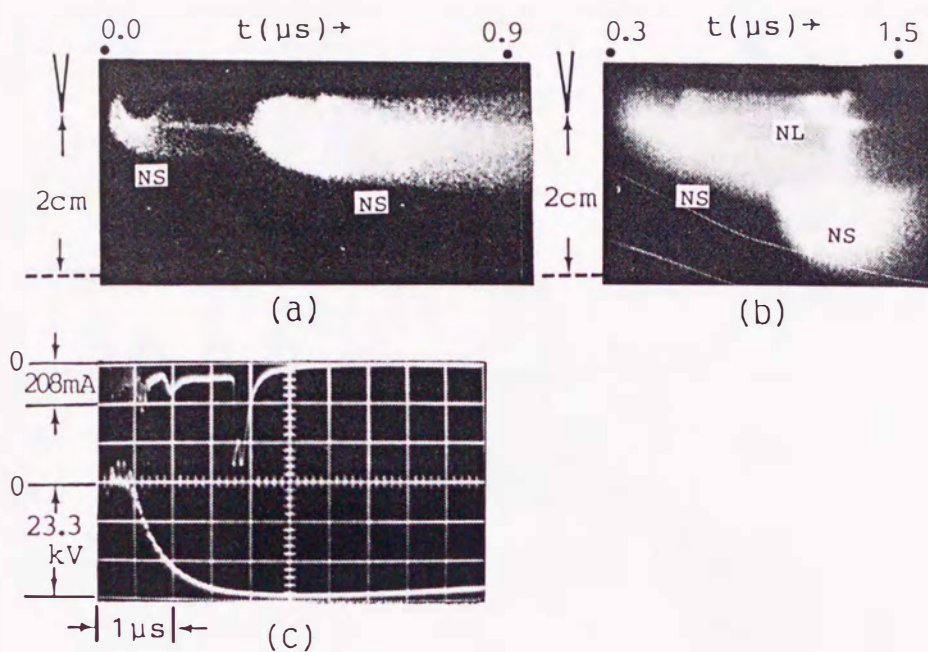
第 2-9 図 負極性電圧印加時の沿面フラッシュオーバ先駆過程の駒撮り写真、静止写真およびオシログラム



($V = 23.3 \text{ kV}$)

第 2 - 1 0 図 負極性電圧印加時の沿面フラッシュオーバ先駆過程の
駒撮り写真

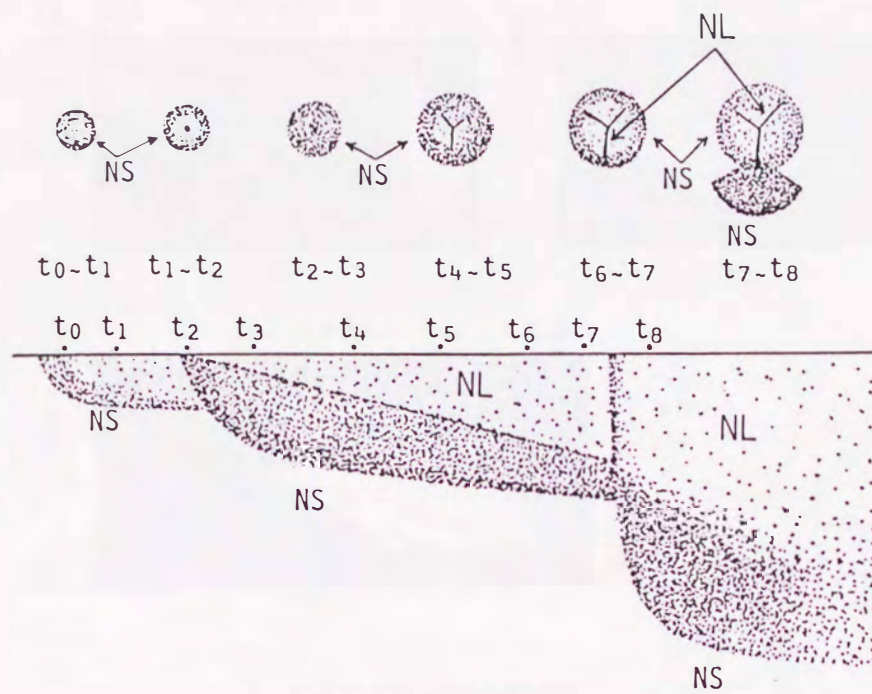
電圧印加後、まず負極(棒電極)先端から拡散的な発光形態を示す負ストリーマ(NS)が発生し、わずかの距離を進展した後、その進展を停止する{第 2 - 9 図(a)、第 2 - 1 0 図(a)、第 2 - 1 1 図(a)}。また、その発光は中心部から急速に弱くなる{第 2 - 1 0 図(b)、第 2 - 1 1 図(a)}。その後、端子電圧が上昇すると、負極先端から再び負ストリーマが進展を開始し、先行コロナの外縁部に達し、さらに進展する{第 2 - 9 図(b)、第 2 - 1 0 図(c)、(d)}。第 2 - 1 0 図(b)では、このような負ストリーマが円環状の先行負ストリーマの中心部分に新たな発光域として見られる。この負極先端から 2 度目に発生した負ストリーマが進展すると、流し撮り写真では見かけの発光が弱い、細く絞られたチャンネルが負ストリーマの幹部に形成



($V = 23.3 \text{ kV}$)

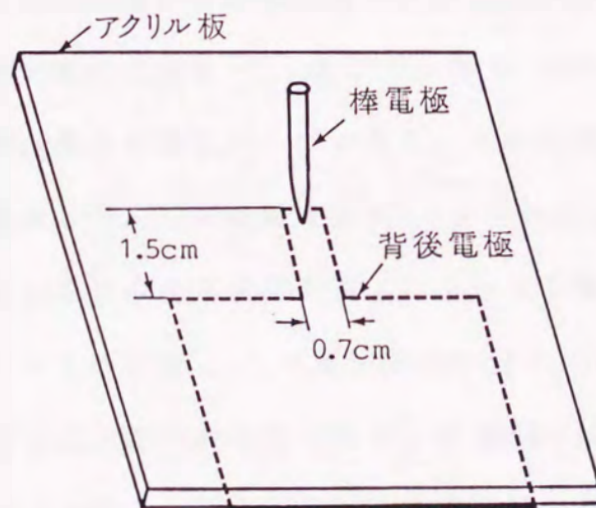
第2-11図 負極性電圧印加時の沿面フラッシュオーバ先駆過程の
流し撮り写真とオシログラム

され、負ストリーマチャンネルに沿って進展する(第2-10図(d)、(e)、第2-11図(b))。このチャンネルが2度目に発生した負ストリーマ内縁近傍に達すると、その点から新たに負ストリーマが発生し、扇状に進展する(第2-9図(c)、第2-10図(f)、第2-11図(b))。この負ストリーマは、先行の各負ストリーマが負極先端から進展したのに対し、細くしぼられたチャンネル先端から進展する。そこで、ここではこの細くしぼられたチャンネルを負リーダ(NL)と呼ぶことにする。負リーダ先端から発生する負ストリーマが進展を開始するとき、その起点となった負リーダの発光は急速に強くなる。このときの状況、特に負リーダに沿う発光波の進展状況を観測するためには、イメージコンバータカメラの対物レンズ側ガラス管

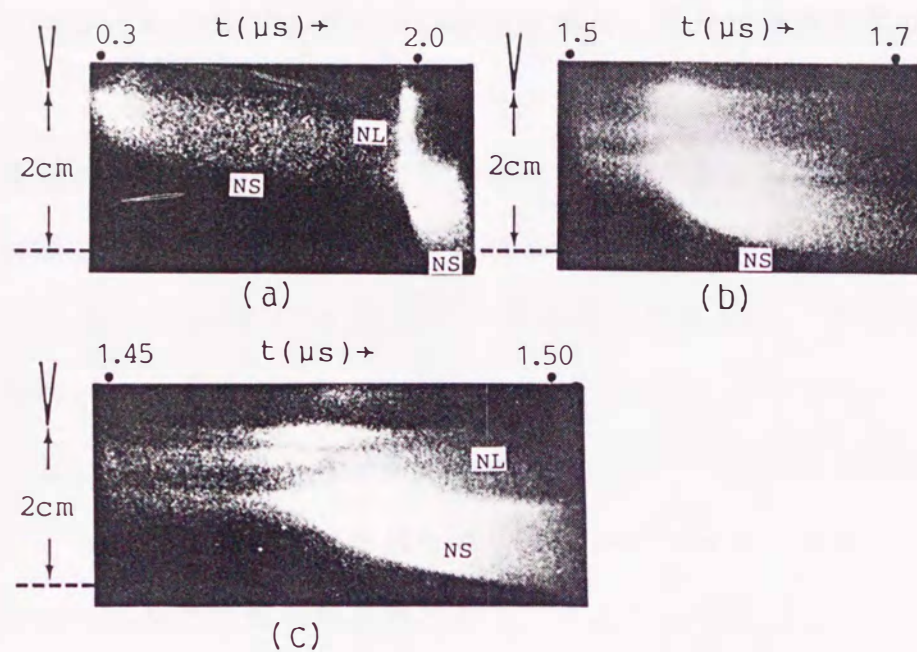


NS : 負ストリーマ LW : 発光波
NL : 負リーダー

第2-12図 負極性電圧印加時の沿面フラッシュオーバー先駆過程の概念図



第2-13図 電極配置図



($V = 24.4 \text{ kV}$)

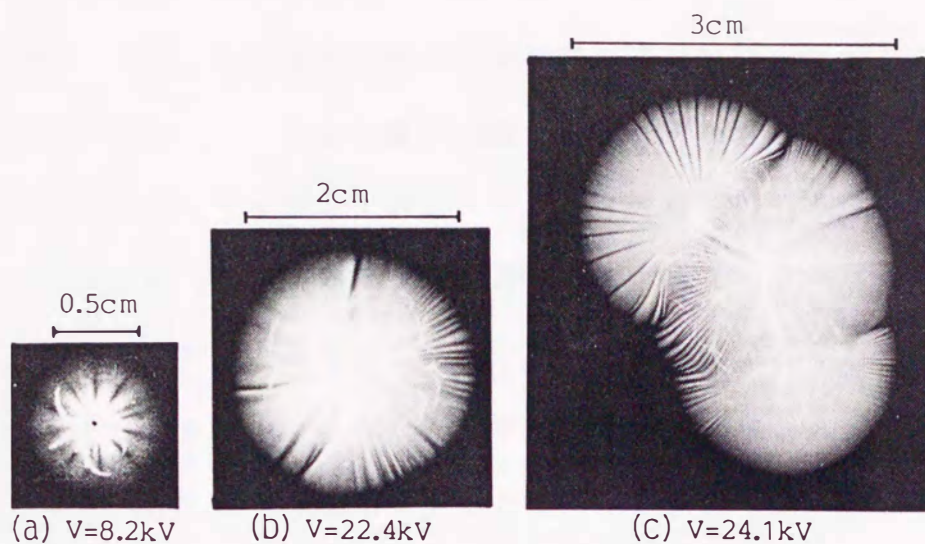
第 2-1 4 図 負極性電圧印加時の沿面フラッシュオーバ先駆過程の
流し撮り写真

面にスリットを取り付け、極めて高速度の流し撮影をする必要がある。しかし、放電は放射状に広がるため、負リーダの進展方向がスリットの視野と一致する確率は極めて小さい。そこで、第 2-1 3 図に示すように、背後電極を棒電極近傍のみ帯状として、負リーダが特定の方向へ進展しやすいようにして観測した。その結果を第 2-1 4 図に示す。同図(a)は、電圧印加後の負極先端からの 2 度目の負ストリーマの発生から、負ストリーマ幹部での負リーダの形成と、その進展および負リーダから発生する負ストリーマの進展に至るまでの状況を示す。同図(b)は、高速度で撮影した負リーダ先端から進展する負ストリーマの発生状況を示しており、この負ストリーマが発生した瞬間に負リーダは全長にわたって強い発光をしている

ることがわかる。しかし、この発光波の進展速度は極めて速く、しかも進展距離が短いため、流し時間が50nsという極めて高速度の流し撮り写真によっても、その進展方向と速度を明らかにすることができなかった。

沿面放電においては、電圧印加後負極先端から2度目の負ストリーマが発生した後、負極先端部では発光が持続し{第2-11図(a)、(b)}、電流も第2-11図(c)と第2-4図(b')とを比較してみると、負極性電圧印加時の方が、正極性電圧印加時に比べ持続的である。このことから、端子電圧の上昇に伴い負極から電子が供給され、この負ストリーマは発光を持続する。この間に負リーダが形成され、負リーダチャンネルを通して負リーダ先端部分に多量の負電荷が蓄積される。これらの負電荷は、その部分の電界を高め負リーダ先端からさらに負ストリーマを発生進展させるものと考えられる。このように負極性電圧印加時の沿面放電では、負リーダが放電の進展に極めて重要な役割を演じている。

第2-15図は、負極性電圧印加時のリヒテンベルグ図である。同図(a)は、ただ一度だけ負極先端から負ストリーマが発生した場合で、第2-10図(a)の駒撮り写真に相当する。同図(b)は、さらに負極先端から負ストリーマが発生進展した場合で、第2-10図(a)および(c)の駒撮り写真を重ねたものに相当するが、これらの負ストリーマはいずれも拡散的な発光をしているため、リヒテンベルグ図では区別できない。同図(c)は、負リーダ先端から発生する負ストリーマが2発発生進展した場合で、やや強い発光をしている細いチャンネルが負リーダである。また、同図(a)~(c)のいずれにも見られる曲がりくねったストリーマ状のチャンネルは、バックディスチャージによるものである。



第 2 - 1 5 図 負極性電圧印加時のリヒテンベルグ図

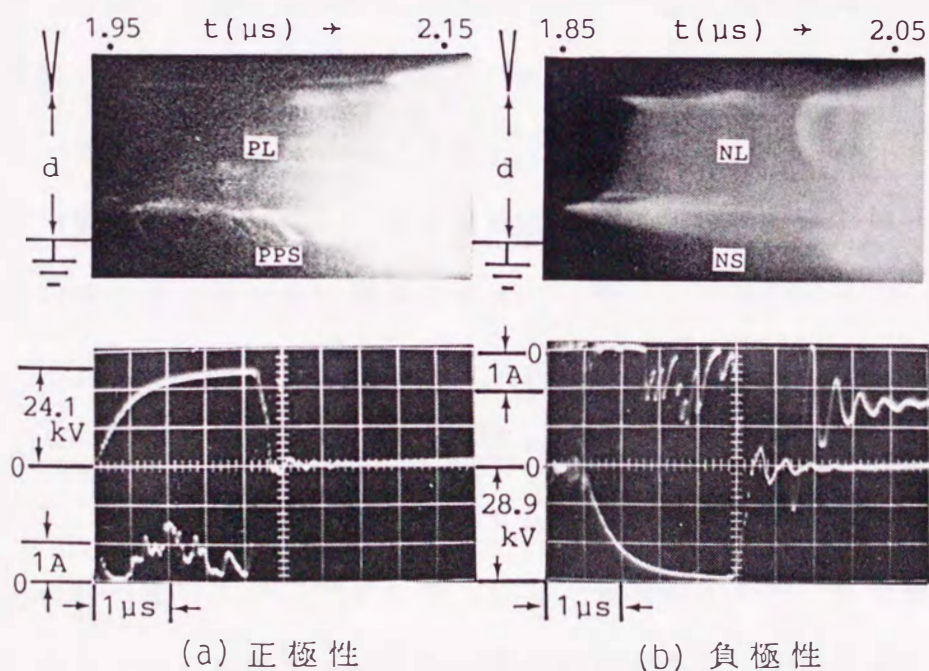
2.5 フラッシュオーバー時の放電過程

ギャップの長さが数 cm 程度の空气中棒対平板ギャップの放電の進展状況と沿面放電の進展状況を比較するため、第 2 - 1 3 図の電極配置で、アクリル板表面上の棒電極から約 5 cm の位置に接地平板を置き、フラッシュオーバー直前の状況を観測した。この場合のイメージコンバータカメラによる観測写真および電圧 - 電流オシログラムを第 2 - 1 6 図に示す。同図 (a) は正極性電圧印加時、(b) は負極性電圧印加時で、それぞれ上部に流し撮り写真、下部にそのときの電圧 - 電流オシログラムを示す。

正極性インパルス電圧印加時の気中放電の場合には、正リーダ先端から間欠的に 1 次正ストリーマを発生進展させながら正リーダが進展し、これがギャップを橋絡することによってフラッシュオーバーする⁽⁶⁶⁾。沿面放電の場合もほぼ同様に正リーダ頭部から 1 次正ストリーマが発生進展し、正リ

ードが負極に達すると直ちにフラッシュオーバーする。

負極性インパルス電圧印加時の気中放電の場合には、負ストリーマがステップ状に進展し、これが正極に到達した後、正極から1次正ストリーマが発生進展する。その後、1次正ストリーマ幹部に形成された2次正ストリーマあるいは正リーダ頭部から間欠的に1次正ストリーマを発生進展させながら正リーダが進展し、フラッシュオーバー直前に進展した負リーダと相会してフラッシュオーバーする⁽⁶⁶⁾。しかし沿面放電では、負リーダはその頭部から負ストリーマを発生しながら進展し、これが正極に到達するとフラッシュオーバーする。すなわち、気中放電では正リーダがフラッシュオーバーの主導的役割を果たしているが、沿面放電では正極からの正リーダの発生進展は見られず、負リーダがフラッシュオーバーの主導的役割を果たし、負極性インパルス電圧印加時の気中放電と沿面放電では、この点で著しく異なっている。



第2-16図 フラッシュオーバー直前の沿面放電の流し撮り写真とオシログラム

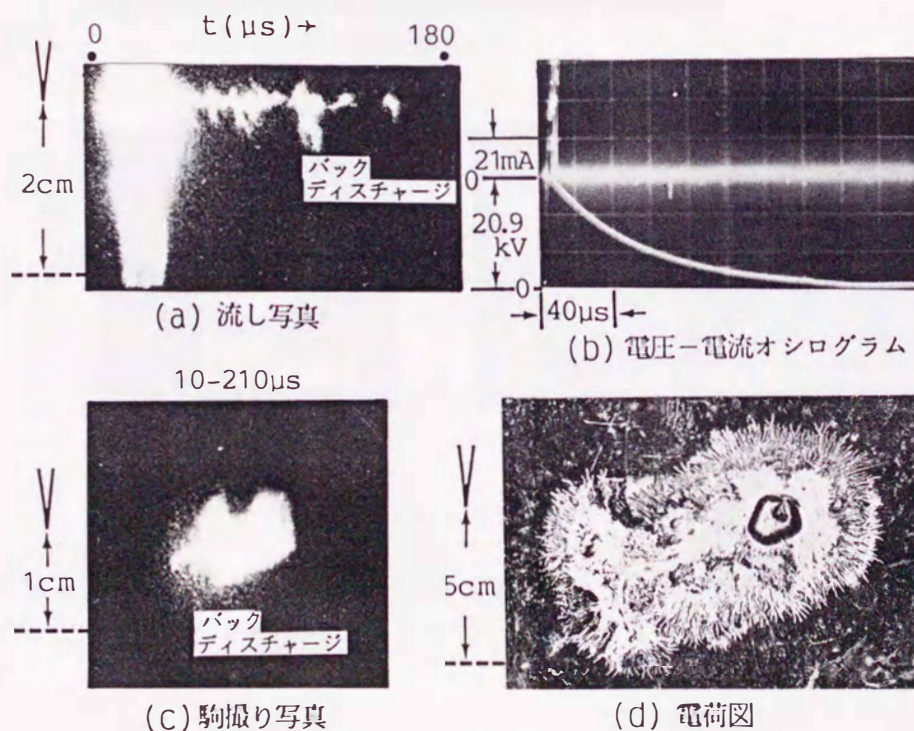
2.6 バックディスチャージ

印加電圧波尾における端子電圧の減衰に伴い、先に進展した沿面コロナストリーマなどにより、アクリル板表面に蓄積された電荷と棒電極との間にバックディスチャージが生じる。第2-2図に示した電極配置で観測したこれらの状況を示す観測結果を、第2-17図および第2-18図に示す。

第2-17図は、正極性電圧印加時の観測結果で、同図(a)は極めて低速度の流し撮り写真、同図(b)はそのときの電圧-電流オシログラムである。同図(c)は、バックディスチャージによる発光のみを撮影するため、イメージコンバータカメラの始動時間を、電圧印加後 $10\mu\text{s}$ 遅延させて撮影した極めて露出時間の長い駒撮り写真、また同図(d)は、そのときの電荷図である。第2-18図は、負極性電圧印加時の観測結果で、同図(a)は極めて低速度の流し撮り写真、同図(b)はそのときの電圧-電流オシログラムである。同図(c)はバックディスチャージの1発1発を観測した駒撮り写真、同図(d)はカメラの始動時間を $10\mu\text{s}$ 遅延させて撮影した駒撮り写真、同図(e)はそのときの電荷図である。

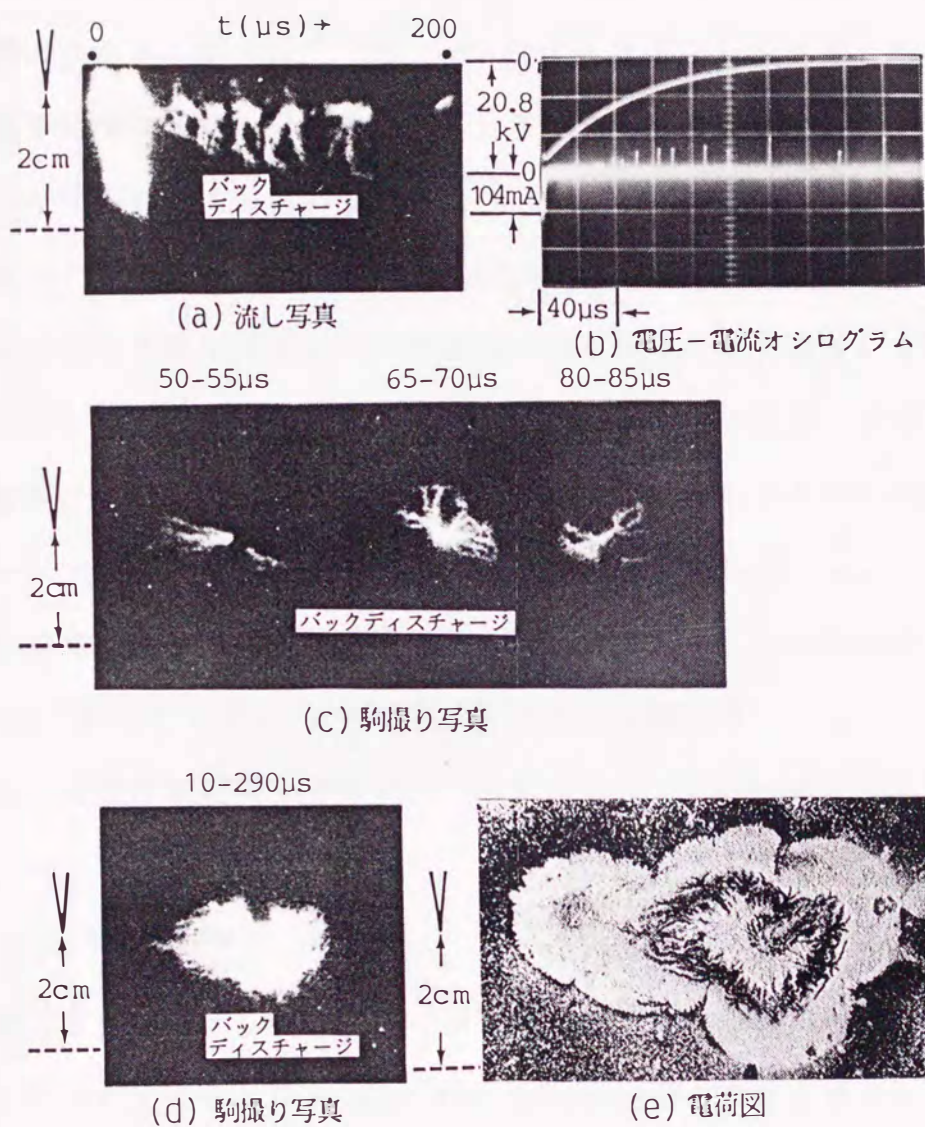
端子電圧が波高値に達し、その後電圧波尾において減衰し始めると、印加電圧の極性とは逆方向の電流パルスが、間欠的に発生する(第2-17図(b)、第2-18図(b))。印加電圧が正極性の場合には、棒電極先端近傍にストリーマ状のチャンネルが種々の方向へ間欠的に発生進展し(第2-17図(a))、駒撮り写真(第2-17図(c))では拡散的な発光とその内部にややチャンネルの径の大きな発光が見られる。印加電圧が負極性の場合には、フィラメント状の形状をした発光が間欠的に現われ、正極性電圧印加時よりその進展距離が大きい(第2-18図(a))。また、それぞれは異なった

方向へ進展している(第2-18図(c))。バックディスチャージが棒電極先端から進展するか、あるいはアクリル板上の残留電荷から棒電極に向かって進展するかは、バックディスチャージの発生時間のバラツキが大きいため確認できなかった。しかし、バックディスチャージの形状は、正極性電圧印加時には負ストリーマ⁽⁶⁷⁾(第2-17図(c))に、負極性電圧印加時には正ストリーマ⁽⁷⁰⁾(第2-18図(d))に良く似ていることから、バックディスチャージは棒電極先端からそれぞれアクリル板上の正あるいは負の残留電荷に向かって進展するものと考えられる。



($V = 20.9 \text{ kV}$)

第2-17図 正極性電圧印加時のバックディスチャージの観測写真とオシログラム



($V = 20.8 \text{ kV}$)

第2-18図 負極性電圧印加時のバックディスチャージの観測写真とオシログラム

電荷図中心部分において、ダストの付着していない部分をイメージコンバータカメラによる駒撮り写真と比較すると、その図形の大きさおよび形状は良く一致している。このことから電荷図中心部分のわずかにダストの

付着した部分、およびダストの全く付着しない部分は、主として印加電圧波尾における端子電圧減衰に伴うバックディスチャージによって生じるものと考えられる。横井ら⁽⁷¹⁾は、バックディスチャージは主として電圧印加電極を誘電体板から分離する時に、残留電荷の一部がその電極へ放電するために現われると報告している。しかし、大賀、福山⁽⁷²⁾、⁽⁷³⁾ならびに室岡ら⁽⁷⁴⁾、⁽⁷⁵⁾も指摘しているように、印加電圧波尾における端子電圧減衰時にバックディスチャージが生じることは明らかである。このようなバックディスチャージは、イメージコンバータカメラのけい光面を直接肉眼で観察すると、印加電圧が正極性および負極性ともストリーマの発生が1回のみでも生じている。しかし、正極性電圧印加時のバックディスチャージの発光は印加電圧が低い場合には極めて微弱で、しかも進展長は極めて短い。そのため第2-7図のリヒテンベルグ図では、バックディスチャージによる発光を判別できない。

2.7 結 論

沿面放電では、リヒテンベルグ図形におけるPolbüschelの段階からさらに電圧を上昇すると、ToeplerによるGleitbüschelに転移する。ここでは沿面放電の進展過程を明らかにするための基礎研究として、Gleitbüschelの進展過程を明らかにすることを試みた。本章において明らかにされた結果を要約すると、次のようになる。

- (1) 正極性インパルス電圧印加時には、まず正極先端から1次正ストリーマが発生し、端子電圧の上昇に伴って正極から新たな1次正ストリーマが発生する。このうち、後に発生した1次正ストリーマ幹部が2次正ス

トリーマに転換し、正リーダの芽となる。その後、正リーダ頭部から新たな1次正ストリーマが間欠的に発生進展し、これに伴って2次正ストリーマおよび正リーダが進展する。

(2) 負極性インパルス電圧印加時には、負極から進展した2発目の負ストリーマ幹部に負リーダが形成され、これを通して多量の電子が負極から供給されて、負リーダ先端部分の負電荷蓄積が進み、負リーダ先端から新たな負ストリーマが発生進展する。

(3) 従来、Polbüschelと呼ばれていた放電は、正放電では1次正ストリーマ、負放電では負ストリーマである。またGleitbüschelは、正放電では1次正ストリーマから正リーダまでの集積、負放電では負ストリーマから負リーダまでの集積に相当する。

(4) 正極性インパルス電圧印加時の放電過程は、気中棒対平板ギャップのそれとほぼ同じになるが、負極性インパルス電圧印加時にはかなり異なり、負リーダがフラッシュオーバーに主導的役割をしている。

(5) 印加電圧波尾において、印加電圧と逆極性の電流が間欠的に発生するが、これはイメージコンバータカメラによる観測結果から間欠的に発生進展するバックディスチャージによることが明らかになった。また、バックディスチャージの進展長は、正極性電圧印加時より負極性電圧印加時の方が大きく、ストリーマの発生が1回のみのような低い電圧でも生じる。

(6) 電荷図中心部分において、ダストの付着していない部分は電圧波尾で撮影したイメージコンバータカメラによる駒撮り写真と良く一致する。したがって、電荷図中心部分のダストの付着しない部分は、主として印加電圧波尾において生じたバックディスチャージによるものである。

第3章 固有容量の小さい沿面の正インパルスフラッシュ オーバ過程と特性

3.1 まえがき

従来、沿面放電は固体誘電体の固有容量によって複雑に変化することが知られていたが、研究された実験における固有容量の変化範囲が狭いため、沿面フラッシュオーバ現象に対する固有容量の影響について未解明な部分が多く、沿面フラッシュオーバ過程に関する系統的研究はほとんどなされていない。

絶縁設計のような工学的観点からは、沿面フラッシュオーバ現象のうちフラッシュオーバ特性の固有容量および沿面距離依存性に興味があり、将来における沿面放電モデルの確立や放電診断法の開発のような基礎的観点からは、種々の固有容量における沿面フラッシュオーバ過程の解明が望まれる。ところで、固有容量は平板状固体誘電体単位面積当たりの静電容量 C_0 で、誘電体の誘電率を ε 、厚さを τ とすると、 $C_0 = \varepsilon / \tau$ で与えられる。したがって、 C_0 は誘電体の材料あるいは厚さを変えることによって変化でき、広い範囲で C_0 を変えたい場合には誘電体の厚さを変える方が容易である。そこで、本章の研究では、固体誘電体としてアクリルを採用し、その厚さを変えて固有容量を 2.6 pF/cm^2 以下の範囲で変化させた。

すなわち、本章では、固有容量の小さい領域で沿面距離を $0.4 \sim 10 \text{ cm}$ の範囲で変化し、正極性インパルス電圧印加時の50%沿面コロナ開始電圧 V_{C50} 、50%沿面フラッシュオーバ電圧 V_{F50} 、およびフラッシュオーバまでの時間 t_f を測定すると共に沿面フラッシュオーバ過程を詳細に調べ、沿面フラッシュオーバ特性が沿面距離によって次の3つに分類できること、および沿面フラッ

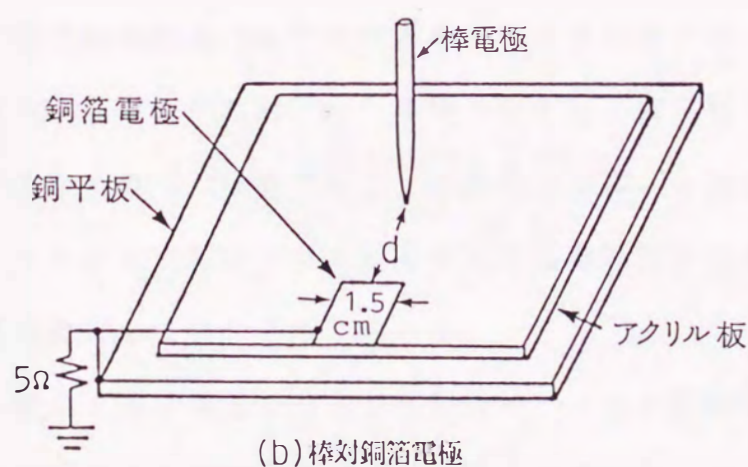
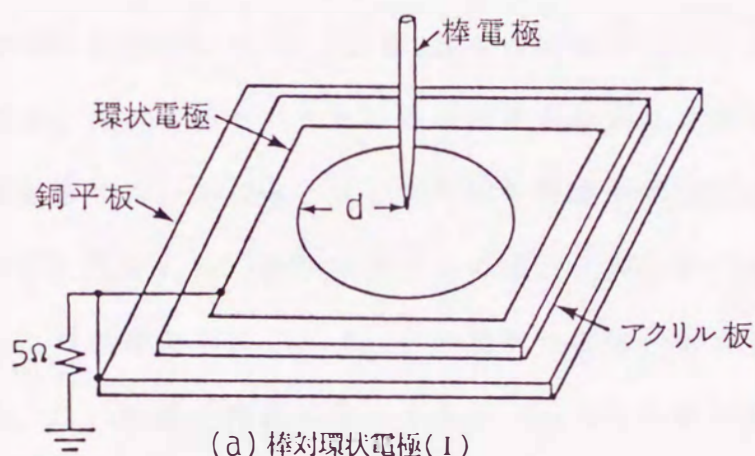
シオーバ電圧を沿面距離と固有容量を使って定式化した結果を述べる。

- (1) 長い沿面距離の場合、放電は1次正ストリーマ、2次正ストリーマ、リーダ、アークの順で発生し、沿面フラッシュオーバ電界は進展長の長いリーダの特性に依存する。リーダ進展特性は固有容量の大きさに影響されるので、沿面フラッシュオーバ電圧は固有容量の関数になる。
- (2) 短い沿面距離の場合、放電は1次正ストリーマ、2次正ストリーマ、アークの順で発生し、リーダの存在は認められない。沿面フラッシュオーバ電界は2次正ストリーマ中の電界(約18kV/cm)にほぼ等しい。
- (3) 中間の沿面距離の場合、1次正ストリーマの発生時刻に依存して、上記(1)または(2)の特性となる。

3.2 実験装置および方法

第3-1図に電極構成を示す。実験回路、高圧側の棒電極および接地した背後電極は2.2節で述べたものとほぼ同じであるが、第3-1図(a)に示したように、アクリル板の上に内部を円形にくりぬいた厚さ0.1mmの銅箔を置き、その半径を種々変化して沿面距離を変え、50%沿面コロナ開始電圧および50%沿面フラッシュオーバ電圧を約30回の昇降法によって測定した。コロナ発生の有無は主として電流波形で判別したが、電流パルスが小さく、雑音との区別が難しいような場合には電荷図により確認した。誘電体板はデシケータ内にて15時間以上乾燥した固有容量 C_0 が2.6(厚さ $\tau = 1$)、1.9(1.5)、1.3(2)、0.9(3)、0.65(4)および0.5pF/cm²(5mm)、一辺が約22cmの正形状のアクリル板で、これは電圧印加毎に取り替えた。印加電圧は1.3/40 μ sの正極性雷インパルス電圧である。

放電状況の観測装置および方法は、2.2節と同様であるが、観測にはイメージインテンシファイアを装着したイメージコンバータカメラを用い、平板電極に対して約 75° の角度から50%沿面フラッシュオーバー電圧 V_{50} を印加して撮影した。イメージコンバータカメラによる流し撮影の場合には、イメージコンバータの対物レンズ側ガラス管面にスリットを取り付け、高圧側電極先端から一方向のみがイメージコンバータカメラの視野になるようにした。また、第3-1図(a)に示したような電極配置では、放電は放



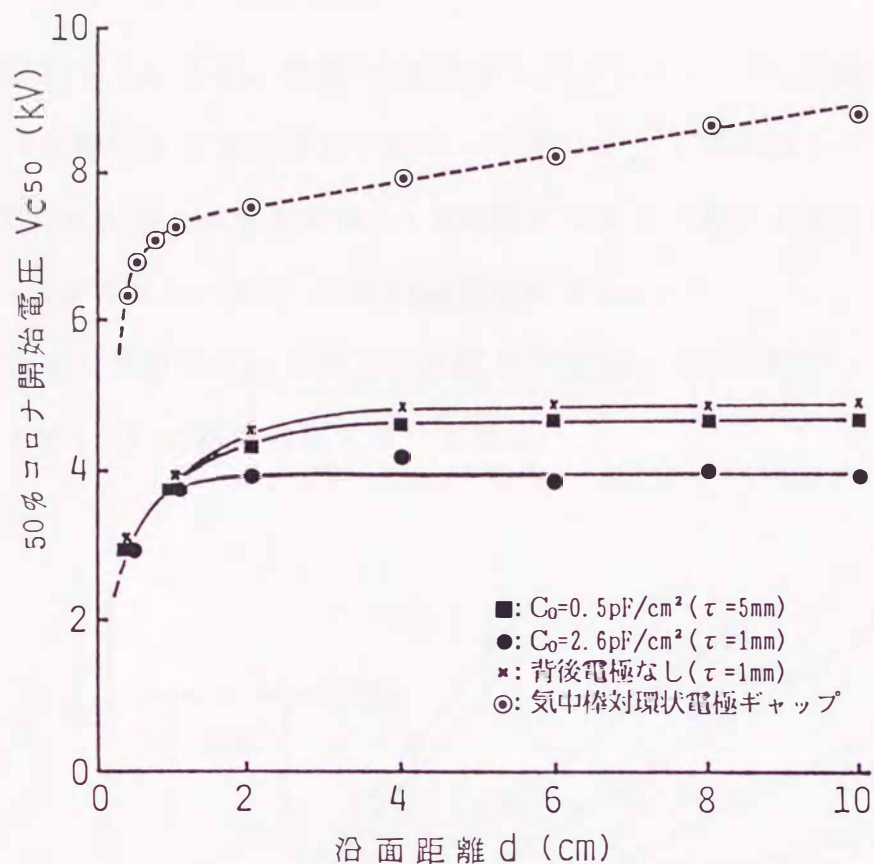
第3-1図 電極構成

射状に広がり、放電の進展方向がスリットの視野と一致する確率は小さいため、アクリル板上に置いた内部を円形にくりぬいた銅箔の電極（以下、環状電極と呼ぶ）の代りに、同図(b)に示したような幅が1.5cmの銅箔の電極を置いて観測した。

3.3 50%沿面コロナ開始電圧および50%沿面フラッシュオーバー電圧

第3-2図は、アクリル板の固有容量 C_0 が2.6($\tau = 1$)および0.5pF/cm²(5mm)の場合と、背後電極を除去した場合($\tau = 1$ mm使用)の50%沿面コロナ開始電圧 V_{C50} と環状電極の半径(沿面距離) d との関係を示したものである。また、同図では、背後電極とアクリル板の両者を除去した場合（以下、気中棒対環状電極と呼ぶ）の V_{C50} と d との関係を破線で示している。同図からわかるように、 C_0 が2.6pF/cm²以下であれば、 d が0.4~1cmの範囲では V_{C50} に及ぼす C_0 の影響は小さく、 $V_{C50} - d$ 曲線はほぼ一致する。 d が1cm以上になると、 C_0 の影響が顕著になると共に V_{C50} の上昇率が低下し、 d が2cmを超すと、それぞれの C_0 の値に対する V_{C50} は d の増加に対してほぼ一定となる。この領域における V_{C50} は C_0 が大きくなるほど低い。背後電極を除去した場合の V_{C50} は $C_0 = 0.5$ pF/cm²の場合のそれと大差なく、棒対環状電極ギャップのその1/2程度である。上述のように、 d が大きい範囲では C_0 の方が、 d が小さい範囲では d の方が高圧電極先端部分の電位分布により強い影響を及ぼしていると考えられる。

V_{C50} よりも著しく高い電圧を印加した場合は、コロナ開始遅れのため、最初のコロナが発生する電圧瞬時値は、 V_{C50} よりも高く、かつその変動幅も大きい。しかしながら、 $V_{C50} - d$ 特性は、電極形状、構成および配置か



第3-2図 50%沿面コロナ開始電圧と沿面距離との関係

ら決まる基本的な特性であるため、これらの実験条件の違いを放電現象の面から比較する際には重要な特性であると考えられる。

第3-3図(a)および(b)は、沿面放電および棒対環状電極ギャップにおける気中放電の50%フラッシュオーバー電圧 V_{50} と沿面距離 d との関係を、それぞれ d が10cm以下および0.4~2.0cmの範囲について示したものである。同図からわかるように、棒対環状電極ギャップの気中放電の場合は、針対平板ギャップの場合と同じように⁽⁷⁰⁾、 d が1.8cm以下の範囲では

$$V_{50} = 18.4 + 5.01d \quad (\text{kV}) \quad (3-1)$$

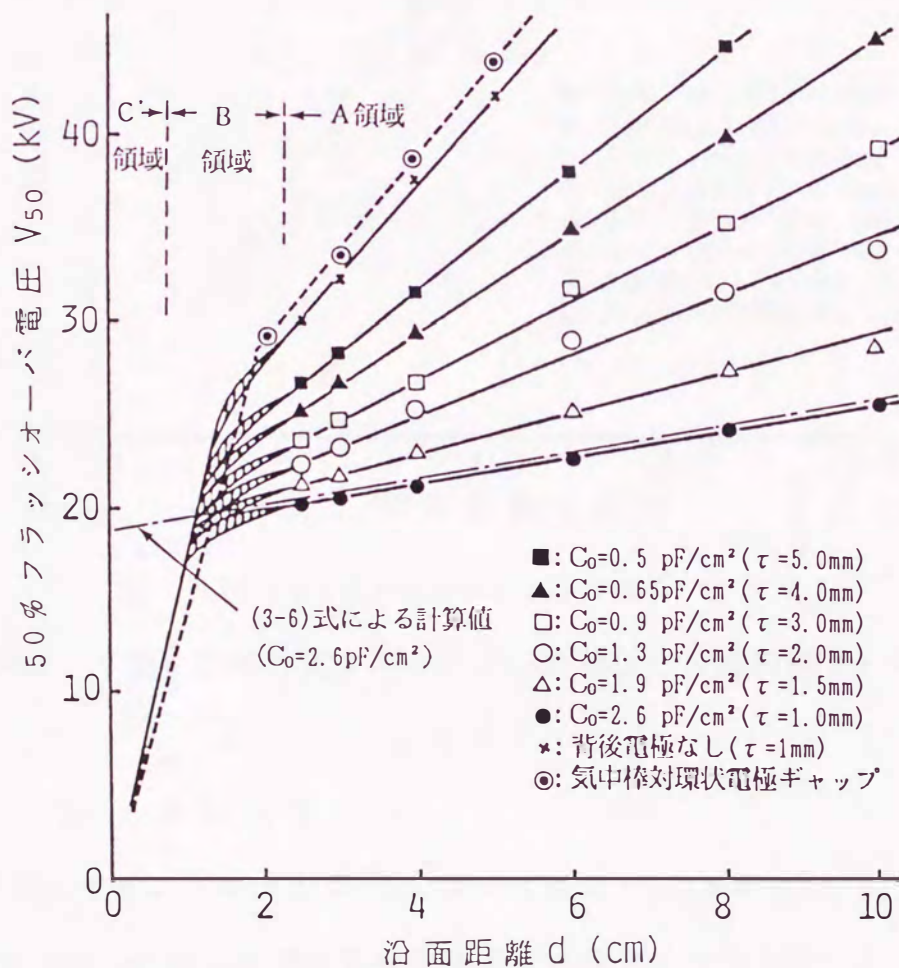
がほぼ成立し、 d が0.4~1.8cmの範囲では

$$V_{50} = 0.5 + 15d \quad (\text{kV})$$

(3-2)

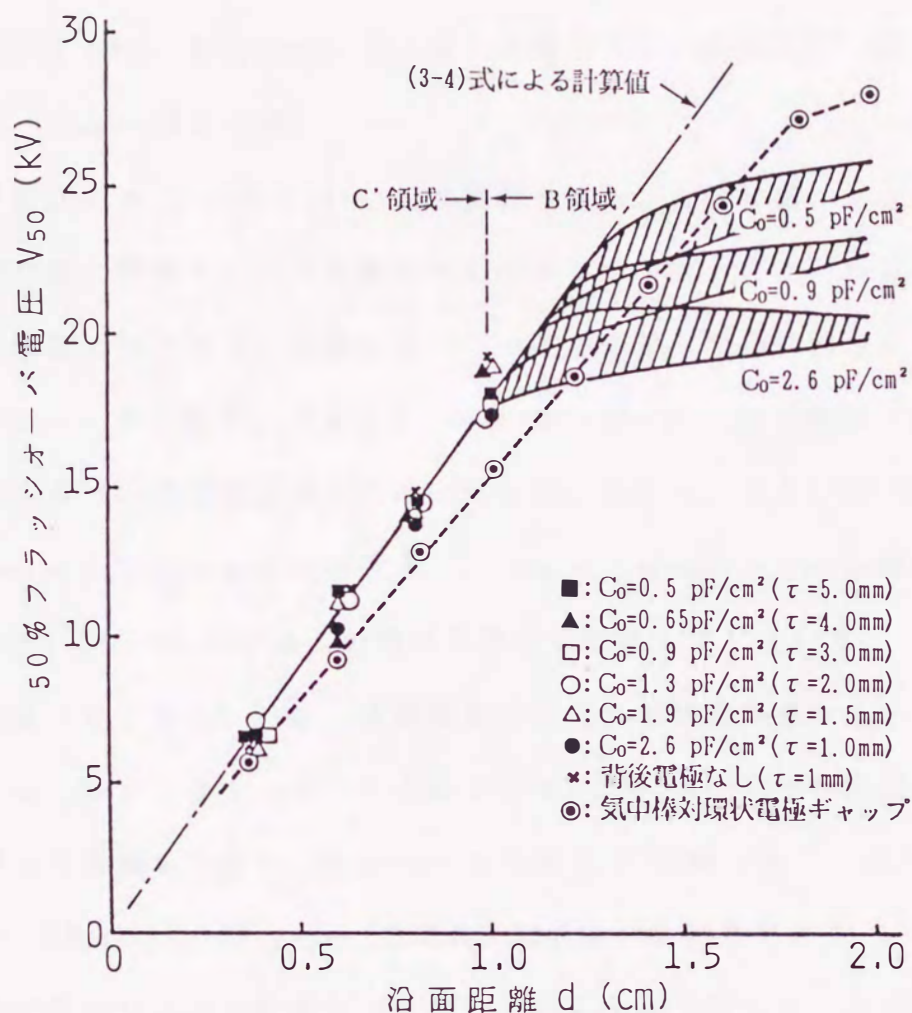
がほぼ成立する。また、第3-4図に示したように、 V_{50} 印加時のフラッシュオーバー時間 t_f も大気中針対平板ギャップの場合とほぼ同じように、 d が1.8cm以上では2~3 μs であるが、1.8cm以下になると著しく長くなり、例えば d が1.2cmでは5~47 μs 、平均18 μs 程度になる。

沿面放電の場合には、 d が2.5cm以上では V_{50} は C_0 の値によってかなり相違するが、(3-1)式と同様な形の実験式



(a) $d = 0.4 \sim 10\text{cm}$ の場合

第3-3図 50%沿面フラッシュオーバー電圧と沿面距離との関係



(b) $d = 0.4 \sim 2.0 \text{ cm}$ の場合

第3-3図 50%沿面フラッシュオーバー電圧と沿面距離との関係

$$V_{50} = 18.4 + k d \quad (\text{kV}) \quad (3-3)$$

がほぼ成立する。ここで k は、 C_0 によって異なり、 C_0 が 2.6、1.9、1.3、0.9、0.65、0.5 pF/cm² および背後電極を除去した場合、それぞれ 0.8、1.2、1.6、2.1、2.8、3.3 および 4.7 となる。また、 k を 5.01 とすると、(3-3) 式は (3-1) 式と一致する。したがって、(3-3) 式は、 d が 2.5 cm 以上における針対平

板ギャップの気中放電における $V_{50} - d$ 特性と、沿面放電の $V_{50} - d$ 特性とを包括した式である。一方、 d が $0.4 \sim 1 \text{ cm}$ の V_{50} には C_0 の値による差は認められず {第 3-3 図 (b)}、 V_{50} は d の増加と共に直線的に上昇し、

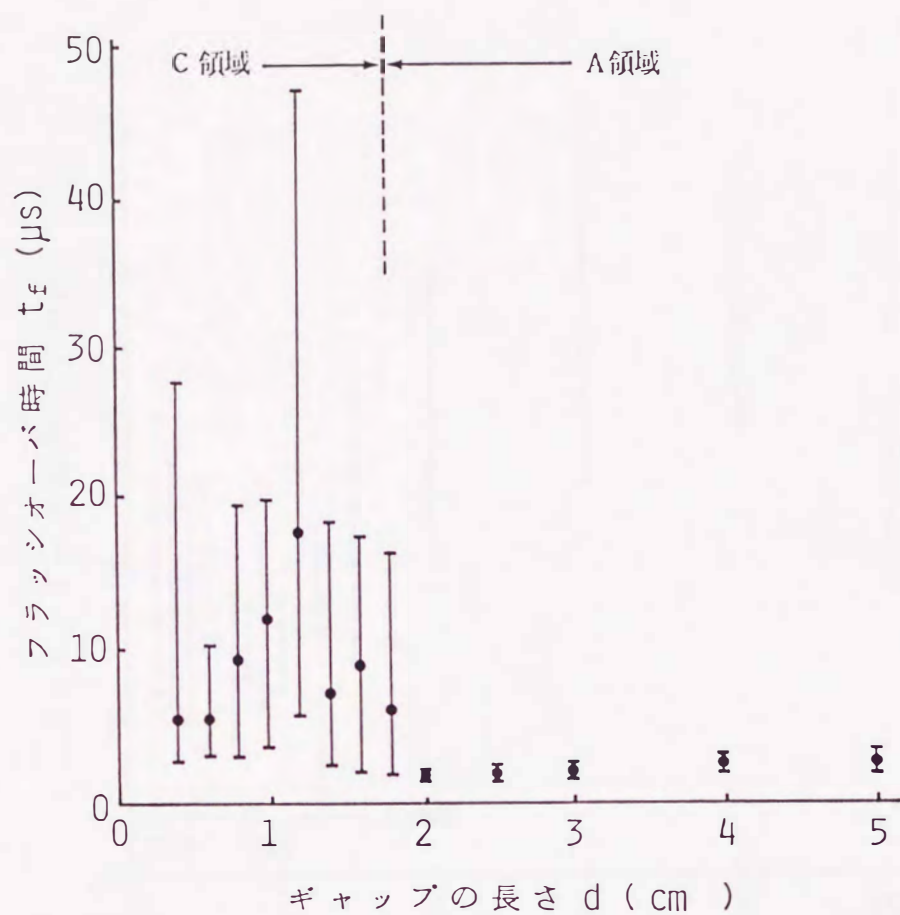
$$V_{50} = 18 d \quad (\text{kV}) \quad (3-4)$$

がほぼ成立する。これを (3-2) 式と比較すると、沿面放電における V_{50} の方が棒対環状電極ギャップにおけるものよりやや高いことがわかる。

沿面放電における V_{50} の測定は、同一条件に対して約 30 回の昇降法を数回反復した。その結果、 d が $2.5 \sim 10 \text{ cm}$ および $0.4 \sim 1 \text{ cm}$ の範囲では、同じ d に対する V_{50} の各測定値はほぼ一致した。しかし、 d が $1 \sim 2.5 \text{ cm}$ の範囲では V_{50} の測定値の変動幅が大きく、 $V_{50} - d$ 特性は 1 本の曲線では表し難いので、第 3-3 図ではこの領域の特性を斜線で示している。

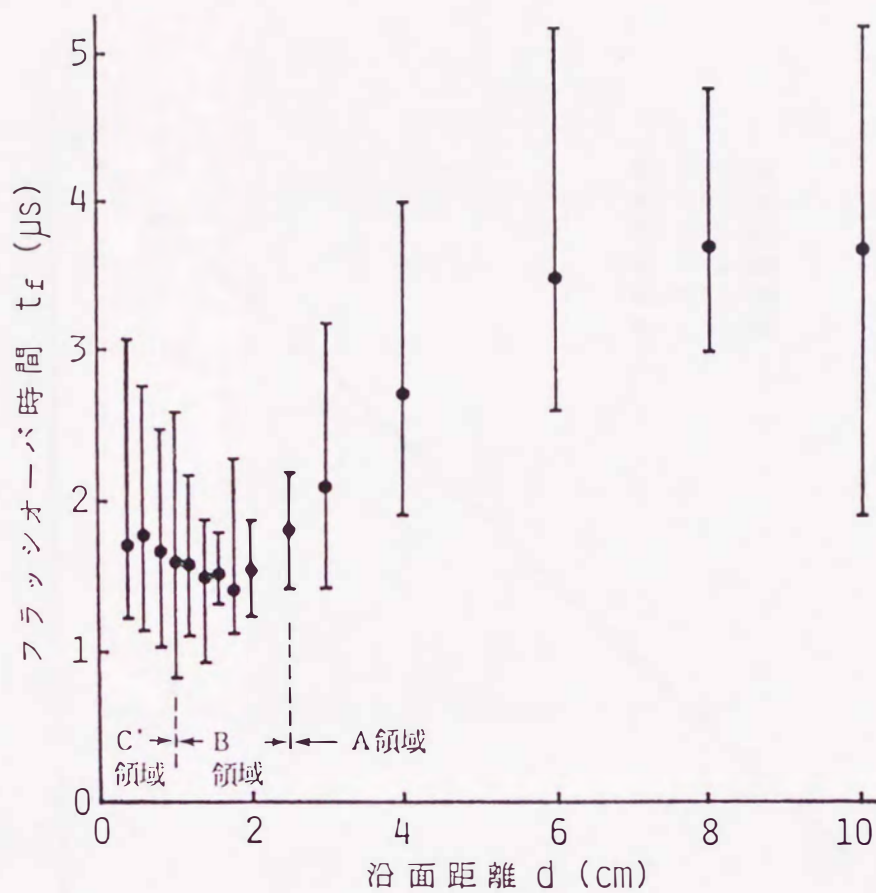
以上述べたように、 $V_{50} - d$ 特性はそれぞれの特性が異なる 3 つの領域に分けることができる。そこで本論文では、 d が $2.5 \sim 10 \text{ cm}$ の範囲を A 領域、 $1 \sim 2.5 \text{ cm}$ の範囲を B 領域、 $0.4 \sim 1 \text{ cm}$ の範囲を C' 領域と呼ぶことにする。

第 3-5 図は、 $C_0 = 2.6 \text{ pF/cm}^2$ の場合における V_{50} 印加時のフラッシュオーバーまでの時間 t_f と沿面距離 d との関係を示したものである。A および B 領域では、 d の減少と共に t_f は減少する。しかし、C' 領域では d の減少と共に t_f はやや増加し、A および B 領域とは明らかに異なった傾向を示す。なお、この場合の t_f は $0.8 \sim 3.1 \mu\text{s}$ で、第 3-4 図に示した棒対環状電極ギャップあるいは針対平板ギャップ⁽⁷⁶⁾における気中放電の d が 1.8 cm 以下の t_f の値に比べ、著しく小さい。



(棒対環状電極における気中放電)

第3-4図 V_{50} 印加時のフラッシュオーバー時間と
沿面距離との関係



(沿面放電, $C_0 = 2.6 \text{ pF/cm}^2$)

第3-5図 V_{50} 印加時のフラッシュオーバー時間と沿面距離との関係

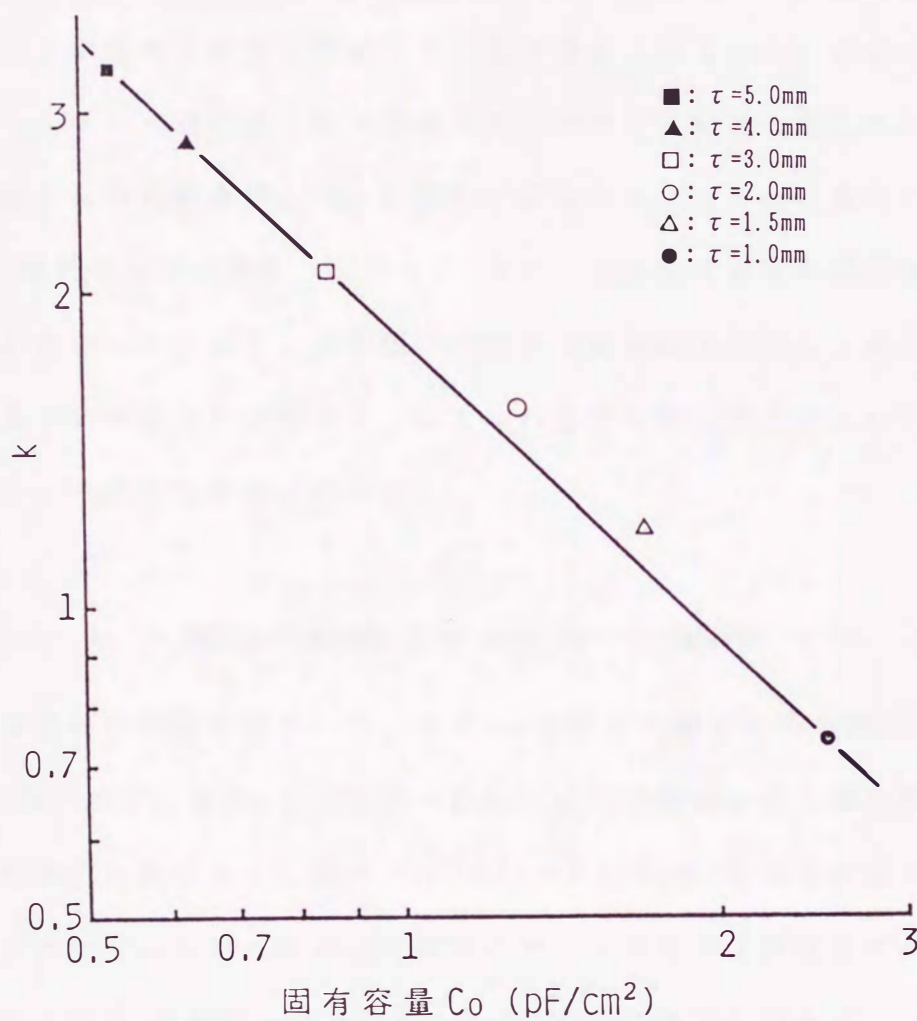
第3-6図は、(3-3)式における k とアクリル板の固有容量 C_0 との関係を示したもので、 k と C_0 の間には

$$k = 1.8 / C_0 \quad (3-5)$$

がほぼ成立する。これを(3-3)式に代入すると

$$V_{50} = 18.4 + 1.8 d / C_0 \quad (\text{kV}) \quad (3-6)$$

となる。上式は、沿面放電におけるA領域の V_{so} を C_0 と d の関数として示す式である。



($d = 2.5 \sim 10\text{cm}$)

第 3 - 6 図 定数 k と誘電体板の固有容量の関係

3.4 50%フラッシュオーバー電圧印加時の沿面フラッシュオーバー過程

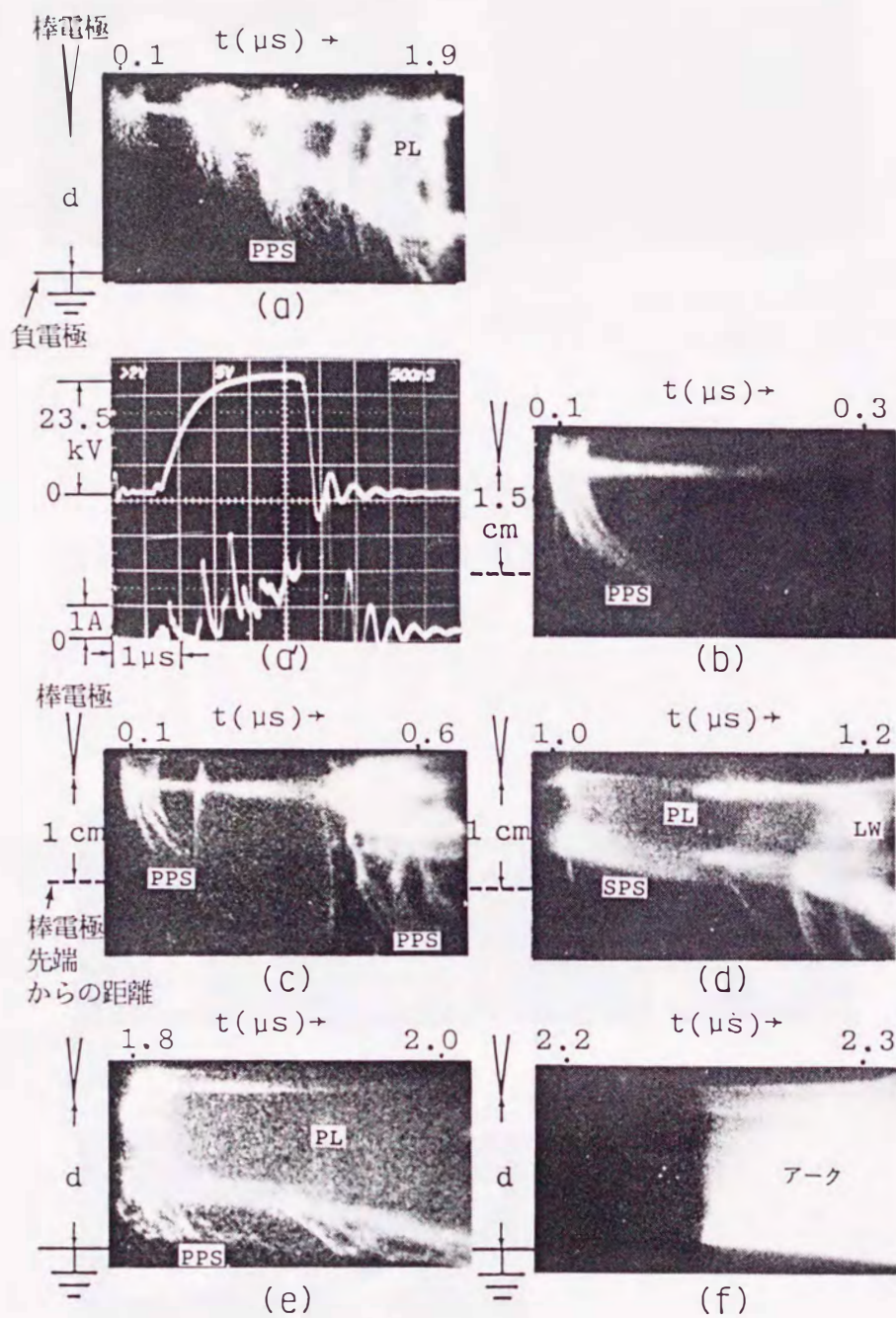
前述のように、沿面フラッシュオーバー諸特性は、A、BおよびC'の3領域で異なった傾向を示す。沿面フラッシュオーバー特性は、沿面フラッシュオーバー過程および機構と密接に関連していると考えられるから、前述の結果は、フラッシュオーバー過程が上記3領域で互に相違していると推定される。本研究における観測結果は、 V_{50} 印加時の沿面フラッシュオーバー過程がA領域とC'領域とでは互に異なっており、また、B領域は両者の移行領域であることがわかった。以下、各領域の代表的な観測結果を示し、多数の観測結果に基づいて描いた沿面フラッシュオーバー過程の概念図を提示し、沿面フラッシュオーバー過程を詳細に述べる。

3.4.1 A領域の沿面フラッシュオーバー過程

この領域の代表的例として、 $d = 5\text{cm}$ の場合の観測結果を第3-7図～第3-9図に示す。第3-7図は $C_0 = 2.6\text{pF/cm}^2$ の場合の流し撮り写真と、電圧-電流オシログラム、第3-8図は $C_0 = 0.5\text{pF/cm}^2$ の場合の流し撮り写真と、イメージコンバータカメラのモニターパルスおよび電流オシログラムである。第3-9図は、 $C_0 = 2.6\text{pF/cm}^2$ の場合の駒撮り写真で、上側の一部分で発光が認められない部分は、棒電極の影になった所である。また、第3-10図は観測結果に基づいて描いた沿面フラッシュオーバー過程の概念図で、上側は駒撮り写真様式、下側は流し撮り写真様式で示したものである。

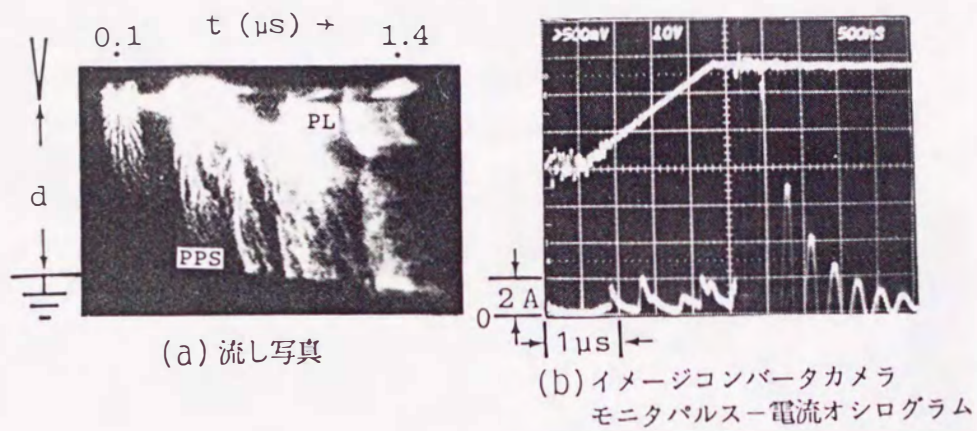
この場合には電圧印加後、先ず正極(棒電極)先端から多数のフィラメント状の正ストリーマがほぼ同時に発生し、放射状に進展する{第3-9図(a)}。この正ストリーマは発生直後は急速に進展するが、その後は進展

するに伴い、その進展速度を急激に低下する{第3-7図(b)}。第3-9図は、イメージコンバータカメラの露出時間を、それぞれ50nsにして撮影した駒撮り写真であるが、同図(a)での正ストリーマは発生直後のため進展速度が速いので、放射状に広がり円盤状に見えるが、(b)および(c)図では正ストリーマの進展速度が低下しているので、その間の正ストリーマの進展速度が小さく、円環状に見える。また、この正ストリーマの発生直後から進展を停止するまでの平均進展速度は $3 \times 10^7 \text{ cm/s}$ 程度である。その後、最初に正極先端から発生した正ストリーマが進展を停止する頃、再び棒電極先端から正ストリーマが発生し、先行の正ストリーマ以上に進展する{第3-7図(c)、第3-9図(d)}。この正ストリーマは、先行の正ストリーマとは異なった経路を進展し、発生する正ストリーマの数が少なく、そのチャンネルの径もやや大きいことから{第3-9図(e)}、開閉インパルス電圧印加時の沿面放電の発光現象を調べた川島⁽⁷⁷⁾によるT図形に相当すると思われる。この正ストリーマの進展開始後、そのチャンネル幹部の正極近傍は持続的な発光をするようになり、端子電圧の上昇と共にこの持続的な発光域は次第に進展する{第3-7図(c)、第3-9図(e)}。この持続的な発光域は、先行の正ストリーマチャンネルに沿って著しく低速度で進展することから、これを2次正ストリーマ(SPS)⁽⁶⁸⁾、前記の正ストリーマを1次正ストリーマ(PPS)と呼ぶことにする。その後、2次正ストリーマ幹部は細く絞られ{第3-9図(f)}、流し撮り写真では見かけの発光が弱くなる{第3-7図(d)}。この細く絞られたチャンネルを、ここでは正リーダ(PL)と呼ぶことにする。正リーダは、1次正ストリーマ幹部に形成された2次正ストリーマが移行したもので、2次正ストリーマが正リーダに移行してしまうか、あるいは未移行部分が衰退した後は正リーダ頭部に2次



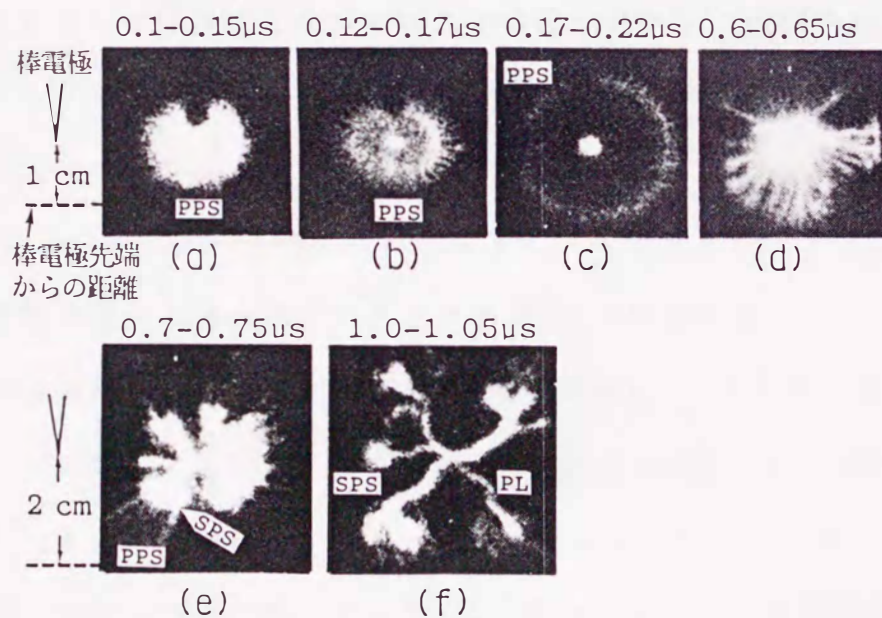
($C_0 = 2.6 \text{ pF/cm}^2$, $d = 5 \text{ cm}$, $V = 23.5 \text{ kV} \approx V_{50}$)

第3-7図 A領域における沿面フラッシュオーバー過程の
流し撮り写真とオシログラム



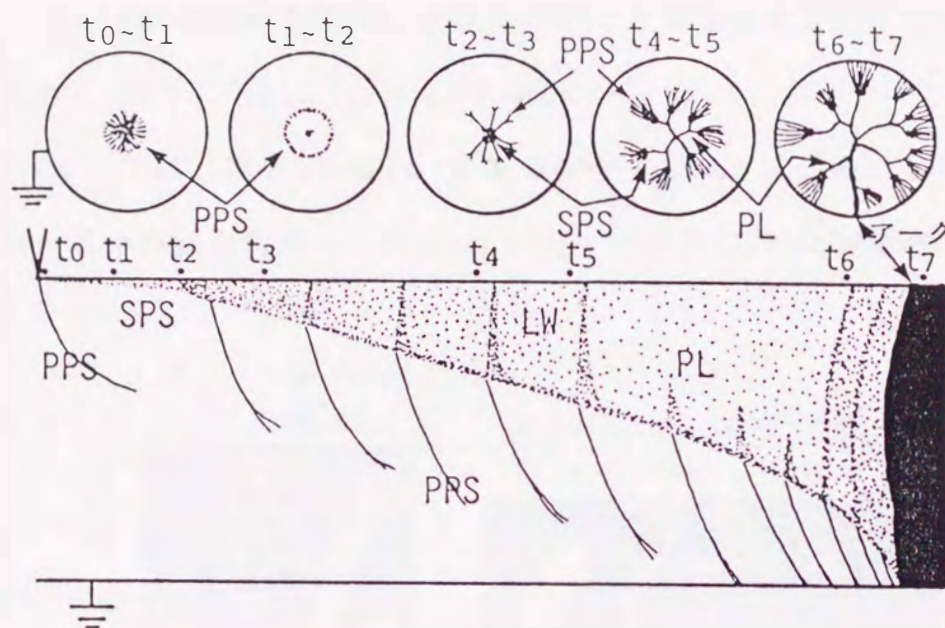
($C_0 = 0.5 \text{ pF/cm}^2$, $d = 5 \text{ cm}$, $V = 35.5 \text{ kV} \approx V_{50}$)

第3-8図 A領域における沿面フラッシュオーバ過程の
流し撮り写真とオシログラム



($C_0 = 2.6 \text{ pF/cm}^2$, $d = 5 \text{ cm}$, $V = 23.5 \text{ kV} \approx V_{50}$)

第3-9図 A領域における沿面フラッシュオーバ過程の駒撮り写真



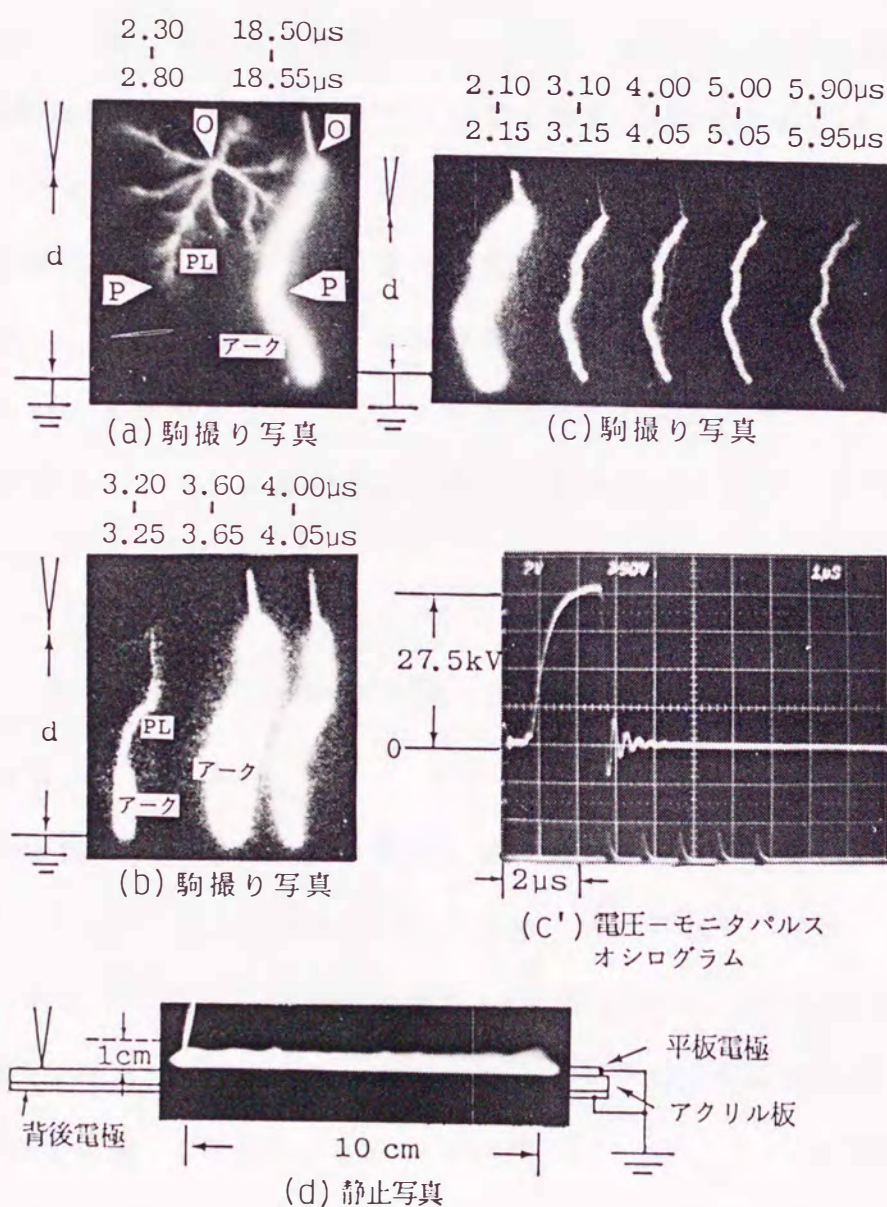
PPS : 1次正ストリーマ PPS : 2次正ストリーマ
LW : 発光波 PL : 正リーダ

第3-10図 A領域の沿面フラッシュオーバー過程の概念図

正ストリーマは存在しなくなる。その後、正リーダ頭部から間欠的に1次正ストリーマが発生し、1次正ストリーマチャンネルに沿ってさらに2次正ストリーマおよび正リーダが進展する{第3-7図(d)、(e)、第3-8図(a)}。この正リーダ頭部から発生する1次正ストリーマを、本論文では気中放電の場合と同様にリーダコロナ^{(78),(79)}と呼ぶことにする。正リーダが進展してリーダコロナが負極(環状電極)に到達するころになると、正リーダは急速に進展して負極に到達し{第3-7図(e)}、直ちにフラッシュオーバーする。この場合、正リーダチャンネルからフラッシュオーバー時の、強烈な発光を伴うアーク柱への移行は、正リーダチャンネルの負極側から進む{第3-7図(f)}。また、1次正ストリーマが発生時に、その発生点から発光波(LW)が正極に向かって進展する。そのため正リーダは正リーダから1次

正ストリーマが進展する度に、全長にわたって発光を間欠的に繰返しながら進展する(第3-7図(a)、第3-8図(a))。

第3-11図は、第3-1図(b)の電極配置で観測した $C_0 = 2.6 \text{ pF/cm}^2$ 、 $d = 10 \text{ cm}$ の場合の観測結果で、同図(c)、(c')は約 $1 \mu\text{s}$ の時間間隔で撮影し



($C_0 = 2.6 \text{ pF/cm}^2$, $d = 10 \text{ cm}$, $V = 27.5 \text{ kV} \approx V_{50}$)

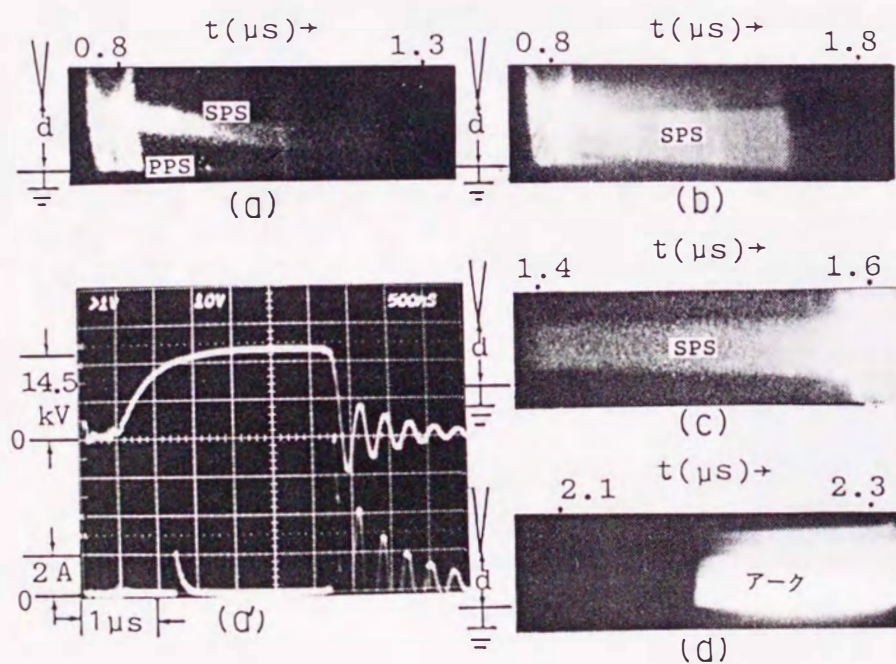
第3-11図 正リーダおよびアークの観測写真

たアークの駒撮り写真およびイメージコンバータカメラのモニターパルスと電圧オシログラムである。時間の経過と共にアークの発光は弱くなるが、その経路の変化は認められない。同図(a)は、フラッシュオーバー直前の正リーダと、フラッシュオーバーしてから約 $15\mu\text{s}$ 後のアークの駒撮り写真である。同図から数本進展した正リーダの中の1本の経路(O-P)と、アークの経路とが良く一致していることがわかる。また、同図(b)の第1駒(左端の駒)では負極側の約 $1/3$ がアークに移行しており、この場合の正リーダの経路も第2および第3駒のアークの経路と良く一致している。同図(d)は、水平方向から撮影したアークの静止写真である。アークの垂直方向の広がり小さく、 5mm 程度以下で、誘電体表面からの浮き上がりはほとんど認められない。上述のように、アークは数条発生した正リーダの何れかが移行したもので、アークが形成された後も誘電体表面に沿い、その経路は変化しない。

3.4.2 C'領域の沿面フラッシュオーバー過程

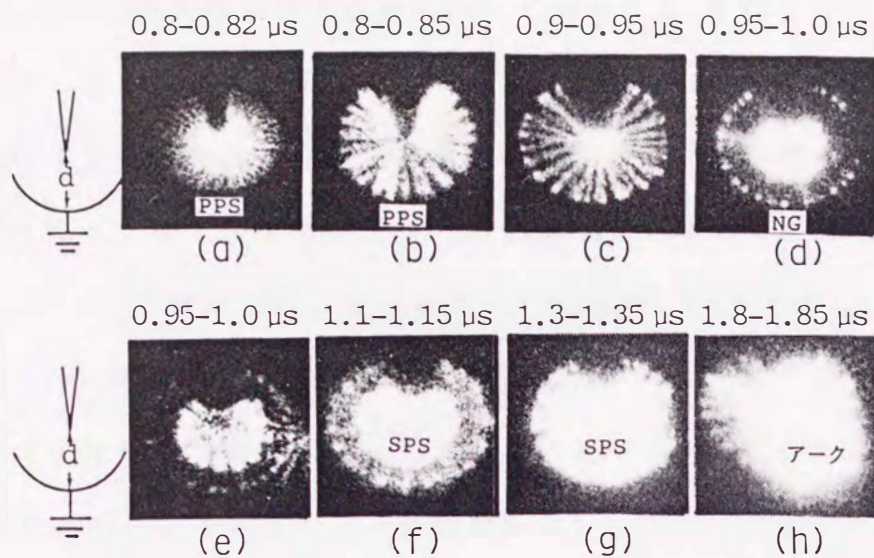
この領域の代表的な例として、第3-12図に $C_0 = 2.6\text{pF/cm}^2$ 、 $d = 0.8\text{cm}$ の場合の流し撮り写真および電圧-電流オシログラムを、第3-13図に $C_0 = 2.6\text{pF/cm}^2$ 、 $d = 0.6\text{cm}$ の場合の駒撮り写真を示す。また、この場合のフラッシュオーバー過程の概念図を第3-14図に示す。電圧を印加すると、先ず正極(棒電極)先端から、1次正ストリーマがほぼ同時に放射状に進展し負極(環状電極)に到達する(第3-12図(a)、第3-13図(a)、(b))。1次正ストリーマが到達した到達点には負グロー(NG)が形成され、この負グローの発光は長時間持続しフラッシュオーバーまで続く(第3-12図(a)、第3-13図(c)~(g))。その後、1次正ストリーマ幹部には2次正スト

リーマが形成され、先行の1次正ストリーマチャンネルに沿って次第に負極に向って進展する。第3-13図(c)、(d)、(f)および(g)から、このような進展状況がよくわかる。電圧の上昇速度が速い間は、2次正ストリーマはその全長にわたって持続的な発光をするが、電圧が波高値に近づいてその上昇速度が低下すると、2次正ストリーマはその正極側から発光が弱くなる。しかし、2次正ストリーマはさらに進展を続けるので、ある長さの発光域が負極方向へ移動することになる。第3-13図(e)はイメージコンバータカメラの感度を低くして撮影したもので、ほぼ同図(d)に対応する。同図では、放射状に進展した多数の2次正ストリーマがそれぞれ局所的な発光域として認められ、これらがほぼ正極を中心とする環状の発光域を形成していることがわかる。2次正ストリーマがさらに進展して負極に到達



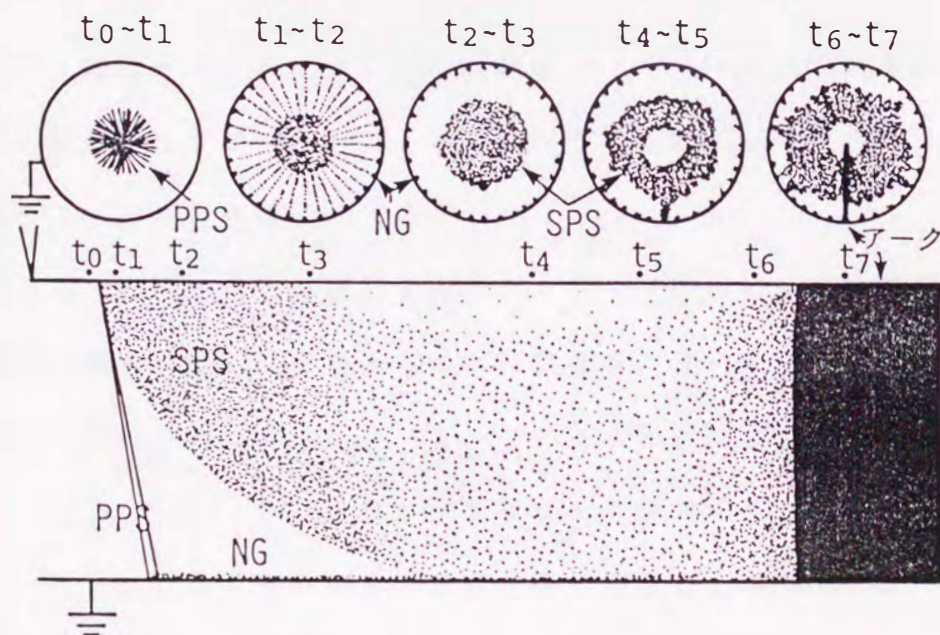
$$(C_0 = 2.6 \text{ pF/cm}^2, \quad d = 0.8 \text{ cm}, \quad V = 14.5 \text{ kV} \approx V_{50})$$

第3-12図 C'領域における沿面フラッシュオーバー過程の
流し撮り写真とオシログラム



($C_0 = 2.6 \text{ pF/cm}^2$, $d = 0.6 \text{ cm}$, $V = 11.0 \text{ kV} \approx V_{50}$)

第3-13図 C'領域における沿面フラッシュオーバー過程の駒撮り写真



PPS : 1次正ストリーマ SPS : 2次正ストリーマ
NG : 負グロー

第3-14図 C'領域の沿面フラッシュオーバー過程の概念図

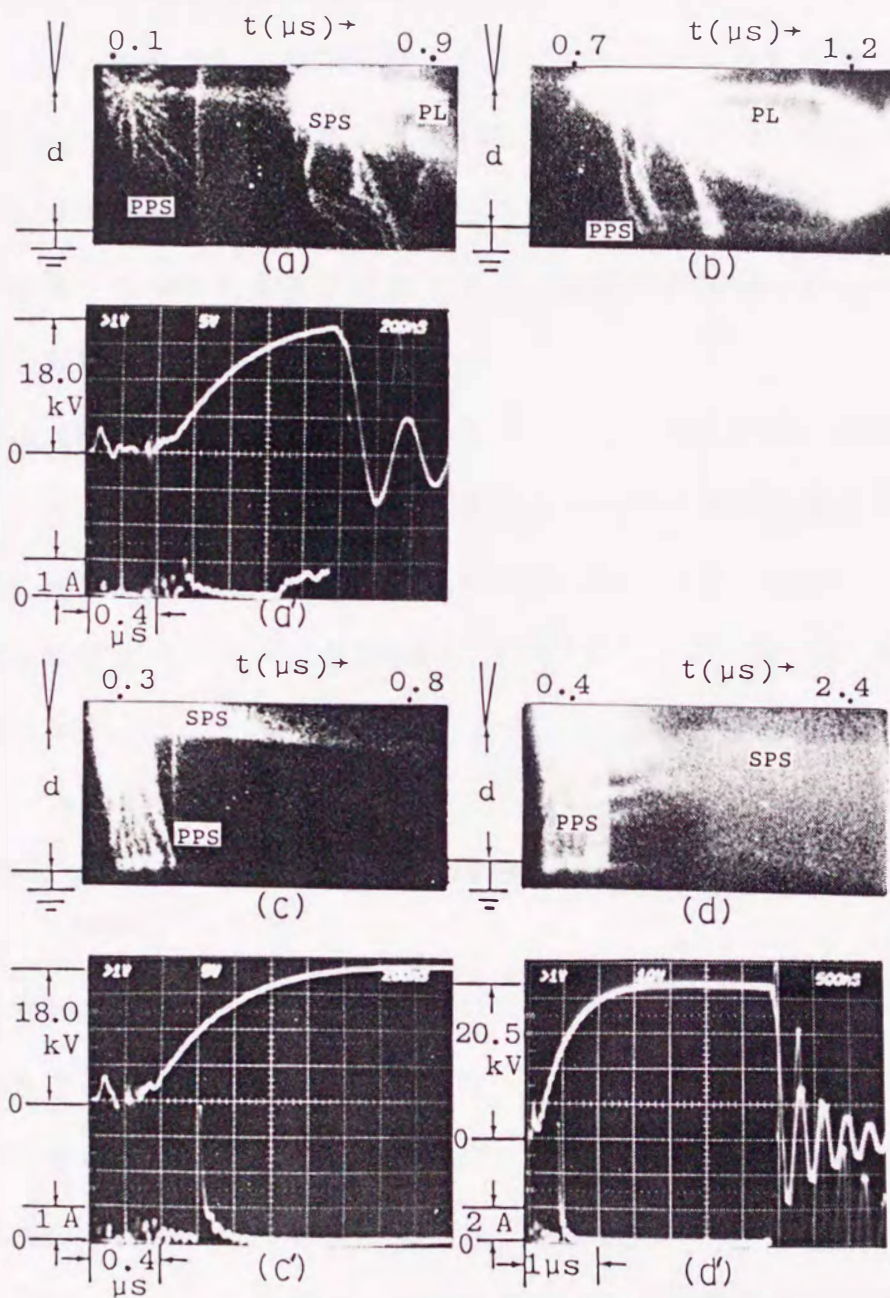
すると、その正極側端が逆に正極に向かって進展する。これは2次正ストリーマが負極に到達すると、多量の電子が負極から供給されて2次正ストリーマの電離度が増すと共にその正極側端の電界が強くなるためと思われる。このようにして、2次正ストリーマが正負両極を橋絡すると{第3-12図(c)}、アークに移行してフラッシュオーバーする{第3-12図(d)}。

なお、この領域をC'領域と呼んだのは、気中針対平板ギャップのC領域では必ず正リーダの進展によってフラッシュオーバーが生じるのに対し⁽⁶⁴⁾、沿面放電のこの領域では正リーダの進展なしにフラッシュオーバーが起こるので、これと区別したためである。

3.4.3 B領域の沿面フラッシュオーバー過程

第3-15図に、 $C_0 = 2.6 \text{ pF/cm}^2$ 、 $d = 1.2 \text{ cm}$ の場合の流し撮り写真および電圧-電流オシログラムを示す。同図(a)~(c)は、印加電圧 V が18.0 kV、同図(d)は V が20.5 kVで、これらはそれぞれ V_{50} のバラツキの範囲の下限および上限程度の値である。

$V = 18.0 \text{ kV}$ の場合、最初の1次正ストリーマ発生時の電圧瞬時値 v_c が極めて低い場合には1次正ストリーマは負極まで到達せず、1次正ストリーマ幹部に形成された2次正ストリーマの進展距離は極めて短い{第3-15図(a)、(a')}。しかし、その後新たな1次正ストリーマが発生し、これによって2次正ストリーマおよび正リーダが進展して負極に達し、フラッシュオーバー{第3-15図(b)}する。この場合のフラッシュオーバー過程は、前述のA領域の過程とほぼ同様である。最初の1次正ストリーマの発生が遅れ、 v_c が高い場合には1次正ストリーマは負極に達し、負極には負グローが形



($C_0 = 2.6 \text{ pF/cm}^2$, $d = 1.2 \text{ cm}$)

第 3 - 1 5 図 B 領域における沿面フラッシュオーバ過程の
流し撮り写真とオシログラム

成され、両極間中に1次正ストリーマに伴って発生した電子群の他、負極から放出され電離増倍した電子群が1次正ストリーマチャンネルに流入する。したがって、2次正ストリーマは1次正ストリーマが負極に到達しない場合に比べて、その進展距離は大きい{第3-15図(c)、(c')}。しかし、この程度の印加電圧では2次正ストリーマは負極まで到達せず、かえってこの空間電荷のため新たな1次正ストリーマの発生が抑制され、フラッシュオーバーしなくなる。

$V = 20.5 \text{ kV}$ の場合、最初の1次正ストリーマの発生が遅れ v_c が高い場合には、1次正ストリーマ幹部の2次正ストリーマの進展距離は大きく負極に到達する{第3-15図(d)}。この場合には1発の1次正ストリーマの発生のみでフラッシュオーバーし{第3-15図(d)、(d')}、C'領域の過程と同様になる。

3.5 沿面フラッシュオーバー特性と沿面フラッシュオーバー過程

針対平板ギャップの気中放電においても^{(70)・(76)}、その $V_{50} - d$ 特性はA、BおよびCの3領域で互に異なった傾向を示す。これに対応してA領域とC領域とでは V_{50} 印加時の沿面フラッシュオーバー過程が相違し、B領域では V_{50} の変動幅が大きい。このように沿面放電のフラッシュオーバー特性およびフラッシュオーバー過程と、針対平板ギャップにおける気中放電のそれとの間には類似点が多い。そこで本節では、沿面放電におけるフラッシュオーバー特性とフラッシュオーバー過程との関連を針対平板ギャップの気中放電と対比して述べ、かつ考察を加える。なお、A領域およびC'領域における V_{50} 印加時のフラッシュオーバー過程を、それぞれA過程およびC'過程と呼ぶこと

にする。

3.5.1 A領域

A領域で V_{50} を印加すると、最初の1次正ストリーマ進展後、後続の1次正ストリーマが進展して、その幹部に正リーダが形成される。正リーダはリーダコロナを間欠的に発生しながら進展し、負極に到達するとフラッシュオーバーが起こる。この過程は、針対平板ギャップの気中放電におけるA過程と同じである。しかし、沿面放電では正リーダが固体誘電体表面に沿って進展するので、固体誘電体表面の性質および固有容量 C_0 が正リーダすなわち Gleitbüschel の進展に影響を及ぼす⁽³⁰⁾。A過程では正リーダの進展がフラッシュオーバーに重要な役割を果たしているため、 V_{50} は C_0 によって異なり、(3-3)式の k の値は(3-5)式で与えられる。第3-3図からわかるように、沿面放電において背後電極が存在する場合の V_{50} は、棒対環状電極ギャップの V_{50} より著しく低い。背後電極を除去した場合は V_{50} の低下は少ない。したがって、本実験では V_{50} に対する固体誘電体表面の性質の影響は C_0 のそれに比し極めて小さいと考えられる。

3.5.2 C'領域

C'領域で V_{50} を印加すると、最初の1次正ストリーマは負極に到達し、2次正ストリーマが両極間を橋絡してフラッシュオーバーが起こる。2次正ストリーマはその全長にわたって強く、かつ持続的な発光をしており、そのチャンネルの長さ方向の電界強度はほぼ均一であると考えられる。また2次正ストリーマの電離は、最初の1次正ストリーマの進展によって形成され

た空間電荷および負極から放出され、負極近傍の高電界で電離増倍した電子群の流入によって維持され、さらには増殖するものと考えられる。したがって、このような過程では、最初の1次正ストリーマが負極に到達して豊富な空間電荷を形成し、かつ負極前面に局所的な高電界域を形成すると共に、正負極間の平均電界がある値以上であることがフラッシュオーバーの要件であると考えられる。(3-4)式によれば、沿面放電における上記の平均電界強度 $\bar{E}$ は18kV/cm程度と推定される。

針対平板ギャップの気中放電におけるC過程も、本質的には上述の過程と同じである⁽⁶⁴⁾。ただし、この場合は、正リーダが発生進展する。そのため印加電圧波尾で電圧が低下しつつあるときでも、内部電界の小さい正リーダの進展によって電圧低下分が補償されるので、印加電圧波尾でも正リーダは進展し得る。したがって、 V_{50} 印加時の t_f は極めて大きい。なお、この正リーダはA過程の正リーダとは異なり、すでにギャップを橋絡したチャンネルが正リーダに移行するもので、リーダコロナは発生しない。一方、沿面放電ではフラッシュオーバー直前まで正リーダは認められない。これは最初の1次正ストリーマが平面上を放射状に進展し、それぞれの分枝数が少ないためと考えられる。このように沿面放電では正リーダが進展しないため、 V_{50} は印加電圧がほぼ波高値に達したころまでにフラッシュオーバーが起り得るような高い値となる。このような理由から、 V_{50} は針対平板ギャップあるいは棒対環状電極ギャップの場合に比し高く、かつ t_f は著しく小さい。また、沿面放電では V_{50} に及ぼす C_0 の影響が極めて小さいので(第3-2図)、最初の1次正ストリーマ進展時の電圧 V_c も C_0 にはほとんど無関係であり、 V_c に強く依存する最初の1次正ストリーマの進展長もほぼ C_0 には無関係となる。しかも、最初の1次正ストリーマの負極到達後は、上述

のように負極がフラッシュオーバに支配的な役割を果すので、 V_{so} に及ぼす C_0 の影響は極めて小さい。

3.5.3 B領域

針対平板ギャップを紫外線で照射すると、電圧印加後最初の1次正ストリーマが進展を開始する時間 t_c が小さくなり、B領域では照射しない場合よりも大幅に V_{so} が低くなる⁽⁸⁰⁾。したがって、沿面放電のB領域における V_{so} の大きな変動も t_c の変動に起因するものと考えられる。 t_c が大きく、 v_c が高いほど最初の1次正ストリーマとこれに伴う2次正ストリーマは良く進展する。しかし、最初の1次正ストリーマ進展による空間電荷の電界緩和効果も大きくなるので、後続の1次正ストリーマの進展は抑制される。したがって、 t_c が大なるほどC'過程は起こりやすくなるが、A過程は起こりにくくなる。 t_c が大なる場合でも、印加電圧が十分に高ければ最初の1次正ストリーマ進展後の電圧上昇が著しいため、後続の1次正ストリーマが進展して正リーダが進展するので、 t_c の変動の影響が小さくなる。ところで、 d が大なるほど V_{so} は高くなるから、 d が十分大きい領域では t_c の変動の影響は小さい。このような領域がA領域である。A領域から d が減少してB領域になると、 t_c の影響は顕著になる。したがって、昇降法を数回反復した場合は、それぞれの t_c の分布が異なるので、 V_{so} の数個の測定値間の変動幅が大きくなる。 d がさらに減少し、(3-3)式の計算値と(3-4)式のそれとの差が小さくなると印加電圧が高く、かつ t_c が大なる場合はC'過程でフラッシュオーバが起こり得るようになる。両計算値がさらに接近すると、両計算値よりも若干低い電圧を印加した場

合、 t_c が小なるときはA過程で、 t_c が大なるときはC'過程でフラッシュオーバーが起こり得るので、フラッシュオーバー確率が増し、 V_{50} は両計算値よりも低くなり得る。

3.6 結 論

種々の厚さの亚克力板の $V_{50} - d$ 特性を実測によって求め、イメージコンバータカメラを用いて放電状況を観測し、フラッシュオーバー過程とフラッシュオーバー諸特性を対応づけると共に、気中針対平板ギャップの場合と比較して、それらの間の違いを論じた。その結果を要約すると以下のようなになる。

- (1) 沿面放電の $V_{50} - d$ 特性は、大気中針対平板ギャップにおける気中放電の場合とほぼ同様になり、 V_{50} が(3-3)式および(3-4)式で示される2領域、すなわちA領域およびC'領域、また両領域の境界領域すなわち、B領域の3領域に分けられる。
- (2) A領域の V_{50} は C_0 の増加と共に低下するが、C'領域の V_{50} は τ 、すなわち C_0 の影響を受けない。
- (3) A領域の V_{50} 印加時の沿面フラッシュオーバー過程は、大気中針対平板ギャップにおける気中放電の場合とほぼ同様の過程になる。すなわち、電圧印加後、まず正極先端から1次正ストリーマが発生し、端子電圧の上昇に伴って正極から再び新たな1次正ストリーマが発生する。このうち、後に発生した1次正ストリーマ幹部には2次正ストリーマおよび正リーダが形成される。その後、正リーダからリーダコロナが間欠的に発生進展し、これに伴って2次正ストリーマおよび正リーダが進展して負極に

達すると、フラッシュオーバーが生じる。また、アークは数条発生した正リーダのいずれかが移行したもので、その形成後も絶縁物表面に沿い、経路は変化しない。

(4) C' 領域で V_{s0} を印加した場合には、最初の 1 次正ストリーマ幹部に形成された 2 次正ストリーマによって両電極間が橋絡され、フラッシュオーバーが起こる。この領域では 1 次正ストリーマの発生進展は 1 回のみである。また、フラッシュオーバー直前まで正リーダの発生は認められず、この点で気中ギャップの C 領域の過程とは異なっている。

(5) B 領域は A 領域と C' 領域の境界領域で、 V_{s0} の変動幅が大きい。これは最初の 1 次正ストリーマの発生遅れの変動に起因し、この領域では最初の 1 次正ストリーマの発生遅れが大きい場合には C' 領域の過程で、遅れが小さい場合には A 領域の過程でフラッシュオーバーする。