

# ガス絶縁機器の絶縁信頼性向上と小形化に関する研究

八島, 政史

<https://doi.org/10.11501/3108125>

---

出版情報 : 九州大学, 1995, 博士 (工学), 論文博士  
バージョン :  
権利関係 :

## 4.2 ベーパミスト誘電体の絶縁特性

### 4.2.1 まえがき

絶縁材料あるいは絶縁媒体は従来、真空、ガス、液体、固体といった概念でとらえられているが、ベーパミスト誘電体は主成分となるガスに対し、液体をミスト化することで空間的に分散させて混合した点に特徴がある。したがって、ベーパミスト誘電体の絶縁特性は主成分ガスとミストとして使用する液体の組合せによって大きく左右されるだけでなく、ミストの濃度(単位体積あたりの個数密度)や個々のミストの直径(粒径)などの条件も影響すると考えられる。そのため、主成分ガスとミスト液体の選定、ミストの発生方法をまず検討する必要がある。さらに、ベーパミスト誘電体の絶縁特性が基本的には主成分ガスとミストの気化ガスであるベーパとの混合ガスの特性によるものか、あるいはミストの存在が決定的な役割を果たすのかを明確にする必要がある。

本節では、主成分ガスとミスト液体の選定、ミストの発生方法に関して考察したのち、これまで小規模な供試電極系で、しかも限られたガス圧力条件でしか検討されていなかったベーパミスト誘電体の絶縁特性を広範囲の実験条件を設定して詳細に検討する。すなわち、主成分ガスを $N_2$ または $SF_6$ とし、 $C_2Cl_4$ のミストを混合したベーパミスト誘電体に対して、直流、交流、雷インパルスの3種類の電圧波形を印加した場合の絶縁特性を0.025~0.4MPaのガス圧力領域にわたって検討する。また、電極表面が濡れて $C_2Cl_4$ のしずくが付着することも考慮して、電極を水平に配置した場合と垂直に配置した場合の比較、ミストの濃度を3段階に変化させた場合の絶縁特性についても検討する。

### 4.2.2 主成分ガスとミスト用液体の選定

主成分ガスとして、これまでの検討では大気圧空気や $SF_6$ が使用されているが、大気圧空気をそのまま使用すると粉塵や水分の混入が絶縁特性に影響する可能性があるため、絶縁耐力が空気と同程度の $N_2$ を使用するのが適当である。 $SF_6$ はガス絶縁機器に実用されるガスである。負イオンを形成しにくい非付着性の $N_2$ に対し、電気的負性ガスという特性の違いにも着目できる。

ミストに使用する液体に要求される条件として、それ自身の絶縁耐力が高いこと、化学的に安定であることに加えて、ミスト近傍の電界の変歪を小さくするために比誘電率がガスに近いことが重要である。また、ミスト化を容易にし、かつ短時間で蒸発や沈降をさせないため、常温での蒸気圧が適度に低く、適度な表面張力があり、密度が小さいことが必要である。表4.1にミストとして使用できる可能性があるハロゲン化炭素系液体4種類の物性値<sup>(32)~(34)</sup>をまとめる。同表には後述する超音波圧電振動子によるミストの発生状況も併記した。

密閉タンクに封入した主成分ガスにこれらのミストを混合すると、必然的にそのベーパも蒸気圧に相当する分圧で混合されることになる。 $C_2Cl_4$ の例では大気圧の主成分ガスに対して1.86%(vol.)のベーパが混合される。ハロゲン元素を含む液体のベーパは電気的負性ガスが多く、一般にそれ自身絶縁耐力が高い。したがって、主成分ガスが $N_2$ の場合、ベーパの混合だけでも絶縁耐力が向上することが予想され、絶縁耐力の向上に及ぼすミスト、ベーパそれぞれの効果を区別して評価する必要がある。この点を考慮すると、

ミスト用液体の選定には以下の2つの考え方がある。

- (1) 蒸気圧が低い液体を使用する (ペーパの分圧比が低い)。
- (2) 蒸気圧が高い液体のペーパを主成分ガスとし、それ自身のミストを発生させる<sup>(21)~(28)</sup>。

後者はミストの効果だけを評価できるが、ガス圧力の設定はその液体の蒸気圧に固定され、大気圧を含む広いガス圧力範囲にわたって実験を行うことができない。したがって、ここでは前者の考え方を採用する。以上より、本研究ではミスト用液体として、常温での蒸気圧が最も低く、ミストの発生が最も容易でその他の諸特性も比較的良好なC<sub>2</sub>Cl<sub>4</sub>を選定する。

表4.1 ミスト用液体として使用可能なハロゲン化炭素系液体の物性値

呼称	C <sub>2</sub> Cl <sub>4</sub>	F11	F113	FC75
化学式	同上	CCl <sub>3</sub> F	C <sub>2</sub> Cl <sub>3</sub> F <sub>3</sub>	C <sub>8</sub> F <sub>16</sub> O
名称	テトラクロロエチレン	トリクロロモノフルオロエチレン	トリクロロトリフルオロエチレン	パラフルオロジブチルエーテル
密度 [g/cm <sup>3</sup> ]	1.623 ○	1.488 ○	1.572 ○	1.78 ○
沸点 [°C]	121.20 ▲	23.82 ▲	47.57 ▲	102.0 ▲
凝固点 [°C]	-22.35 ▲	-111 ▲	-35 ▲	-113 ▲
蒸気圧 [kPa]	1.86 ○	91.3 ○	36.7 ○	4.15 △
表面張力(対空気) [dyn/cm]	32.32 ○	22 △	17.75 ○	15 △
比誘電率	2.30 △	2.28 □	2.41 △	1.87 △
可燃性・引火性	なし	なし	なし	なし
揮発性	あり	あり	あり	あり(弱い)
腐食性	一部の樹脂を溶かす	ほとんどなし	ほとんどなし	なし
毒性	微弱	きわめて微弱	きわめて微弱	なし
超音波圧電振動子によるミストの発生状況	良好	不良	不良	やや不良

※ 温度・圧力等の条件…○：20℃、△：25℃、□：29℃、▲：0.1013MPa

ミストの発生方法としては超音波圧電振動子による超音波霧化法<sup>(3)~(23)</sup>、噴霧ノズルを用いる手法<sup>(15)</sup>、急激な体積膨張により凝縮ミストを得る手法<sup>(31)</sup>、液体の沸点前後に温度を制御し、そのペーパ中に凝縮ミストを得る手法<sup>(24)~(28)</sup>などが考えられる。超音波圧電振動子による霧化法は所要動力が小さく、粒径が数μm程度の極めて微細なミストを効率よく生成できるメリットがある。さらに、超音波の出力や周波数の制御により、ミストの粒径や濃度(単位体積あたりの個数密度)を制御できる可能性がある。噴霧ノズルによる手法はコンプレッサなどの動力が必要なことと、実験容器内の圧力を一定に維持するのが困難であるなどの問題がある。凝縮ミストを生成する手法は圧力か温度を変化させる必要があり、これらを実験条件として一定に維持することができない。特に、液体の沸点前後で凝縮ミストを得る手法は実験できる温度

条件が限定される。これより、ミストの発生方法として超音波圧電振動子による霧化法を選定する。

#### 4.2.3 実験装置と実験手法

実験装置の概要を図4.1に示す。実験タンクは内径 50cm、内容積 0.3m<sup>3</sup> の鉄製圧力容器で、石英ガラス製観測窓を二方向に有する。供試ギャップは図4.2に示す球-球電極(黄銅製)で、球径は 6.0cm、ギャップ長は 1.0cm である。電界利用率(平均電界/最大電界)は 0.89 であるので、ギャップ間の電界は準平等電界と

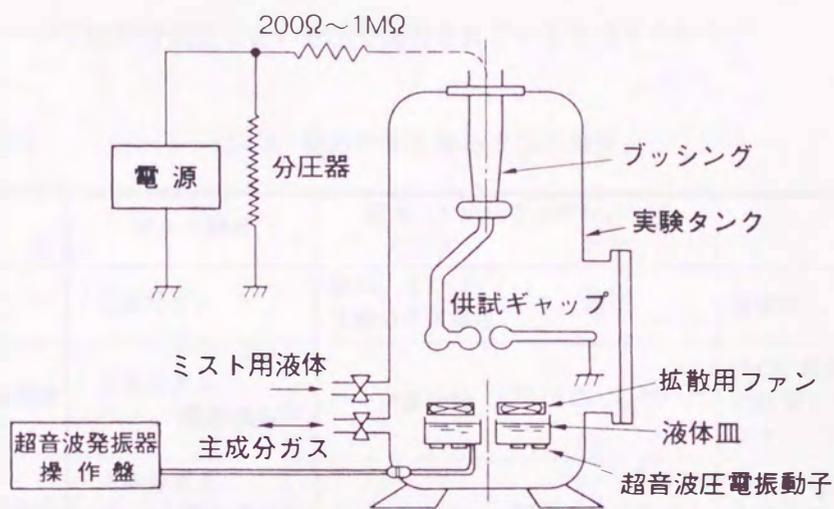


図4.1 実験装置の概要

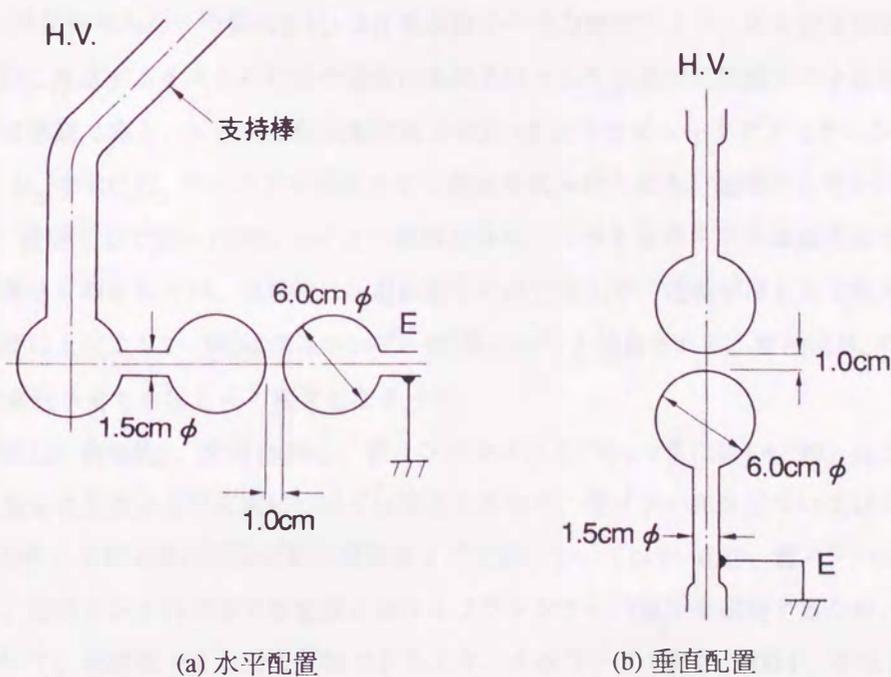


図4.2 供試ギャップ

見なせる。電極に付着するしずくの影響を考慮して水平配置と垂直配置を比較した。電極表面は金属研磨材とエタノールで処理して、鏡面仕上げとした。

主成分ガスとして $N_2$ または $SF_6$ を使用し、超音波圧電振動子でミスト化した $C_2Cl_4$ を拡散用ファンにより、供試ギャップ付近に供給した。超音波圧電振動子は超音波加湿器用の振動子(松下電子部品:直径2cm、固有振動周波数1.7MHz)を使用し、これを液体皿の底部に18個設置して容器外部の発振器により駆動した。前節で述べたように、絶縁特性に及ばずミスト、ベーパーそれぞれの効果を区別して評価するために、表4.2に示す3種類のガス条件を検討対象とした。ベーパー混合時も $C_2Cl_4$ の蒸発や拡散を促進させるため、拡散ファンを使用した。この状態では供試ギャップにフラッシュオーバーが生じた際に、微細なミストが発生したので、ベーパーは飽和蒸気圧に近い分圧で混合されていると考えられる。

表4.2 検討対象となるガスの条件

ガスの条件	ガスの構成	表 記 (主成分ガスが $N_2$ の例) 文中 図中	方 法
主成分ガスのみ	・主成分ガス	純 $N_2$ または 主成分ガス単体 純 $N_2$	直接封入
$C_2Cl_4$ のベーパーを混合	・主成分ガス ・ベーパー (飽和蒸気圧)	ベーパー混合時 $N_2 + C_2Cl_4$ ベーパー	$C_2Cl_4$ 液体を実験タンク中に放置して自然蒸発させ、ファンで拡散。
$C_2Cl_4$ のミストを混合	・主成分ガス ・ベーパー (飽和蒸気圧) ・ミスト (液滴)	ミスト混合時 $N_2 + C_2Cl_4$ ミスト	超音波圧電振動子で直接ミスト化し、ファンで供試ギャップ付近に誘導。

ミストの濃度(単位体積あたりの個数密度)は圧電振動子の出力制御により、ある程度調整することができる。ギャップ間に浮遊するミストの粒径や濃度は実験条件として定量的に把握すべき数値であるが、実際に測定するのは困難である。レーザ光散乱型粒度分布計(東日コンピュータアプリケーションズ LDSA-1200A)により、 $N_2$ 中に $C_2Cl_4$ のミストを発生させて測定を試みたところ、粒径として $5 \sim 13 \mu m$ (50%粒径は $8 \sim 10 \mu m$ )、濃度として $20 \sim 100$ 個/ $cm^3$ との数値を得た。このときのミストは観測窓から電極が十分見えるほどの希薄なものとしたが、実験時は圧電振動子の出力を上げ、電極がほとんど見えないほどにしたので、個数濃度は上記より2~3桁は大きい( $10^4 \sim 10^5$ 個/ $cm^3$ )と推察される。粒径は $N_2$ の圧力を大気圧から0.3MPaまで変化させてもほとんど変化しなかった。

印加電圧は直流(正・負極性)、交流(50Hz)、雷インパルス( $1.1/75 \mu s$ または $1.4/90 \mu s$ )とした。フラッシュオーバー電圧の測定は直流および交流については電圧上昇法を、雷インパルスについては昇降法を適用した。同一の実験条件における電圧印加回数は直流および交流については5~10回、雷インパルスについては15~30回である。密閉タンク内で準平等電界におけるフラッシュオーバー電圧を測定するため、直流電圧を印加する場合を除いて、初期電子を十分に供給できるよう、水銀ランプ(東芝 H400-P、直流2Aで点灯)にて供試ギャップに紫外線照射を行った。観測窓の紫外線透過率は90%以上あるので、照射の効果を評価す

るには十分である。ただし、ミストを発生させると観測窓からは電極がほとんど見えなくなるので、紫外線照射の効果は弱められると考えられる。

フラッシュオーバ電圧の測定は以下の各条件で行った。すなわち、ベーパー混合時の条件として2ケース、ミスト混合時の条件として濃度を变化させた3ケース、さらに、ミストの発生を停止した後の状態(ベーパー混合時に相当)での2ケースである。

(1) 主成分ガス単体

(2) ベーパー混合時：

(2-1) 自然気化状態(拡散ファンを使用しない場合)

(2-2) 拡散ファン使用時

(3) ミスト混合時：

(3-1) ミスト濃度低— 観測窓より電極がはっきり見える、電極表面が薄く濡れる

(3-2)     〃    中—             〃       うっすら見える、     〃       ずぶ濡れ

(3-3)     〃    高—             〃       ほとんど見えない、     〃       ずぶ濡れ(しずく付着)

(4) ミスト発生停止後：

(4-1) 電極表面湿潤(しずくが残る状態)

(4-2) 電極表面乾燥

ミストの発生量は温度やガス圧力の変化により必ずしも同一ではないので、超音波発振器の出力および拡散ファンにより調整した。目視観測によると、ミストの発生量はガス圧力が大気圧に近い場合が最も多く、低気圧では発生量は多いものの浮力の減少によりギャップ付近に届きにくく、また高気圧では発生量そのものが若干減少することが観測された。

#### 4.2.4 温度補正法

実験時のタンク内温度は20~30℃の範囲である。密閉タンクに所定圧力の主成分ガスを封入する場合、温度によってガス密度が変化するため、フラッシュオーバ電圧も温度の影響を受ける。そこで、上記温度範囲内でフラッシュオーバ電圧はガス密度に比例すると仮定し、20℃を標準温度として次式の補正を行った。

$$\text{フラッシュオーバ電圧 (補正值)} = \text{フラッシュオーバ電圧 (測定値)} \times \frac{t [^\circ\text{C}] + 273}{293} \quad (4.1)$$

ここで、 $t$ ：所定圧力封入時の主成分ガス温度

一方、温度変化により $\text{C}_2\text{Cl}_4$ の蒸気圧も変化するため、主成分ガスに対するベーパーの分圧比の変化から、やはりフラッシュオーバ電圧に影響を与える。そのため、フラッシュオーバ電圧値の温度補正として、ベーパー分圧比の変化も考慮する必要がある。図4.3に5~30℃までの温度範囲で $\text{N}_2$ のベーパー混合時( $\text{N}_2 + \text{C}_2\text{Cl}_4$ ベーパー)のフラッシュオーバ電圧を測定した結果を整理する。印加電圧は直流(正・負極性)または交流である。同

図の縦軸は純N<sub>2</sub>に対するフラッシュオーバ電圧で規格化して示した。また、プロットはすべて(4.1)式の補正を行っている。同図で、C<sub>2</sub>Cl<sub>4</sub> ベーパの分圧比 (p) と温度 (t) の関係は次式の実験式<sup>(35)</sup>により求めた。

$$\log \frac{p [\text{Pa}]}{133.3} = 7.02 - \frac{1415}{221 + t [^{\circ}\text{C}]} \quad (4.2)$$

図4.3より、N<sub>2</sub>のフラッシュオーバ電圧はわずかなC<sub>2</sub>Cl<sub>4</sub> ベーパの混合により、1.3~2.2倍に上昇することが判る。この影響はガス圧力が低い場合ほど大きい。ただし、ベーパの分圧が約3 kPa以上になると飽和する傾向がある。したがって、フラッシュオーバ電圧値の温度補正として、(4.1)式によるガス密度に対する補正と、図4.3によるベーパの分圧比に対する補正の両方が必要である。以下に示すフラッシュオーバ電圧の実測データは、すべて20℃を標準温度としてこれらの補正を行っている。ただし、主成分ガスがSF<sub>6</sub>の場合はベーパ混合によるフラッシュオーバ電圧の上昇が小さいので、ガス密度に対する補正のみを行った。

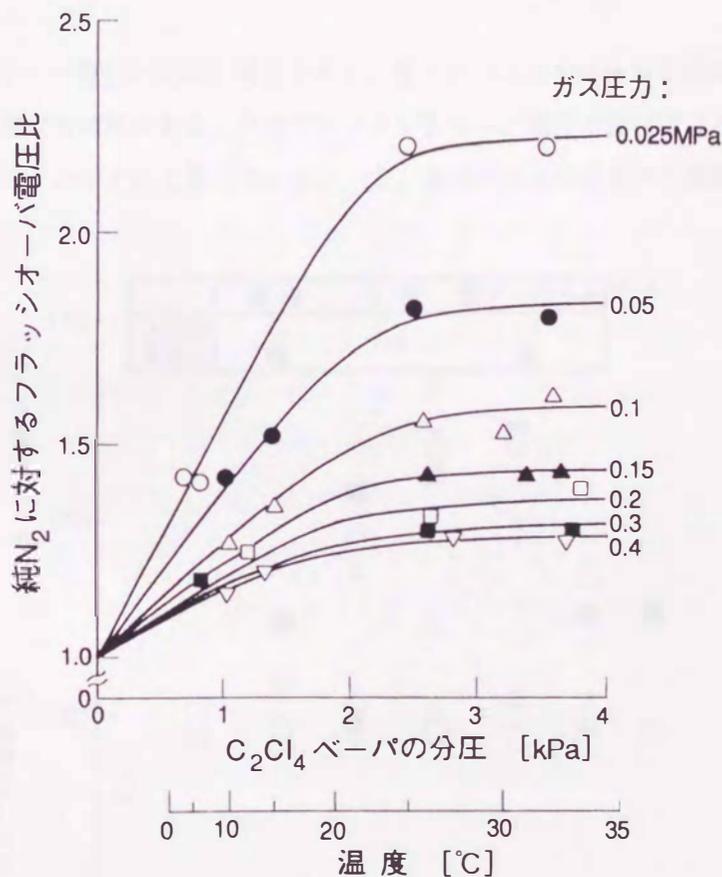


図4.3 N<sub>2</sub>+C<sub>2</sub>Cl<sub>4</sub> ベーパに対するフラッシュオーバ電圧-温度 (C<sub>2</sub>Cl<sub>4</sub> の分圧) 特性  
(印加電圧：直流および交流)

#### 4.2.5 フラッシュオーバ電圧の測定結果

図4.4に前節で述べたベーパ混合時およびミスト混合時の各条件で測定したフラッシュオーバ電圧を示す。主成分ガスはN<sub>2</sub>、ガス圧力は0.1MPa、印加電圧は直流(正・負)、交流、雷インパルス(正・負)、電極配

置は水平配置である。同図のプロットは直流および交流についてはフラッシュオーバ電圧の平均値を、雷インパルスについては50%フラッシュオーバ電圧を示す。また、フラッシュオーバ電圧値にばらつきが見られたケースではエラーバーでその範囲を示した。雷インパルスについては最高非フラッシュオーバ電圧と最低フラッシュオーバ電圧の範囲を示した。

図4.4より、以下のことが判る。

- (1) 純 $N_2$ のフラッシュオーバ電圧は印加電圧波形に関係なくほぼ同一値である。
- (2) ベーパ混合時(自然気化状態)のフラッシュオーバ電圧は純 $N_2$ に対し、印加電圧波形に関係なく1.4~1.6倍上昇する。拡散ファン使用時は直流および交流フラッシュオーバ電圧はこれと同程度であるが、雷インパルスフラッシュオーバ電圧はさらに上昇する傾向がある。
- (3) ミスト混合時は印加電圧波形の効果が強く現れる。すなわち、雷インパルスフラッシュオーバ電圧は、正・負極性とも純 $N_2$ の約4倍まで上昇するが、直流および交流フラッシュオーバ電圧はこのような上昇は生じない。
- (4) ミスト濃度とフラッシュオーバ電圧の関連に着目すると、雷インパルスではミスト濃度の上昇により、フラッシュオーバ電圧も上昇する傾向がある。交流ではフラッシュオーバ電圧の変化はほとんどないが、最もミスト濃度が高い状態で、わずかに上昇している。一方、直流に対してはミスト濃度の上昇に伴い、フ

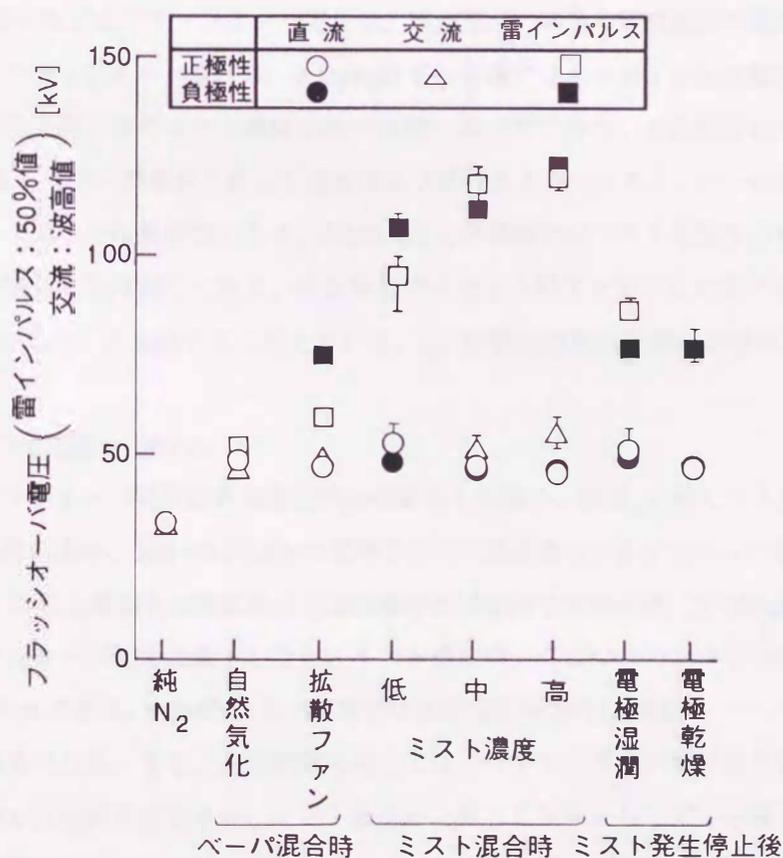


図4.4  $N_2 + C_2Cl_4$  ベーパーおよびミストに対するフラッシュオーバ電圧特性(ガス圧力: 0.1MPa)

ラッシュオーバ電圧がわずかに低下する傾向がある。

- (5) ミスト混合時の雷インパルスフラッシュオーバ電圧測定時に、著しく長い放電時間遅れ(10~40 $\mu$ s)がしばしば観測された。
- (6) ミストを停止すると、雷インパルスフラッシュオーバ電圧はベーパー混合時(拡散ファン使用時)と同程度に低下するが、それでも純 $N_2$ と比較して2倍程度高い。

図4.4と同様の絶縁特性を主成分ガス $N_2$ について、0.025~0.4MPaまでのガス圧力に対して測定した。電極配置についても水平配置、垂直配置の両方を検討した。これらの結果を図4.5~図4.7に整理する。これらの図において、ベーパー混合時の特性(実線)は自然気化状態のものである。また、ミスト混合時の特性(破線)はミスト濃度の異なる3ケースのうち、最もフラッシュオーバ電圧が上昇した例を引用した。ただし、ミスト濃度の上昇に伴って、フラッシュオーバ電圧が低下した場合はその特性を細点線で示した。同図には純 $N_2$ に対する特性も一点鎖線で併記した。

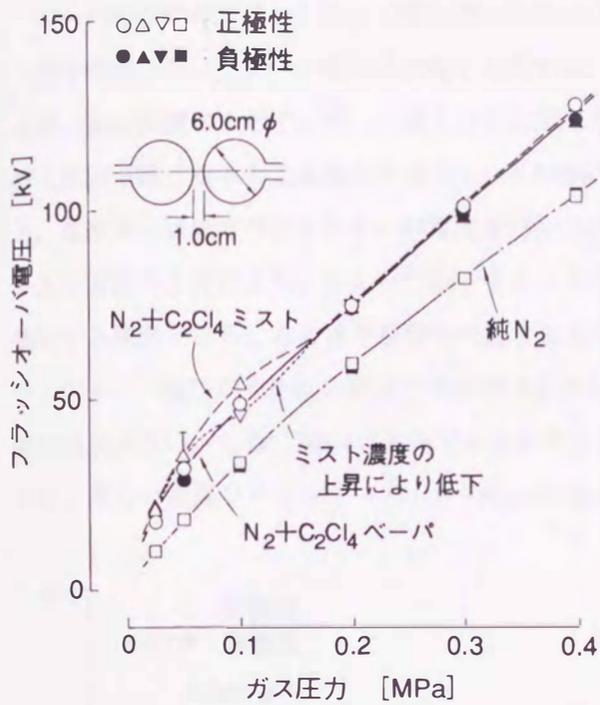
これらの結果を要約すると以下ようになる。

#### (1) 直流フラッシュオーバ電圧特性(図4.5)

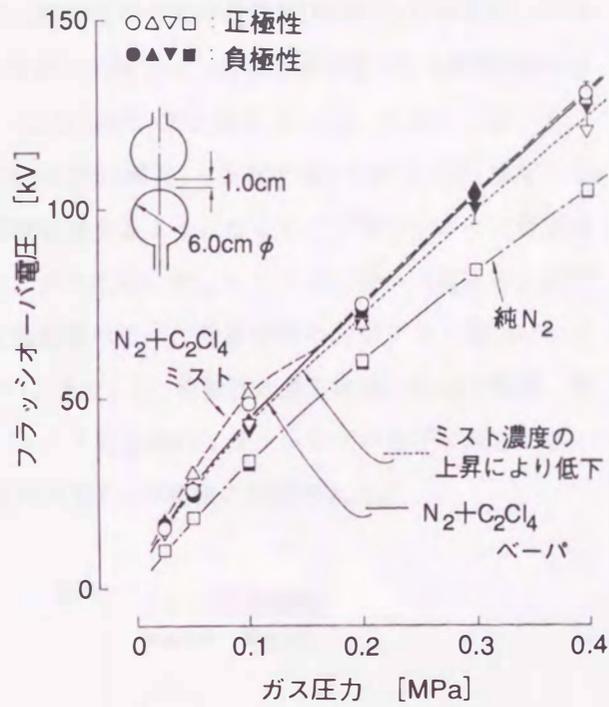
純 $N_2$ とベーパー混合時のフラッシュオーバ電圧を比較すると、ベーパー混合の効果はガス圧力が低いほど大きく現れ、フラッシュオーバ電圧は0.025MPaのケースで約2倍に、0.4MPaのケースで約1.2倍に上昇する。純 $N_2$ およびベーパー混合時に対するフラッシュオーバ電圧は、直流電圧の極性や電極配置の影響をほとんど受けない。ミスト混合時のフラッシュオーバ電圧は、0.1MPa以下の領域では水平および垂直配置ともにわずかに上昇するが、これはミスト発生後のミスト濃度が低い状態においてであり、上昇割合はベーパー混合時と比較して1.1~1.2倍である。ミスト濃度が上昇して電極表面が濡れるようになると、ベーパー混合時の値と同程度になる。すなわち、ミストの効果なくなる。0.2MPa以上の領域ではミストを発生させても、ベーパー混合時のフラッシュオーバ電圧とほぼ同じであり、垂直配置ではむしろ低下する。この低下は課電側(上側)の電極に付着する $C_2Cl_4$ のしづくに起因すると考えられる。正・負極性効果は明確には認められない。

#### (2) 交流フラッシュオーバ電圧特性(図4.6)

ベーパー混合時のフラッシュオーバ電圧は直流電圧印加の場合と同様に、純 $N_2$ に対して上昇する。ミスト混合時には水平配置の場合、0.05~0.15MPaの範囲でベーパー混合時のフラッシュオーバ電圧と比較して1.1~1.2倍の上昇を示す。この上昇割合は直流電圧印加の場合とほぼ同じであるが、0.1MPa以下ではミスト濃度が上昇してもフラッシュオーバ電圧は低下しない。ミスト濃度の上昇につれてフラッシュオーバ電圧が低下するのは0.15MPa付近のみである。0.2MPa以上の領域では直流電圧印加時と同様に、ベーパー混合時のフラッシュオーバ電圧値と同程度になる。また、垂直配置に対しては、フラッシュオーバ電圧の上昇割合やその傾向など、直流電圧印加時とほぼ同じであるが、ミスト濃度が上昇して電極からしづくが滴下するようになっても、フラッシュオーバ電圧はほとんど低下しない。

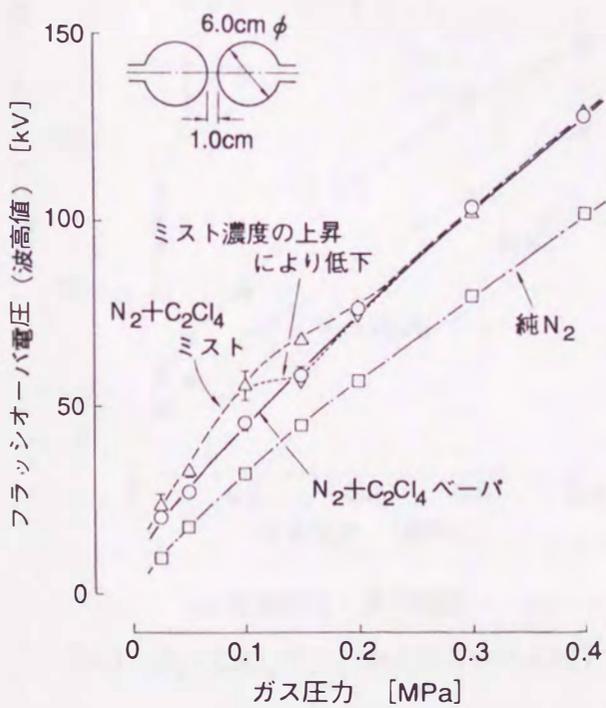


(a) 電極配置：水平配置

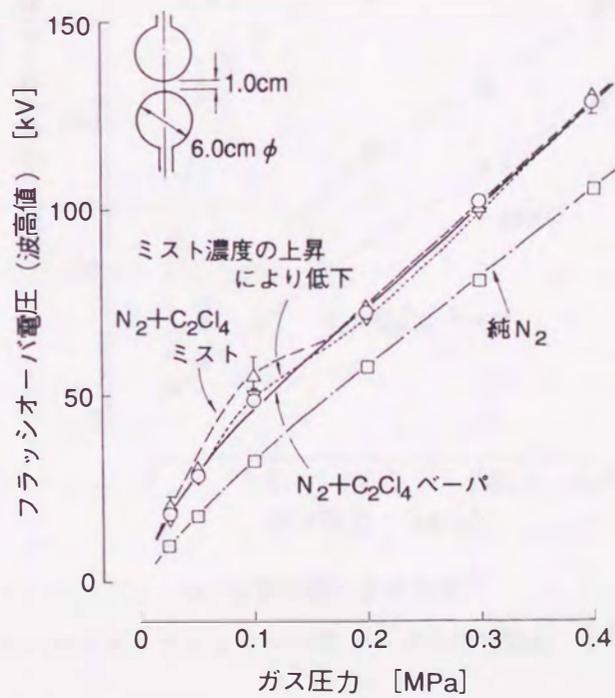


(b) 電極配置：垂直配置

図4.5  $N_2+C_2Cl_4$  ベーパおよびミストに対する直流フラッシュオーバー電圧-ガス圧力特性



(a) 電極配置：水平配置



(b) 電極配置：垂直配置

図4.6  $N_2+C_2Cl_4$  ベーパおよびミストに対する交流フラッシュオーバー電圧-ガス圧力特性

(3) 雷インパルスフラッシュオーバー電圧特性 (図4.7)

ベーパー混合時のフラッシュオーバー電圧の上昇割合は直流、交流電圧印加の場合とほぼ同じであるが、ミスト混合時のフラッシュオーバー電圧は大幅に上昇する。特に低ガス圧領域で上昇割合が大きく、0.025MPaでは水平、垂直配置によらず、ベーパー混合時と比較して2.5~3.5倍 (純N<sub>2</sub>と比較すると5.5~7.5倍) に達する。ガス圧力が高くなると上昇割合は低下し、0.4MPaでは1.2~1.5倍 (純N<sub>2</sub>と比較すると1.8~2.0倍) 程度となる。高ガス圧領域でフラッシュオーバー電圧が150~160kV程度に達するようになると、フラッシュオーバー電圧はミスト濃度の上昇により、かえって低下するようになり、ガス圧力に対してフラッシュオーバー電圧の上昇が飽和する傾向となる。このような特性に対する水平、垂直配置の差は、垂直配置の方がミスト混合時のフラッシュオーバー電圧がやや低い程度でその他は認められない。また、正・負極性効果も直流の場合と同様、明確には現れない。なお、図4.4の説明でも触れたように、ミスト混合時のフラッシュオーバー電圧の測定においては、著しい波尾フラッシュオーバー (10~40 μsに及ぶ放電時間遅れ) が頻繁に観測された。

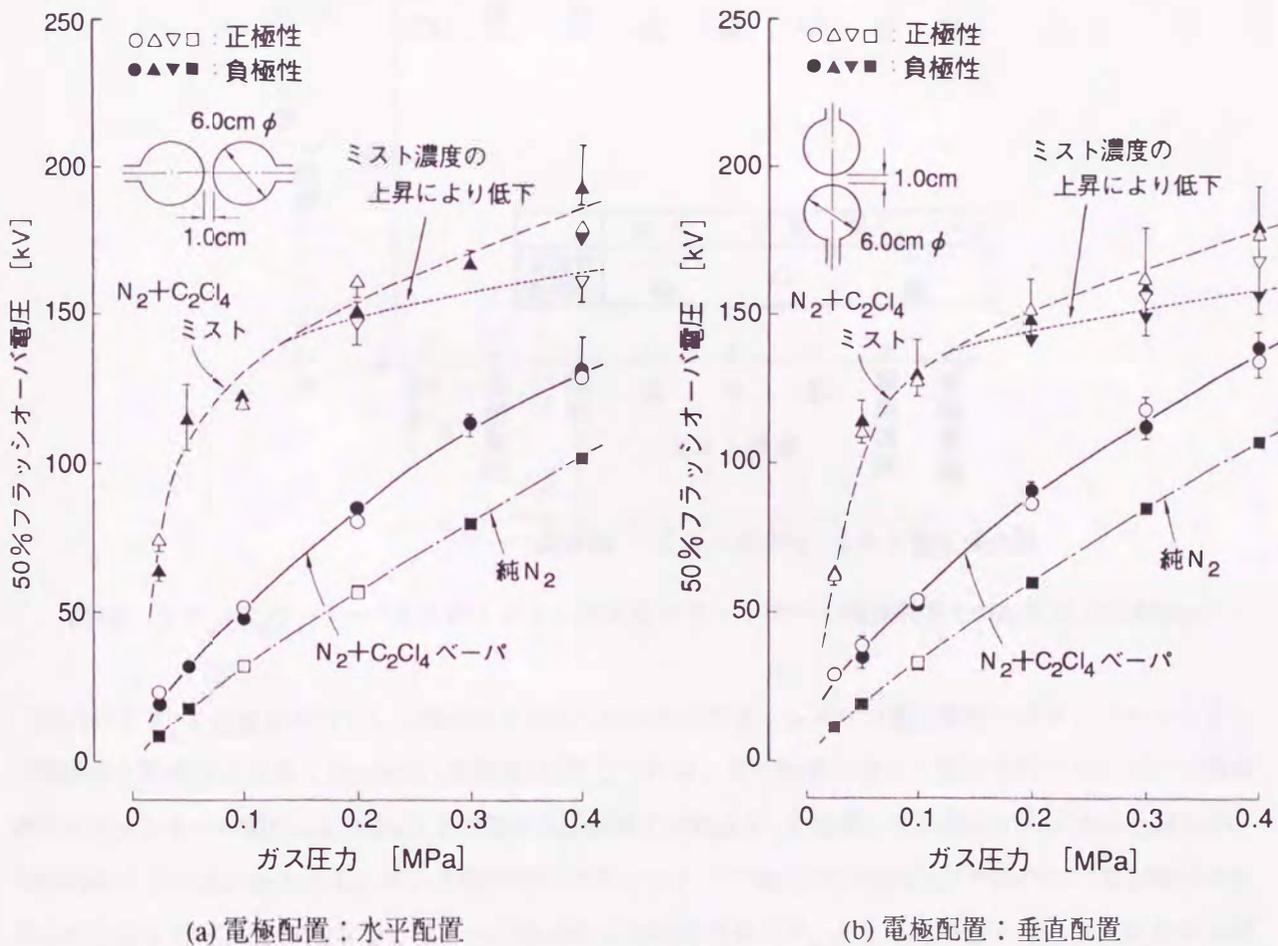


図4.7 N<sub>2</sub>+C<sub>2</sub>Cl<sub>4</sub> ベーパーおよびミストに対する雷インパルスフラッシュオーバー電圧-ガス圧力特性

図4.8および図4.9は主成分ガスがS F<sub>6</sub>の場合のフラッシュオーバー電圧特性を示す。図4.8は図4.4と同様、ガス圧力を0.1MPaとして、ベーパー混合時およびミスト混合時の各条件で測定したフラッシュオーバー電圧特性で

ある。ベーパー混合時のフラッシュオーバー電圧は、印加電圧波形によらず純  $\text{SF}_6$  とほぼ同じで、 $\text{N}_2$  を主成分ガスとした場合のような上昇は見られない。ミスト混合時のフラッシュオーバー電圧も直流および交流電圧印加の場合はほとんど上昇せず、雷インパルス電圧(負極性)印加の場合のみ、純  $\text{SF}_6$  の約1.6倍に上昇した。Harrold氏の報告<sup>(3)(4)</sup>では大気圧の  $\text{SF}_6$  に対し、交流フラッシュオーバー電圧が約2倍、雷インパルスフラッシュオーバー電圧が約1.8倍に上昇した例が示されているが、本実験ではこれほどの上昇は得られなかった。

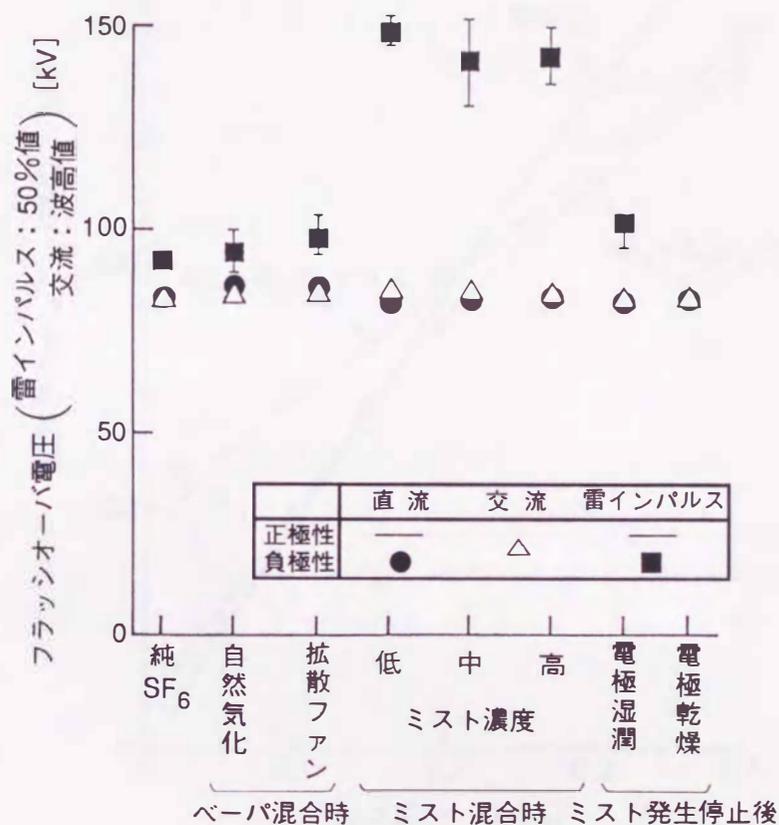


図4.8  $\text{SF}_6 + \text{C}_2\text{Cl}_4$  ベーパーおよびミストに対するフラッシュオーバー電圧特性 (ガス圧力: 0.1MPa)

図4.9は  $\text{SF}_6$  を主成分ガスとした場合のガス圧力に対するフラッシュオーバー電圧特性である。フラッシュオーバー電圧の上昇が生じる雷インパルス(負極性)に対してのみ、水平配置において測定を行った。ベーパー混合時のフラッシュオーバー電圧は0.1MPa以下の低ガス圧領域では純  $\text{SF}_6$  と比較して同程度わずかに上回るが、0.2MPa以上では逆に低下する。ミスト混合時のフラッシュオーバー電圧は0.2MPa以下ではベーパー混合時よりもさらに上昇するが、0.2MPa以上ではベーパー混合時と同程度で純  $\text{SF}_6$  よりも低い値となる。主成分ガスが  $\text{SF}_6$  の場合も、著しい放電時間遅れ (10~30  $\mu\text{s}$ ) が頻繁に観測された。

図4.9より、印加電圧の値が約200kV (印加電界で約220kV/cm) を越えると、ミストの効果なくなることが判るが、主成分ガスが  $\text{N}_2$  の場合(図4.7)においても、ミスト混合時の雷インパルスフラッシュオーバー電圧が同程度の電圧レベルに近づきながら飽和する傾向が現われている。このことは、ミストの効果が見れる

条件として、主成分ガスの種類によらず、印加電圧 (印加電界) の絶対値に上限があることを示唆する。

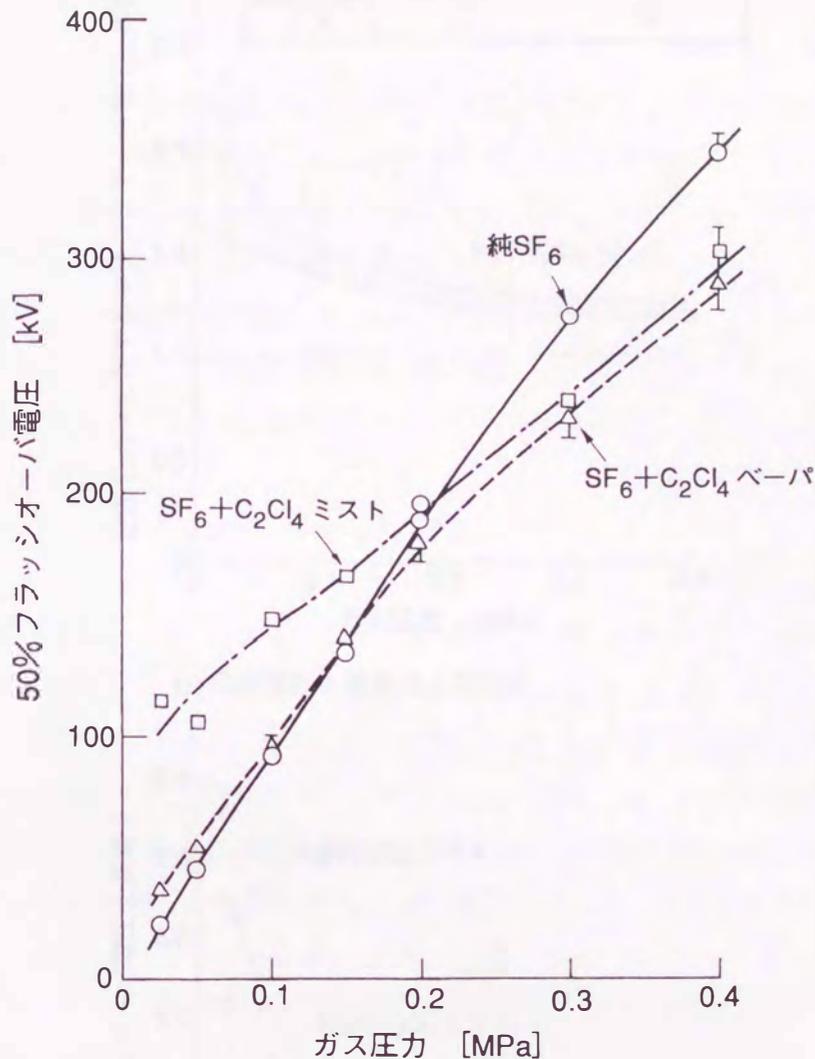
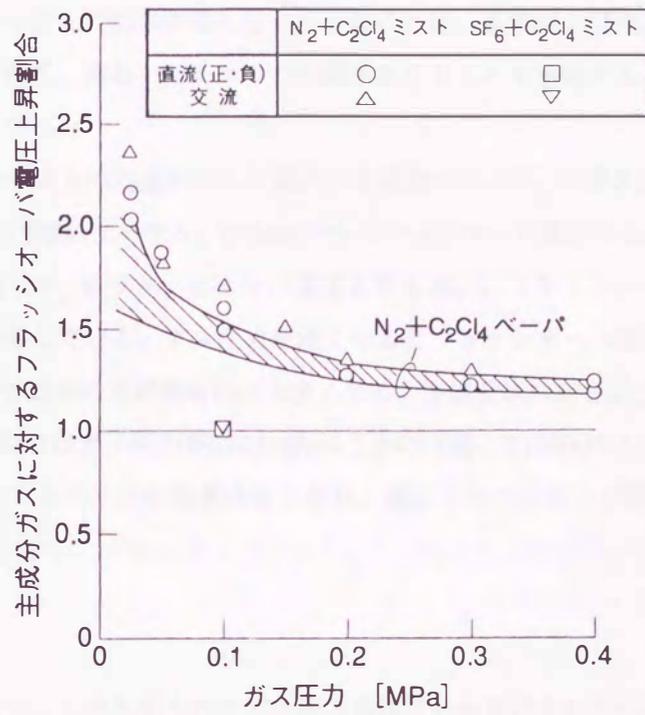


図4.9 SF<sub>6</sub>+C<sub>2</sub>Cl<sub>4</sub> ベーパおよびミストに対する雷インパルスフラッシュオーバー電圧-ガス圧力特性 (電極配置：水平配置)

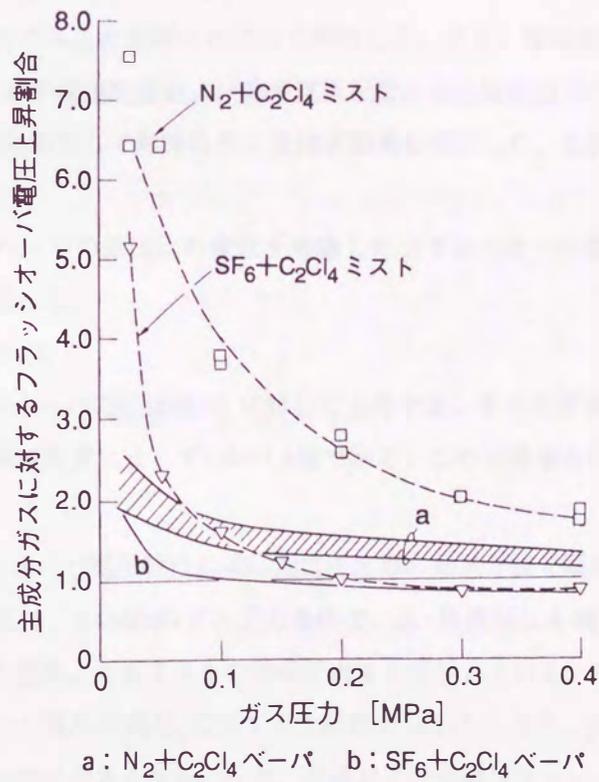
#### 4.2.6 フラッシュオーバー電圧の上昇割合

図4.10にフラッシュオーバー電圧の上昇割合を整理して評価する。同図では主成分ガス単体のフラッシュオーバー電圧を基準とした上昇割合をガス圧力に対して示しており、同図(a)は直流および交流電圧に対する特性、同図(b)は雷インパルス電圧に対する特性である。図中の斜線で示した領域、および同図(b)の実線bがベーパ混合時の特性、プロットはミスト混合時の特性を示す。したがって、このミスト混合時の特性とベーパ混合時の特性の差がミストの効果を表す。

主成分ガスがN<sub>2</sub>の場合、直流および交流電圧印加時では、ガス圧力が低いとき(0.025MPa)、フラッシュオーバー電圧が純N<sub>2</sub>の1.6~2.4倍に上昇する。しかし、この上昇の大部分はベーパの混合によって生じるも



(a) 印加電圧：直流および交流



(b) 印加電圧：雷インパルス

図4.10 主成分ガスに対するフラッシュオーバー電圧上昇割合

のである。ガス圧力が0.2MPa以上の場合はミストの効果がほとんどなくなる。主成分ガスが $\text{SF}_6$ の場合も直流および交流電圧印加時はミストの効果が現れない。このことは、直流および交流電圧の印加時に、ギャップ空間のミストに著しい擾乱、あるいはミストの消滅が生じることを示唆する。この点は4.3.6節で解明する。

一方、雷インパルス印加時はミストの効果が大きく現れ、主成分ガスが $\text{N}_2$ でガス圧力が0.025MPaの場合、フラッシュオーバー電圧は5.5~7.5倍に上昇する。0.1MPaでもフラッシュオーバー電圧の上昇割合は約4倍で、これは同じ供試ギャップでの純 $\text{SF}_6$ のフラッシュオーバー電圧よりも高い。フラッシュオーバー電圧の上昇にはベーパーよりもミストが大きく寄与している。ガス圧力が高くなるとフラッシュオーバー電圧の上昇割合は減少し、ミストの効果よりもベーパーの効果の方が相対的に大きくなる。主成分ガスが $\text{SF}_6$ の場合も同様の傾向で、フラッシュオーバー電圧の上昇割合はガス圧力が0.025MPaのとき約5倍、0.1MPaのとき約1.6倍である。しかし、ガス圧力が0.2MPaを越えるとミストの効果はなくなり、逆にフラッシュオーバー電圧は純 $\text{SF}_6$ よりも低下する。

#### 4.2.7 まとめ

これまで小規模な供試電極系で、しかも限られたガス圧力条件でしか検討されていなかったベーパーミスト誘電体の絶縁特性を詳細に明らかにした。すなわち、主成分ガスを $\text{N}_2$ または $\text{SF}_6$ とし、 $\text{C}_2\text{Cl}_4$ のミストを混合したベーパーミスト誘電体に対して、直流、交流、雷インパルスの3種類の電圧波形を印加した場合の絶縁特性を0.025~0.4MPaのガス圧力領域にわたって解明した。また、電極表面が濡れて $\text{C}_2\text{Cl}_4$ のしずくが付着することも考慮して、水平電極配置および垂直電極配置による絶縁特性の違いも検討に加えた。さらに、ミストの濃度を3段階に調節して絶縁特性に及ぼす効果も検討した。主要な結果を以下に整理する。

(1) 従来検討されていなかったベーパーの分圧比の変化を考慮したフラッシュオーバー電圧の温度補正法を提案し、それぞれの測定値に適用した。

(2) 主成分ガスが $\text{N}_2$ の場合について

(2-1) ベーパー混合時のフラッシュオーバー電圧は純 $\text{N}_2$ に対して上昇する。その上昇割合は0.1MPaのガス圧力条件で、印加電圧波形や電極配置によらず1.4~1.6倍である。この上昇割合はガス圧力が高くなるほど小さくなる。

(2-2) ミスト混合時のフラッシュオーバー電圧特性には印加電圧波形の効果が強く現れる。すなわち、雷インパルスフラッシュオーバー電圧は、0.1MPaのガス圧力条件で、正・負極性とも純 $\text{N}_2$ の約4倍まで上昇する。この上昇にはベーパーの効果よりもミストの効果が大きく寄与している。高ガス圧力になるほど、雷インパルスフラッシュオーバー電圧の純 $\text{N}_2$ に対する上昇割合は小さくなり、同時にミストの効果よりもベーパーの効果の方が相対的に大きくなる。一方、直流および交流フラッシュオーバー電圧はベーパー混合時と同程度であり、0.1MPa以下の低ガス圧力でこれをわずかに上回る程度であるが、0.2MPa以上の高ガス圧力領域ではミストの効果がほとんど現れない。

- (2-3) ミスト濃度とフラッシュオーバー電圧の関連に着目すると、雷インパルスではミスト濃度の上昇により、フラッシュオーバー電圧も上昇する傾向があるが、交流ではフラッシュオーバー電圧の変化は小さく、直流に対しては逆にフラッシュオーバー電圧が低下する傾向がある。
- (2-4) 電極配置が水平であっても垂直であっても、フラッシュオーバー電圧はさほど影響を受けない。しかし、垂直配置に対し、0.2MPa以上の高ガス圧力領域で直流電圧を印加する場合は、ミスト混合時のフラッシュオーバー電圧がベーパー混合時のフラッシュオーバー電圧よりも低下する。この低下は上側電極に付着する $C_2Cl_4$ のしずくに起因すると考えられる。
- (3) 主成分ガスが $SF_6$ の場合について
- (3-1) ベーパー混合時のフラッシュオーバー電圧は純 $SF_6$ に対して低ガス圧力領域では上昇するが、0.1MPaでは同程度であり、0.2MPa以上の高ガス圧力領域では逆に低下する。
- (3-2) ミスト混合時のフラッシュオーバー電圧は $N_2$ を主成分ガスとした場合と同様に、雷インパルスに対してはベーパー混合時以上に上昇するが、直流および交流に対してはベーパー混合時と同程度である。雷インパルスフラッシュオーバー電圧は、0.1MPaのガス圧力条件で純 $SF_6$ の約1.6倍である。この上昇割合は低ガス圧力領域ではさらに大きくなるが、0.2MPa以上の高ガス圧力領域ではベーパー混合時と同程度となり、ミストの効果がなくなる。
- (4) ミストの存在が雷インパルスフラッシュオーバー電圧の上昇に寄与する条件として、主成分ガスの種類によらず印加電圧(印加電界)の絶対値に上限があると考えられる。この上限値は本実験では約200kV(印加電界で約220kV/cm)である。
- (5) ミスト混合時の雷インパルスフラッシュオーバー電圧測定時に、紫外線照射を行っているにもかかわらず、著しく長い放電時間遅れ(10~40 $\mu$ s)がしばしば観測された。
- (6) 直流および交流電圧の印加により、ギャップ空間のミストに著しい擾乱、あるいはミストの消滅が生じる可能性がある。

### 4.3 ベーパーミスト誘電体の絶縁耐力向上要因

#### 4.3.1 まえがき

ベーパーミスト誘電体の雷インパルスフラッシュオーバー電圧が主成分ガス単体に比べて大幅に高くなることから、その要因について非常に興味を持たれる。ミストの混合による絶縁耐力の向上要因の解明は、ミストを有効に活用できる条件を明らかにし、ベーパーミスト誘電体の特性が適用できる分野や理想的なベーパーミスト誘電体の構成、適切な使用形態などを検討するうえでの重要な課題となる。ベーパーミスト誘電体についてのこれまでの検討例<sup>(6)~(28)</sup>ではフラッシュオーバー電圧の測定が主体であり、放電進展機構や絶縁特性に及ぼすミストの効果に関する検討はほとんどない。これについては、放電現象がミストに覆われるため光学的観測が困難であること、また電極表面の濡れやミストの浮遊、温度変化などのため、ギャップ条件が不安定・非正常となり、絶縁特性に寄与する種々のパラメータを明確には分離できないなどの問題もある。

これまでの検討によれば、絶縁耐力の向上に寄与するミストの効果として、定性的には以下の提案がある。

- (1) 電子なだれやストリーマ進展を引き起こす電子やイオンをミストが捕獲する<sup>(3)(4)</sup>。
- (2) ベーパと主成分ガスの混合によるシナジズム効果<sup>(3)(4)</sup>。
- (3) 過飽和のベーパ中でイオンなどがミスト形成の凝縮核となる<sup>(5)</sup>。
- (4) 電極からの電界電子放出が抑制される<sup>(5)</sup>。
- (5) ミストが外部からの紫外線や照射光を吸収、分散する<sup>(5)(31)</sup>。
- (6) ミストによるギャップの細分化<sup>(36)</sup>。
- (7) 不平等電界ではミストが一種のバリアとして作用する<sup>(21)(25)</sup>。

しかし、これらの提案は実験的には検討されておらず、根拠となるデータも乏しい。4.2節での検討により、ベーパミスト誘電体の基礎的な絶縁特性が明らかとなり、従来の絶縁媒体には見られないいくつかの知見が得られた。それらを整理すると以下のようになり、ミストの混合がフラッシュオーバー電圧の上昇にいかなる要因で寄与するかを解明するうえで有益な情報となる。

- (1) フラッシュオーバー電圧の上昇に寄与するミストの効果は、雷インパルス印加時のみ大きく現れる。
- (2) 紫外線照射を行っているにもかかわらず、著しく長い放電時間遅れが生じる。
- (3) 直流および交流電圧印加時にミストの擾乱あるいは消滅が生じる可能性がある。

上記の(1)、(2)からはミストの混合により、放電開始と種となる初期電子の欠乏が生じる可能性が示唆される。そこで、本節では初期電子の欠乏の可能性に着目して、紫外線照射の効果、初期電子を十分に供給した場合の絶縁特性を実験的に検討する。さらに、直流および交流電圧に対してはフラッシュオーバー電圧の上昇がほとんど生じない点を解明するために、直流と雷インパルスを重畳した場合の絶縁特性についても検討する。これらの結果に基づき、ミストおよびベーパについてフラッシュオーバー電圧の上昇に寄与する効果と、逆に異物としての効果を印加電圧波形との関連も含めて整理する。

#### 4.3.2 紫外線照射効果の検討

4.2節の実験のように、鉄製のタンク中で準平等電界ギャップの絶縁特性を測定する場合、初期電子の供給不足により、放電の統計的時間遅れが長くなり、その結果フラッシュオーバー電圧のばらつきや上昇を招くことが知られている。これは主として宇宙線や紫外線などがタンク壁で減衰されたり、タンク壁で荷電粒子が再結合するなど、ギャップ空間における初期電子の生成が十分でないためと解釈されている。したがって、放電の統計的時間遅れは大気中で実験を行う場合よりも長くなり、純 $N_2$ に対して数秒のオーダーにも達し得ることが示されている<sup>(37)</sup>。この現象は雷インパルスのような短波頭電圧を印加する場合や、供試ギャップの規模が小さいときに問題となり、一般に電極への紫外線照射などにより改善できる。実際のガス絶縁機器では有効な照射源は存在しないが、電極面積が極めて大きいことや、測定データの信頼性を

考慮してこの種の検討では紫外線や放射性物質などにより照射を行う例が多い。

4.2節の実験では直流電圧印加のケースを除いて水銀ランプによる紫外線照射(以下照射)を行った。本実験で使用した水銀ランプの放射限界は約200nm(6.2eV)であるので、 $N_2$ や $SF_6$ の電離エネルギー(それぞれ14.5eV, 9.3eV)より小さい。したがって、照射時の初期電子供給は主に電極からの光電子放出によると考えられる。一方、 $C_2Cl_4$ のベーパーやミストに対する照射の作用は明らかでなく、ミストの存在により紫外線のような短波長光は分散されたり、弱められる可能性もある。また、ベーパーあるいはミスト混合時では、自由電子や負イオンが生成されてもミストに付着したり、ミストを形成する凝縮核になってミストに取り込まれるなどして、放電開始の有効な種にならないことも考えられる。そこでまず、ベーパーミスト誘電体の絶縁特性に及ぼす照射の効果を検討する。

図4.11は主成分ガスが $N_2$ 、ガス圧力が0.05MPa、電極配置が水平配置の条件で、ミスト濃度が十分高い状態で連続して測定した交流フラッシュオーバー電圧値を示す。横軸は経過時間である。比較のためベーパー混合時の交流フラッシュオーバー電圧レベル(照射時)を破線で併記する。図中○および●で示したプロットはそれぞれ照射時および非照射時の測定結果である。これより、非照射時のフラッシュオーバー電圧の平均値約41kVは、照射時の平均値約33kVと比べて明らかに高いことが判る。すなわち、本実験における最もミスト濃度が高い状態でも照射の効果があると考えられる。同図では照射時、非照射時ともにベーパー混合時と同程度のフラッシュオーバー電圧レベルでフラッシュオーバーしたケースが一例ずつある(図中※)。このことは、ミスト混合時のフラッシュオーバー電圧の上昇が必ずしも定常的でないことを示唆し、その要因としてギャップ条件(ミストの粒径、形状、個数濃度など)の変動や統計的時間遅れの関与などが考えられる。

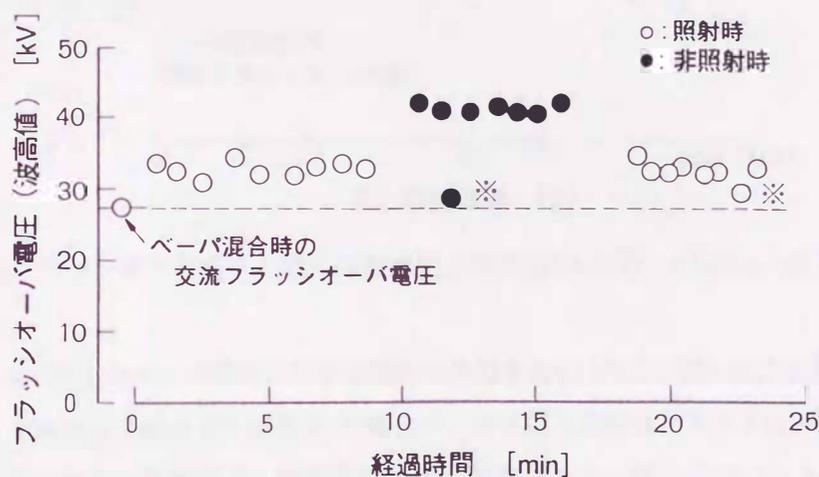


図4.11 交流フラッシュオーバー電圧に対する照射の効果(ガス圧力：0.05MPa、水平配置)

図4.12は一定値の交流電圧を連続して印加し、フラッシュオーバーが生じるまでの時間を測定した結果(長時間 $V-t$ 特性)である。主成分ガスは $N_2$ 、ガス圧力は0.1MPa、電極配置は水平配置、ミスト濃度は十分高い状態である。同図にも比較のため、ベーパー混合時の交流フラッシュオーバー電圧レベルを併記した。これよ

り、全体として右下りのV-t特性、すなわち低い印加電圧でも電圧印加時間が長いとフラッシュオーバーしやすくなる傾向があり、照射によりフラッシュオーバーまでの時間(放電時間遅れ)が短くなることが判る。ベーパー混合時と同程度のフラッシュオーバー電圧レベルで、フラッシュオーバーが生じるまでの最短時間は照射時で約15秒、非照射時で約2分である。放電時間遅れは長い場合は10分に達する場合がある。

すでに触れたように、ミストの条件が時間的に変動している可能性があり、ここで観測された著しく長い放電時間遅れも、こうしたギャップ条件の変動に起因することも考えられる。しかし、図4.11と同様に照射の効果がかなり明瞭に現れることから、初期電子の欠乏が十分に考えられる。図4.12の結果から、ミスト混合時でも照射の効果は残るが、放電時間遅れは数秒~数分にまで長くなることが判る。従って交流フラッシュオーバー電圧の測定を電圧上昇法で行う場合、電圧上昇速度が速い場合にフラッシュオーバー電圧の上昇傾向を示すことは十分に考えられ、特に電圧継続時間の短い雷インパルスなどを印加する場合、フラッシュオーバー電圧の上昇割合はさらに大きくなることが考えられる。

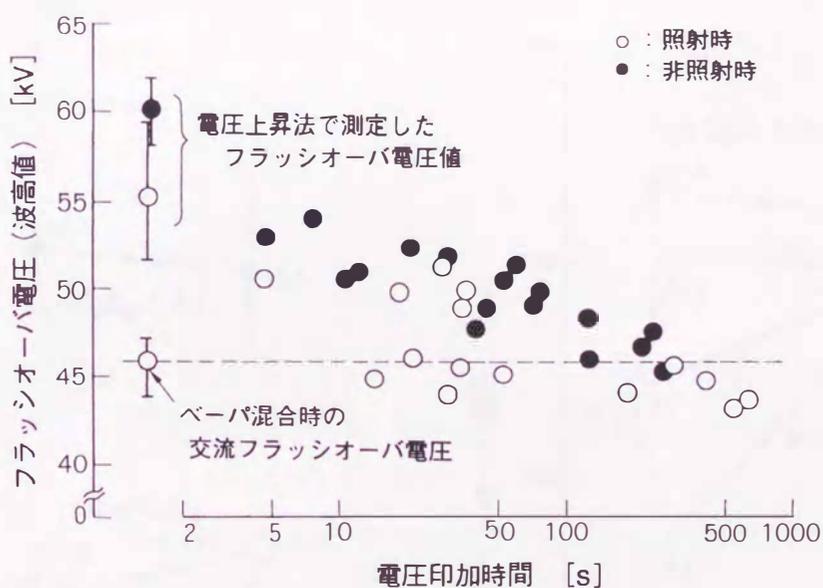


図4.12 交流フラッシュオーバー電圧と電圧印加時間の関係(ガス圧力: 0.1MPa、水平配置)

次に、雷インパルスフラッシュオーバー電圧に対する照射の効果を図4.13および図4.14に示す。図4.13は主成分ガスが $N_2$ の場合、図4.14は主成分ガスが $SF_6$ の場合で、ガス圧力条件はどちらも0.1MPaおよび0.3MPaである。雷インパルスの極性は負極性で、電極配置は水平配置である。図中のプロットは50%フラッシュオーバー電圧( $V_{50}$ )を示し、各データに標準偏差( $\sigma$ )および放電時間遅れとしてフラッシュオーバー時間の平均値(図中 平均FO時間)を併記した。また、測定を進めるうちにフラッシュオーバー電圧が変化する場合があったので、測定順を矢印で明記した。測定途中でフラッシュオーバー電圧が明らかに変化した場合は、その前後で別々にフラッシュオーバー電圧や標準偏差を求め、両方をプロットした。測定途中でのフラッシュオーバー電圧の変化(ほとんどは上昇)はベーパー混合時にしばしば観測された。

図4.13(a)の純 $N_2$ (ガス圧力0.1MPa)に対して、非照射時のデータは照射時に比べて明らかにばらつきが大きく、 $V_{50}$ は約1.4倍高い。このとき、昇降法による測定時に、照射時よりもはるかに広い電圧範囲で非フラッシュオーバーの連続とフラッシュオーバーの連続が繰返し現れた。この現象は初期電子の欠乏を示す特徴的な現象である。ベーパー混合時も $V_{50}$ は非照射時のほうが高くなるが、照射の効果に加えて時間経過とともに上昇する傾向が読取れる。ミスト混合時は $V_{50}$ が大幅に上昇するとともに、フラッシュオーバー時間が長くなる。照射時、非照射時で $V_{50}$ の変化は少ないが、ばらつきは照射時のほうが小さい。すなわち、照射の効果が認められる。同様の傾向はガス圧力が0.3MPaの図4.13(b)においても見られる。この場合、照射時、非照射時で $V_{50}$ の変化が大きい。ミスト混合時の非照射の場合に、フラッシュオーバー電圧が測定途中で低下する特異な変化が観測された。

図4.14(a)の純 $SF_6$ (ガス圧力0.1MPa)に対しても、純 $N_2$ の場合と同様に非照射時のほうがフラッシュオーバー電圧が高い。ベーパー混合時は照射時のほうがフラッシュオーバー電圧が高くなっているが、これは時間経過に伴う上昇と考えられる。照射時では測定中もさらにフラッシュオーバー電圧が上昇し、ミスト混合時の $V_{50}$ に

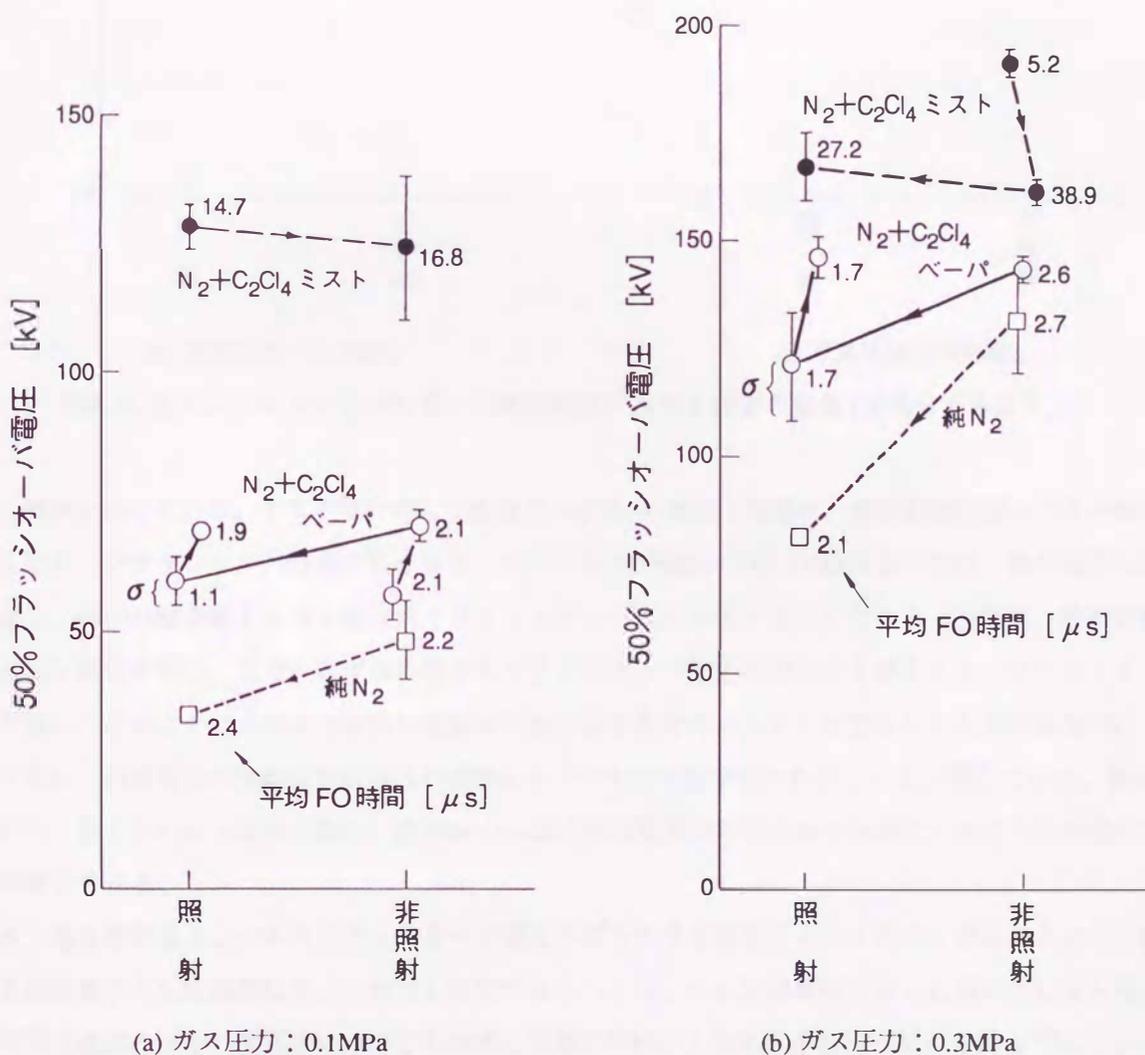
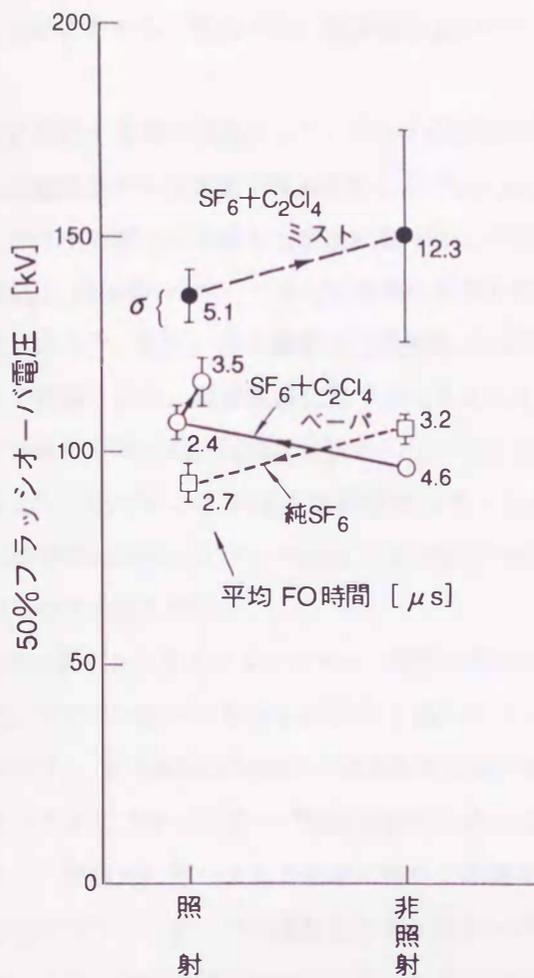
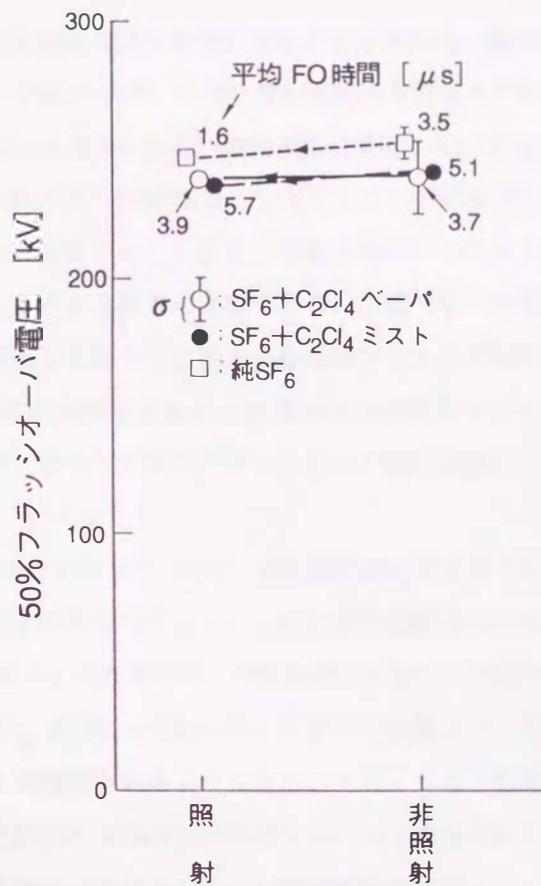


図4.13 雷インパルスフラッシュオーバー電圧特性に及ぼす照射の効果(主成分ガス $N_2$ )



(a) ガス圧力：0.1MPa



(b) ガス圧力：0.3MPa

図4.14 雷インパルスフラッシュオーバー電圧特性に及ぼす照射の効果 (主成分ガス SF<sub>6</sub>)

近づく傾向を示している。ミスト混合時も主成分ガスがN<sub>2</sub>の場合と同様に、非照射時にばらつきが極めて大きくなり、フラッシュオーバー時間が長くなる。ガス圧力が0.3MPaの図4.14(b)においては、他の傾向とは全く異なり、ベーパ混合時とミスト混合時でフラッシュオーバー電圧の差がほとんどなく、照射時、非照射時でもほとんど変化がない。また、いずれの場合もフラッシュオーバー電圧のばらつきが小さく、フラッシュオーバー時間が短い。このことはこのように高い電界が印加される条件ではミストを混合してもその効果がなくなるとともに、初期電子の供給は照射以外の機構によって十分な量で行われることを示唆している。図4.9の結果から、雷インパルス印加の場合、約220kV/cm以上の高電界が印加される条件でこのような状態になることが考えられる。

ミスト混合時の雷インパルスフラッシュオーバー電圧のばらつきが照射によって小さくなることから、照射による初期電子の供給機構はミスト中でも存在するといえる。これには電極に達した照射光による電極からの光電子放出のほか、誘電体についても金属と同様に照射による光電子放出が起こり得る<sup>(38)</sup>ことから、ミスト自身からの電子放出も考えられる。220kV/cm以上の高電界下での初期電子の供給機構は照射の効果

によらないことから、電極からの電界電子放出や $SF_6$ や $C_2Cl_4$ の負イオンからの電子離脱などが考えられる。

照射に起因する他の現象として、ベーパー混合時に極めて微細なミストが発生することがあった。照射光により電極表面からは光電子放出が生じるが、 $C_2Cl_4$ のベーパーはハロゲン元素を含む電氣的負性ガスであるので、ガス中の電子が付着して容易に負イオンが形成されると考えられる。飽和蒸気圧あるいはそれを上回る蒸気圧(過飽和)のベーパー中では霧箱の原理と同様に、負イオンが凝縮核となってミストが形成される可能性がある<sup>(5)</sup>。実際にガス温度が比較的高く(30℃以上)、拡散ファンを使用した場合など、このようなミストが観測された。超音波霧化法で発生させたミストと比べると非常に希薄であり、注視しないと確認できないほどであった。同様に何回かのフラッシュオーバーが生じた後でもこのような希薄なミストが自然発生することがあった。このような状態でフラッシュオーバー電圧を測定すると、直流および交流についてはベーパー混合時のフラッシュオーバー電圧とほぼ同じであったが、雷インパルスフラッシュオーバー電圧は極めて大きなばらつきを示した。

図4.15は雷インパルスフラッシュオーバー電圧が異常なばらつきを示した一例で、昇降法のデータをそのまま示した。フラッシュオーバーを示す○印の上部にフラッシュオーバー時間を併記した。このときの実験条件は主成分ガスが $N_2$ 、ガス圧力は0.4MPa、電極配置は垂直配置である。この条件で、自然気化によるベーパー混合時の雷インパルスフラッシュオーバー電圧を測定したところ、 $V_{50}$ は139kVであった。しかし、拡散ファンを使用すると、照射光に照らされた領域に極めて希薄なミストが観測されるようになり、それにつれて昇降法における非フラッシュオーバーの連続とフラッシュオーバーの連続が172~222kVの広範囲にわたって測定された。非フラッシュオーバーが連続した後でフラッシュオーバーが生じる場合、フラッシュオーバー時間が極めて長く、一度フラッシュオーバーが生じて電子やイオンがギャップ空間に放出されると、その後は波頭でのフラッシュオーバーが連続して生じる。このような特性は明らかに初期電子の欠乏を示している。同図には図4.7(b)でのミスト

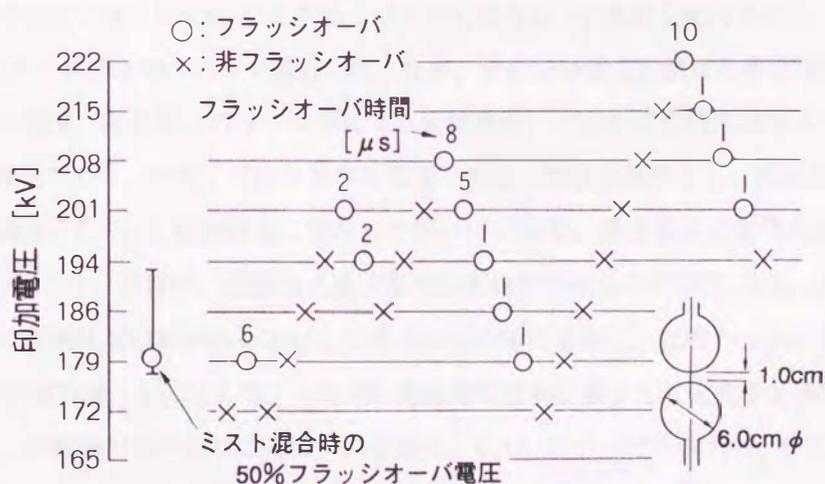


図4.15 照射光による微細なミストの発生により雷インパルスフラッシュオーバー電圧が異常に上昇した例  
(主成分ガス： $N_2$ 、ガス圧力：0.4MPa)

混合時の雷インパルスフラッシュオーバー電圧値 ( $V_{50} = 179\text{kV}$ ) およびそのばらつきを左端に併記したが、それよりもはるかに高いレベルまでフラッシュオーバー電圧が上昇していることが判る。このことは雷インパルスフラッシュオーバー電圧が上昇するためには必ずしも濃いミストは必要なく、直接には初期電子の欠乏が重要な要因となっていることを示唆する。拡散ファン使用の有無が関係するのは、これによって  $\text{C}_2\text{Cl}_4$  のベーパーが過飽和な状態に近づくことが考えられる。したがって、紫外線照射が十分に電極に達して光電子放出が生じて、過飽和ベーパー中で負イオンがミスト形成の凝縮核となってミストに取り込まれ、放電開始能力を失い、結果として初期電子の欠乏が生じるという機構が考えられる。

#### 4.3.3 光電子放出電流の測定

4.3.2節の検討で、照射による初期電子供給の効果はミスト混合時でも認められるものの、その効果は十分ではなく、初期電子の欠乏によって放電時間遅れの増大や雷インパルスフラッシュオーバー電圧の上昇を生じている可能性が濃厚となった。特に、ベーパー混合時で照射光が電極を十分に照射していても、初期電子の欠乏が生じる可能性があることから、初期電子の供給量およびその寿命についてさらに検討すべきである。本実験での初期電子の供給源としては照射による電極からの光電子放出が支配的であると考えられ、 $220\text{kV/cm}$ 以上の高電界が印加される場合は負イオンからの電子離脱や電極からの電界電子放出などが支配的となると考えられる。そこで、本実験で使用した電極系に対して、照射時の光電子の発生量(光電子電流)を測定する。

測定に使用した電極はこれまでの実験で使用したものと材質、形状において同一であるが、接地側電極の一部を光電子電流測定用のプローブとした。その構造を図4.16に示す。プローブは接地側電極の最大表面電界の90%以上の領域に相当し、その直径は $1.2\text{cm}$ 、面積は $1.13\text{cm}^2$ である。照射用の水銀ランプを実験時と同じく、供試ギャップの中心より $40\text{cm}$ の距離から、電極中心軸に対し垂直方向から照射するよう配置した。光電子電流の測定は実験の都合上、大気中で行い、高精度安定化直流電源 (Spellman RHSR10PN60、リップル  $0.001\%$ rms、電圧安定度  $0.005\%$ ) により低リップルの直流電圧 (正極性  $10\text{kV}$ ) を印加し、プローブ流入電流を微小電流計 (タケダ理研 TR8651) で測定した。なお、照射時の測定電流は非照射時の約1000倍であったので、回路内漏れ電流、直流電圧のリップル分による変位電流、大気中の自然電離電子やイオンによるドリフト電流などは無視できる。光電子電流は清浄な電極で測定した値を基準とし、電極系を  $\text{C}_2\text{Cl}_4$  ベーパー中に長時間放置した場合、 $\text{C}_2\text{Cl}_4$  を直接電極に塗布した場合について、測定電流の変化を調べた。

測定結果を図4.17に示す。同図で、縦軸の光電子電流は電極洗浄直後の初期値 (約 $0.1\text{nA}$ ) で規格化して示した。また、横軸の経過時間は初期値を測定した時点からの時間である。比較のため、電極系を大気中に放置した場合の特性 (図中■) も併記した。大気中に電極を長時間放置すると光電子電流は徐々に低下し、2時間で約90%に、50時間で約半分になる。これに対し、 $\text{C}_2\text{Cl}_4$  のベーパーを含む  $\text{N}_2$  や  $\text{SF}_6$  中に電極を放置した場合は、さらに1~2桁も光電子電流が減衰する。また、 $\text{C}_2\text{Cl}_4$  を直接電極に塗布した場合は、光電子電流はいきなり1桁低下し、約2時間後に再度塗布すると、初期値の約 $1/50$ にまで低下した。このとき、黄銅製の電極は黄色に変色しており、ベーパーの吸着などにより表面状態が変化したことが考えられる。

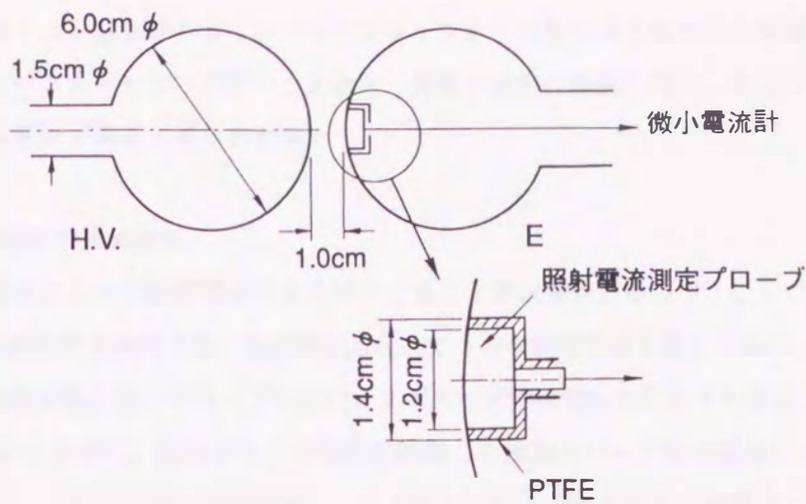


図4.16 光電子電流測定用プローブ付き電極

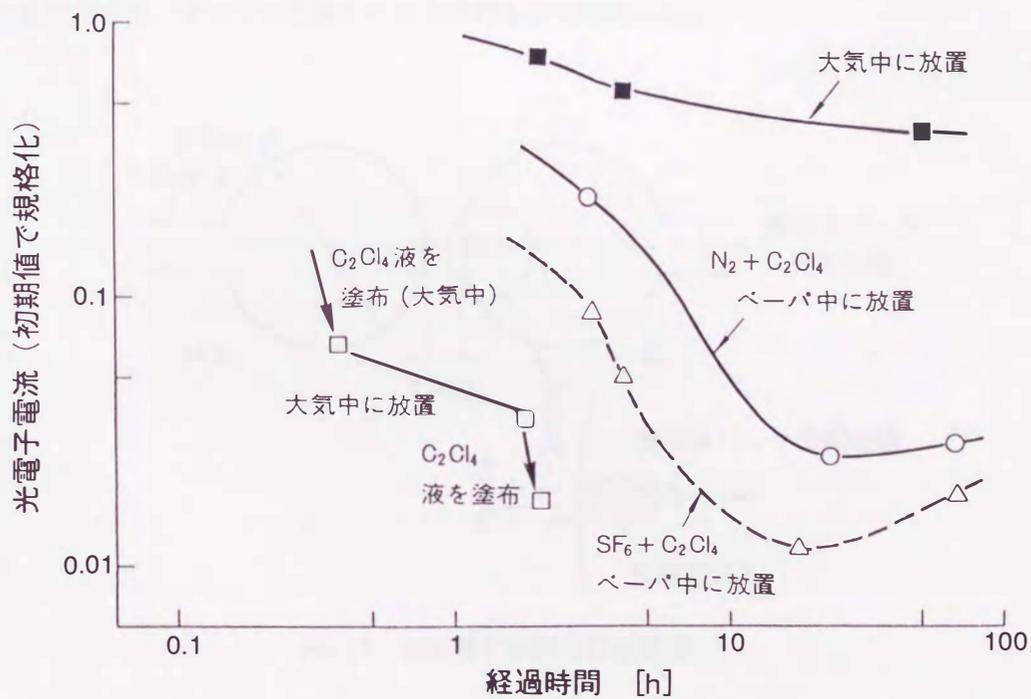


図4.17 光電子電流の減衰特性

光電子電流の大幅な低下は、照射時の光電子放出による初期電子の供給を困難にし、時間経過とともに照射の効果が弱められることを意味する。このことは、図4.13および図4.14におけるベーパー混合時のフラッシュオーバー電圧が時間経過とともに上昇する傾向と密接に関連するものと考えられる。

以上の結果より、純 $N_2$ や純 $SF_6$ に対しては照射によって雷インパルスフラッシュオーバー電圧が安定するが、ベーパー混合時やミスト混合時は照射光が電極に到達しても光電子放出が減少することから、初期電子が欠乏して雷インパルスフラッシュオーバー電圧の上昇やばらつきが増大の一因となることが十分に考えられ

る。しかし、一般にはミスト混合時の雷インパルスフラッシュオーバー電圧は主成分ガス単体やベーパー混合時に対する非照射時のデータよりもさらに高いことから、光電子放出の減衰以外に、さらにフラッシュオーバー電圧の上昇に寄与する要因があると考えられる。

#### 4.3.4 初期電子供給時の絶縁特性

ベーパーやミストの混合によって初期電子の欠乏が生じることが示唆されるので、ここでは初期電子を十分に供給した状態で絶縁特性を検討する。放電開始点付近で十分な初期電子を得るために、図4.18に示すように、供試電極の接地電極側に微小ギャップを設け、主ギャップ間に電圧を印加する直前に微小な放電(以下 補助スパーク)を発生させた。石英ガラスで周囲と絶縁した補助スパーク印加電極には7.1kVの負極性直流電圧で充電した0.1 $\mu$ Fのコンデンサを接続し、サイラトロンスイッチにより放電させて補助スパークを得た。主ギャップへの印加電圧は雷インパルスで、接地電極側で初期電子が供給されることを考慮して、極性は正極性とした。補助スパークの発生から雷インパルスが印加されるまでの時間 $\Delta T$ を $10^{-3}$ sから10sの範囲で変化させた。すべての実験ケースで照射も併せて行った。

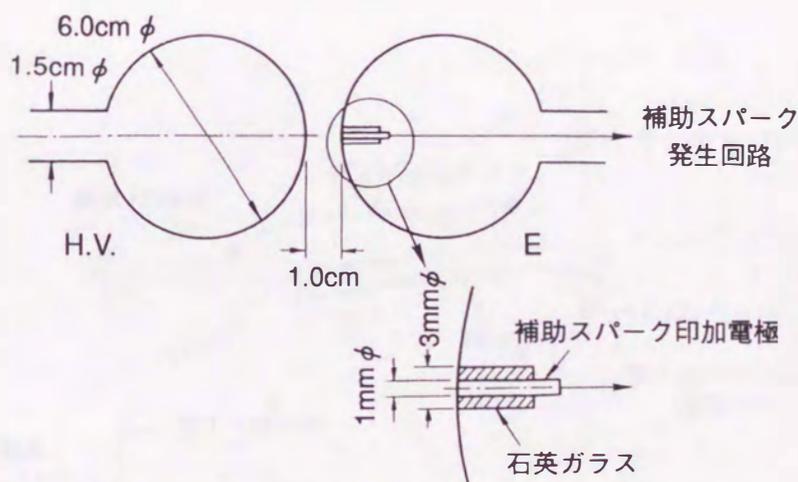
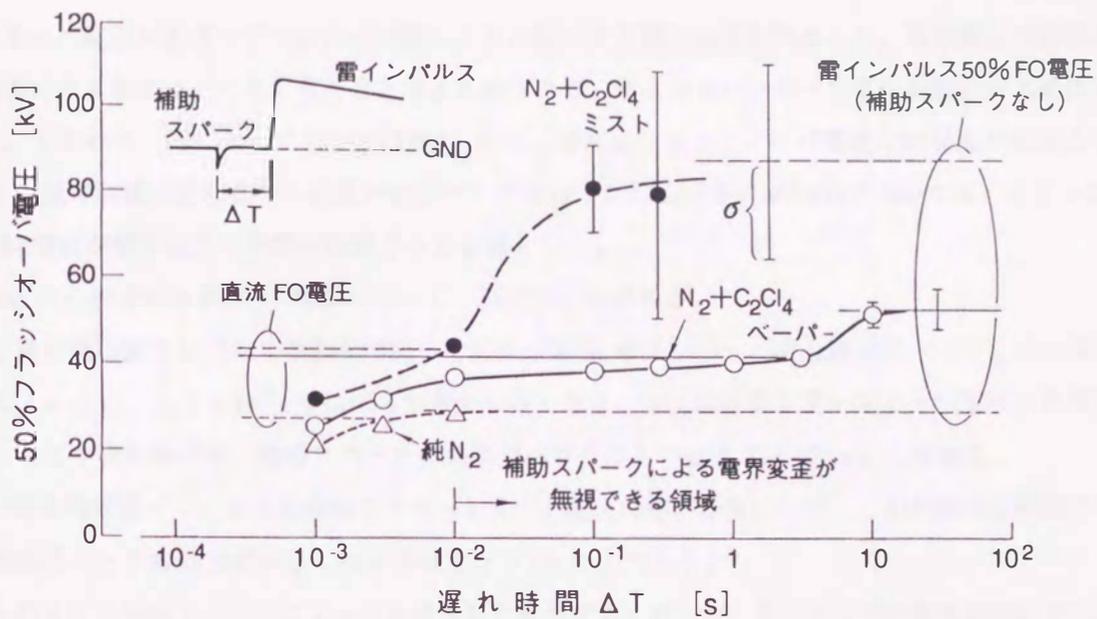
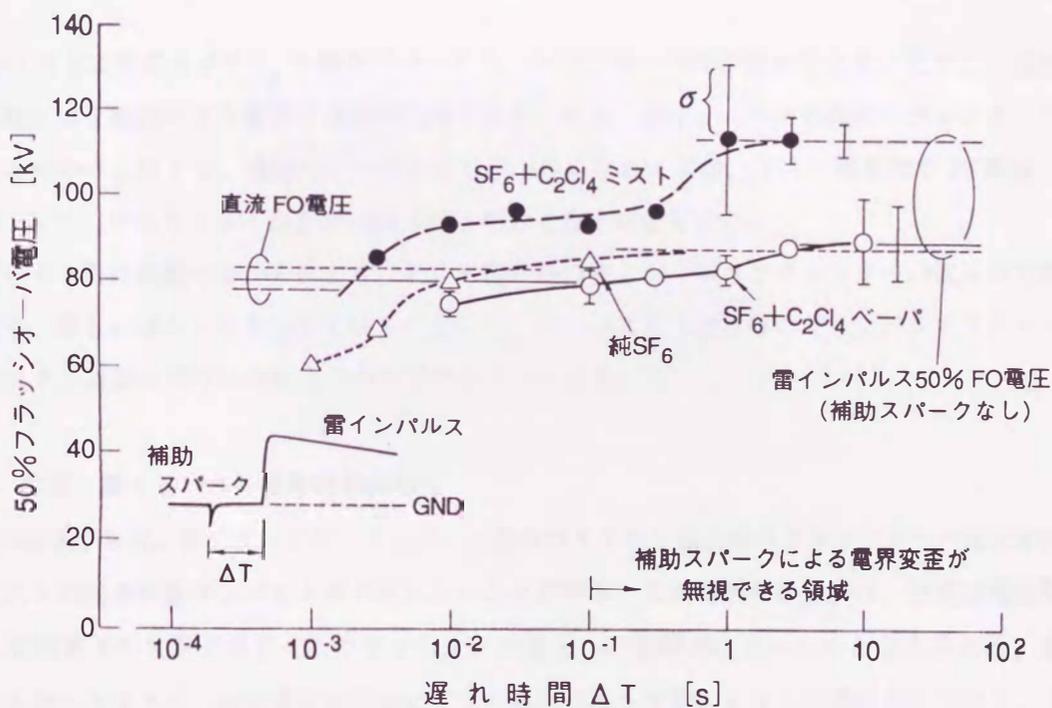


図4.18 初期電子供給用供試電極

図4.19に $\Delta T$ を変化させた場合の50%フラッシュオーバー電圧( $V_{50}$ )および標準偏差( $\sigma$ )の測定結果を示す。主成分ガスは図4.19(a)のケースが $N_2$ 、図4.19(b)のケースが $SF_6$ である。ガス圧力はどちらも0.1MPaである。同図には $\Delta T$ が十分長い場合として、補助スパークなし(雷インパルス単独)で測定した $V_{50}$ レベルを右側の直線群として併記した。また、直流電圧を単独で印加した場合のフラッシュオーバー電圧を、本供試電極でのスパークを発生させない場合の最低フラッシュオーバー電圧と考え、左側の直線群(図中 直流FO電圧)で示した。なお、補助スパークなしの場合の $V_{50}$ および $\sigma$ は図4.13および図4.14の特性と異なるが、これは供試電極の接地電極側の構造が異なるためである。



(a) 主成分ガス：N<sub>2</sub> (0.1MPa)



(b) 主成分ガス：S F<sub>6</sub> (0.1MPa)

図4.19 初期電子供給時の雷インパルス絶縁特性

本実験においては接地電極側の電界最大点付近にて補助スパークを発生させているため、 $\Delta T$ が短い場合は空間電荷による電界の変歪のため、フラッシュオーバー電圧が供試電極の耐電圧(スパークなしの場合の最低フラッシュオーバー電圧)以下に低下する可能性がある。そこで、 $\Delta T$ が短い領域で補助スパーク発生時の

フラッシュオーバー電圧が直流フラッシュオーバー電圧よりも低下する場合は検討外とした。電界歪の影響は絶縁耐力が低いガス条件ほど大きく現れると考えられるので、最もフラッシュオーバー電圧が低いガス条件を基準とした。すなわち、図4.19(a)においては純 $N_2$ の $V_{50}$ が直流フラッシュオーバー電圧と同程度となる $\Delta T = 10^2 s$ よりも長時間側が電界歪の影響が無視できる領域とした。同様に同図(b)においては、 $\Delta T = 10^1 s$ よりも長時間側が電界歪の影響が無視できる領域とした。

図4.19(a)の主成分ガスが $N_2$ の結果について、以下のことが判る。

- (1) ミスト混合時に雷インパルス単独を印加した場合、純 $N_2$ およびベーパー混合時に比べて $V_{50}$ は大幅に上昇する。しかし、 $\Delta T = 10^2 s$ ではばらつきが小さくなり、 $V_{50}$ は直流フラッシュオーバー電圧と同程度になる。ミスト混合時では、補助スパークの効果が小さくなるのは $\Delta T = 10^1 s$ 以上である。
- (2) ベーパー混合時は雷インパルスと直流でフラッシュオーバー電圧の差が小さいため、上記の傾向は明確でないが、補助スパークの効果が小さくなるのは $\Delta T = 10s$ 以上である。
- (3) これらの $\Delta T$ は補助スパークによって生成された電子や負イオンが、主ギャップの放電開始において初期電子となり得る状態での有効時間(寿命)と考えられ、ベーパー混合時よりもミスト混合時のほうが2桁程度短くなる。

図4.19(b)の主成分ガスが $SF_6$ の結果についても、ほぼ同様の傾向が認められる。ただし、直流フラッシュオーバー電圧は3種類のガス条件でほぼ同程度であり、また、雷インパルス単独のフラッシュオーバー電圧はミスト混合時のみ上昇する。補助スパークの効果が小さくなる $\Delta T$ は、ミスト混合時で1s程度、ベーパー混合時で10sで、やはりミスト混合時のほうが1桁短くなる結果を得た。

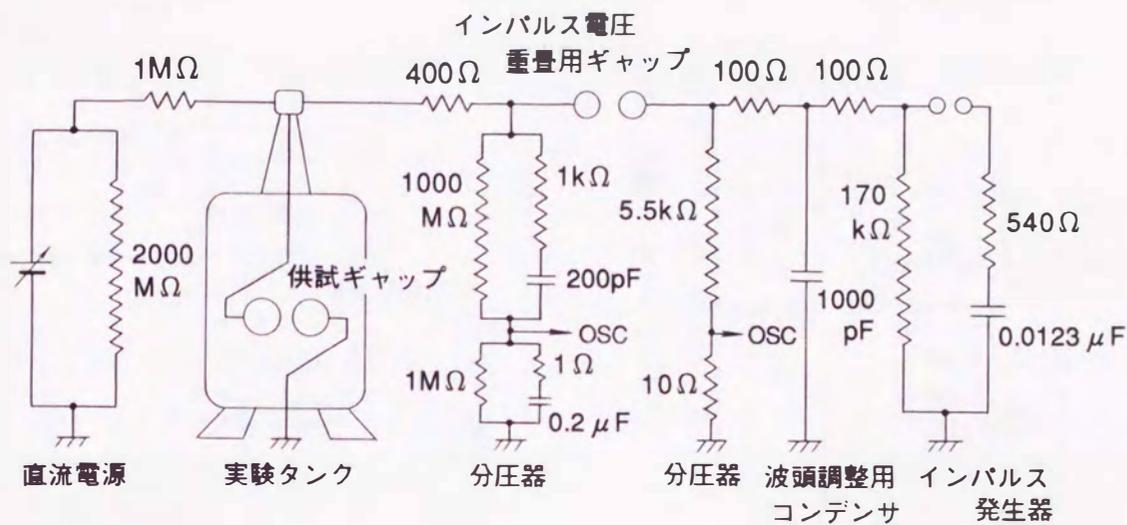
初期電子を十分に供給することにより、ミスト混合時の雷インパルスフラッシュオーバー電圧の大幅な上昇がなくなり、著しいばらつきも小さくなることから、ベーパーミスト誘電体の雷インパルスフラッシュオーバー電圧が上昇する直接の要因は初期電子の欠乏であるといえる。

#### 4.3.5 直流・雷インパルス重畳時絶縁特性

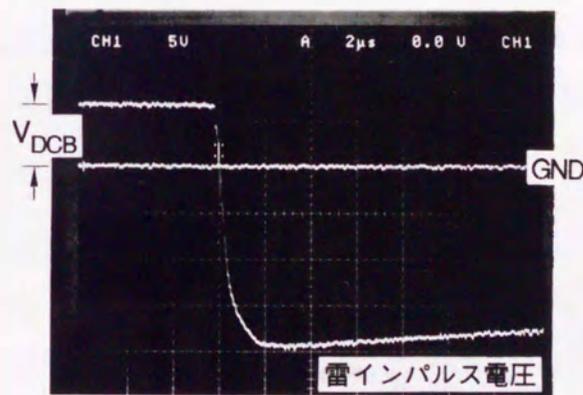
図4.19の結果からは、直流電圧に対してはベーパー混合時とミスト混合時のフラッシュオーバー電圧が同程度であり、ミストの効果が雷インパルスほど現れないことが判る。この要因のひとつは、直流は電圧継続時間が長く、初期電子の欠乏が生じててもフラッシュオーバー電圧への影響が小さいためと考えられる。しかし、4.2.6節でも触れたように、直流電圧の印加によって供試ギャップ間のミストに擾乱が生じたり、ミストの濃度が低下することも示唆されるため、ここでは直流と雷インパルスを重畳印加した場合の絶縁特性を検討する。

実験に使用した供試ギャップは図4.2と同一で、電極に付着するしずくの影響を考慮して水平配置とした。高電圧側電極に正極性の直流バイアス電圧( $V_{DCB}$ )を印加した状態で、負極性雷インパルスを重畳印加して50%フラッシュオーバー電圧( $V_{50}$ )および標準偏差( $\sigma$ )を測定した。主成分ガスは $N_2$ (0.3MPa)および $SF_6$ (0.1MPa)とした。実験に使用した試験回路と印加電圧波形を図4.20に示す。なお、低電圧側の電極は

常に接地電位であるので、 $V_{50}$  は接地電位に対する雷インパルス波形の波高値で表示する。また、フラッシュオーバー時間も測定した。



(a) 試験回路

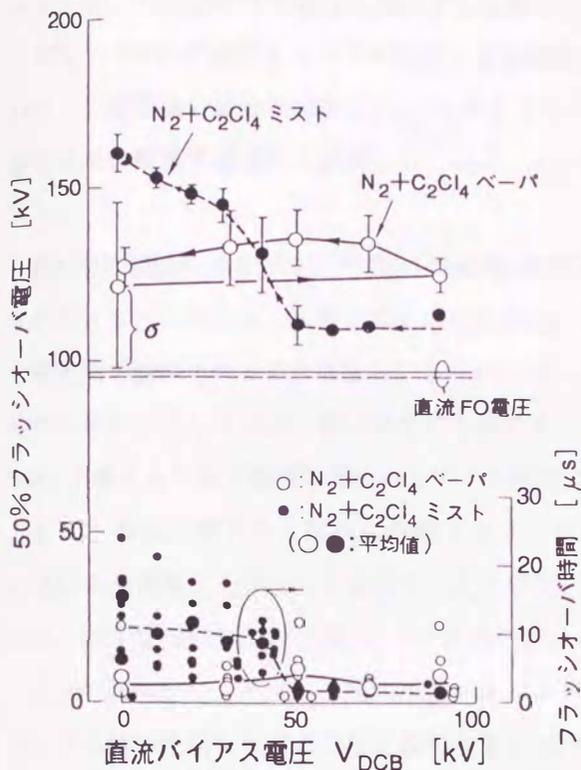


電圧軸：31.4kV/div、時間軸：2 μs/div

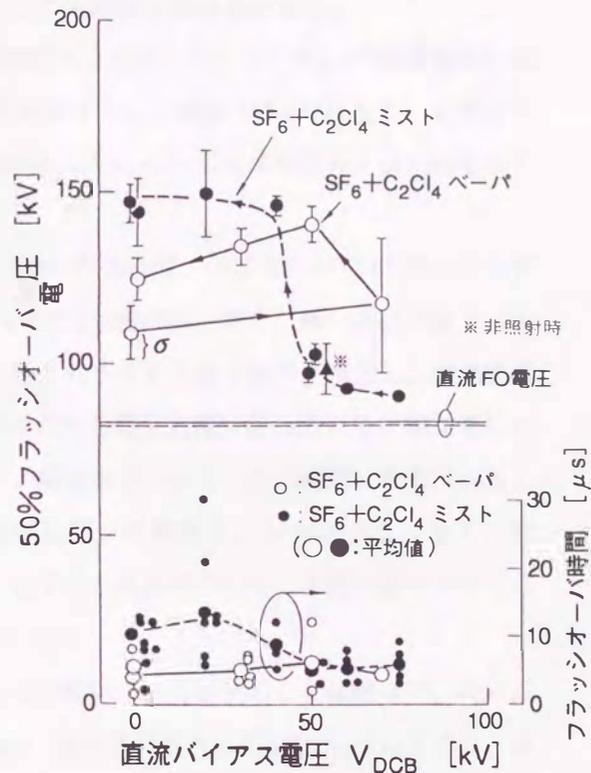
(b) 印加電圧波形

図4.20 直流・雷インパルス重畳用試験回路と印加電圧波形

図4.21に結果を示す。同図(a)は主成分ガスが $N_2$  (0.3MPa) の場合である。図中の矢印は測定順を示す。また、図面下部のプロットはフラッシュオーバー時間の分布と平均値を示す。ミスト混合時は $V_{DCB}$  の効果が明瞭で、 $V_{DCB}$  が40kVを越えると $V_{50}$  は大幅に低下し、 $V_{DCB} = 50kV$  以上ではベーパー混合時の $V_{50}$  レベルよりも低いほぼ一定値となる。この低下した $V_{50}$  は直流電圧単独で測定したフラッシュオーバー電圧値(図中 直流FO電圧)に近いレベルである。また、フラッシュオーバー時間も $V_{DCB} = 40kV$  付近を境として、それ以上の $V_{DCB}$  に対して、数10 μs から数 μs に急激に安定する。これに対し、ベーパー混合時は $V_{50}$  に対する $V_{DCB}$  の効果が明瞭ではなく、全体にばらつきが大きい。フラッシュオーバー時間についても $V_{DCB}$  の効果は明瞭に



(a) 主成分ガス:  $N_2$  (0.3MPa)



(b) 主成分ガス:  $SF_6$  (0.1MPa)

図4.21 直流・雷インパルス重畳時の絶縁特性

は認められない。したがって、 $V_{DCB}$  はガスには影響を与えないが、ミスト混合時にはフラッシュオーバー電圧上昇の効果を失わせる作用がある。

図4.21(b) は主成分ガスが  $SF_6$  (0.1MPa) の場合である。上記の傾向はこの場合にもほぼ同様に認められる。ベーパ混合時の  $V_{50}$  のばらつきは非常に大きく、 $V_{DCB}=50kV$  のように、ミスト混合時の  $V_{50}$  と同程度まで上昇しているケースがある。ミスト混合時では  $V_{DCB}$  が  $40kV$  を越えると  $V_{50}$  が急激に低下し、 $50kV$  以上で直流フラッシュオーバー電圧に近いレベルとなる。この状態で非照射とした場合の  $V_{50}$  (図中※) も測定したが、照射時と同程度であり、照射の効果が認められない。ミスト混合時の  $V_{50}$  が急激に低下する  $V_{DCB}$  の値が主成分ガスの種類によらず同程度であることから、ミストの効果が消滅する要因は主成分ガスでなくミストそのものにあり、一定値以上の直流電界(約  $50kV/cm$ ) の印加により生じると考えてよい。この状態ではフラッシュオーバー時間が短くなり、照射の効果もなくなるので、初期電子の欠乏は生じておらず、初期電子の供給にミストが直接関与していることが示唆される。

#### 4.3.6 直流および交流電圧印加時の液膜の変歪

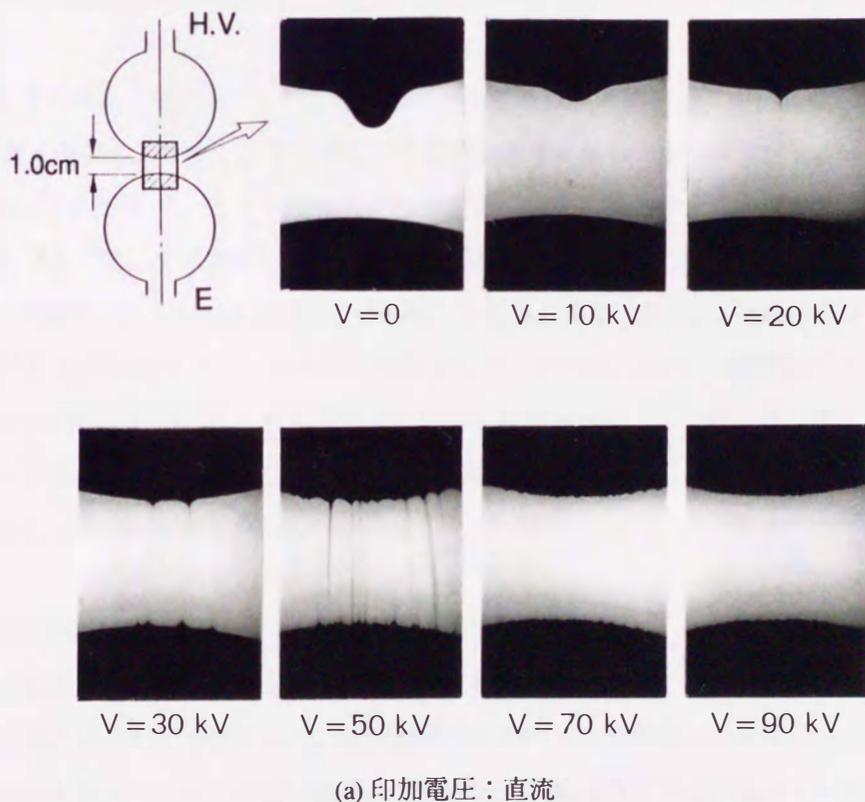
供試ギャップ間に浮遊するミストは印加電界により静電的な作用を受けると考えられる。したがって、直流および交流電圧を印加する場合、無電圧の状態でのミストの条件(粒径、形状、個数濃度など)はフ

ラッシュオーバーが発生する時点では必ずしも維持されていないことを考慮する必要がある。

ギャップ間に浮遊するミストの状況を直接観測するのは困難であるので、ここでは図4.2の垂直配置において、上部電極の底部に付着した $C_2Cl_4$ のしずくの変歪状況を観測する。主成分ガスは $N_2$ とし、しずくの変歪状況を高電界領域まで観測するために、ガス圧力は0.3MPaとした。印加電圧は直流および交流電圧とした。

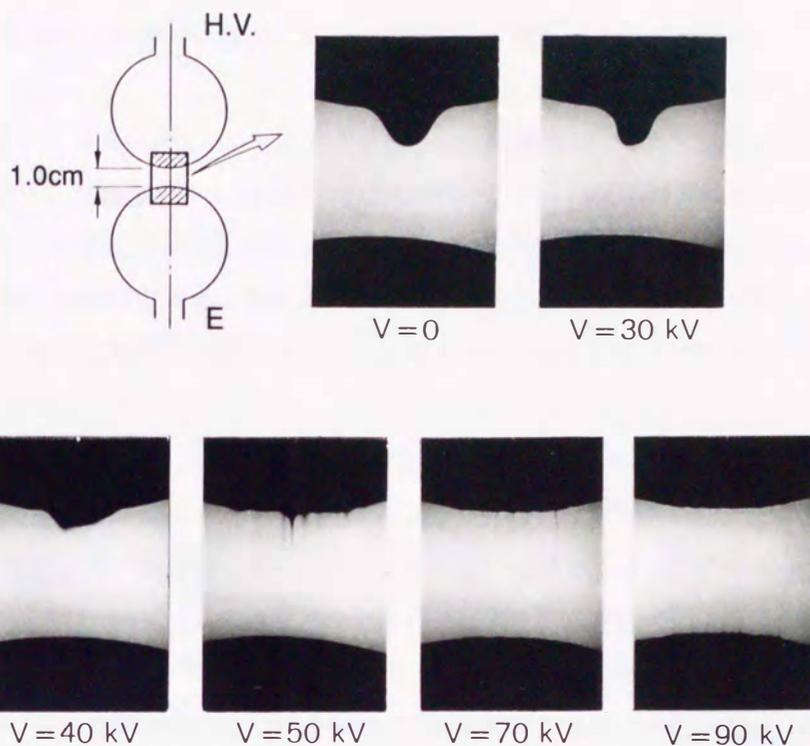
図4.22に観測結果を示す。同図(a)は直流(負極性)電圧を印加した場合で、印加電圧が10kV程度から変化が現れる。このとき、しずくは平たく広がる。しかし、20kVでは先端が鋭く尖り、細い糸状の滴下により電極間が橋絡されるようになる。さらに、30~50kVに電圧を上昇させると滴下箇所が増加し、接地側電極から重力に反して上方に伸びるものも現れる。滴下の軌跡は何れも電気力線に沿っている。印加電圧が70kVを越えると滴下箇所に現れるしずくの突起は小さくなり、電極表面のかなり広い範囲に多数現れるとともに、糸状の滴下から霧状に分散するようになり、電極間を完全に橋絡するものは少なくなる。■4.22(b)の交流電圧を印加した場合も上記と類似しているが、しずくが突起状になり、糸状の滴下が生じるのは、印加電圧50kV(波高値)以上で直流の場合よりもかなり高い。

以上の状況から、ギャップ間に浮遊するミストについても印加電界の作用が及ぶことは確実で、特に重力よりも強い作用をしずくに与える印加電圧(直流で30~50kV、電極表面電界は約50kV/cm)以上では、水



(a) 印加電圧：直流

図4.22 電極表面に付着した $C_2Cl_4$ のしずくの変歪状況(主成分ガス： $N_2$ 、0.3MPa)



※ V : 交流電圧の波高値

(b) 印加電圧：交流

図4.22 電極表面に付着した $C_2Cl_4$ のしずくの変歪状況 (主成分ガス： $N_2$ 、0.3MPa)

平配置においてもギャップ間のミストに大幅な擾乱が生じるはずである。このことは図4.21に示した $V_{DCB} = 40kV$ 以上で雷インパルスフラッシュオーバー電圧の急激な低下が生じ、かつフラッシュオーバー時間が短くなる結果と整合する。したがって、ミストの擾乱が初期電子の供給に寄与することになる。

なお、雷インパルス電圧を印加する場合は電圧の継続時間が短かいために、印加電界による電極表面のしずくやギャップ間のミストへの作用は小さいと考えられる。実際に図4.22と同様にしずくの状態を観測しても、雷インパルス印加時やフラッシュオーバーの際にしずくが滴下したり、揺れ動くことはなかった。また、フラッシュオーバーの経路がしずくから発することはまれであった。したがって、雷インパルス電圧の印加によるギャップ間のミストの変化は少なく、電極表面にしずくが存在してもフラッシュオーバー電圧を低下させる要因にはならないと考えられる。

#### 4.3.7 絶縁耐力向上要因の検討

前節までの実験結果により、雷インパルス印加時に生じるフラッシュオーバー電圧の上昇には初期電子の欠乏が決定的な要因となることを解明した。本実験条件においては初期電子の生成は主にガスの自然電離、高電界領域における負イオンからの電子離脱、光電子放出や電界放出など電極からの電子放出などにより行われていると考えられる。さらに、ミストからも局所的な高電界が印加されれば、電子放出が生じる可能性がある。これらに対し、ペーパおよびミストがどのようにして初期電子の欠乏をもたらすか、また、

電圧波形によってこれらの効果が絶縁特性に対してどのように現れるかを整理する。

#### (1) ベーパの効果

本実験で使用した $C_2Cl_4$ のベーパはハロゲン元素を含む電氣的負性ガスであり、それ自身の絶縁耐力が高いので、主成分ガスが $N_2$ の場合はベーパの混合だけでフラッシュオーバー電圧の上昇が生じる。この効果は主成分ガスに比べてベーパの分圧比が大きい場合、すなわち温度が高く $C_2Cl_4$ の蒸気圧が高い条件、あるいは主成分ガスの圧力が低い場合ほど大きく現れる。ただし、図4.3の結果から、ベーパの分圧比が大きくなっても、フラッシュオーバー電圧は飽和する傾向がある。このようなフラッシュオーバー電圧の上昇は電圧波形や電極の配置によらず生じる。

つぎに、4.3.2節で述べたように、ベーパ混合時の実験においては紫外線照射をした場合や何回かのフラッシュオーバーが生じた後で、希薄なミストが発生することがしばしば観測された。このことは、本実験条件ではほぼ飽和蒸気圧に相当する分圧でベーパが混合されていることを示し、このような雰囲気中では電子やイオン(ハロゲン元素を含む $C_2Cl_4$ のベーパ中では電子は単体で存在せず、ほとんどは負イオンと考えられる)が多数の中性分子を引き寄せて巨大化分子を生じたり、それらが凝縮核となってミストが形成される可能性を示唆する。ミスト混合時に生じる過飽和な雰囲気中では霧箱の内部と同様に荷電粒子が凝縮核になる可能性が十分に考えられるが、ベーパ混合時でも温度の不均一などにより、局所的に過飽和状態が生じる可能性がある。このような状態で負イオンを核としてミストが形成され、電子離脱が生じにくくなることで、負イオンが初期電子源としての機能を失うことは十分に考えられることである。さらに、 $C_2Cl_4$ のベーパにさらされた電極からは光電子放出が大幅に抑制されることから、これも含めた電極からの二次電子放出が抑制され初期電子の欠乏に寄与することも十分に考えられる。

ベーパはガスであり、その分圧比などの条件に電圧波形の影響はほとんど考えられない。したがって、電圧波形によってベーパの効果が変わるわけではないが、その現れかたが雷インパルスに対しては初期電子の欠乏による放電確率低下ということが生じる。

#### (2) ミストの効果

ミストを混合した状態は、液体が自然に蒸発する場合よりも多くの量の液体を強制的に主成分ガスに送り込んだ状態であり、ベーパ混合時よりも飽和性が増す(あるいは過飽和な状態となる)と考えられる。電子や負イオンの初期電子源としての寿命が、ベーパ混合時よりも1~2桁短くなる実験結果から、負イオンが凝縮核となってミストを形成したり、中性分子を吸着して巨大化するなど、初期電子源としての機能を失う可能性がさらに有力に考えられる。したがって、初期電子の欠乏による放電確率の低下から、雷インパルスフラッシュオーバー電圧が上昇する。また、交流フラッシュオーバー電圧の測定においては、数秒~数分という著しく長い放電時間遅れを生じ、印加電圧の上昇速度によってはフラッシュオーバー電圧の上昇が観測される場合がある。このように、初期電子の欠乏がベーパミスト誘電体の直接の絶縁耐力向上要因である。

しかし、逆にフラッシュオーバー電圧の上昇に寄与しない異物としての側面もあることを考慮する必要がある。とくに、直流や交流電圧を印加する場合は静電気がミストの形状や個数濃度を変化させ、ミストそ

のものが初期電子の供給に寄与する可能性がある。図4.22の結果から、ギャップ間のミストは直流および交流電界の印加により、凝集を生じたり、凝集したミストが電気力線に沿って突起状に変歪するなど、著しい擾乱を受けることが明らかとなった。突起状に変歪したしずくや突出した液膜の先端では電子放出が生じたり、その周囲の高電界領域では負イオンからの電子離脱が生じる可能性があり、ミストそのものが初期電子の供給に寄与する要因になり得る。この機構は図4.21の結果からも十分に考えられることであり、そのときの直流電界強度は約50kV/cm以上である。

以上の考察をもとに、ペーパミスト誘電体の絶縁特性に及ぼすペーパおよびミストの効果と印加電圧波形のとの関係を表4.3に整理する。

表4.3 ペーパミスト誘電体の絶縁特性に及ぼすペーパおよびミストの効果

	主成分ガス ⇒ ペーパ混合時 ⇒ ミスト混合時	印加電圧波形の条件	絶縁耐力	
ミストの有効な効果 (絶縁耐力向上に寄与)  	<ul style="list-style-type: none"> <li>○初期電子の寿命短縮</li> <li>・負イオンがミスト形成の凝縮核になる</li> <li>・負イオンが巨大分子化し、電子離脱が生じにくくなる</li> <li>○光電子放出の著しい抑制</li> <li>・照射光の遮蔽</li> <li>・電極表面の濡れ</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・雷インパルス (約220kV/cm以下)</li> </ul>	⇒大幅に向上	
	<ul style="list-style-type: none"> <li>○光電子放出の抑制</li> <li>・電極へのペーパの吸着</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・雷インパルス (約220kV/cm以下)</li> </ul>	⇒ばらつき増大	
	<ul style="list-style-type: none"> <li>○絶縁耐力が高いペーパの混合</li> </ul>	○同左	・全波形	⇒若干向上
		○ミスト周囲の電界上昇	・全波形	⇒影響小さい
ミストの異物として影響 (絶縁耐力向上に寄与しない)	<ul style="list-style-type: none"> <li>○初期電子の供給</li> <li>・変歪したミスト、突出したミストからの電子放出</li> <li>・変歪したミスト周囲の高電界領域で、負イオンからの電子離脱</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・直流、交流</li> <li>・直流(約50kV/cm以上) + 雷インパルス</li> <li>・雷インパルス (約220kV/cm以上)</li> </ul>	⇒向上しない	

4.3.1節で触れたように、これまでの検討ではミストの効果として、電子なだれやストリーマ進展を引き起こす電子やイオンをミストが捕獲する効果<sup>(3)(4)</sup>、ペーパと主成分ガスの混合によるシナジズム効果<sup>(3)(4)</sup>なども指摘されている。後者はペーパの分圧比を大きくしてもフラッシュオーバー電圧が飽和する傾向があることから、絶縁耐力の主要な向上要因にはあたらない。前者についてはこれまで最も有力に考えられてきた機構であるので、SF<sub>6</sub>の例で放電開始条件と臨界電子なだれ進展長を評価してみる。

SF<sub>6</sub>をはじめ電氣的負性ガスの放電進展条件は一般に次式で表される。

$$\int_0^{x_0} (\alpha - \eta) dx = K \quad (4.3)$$

ここで、 $\alpha$ ：電離係数、 $\eta$ ：付着係数、 $x$ ：電極からの距離、 $x_0$ ： $\alpha - \eta = 0$ となる点の距離、  
 $K$ ：電離指数

本実験で使用した電極系に対し、上式で  $K=18^{(39)}$  として計算した  $x_0$  とフラッシュオーバー電圧の計算結果を表4.4に示す。同表には、負極性直流電圧で測定したフラッシュオーバー電圧の実測値とフラッシュオーバー電界における  $\alpha$  の逆数(衝突電離が1回生じる間に電子が進む平均距離)を併記した。なお、 $\alpha$  および  $\eta$  の値は文献<sup>(40)</sup>に記載されているものを使用した。フラッシュオーバー電圧の計算値と実測値は比較的良く一致しているため、(4.3)による評価と  $K=18$  の仮定は妥当といえる。

表4.4 SF<sub>6</sub>中の臨界電子なだれ進展長の計算結果

ガス圧力 [MPa]	$x_0$ [cm]	$\alpha$ の逆数 [cm]	フラッシュオーバー電圧 [kV]	
			計算値	実測値
0.025	$4.6 \times 10^{-1}$	$3.4 \times 10^{-3}$	23.5	21.2
0.05	2.5	1.8	45.1	42.4
0.1	1.7	1.0	87.3	83.2
0.2	1.1	0.53	170.3	163.7
0.3	0.91	0.36	252.5	241.9
0.4	0.78	0.28	334.3	309.5

一方、超音波霧化法で発生させたミストの液滴間の平均距離は  $1.8 \times 10^{-2} \text{cm}^{(3)}$  程度と推定される。この値と表4.4の  $x_0$ 、および  $\alpha$  の逆数と比較すると、たとえば大気圧の結果では  $x_0$  は約10倍大きく、 $\alpha$  の逆数は約1/20である。したがって、衝突電離の個々の過程で電子がミストに捕獲される可能性は極めて小さいが、放電開始条件が成立する  $x_0$  の距離まで考えれば、電子なだれの進展をミストが抑止する可能性はある。ガス圧力が高くなれば  $x_0$  は小さくなるのでミストが電子なだれを抑止する可能性は低下し、ミストの効果は小さくなる。この傾向は定性的には図4.9の実測結果と一致する。

上記の機構は電圧印加時の電子なだれの進展に対して寄与し得るものであり、初期電子の生成量や寿命に直接には依存しないので、絶縁耐力の向上要因としては初期電子の欠乏とは異質のものである。上記の検討からミストが電子なだれやストリーマ進展を抑止する可能性は否定できないが、ベーパーミスト誘電体の絶縁特性として、初期電子を十分に供給すればフラッシュオーバー電圧の上昇がなくなること、ベーパー混合時でもフラッシュオーバー電圧が大幅に上昇する可能性があることなどを考慮すれば、この機構も絶縁耐力の主要な向上要因にあたらぬ。

#### 4.3.8 ベーパーミスト誘電体の実用分野

これまでの検討から、主成分ガスにミストを混合することにより、絶縁耐力が向上するためには次のような条件、あるいは制約が伴うことが判明した。

(1) 印加電圧が雷インパルスなど、電圧継続時間の短いサージ性過電圧であること。

(2) 印加電界に上限 (本実験では約220kV/cm) がある。すなわち、 $SF_6$  に対してはガス圧力が約0.2MPa以下であること。

(3) 一定値を越える直流電界 (本実験では約50kV/cm以上) または交流電界が重畳されない場合。

さらに、雷インパルスで絶縁耐力が向上する第一の要因は初期電子の欠乏であることが明らかとなった。これらの知見を基にベーパーミスト誘電体の実用分野を検討する。

実用の  $SF_6$  に対しては、ミストの効果が現れるのはガス圧力が0.2MPa程度以下の場合に限られ、実際のガス絶縁機器で使用される0.4~0.6MPaといった高ガス圧領域では絶縁耐力はむしろ低下する。さらに、絶縁耐力の向上が初期電子の欠乏に起因することから、電極面積が格段に大きな実機器においては、絶縁耐力の上昇割合として、本実験の供試ギャップで得られた値 (大気圧の  $SF_6$  に対して約1.6倍) 以上は期待できない。したがって、ガスの絶縁耐力を高める目的で実用のガス絶縁機器にベーパーミスト誘電体を適用することは、現状ではメリットが少ないと考えられる。大気圧程度の  $SF_6$  を主絶縁に使用するc-GIS (キュービクル形GIS) については、サージ性過電圧に対する絶縁信頼性の向上を目的として、相応のメリットが期待できる。

一方、不平等電界においては直流および交流電圧に対しても絶縁耐力が向上する可能性がある<sup>(5)(20)~(22)</sup>。この要因は電極の先端部にミストが凝集して電界電子放出を抑制する<sup>(5)</sup>、あるいは先端部の電界を緩和したり、一種のバリアとして作用する<sup>(20)~(22)</sup>ことなどが提案されているが、明確な根拠はない。ミストが電極の突起部など、高電界部分に選択的に凝集、付着して部分放電を抑制するならば、ガス絶縁機器の絶縁上の問題となるパーティクルの混入に対する対策になり得る。

ガス絶縁機器への適用に関しては絶縁耐力の向上だけでなく、冷却性能の向上を目指すことも有望であると考えられる。Westinghouse社におけるベーパーミスト誘電体に関する検討の当初の目的はガス絶縁変圧器の絶縁・冷却媒体への適用<sup>(41)</sup>であった。この検討は現在は継続されておらず、その後、液体絶縁媒体に比べて軽量化できるという特長を生かして、航空機搭載を目的とした高出力マイクロウェーブの発信・受信セルの絶縁媒体への適用が考えられている<sup>(31)</sup>。ガス絶縁変圧器はわが国でも既に275kV級の電力用機器が実用段階にあり<sup>(30)</sup>、防災上の理由により油絶縁からの脱却が進められている現状では、今後台数が増加することが予想される。現在、大容量機器では冷却効果を高めるために液体フロンを散布するなどの方法がとられているが、絶縁・冷却媒体として液滴混合ガスを適用する道が開けるかもしれない。

ガス絶縁機器以外への適用としては、パルスパワー機器への適用が有望である。パルスパワー機器では過電圧の時間領域が極めて短いので、ベーパーミスト誘電体の絶縁特性が有効に活用できる可能性がある。ミストの発生に動力を要するという問題も、パルスパワーの発生に合わせてパルスの発生させるといった方法で軽減される可能性がある。今後、これらの分野での検討が進むことが期待される。

その他、直流フラッシュオーバー電圧と雷インパルスフラッシュオーバー電圧の差が大きいこと、放電時間遅れが極めて長いことなどを活用する方法などがあるかもしれない。また、紫外線など短波長光を遮蔽する効果、放電に伴う衝撃音をミストにより緩和するといった効果の利用も考えられる。さらに、過飽和ベ-

パーを絶縁媒体に使用し、部分放電の発生によりミストを形成させるといった利用なども考えられる。これらを表4.5にまとめる。

表4.5 ベーパーミスト誘電体の実用分野

活用するミストの効果	適用機器	メリット	問題点または制約条件
絶縁耐力の向上	ガス絶縁機器全般	パーティクル、電極表面粗さに起因する絶縁性能の低下を軽減できる可能性がある	不平等電界での絶縁特性が十分に解明されていない
	c-GIS	大気圧付近のガス圧力領域での急峻波サージなどインパルス性過電圧に対する絶縁耐力の向上、それによる機器の縮小化	交流電圧の常規印加電界を高く設定できない
	パルスパワー機器	パルス性の過電圧に対する高い絶縁耐力の活用	対象となる過電圧の波形や電極構成などの整理が必要
	マイクロウェーブの発信・受信セル <sup>(31)</sup>	機器の縮小化・軽量化	検討例が少ない
冷却効果	ガス絶縁変圧器 <sup>(41)</sup>	ミストが蒸発する際の気化熱が冷却効果に寄与する	液体散布方式との優劣が不明
放電エネルギーの吸収	遮断器 <sup>(41)</sup>	アーク電流を抑制する可能性がある	検討例なし
放電時間遅れの増大	?	直流とインパルスでフラッシュオーバー電圧の差が大きいことの活用	?
紫外線の遮蔽・吸収	?	紫外線など短波長光の照射を減衰させる	?
遮音効果	?	放電発生時の衝撃音を緩和する	?
過飽和性	?	放電の発生に伴うペーパーの凝縮、ミスト形成の活用	?

#### 4.3.9 まとめ

ミストの混合によって初期電子の欠乏が生じる可能性に着目して、紫外線照射の効果、初期電子を十分に供給した場合の絶縁特性を実験的に検討した。さらに、直流および交流電圧に対してはフラッシュオーバー電圧の上昇が生じない点を解明するために、直流と雷インパルスを重畳した場合の絶縁特性についても検討した。これらの結果に基づき、ミストおよびペーパーのそれぞれについて、フラッシュオーバー電圧の上昇に寄与する効果と、逆に異物としての効果を印加電圧波形との関連も含めて整理した。主要な結果を以下にまとめる。

##### (1) 紫外線照射の効果

(1-1) 交流電圧を印加して測定した長時間V-t特性は右下りの特性となるが、照射によりフラッシュオーバーまでの時間(放電時間遅れ)が短くなる。放電時間遅れは照射時でも数秒~数分に達する場合がある。

(1-2) 雷インパルスフラッシュオーバー電圧に関しては、照射の有無で50%フラッシュオーバー電圧はさほど変わらないが、ばらつきは照射時の方が小さくなる。ペーパー混合時の雷インパルスフラッシュオーバー電圧は

照射の有無よりも、時間の経過に伴って上昇する傾向がある。印加電界が約220kV/cmを越える条件(主成分ガスがSF<sub>6</sub>の場合、ガス圧力が約0.2MPaを越える領域)では、雷インパルスフラッシュオーバー電圧は照射の有無やガスの条件(主成分ガス単体、ベーパー混合時、ミスト混合時)によらず、ほぼ同一の値となる。

(1-3) 照射によってベーパー混合時に極めて希薄なミストが自然発生することがある。この状態でフラッシュオーバー電圧を測定すると、直流および交流についてはベーパー混合時のフラッシュオーバー電圧とほぼ同じであったが、雷インパルスフラッシュオーバー電圧は極めて大きなばらつき(非フラッシュオーバーが連続した後、フラッシュオーバーが連続する現象)を示した。このような特性は初期電子の欠乏を示す。

(1-4) 電極からの光電子電流は、電極をC<sub>2</sub>Cl<sub>4</sub>のベーパーを含むN<sub>2</sub>やSF<sub>6</sub>中に放置した場合、あるいはC<sub>2</sub>Cl<sub>4</sub>を直接電極に塗布した場合、もとの状態に比べて1~2桁低下する。このことは初期電子の供給量が減少する要因となり得る。

## (2) 初期電子を十分に供給した場合の絶縁特性

(2-1) 初期電子を十分に供給することにより、雷インパルスフラッシュオーバー電圧の上昇がなくなり直流フラッシュオーバー電圧と同程度となる。

(2-2) 電子や負イオンが初期電子となり得る状態で存在する有効時間(寿命)はミストの混合により大幅に短くなる。主成分ガスがN<sub>2</sub>の場合、ミスト混合時の初期電子の寿命はベーパー混合時に比べて2桁程度短くなる。主成分ガスがSF<sub>6</sub>の場合も1桁程度短くなる。

(2-3) 上記の結果から、ベーパーミスト誘電体の雷インパルスフラッシュオーバー電圧が上昇する直接の要因は初期電子の欠乏といえる。

## (3) 直流・雷インパルス重畳時の絶縁特性

(3-1) 約50kV/cm以上の直流電界を重畳印加した状態では、雷インパルスに対してもフラッシュオーバー電圧の上昇が生じなくなる。また、フラッシュオーバー時間が短くなり、照射の効果がなくなる。この電界値はガスの種類や圧力によらずほぼ一定である。

(3-2) 上記の結果より、ミストの効果が消滅する要因は主成分ガスでなくミストそのものにあり、初期電子の欠乏にミストが関与していることが示唆される。

(4) 直流および交流電界が印加されると、ギャップ間のミストに著しい擾乱が生じる。電極が垂直配置の場合は突出した液膜がギャップ間を橋絡する現象を直接観測した。ギャップ間のミストに作用する静電力は重力の作用よりも強いことから、水平配置でも同様の状況が考えられる。

## (5) ベーパーミスト誘電体の絶縁耐力向上要因

(5-1) ベーパーの効果として、それ自身絶縁耐力が高く主成分ガスの絶縁耐力を上昇させること、過飽和な雰囲気を生じやすく負イオンがミスト形成の凝縮核になることで初期電子源としての機能を失うこと、電極からの光電子放出を大幅に抑制することなどが指摘できる。

(5-2) ミストの効果として、上記のベーパー効果をさらに高めること、初期電子の寿命がベーパー混合時よりもさらに短くなることが指摘できる。

- (5-3) 雷インパルス印加時は初期電子欠乏による放電確率の低下がフラッシュオーバー電圧の上昇に直接的に寄与する。
- (5-4) 直流および交流印加時はそれ自身が初期電子の供給に寄与するなど、ミストの異物としての効果が現れる。この状態では雷インパルスを重畳印加してもフラッシュオーバー電圧の上昇は生じない。
- (6) ベーパーミスト誘電体の実用分野として、パルスパワー機器の絶縁媒体への適用が有望である。

#### 4.4 結 論

本章では、ベーパーミスト誘電体の実用可能性を評価するうえで基礎となる絶縁特性と絶縁耐力の向上要因を実験的に検討した。主成分ガスを $N_2$ または $SF_6$ とし、 $C_2Cl_4$ をミストとして混合したベーパーミスト誘電体について、実用的規模の供試ギャップを使用し、0.025~0.4MPaという広範囲のガス圧力領域にわたって、その絶縁特性を明らかにした。

直流および交流フラッシュオーバー電圧は、ミストを混合しても主成分ガスとベーパーの混合で決まる値以上には上昇しない。すなわち、ミストの効果はほとんど現れない。これは、直流および交流電界の印加により、ミストに著しい擾乱が生じるためである。ただし、放電時間遅れが著しく長くなるので、交流電圧印加時で電圧上昇速度が速い場合などは、フラッシュオーバー電圧の上昇が観測される場合がある。

一方、雷インパルス印加時はミストの混合により、ベーパーだけを混合した場合よりもフラッシュオーバー電圧が上昇する。この上昇割合はガス圧が低い場合ほど大きい。雷インパルスフラッシュオーバー電圧が上昇する直接の要因は初期電子の欠乏による放電確率の低下である。初期電子の欠乏はミストの混合により、初期電子源となる電子や負イオンが短時間のうちにその機能を失うこと、および電極からの光電子放出が抑制されることによってもたらされる。

#### 参考文献

- (1) D.R. James, L.G. Christophorou & R.A. Mathis: "New unitary and multicomponent gaseous dielectrics", Gaseous Dielectrics II, L.G. Christophorou, ed., Pergamon Press, New York, pp.115-125 (1980)
- (2) R.E. Wootton, S.J. Dale & N.J. Zimmerman: "Electric strength of some gases and gas mixtures", *ibid*, pp.137-146 (1980)
- (3) R.T. Harrold: "Vapor-mist dielectrics", 1981 Annual Report of the Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, pp.360-369 (1981)
- (4) R.T. Harrold: "Physical aspects of vapor-mist dielectrics", 1982 IEEE Industry Applications Society Conference, San Francisco, CA, pp.1172-1178 (1982)
- (5) R.T. Harrold: "Partial discharge suppression in vapor-mist dielectrics", 1984 IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, Clayton, DE, pp.21-24 (1984)
- (6) 宮本, 金子, 下妻, 田頭: "ベーパーミスト絶縁の研究(I)", 昭和60年電気関係学会北海道支部連合大会, No.213 (1985)

- (7) 宮本, 金子, 下妻, 佐藤, 田頭: "ペーパーミスト絶縁の研究(II)", 昭和61年応用物理学会北海道支部大会, B25 (1986)
- (8) 宮本, 金子, 下妻, 佐藤, 田頭: "ペーパーミスト絶縁の研究(IV)", 昭和61年電気学会全国大会, 178 (1986)
- (9) 宮本, 金子, 下妻, 佐藤, 田頭: "ペーパーミスト絶縁の研究(V)", 電気学会放電研究会資料, ED-86-68 (1986)
- (10) H. Tagashira, Y. Miyamoto, Y. Kaneko, M. Shimozuma & T. Sato: "Breakdown voltage measurement of some vapor-mist dielectrics", 5th Int. Symp. on Gaseous Dielectrics, Knoxville, Tennessee, U.S.A. (1987)
- (11) 高橋, 金子, 下妻, 佐藤, 田頭: "ペーパーミスト絶縁の研究(X)", 昭和63年電気学会全国大会, 105 (1988)
- (12) 高橋, 金子, 下妻, 佐藤, 田頭: "ペーパーミスト絶縁の研究(XIII)", 平成元年電気学会全国大会, 143 (1989)
- (13) 高橋, 金子, 下妻, 佐藤, 田頭: "ペーパーミスト絶縁の研究(XIV)", 電気学会放電研究会資料, ED-89-58 (1989)
- (14) 八島, 藤波, 宅間: "液滴混合ガス ( $N_2 + C_2Cl_4$ ) の準平等電界ギャップにおける絶縁破壊電圧特性", 昭和62年電気学会全国大会, 177 (1987)
- (15) 八島, 藤波, 宅間: "液滴混合ガスの絶縁特性", 電力中央研究所報告, T87030 (1988)
- (16) 八島, 藤波, 宅間: "液滴混合ガス ( $SF_6 + C_2Cl_4$ ) の準平等電界ギャップにおける雷インパルスフラッシュオーバー特性", 昭和63年電気学会全国大会, 103 (1988)
- (17) 八島, 藤波, 宅間: "液滴混合ガスの絶縁耐力向上要因の検討", 電力中央研究所報告, T88040 (1989)
- (18) M. Yashima, H. Fujinami & T. Takuma: "Effect of carbon-chloride mist on flashover characteristics of nitrogen and  $SF_6$  under nearly uniform fields", 6th Int. Symp. on High Voltage Eng., 49.10, New Orleans, Louisiana (1989)
- (19) M. Yashima, H. Fujinami & T. Takuma: "Breakdown characteristics of gases mixed with tetrachloroethylene mist under nearly uniform fields", IEEE Trans. on Electrical Insulation, Vol.EI-25, No.2, pp.371-379 (1990)
- (20) 仲西, 花崎, 大寺: " $C_2Cl_4$  ベイパーミスト誘電体の絶縁破壊特性", 昭和62年電気学会全国大会, 175 (1987)
- (21) 仲西, 井波: "ベイパーミスト誘電体の交流・直流破壊特性", 昭和63年電気学会全国大会, 104 (1988)
- (22) 仲西, 井波: "ベイパーミスト誘電体の交流・直流絶縁破壊特性", 電気学会放電研究会資料, ED-88-54 (1988)
- (23) K. Nakanishi, K. Inami & Y. Shibuya: "Breakdown characteristics of  $C_2Cl_3F_3$  vapor-mist dielectrics", IXth Int. Conf. on Gas Discharge and Their Applications, Venezia, pp.19-23 (1988)
- (24) 矢島, 曾禰, 光井: "ペーパーミストにおける過飽和蒸気の影響", 昭和63年電気学会全国大会, 106 (1988)
- (25) 平林, 曾禰, 光井: "ペーパーミスト形成の破壊電圧に与える影響", 電気学会放電研究会資料, ED-88-53 (1988)
- (26) 矢島, 曾禰, 光井: "交流電圧におけるペーパーミストの効果", 電気学会放電研究会資料, ED-89-44 (1989)
- (27) 曾禰, 矢島, 田畑, 光井: "各種ペーパーミスト材料の効果", 電気学会放電研究会資料, ED-89-45 (1989)
- (28) 矢島, 飯島, 曾禰, 光井: "各種気体のペーパーミスト効果", 電気学会放電研究会資料, ED-89-60 (1989)
- (29) Final Report EPRI Contract EL-302: "Gas insulated fluidized bed transformer" (1977)
- (30) Y. Harumoto, Y. Kabayama, Y. Kuroda, Y. Yoshida, H. Kan, Y. Miura, E. Tamaki & T. Hakata: "Development of

275kV EHV class gas-insulated power transformer", IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, Vol.PAS-104, No.9, pp.2501-2507 (1985)

- (31) R.T. Harrold: "Radar frequency and transient electrical breakdown in vapor-mist dielectrics", 1987 Annual Report of the Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, pp.479-491 (1987)
- (32) (社)日本化学会: "化学便覧応用編", 丸善 (1980)
- (33) ダイキン工業: "ダイフロンガスハンドブッケー冷媒編一"(1984)
- (34) 住友スリーエム(株)資料: "フロリナート"
- (35) (社)日本化学会: "化学便覧基礎編Ⅱ", 丸善, p.111 (1984)
- (36) 御所: "ギャップの分割による耐圧の上昇", 昭和62年電気学会全国大会, 158 (1987)
- (37) 野口, 堀井: "高気圧窒素中の交流破壊電圧と統計的時間遅れ", 電気学会雑誌, Vol.87-12, No.951, p.2477-2484 (1967)
- (38) 御所, 佐伯: "大気中誘電体表面からの電子放出", 放電研究, No.119, pp.9-12 (1988)
- (39) A. Pedersen: "Criteria for spark breakdown in sulfur hexafluoride", IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, Vol.PAS-89, No.8, pp.2043-2048 (1970)
- (40) 電気学会: "放電ハンドブック", p.26 (1975)
- (41) R.T. Harrold: "Ultrasonic fluid-atomizing cooled power transformer", U.S. Patent, No.4350838 (1982)