

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 :

3.3.4 雷インパルス放電進展の基礎特性

3.3.3節での検討結果から、放電進展の様相はコロナあるいはリーダの発生からフラッシュオーバに至るまでの全体で見れば、雷インパルスと振動性インパルスでは大きく異なり、さらにガス圧力の影響が顕著であることが判明した。すなわち、統計的時間遅れ、コロナの形成と消滅、リーダの形成、リーダのステップ進展、フラッシュオーバという過程に、振動性インパルスの波頭の急峻な立上りと電圧の振動が大きな影響を与える。そこで、これらの点を定量的に評価するために、まず雷インパルス印加時の放電進展について、統計的時間遅れ、形成時間遅れ、ならびにリーダステップ時間などの諸数値を整理する。

通常、統計的時間遅れは印加電圧が放電を起こし得る最低値 (V_0) に達した後、初期電子発生までの時間遅れを指すが、ここでは雷インパルスにおける放電進展観測結果から、最初のコロナが発生するまでの時間遅れ (T_{s1}) とリーダが形成されるまでの時間遅れ (T_{s2}) とに区別して考える。形成時間遅れ (T_f) はリーダが形成された後、フラッシュオーバに至るまでの時間遅れとする。これらの時間遅れは一般には矩形波による多数回の放電時間遅れの測定から、ラウエ・プロットにより求められる。今回の波形条件でのラウエ・プロットの評価は難しいため、便宜的に最初のコロナが出現した時点を初期電子の発生とみなし、観測例中最も低い電圧でコロナが発生したケースを $T_{s1}=0$ と定義し、その時の印加電圧の瞬時値を V_0 とした。 V_0 の値は後掲の表3.4に示す。また、この時点からリーダ進展が開始するまでの時間を T_{s2} とした。これらの関係の概略を図3.17に示す。

正極性雷インパルス放電進展における T_{s1} および T_{s2} 、 T_f とガス圧力との関係を図3.18、図3.19に示す。これらの時間遅れには電界強度 (印加電圧) も影響すると考えられるが、ここでは印加電圧を各条件で一定 (各ガス圧力での50%フラッシュオーバ電圧の約1.25倍) としており、ガス圧力についてのみ整理した。 T_f に

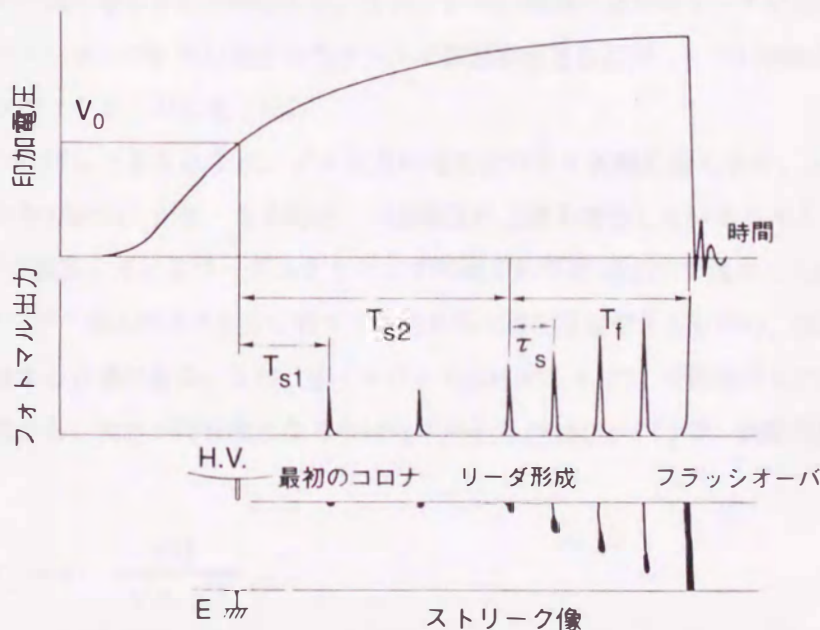


図3.17 雷インパルスに対する T_{s1} 、 T_{s2} 、 T_f の定義

についても同様に表示した。一方、リーダステッピング時間 (τ_s) についてはストリーク像から直接読み取り、印加電圧の瞬時値との関係を図3.20に表示した。同図には後述の(3.1)式により計算した τ_s の値(破線)と、4.2MHzおよび7.3MHzの振動性インパルスの振動周期に相当する時間(それぞれ約240ns, 140ns)を実線で併記した。

これらの結果から、 T_{s1} は特に低ガス圧力でばらつきが大きく、 T_{s2} は T_{s1} に比べればばらつきが小さいことが判る。おおむね T_{s1} は圧力の増加につれて大きくなり、 T_{s2} は0.1MPaから0.3MPaにかけては長くなるが、0.5MPaでは逆に短くなり、 T_{s1} との差が小さくなる。本実験では紫外線照射は行っていないので、正極性電圧による放電の場合、初期電子は主として宇宙線などによるガスの自然電離、高電界領域での負イオンからの電子離脱によって供給されると考えられる。このとき、負イオンの存在確率はガス分子の密度(ガス圧力)とともに高くなるので、ガス圧力の上昇に伴い T_{s1} は短くなると考えられる。一方、ガス圧力が高くなると、ガスの電離が生じ得る臨界電界が上昇して有効な負イオンが存在すべき空間の体積は著しく小さくなる。図3.18の T_{s1} の傾向はこの後者の効果の方が大きいことを示唆する。

一方、 T_{s2} は T_{s1} に比べてかなり大きく、コロナが現れた後、リーダが形成されるまでの時間遅れ ($T_{s2} - T_{s1}$) は T_{s1} の傾向とは逆に高ガス圧力の方が短くなる。この時間遅れの間突起電極先端では間欠的にコロナが生じるほかは、大部分発光のない時間が経過する。コロナがリーダに転換する条件は現状では十分明確になってないが、コロナの発生によって生成された空間電荷による電界緩和、あるいは中性ガス分子への電子付着によって、一度発生したコロナが消滅する過程を繰り返すなかで、さらに電子増倍を生じて導電性の高いリーダに成長するものが現れると考えられる。したがって、 T_{s1} や T_{s2} は電圧波形の波頭峻度の影響を大きく受けることが予想される。

T_f のばらつきは比較的小さく、ガス圧力の増加につれて短くなる。この傾向はガス圧力の上昇とともにリーダ進展速度が速くなることに対応する。なお、 $p = 0.1\text{MPa}$ の場合はリーダが形成されても途中で進展が停止し、フラッシュオーバーに至らなかったケースが数例観測されたが、 $p = 0.3\text{MPa}$ 以上では一度リーダが生じると必ずフラッシュオーバーに至った。

τ_s はかなりのばらつきを示すが、ガス圧力の増加につれて大幅に短くなる。 $p = 0.1\text{MPa}$ に比べて、0.3MPa および0.5MPaで τ_s が短くなるのは、印加電圧の上昇も寄与していると考えられる。図3.20の実線は Luxa氏ら⁽¹⁶⁾が提案しているリーダステッピング時間の計算式(3.1)式を適用した結果を示す。この式により、 τ_s のオーダ、電圧やガス圧力に対する傾向をある程度推定できるものの、実際の現象はばらつきが大きい点に留意する必要がある。また、雷インパルスに対する τ_s と、今回使用した振動性インパルスの振動周期との比較から、両者が同程度となるのは低ガス圧力(0.1MPa以下)で、振動周波数4 MHz以上のケースである。

$$\tau_s [\text{ns}] = \frac{375}{V \times p^2} \quad (3.1)$$

ここで、 V : 印加電圧 [kV]、 p : ガス圧力 [MPa]

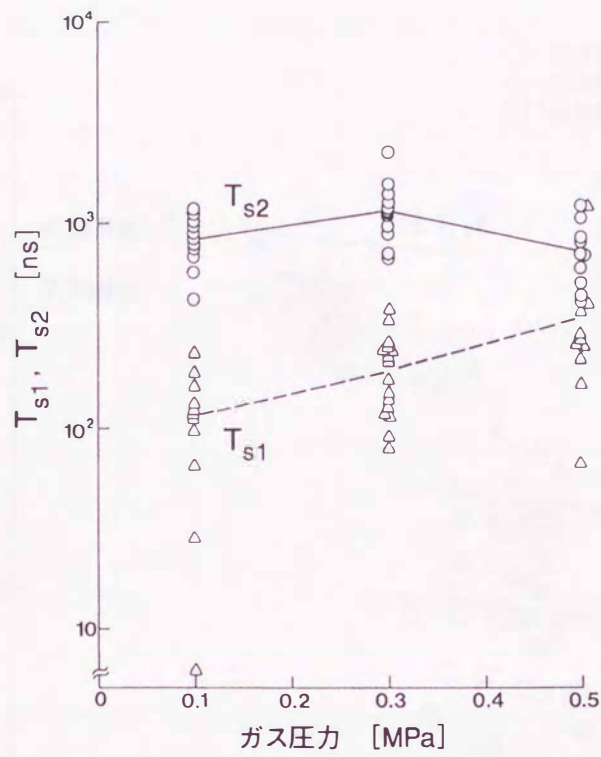


図3.18 雷インパルスに対する T_{s1} , T_{s2} とガス圧力の関係 (正極性)

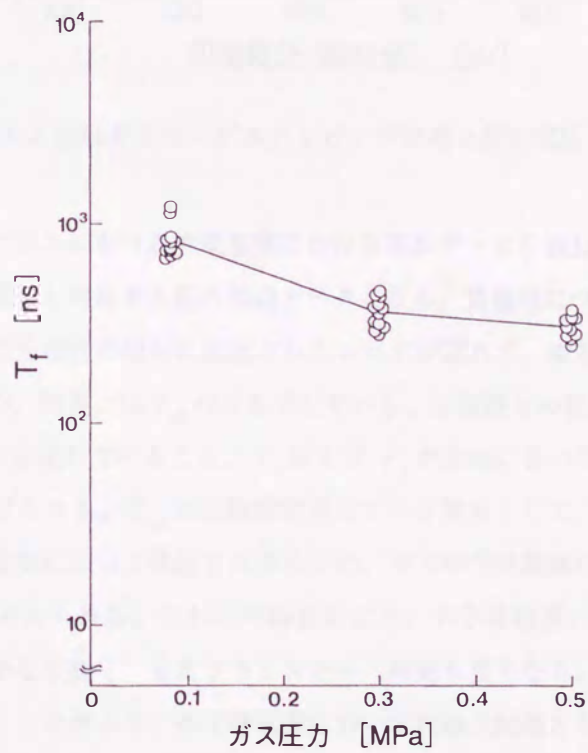


図3.19 雷インパルスに対する T_f とガス圧力の関係 (正極性)

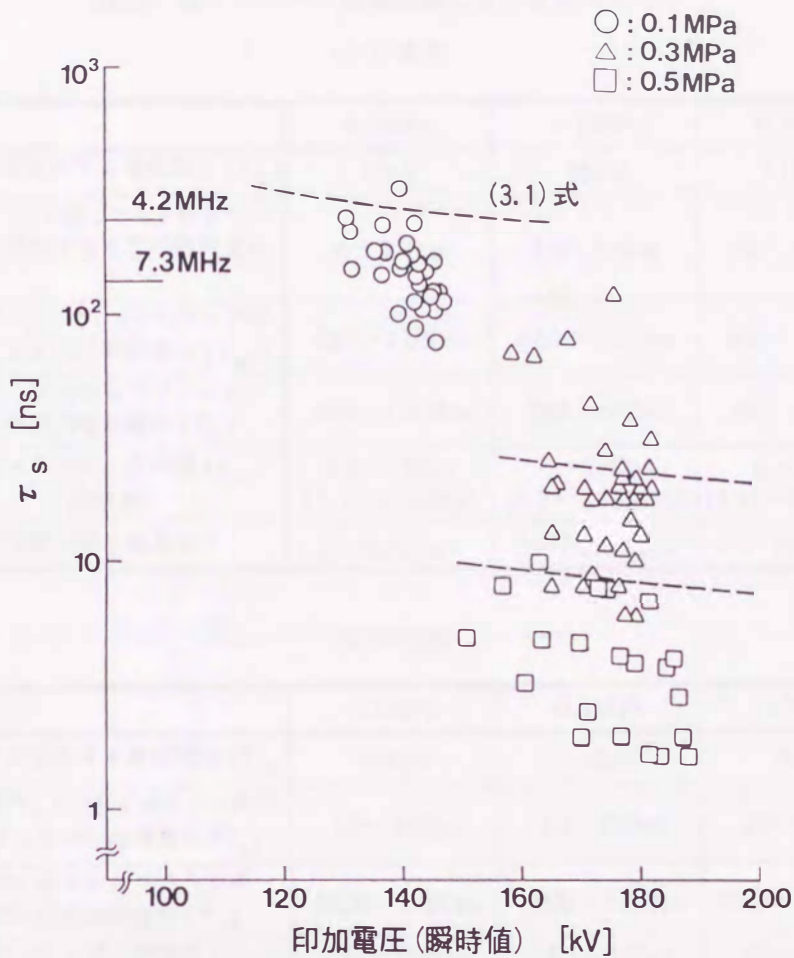


図3.20 雷インパルスに対するリーダステッピング時間と印加電圧との関係(正極性)

以上の結果より、雷インパルスにおける放電進展における基本データを表3.4にまとめる。これらは振動性インパルスにおける放電進展と対比する際の基礎データとなる。負極性についても同様の諸特性を表3.4に併記したが、前述のように正極性の場合に観測されたコロナが現れず、最初の発光がリーダ状のままステップリーダとなるため、同表には T_{s2} のみを示している。正極性との相違として、 V_0 が約2倍程度高いこと、 T_{s2} が短く比較的安定していること、 T_f および τ_s が大幅に長いこと、リーダ先端の進展速度が大幅に遅いことなどが挙げられる。 T_{s2} が比較的安定している理由として、負極性の場合には初期電子が突起電極先端から電界電子放出によって供給され得るため、ガスの自然電離の状態や負イオンの密度などにあまり依存しないことが考えられる。これらの特性により、不平等電界においては負極性のフラッシュオーバー電圧は正極性よりもかなり高く、またフラッシュオーバー時間も長くなる。つまり、 $V-t$ 曲線が右上方向に推移する傾向となる。したがって、不平等電界において絶縁上問題となる過電圧の極性は正極性といえる。

表3.4 雷インパルス放電進展における基本データ

(a) 正極性

	0.1MPa	0.3MPa	0.5MPa
コロナが発生する最低電圧 (V_0)	72kV	88kV	111kV
電圧が V_0 に達してから最初のコロナが発生するまでの時間遅れ (T_{s1})	6~230ns	80~390ns	70~1200ns
電圧が V_0 に達してからリーダが発生するまでの時間遅れ (T_{s2})	450~1200ns	660~2200ns	400~1200ns
リーダの発生からフラッシュオーバーまでの形成時間遅れ (T_f)	660~1200ns	280~460ns	240~370ns
リーダステッピング時間 (τ_s) (周波数)	80~320ns (3.1~13MHz)	6~120ns (8.3~170MHz)	2~10ns (100~500MHz)
リーダ先端の平均進展速度	3~6cm/ μ s	9~14cm/ μ s	11~16cm/ μ s

(b) 負極性

	0.1MPa	0.3MPa	0.5MPa
リーダが発生する最低電圧 (V_0)	158kV	172kV	186kV
電圧が V_0 に達してからリーダが発生するまでの時間遅れ (T_{s2})	10~140ns	10~270ns	20~220ns
リーダの発生からフラッシュオーバーまでの形成時間遅れ (T_f)	1600~2400ns	1300~3100ns	1500~2600ns
リーダステッピング時間 (τ_s) (周波数)	400~1300ns (0.8~2.5MHz)	100~700ns (1.4~10MHz)	50~400ns (2.5~20MHz)
リーダ先端の平均進展速度	2~3cm/ μ s	2.5~4cm/ μ s	3~5cm/ μ s

3.3.5 放電進展に及ぼす電圧振動の効果

(1) リーダ形成に及ぼす波頭峻度の効果

雷インパルスに対する放電進展においては、最初のコロナ発生からリーダ進展の開始までに数100ns~1 μ s程度の時間遅れがあるのに対し、振動性インパルスでは電圧の立上りから100~300ns後にはリーダの形成が観測されている。振動性インパルスでリーダ形成までの時間遅れが短いのは明らかに電圧の波頭峻度に起因しており、急峻な場合ほどコロナによる電界緩和効果(コロナ安定化作用)が現れにくく、コロナからリーダへの転換過程が容易になるためと考えられる。実際、0.96MHzの振動性インパルスよりもさらに緩波頭の0.75MHzの振動性インパルスを印加した場合、第1波ではコロナやリーダによる発光がなく、第2波になってリーダ進展が生じたケースが数例観測された。図3.8~3.9に示したように、 $V-t$ 特性の短時間領域では振動性インパルスの $V-t$ 曲線が雷インパルスより低くなる。この特性は振動性インパルスの方が放電開始に必要な最低の電圧レベル (V_0) に印加電圧が早く到達することもあるが、リーダ形成まで

の時間が大幅に短いことが大きく寄与していると解釈できる。

(2) リーダ進展に対する電圧振動の効果

Hiesinger氏ら⁽⁴⁾は振動性インパルスの電圧振動周期が短くなると、リーダチャンネルに供給されるエネルギーが多くなり、振動周期が τ_s に同期したときに最もリーダ進展が促進されると主張している。振動性インパルスの電圧振動周期は0.96, 4.2, 7.3MHzに対してそれぞれ約1040, 240, 140nsである。4.2および7.3MHzの振動性インパルスは雷インパルスにおける $p = 0.1\text{MPa}$ の τ_s とほぼ同期する振動周期であるが、図3.4に示すようにフラッシュオーバー電圧は雷インパルスよりも高い。また、 $p = 0.5\text{MPa}$ の場合にもフラッシュオーバー電圧がほとんど変わらない点は説明できない。さらに、7.3MHz振動性インパルスの $p = 0.1\text{MPa}$ のケースでは、電圧のピークごとにリーダが現れるとは限らないことから、電圧振動がリーダ進展を促進する可能性は考えにくい。

$p = 0.3\text{MPa}$ 以上では τ_s が電圧振動周期よりも1ケタ、あるいはそれ以上に短くなり、電圧振動の各ピーク付近でのみリーダは進展し、下降時は中断される。したがって、フラッシュオーバーに至るまでの時間が延ばされる。振動性インパルスでの電圧振動の各ピーク付近におけるリーダ進展状況は雷インパルスとほぼ同じであり、リーダ進展速度が特に増加することもない。したがって、放電進展現象には印加電圧の振動がリーダ進展を促進して雷インパルスよりもフラッシュオーバー電圧を低下させる要因は見あたらない。

(3) 逆放電に対する振動周波数の効果

松本氏ら⁽²⁶⁾は本実験と同等規模の電極系に対し、2.47MHzの振動性インパルスで観測された逆放電について、空間電荷の電荷量、リーダ先端電界、電子および正・負イオンの移動速度などを評価している。これによれば、電圧の各周期に対応する時間に空間電荷がドリフトで移動できる距離はわずか0.1~0.2mmで、ギャップ空間ではほとんど停止した状態と見なせるため、逆放電が生じる条件が満足されたとしている。

上記の評価から、逆放電についてはこれまで高い周波数の方が生じやすいと考えられていたが、今回の実験で使用した7.3MHzの振動性インパルスでは観測されなかった。 $p = 0.5\text{MPa}$ に対する観測例によれば、振動周波数が低い場合(0.96MHz)は明瞭な逆放電が観測されたが、周波数が高くなるにつれて逆放電の発光が弱くなった。この原因として、振動周波数が高い場合は逆電界が形成されるまでの時間が短く、リーダチャンネルの導電性がチャンネル内電荷の再結合によって低下する前に逆放電電流が流れるため、電離状態を新たに高める必要がないことが考えられる。したがって、7.3MHzの振動性インパルスの場合にはリーダチャンネルの導電性が常に高いので、チャンネル内に逆放電による電流が流れても発光はほとんど生じないと考えられる。振動周波数が低い場合はリーダ進展が停止した後、次の電圧ピークまでリーダチャンネルの導電性が低下するため、その後のリーダ進展には導電性の回復が必要であり、その結果リーダ進展がさらに遅れると考えられる。図3.4のU形特性の左側の領域はこうした理由により、フラッシュオーバー電圧が上昇した可能性がある。

(4) フラッシュオーバー電圧に対する電圧波形減衰の効果

今回使用した7.3MHzの振動性インパルスは第1波のピーク値に対して後続波の減衰が大きく、フラッシュオーバーが生じる点では50～60%程度の電圧になる。このため、リーダ進展の途中で電圧が低下するために放電進展が継続できない可能性がある。雷インパルスに対しては、リーダが形成されながらフラッシュオーバーに至らなかったケースは、 τ_s が長い $p = 0.1\text{MPa}$ の場合に1例観測されただけであるが、7.3MHzの振動性インパルスでは $p = 0.5\text{MPa}$ でも数例観測された。振動周波数が4MHz以上の領域(図3.4のU形特性の右側領域)では、振動周波数の上昇とともにフラッシュオーバー電圧が上昇しているが、印加電圧波形の減衰が大きいためこのような特性が生じたと考えられる。したがって、減衰の小さい高周波の振動性インパルスを使用すれば、図3.4のU形特性の右側領域は平坦な特性になる可能性がある。

3.3.6 雷インパルスと振動性インパルスに対する耐電圧の評価

3.3.5節で述べたように、振動性インパルスの放電進展において、振動周波数が4.2MHz以下の場合にはガス圧力 $p = 0.1 \sim 0.5\text{MPa}$ に対して明瞭な逆放電が観測された。逆放電に伴う発光は、リーダチャンネル内電荷の再結合によってチャンネルの導電性が低下した状態に逆放電電流が流れて再び電離状態が高まる際に生じると考えられ、進展しないリーダにエネルギーを消費することになる。一方、7.3MHzの振動性インパルスでは逆放電の発光は観測されず、 $p = 0.3 \sim 0.5\text{MPa}$ では雷インパルスと同様の放電進展が電圧の振動によって分断された様相であった。振動性インパルスにおけるこれらの現象は放電進展を促進してはならず、フラッシュオーバー電圧の低下に寄与し得る要因は存在しない。7.3MHzの振動性インパルスに対する $p = 0.1\text{MPa}$ のケースでは、リーダステップ時間と電圧振動周期が近く、電圧振動がリーダ進展を促進する効果がないとは断定できないが、実機器では0.5MPa程度のガス圧力が対象となることから、数10MHz以下の振動性インパルスに対してはこのような効果は問題とするには及ばない。

以上より、放電進展現象からは振動性インパルスのフラッシュオーバー電圧が雷インパルスよりも低下する要因は見あたらない。したがって、3.2.3節で述べたように、条件によっては振動性インパルスの最低フラッシュオーバー電圧が雷インパルスよりも最大10%程度下回るが、この現象は振動性インパルスフラッシュオーバー電圧の著しいばらつきによるものと考えられ、この10%の相違は有意差とはいえない。さらに、各種ギャップ条件に対して、雷インパルス、振動性インパルス両者の絶縁特性を調べたが、この相違が拡大する傾向は見られなかった。JEC-0102-1994「試験電圧標準」の制定に伴って500kV系統に新たに導入された雷インパルス耐電圧試験電圧値(LIWV)の低減値1425kVは、最も過酷な断路器サージの波高値(2.89pu = 約1300kV)に対してもなお約10%の余裕がある。したがって、現状ではこの低減LIWVを採用した機器に対しても、雷インパルスによる絶縁試験で断路器サージに対する機器絶縁の検証も可能であり、LIWVの低減により従来よりも機器の縮小化が可能となる。500kV級GISに対しては、従来のLIWV = 1550kVから1425kVへの低減により、相分離型母線部で約10%、3相一括型主母線部で約20%のシース径の縮小が可能であり⁽²⁷⁾、これによる相応のコスト低減も実現できる。

3.3.7 まとめ

振動性インパルスに対するSF₆の放電進展機構を雷インパルスとの相違、振動周波数の効果、ガス圧力や電圧極性の効果、逆放電の関与などに着目して検討した。主要な結果を以下にまとめる。

(1) コロナの発生からフラッシュオーバーに至るまでの全体の放電進展現象は、雷インパルスと振動性インパルスとは極めて異なり、それぞれガス圧力や印加電圧の極性などの影響を顕著に受ける。

(2) 雷インパルスに対する放電進展

(2-1) 正極性の場合、印加電圧の瞬時値がある値に達した後、コロナの発生と消滅を繰り返し、その後リーダが形成され、それが間欠的な発光を伴うステップ状の進展をしてフラッシュオーバーに至る。

(2-2) ガス圧力を高くするにつれて、以下の特性が現れる。

- ・コロナが発生する最低電圧が上昇する。
- ・最初のコロナが発生するまでの時間遅れが長くなる。
- ・リーダステップング時間が短くなる。
- ・1回のステップで新たに伸びるリーダの長さが短くなる。
- ・リーダチャンネル(前のステップまでのリーダ進展経路)の発光が弱くなる。
- ・リーダ先端の進展速度が速くなる。

(2-3) 負極性の場合、放電進展の基本様相は正極性と同様であるが、コロナに相当する発光がなく、最初の発光がリーダ状で、そのままステップリーダを経てフラッシュオーバーに至る。正極性と比べると、印加電圧が高いにもかかわらず、リーダステップング時間が大幅に長く、リーダ先端の進展速度が遅い。また、高ガス圧力でもリーダチャンネルの発光が明るい。

(2-4) リーダが発生する電圧が高いこと、リーダの進展速度が遅いことが負極性のV-t特性を正極性よりも長時間側あるいは高電圧側にシフトさせる要因と考えられる。

(3) 振動性インパルスに対する放電進展

(3-1) 正極性の場合、電圧振動の各ピークに対応してリーダが進展するが、電圧下降時には新たなリーダは進展しない。振動周波数が4.2MHz以下の場合、電圧振動の極小値付近で、それまでに進展した経路が間欠的に発光する逆放電が観測されるが、7.3MHzではこのような発光がなく、リーダ進展が中断された様相となる。

(3-2) 負極性の場合も基本的に同様であるが、逆放電の発光は明瞭でなく、電離域がぼんやりとした様相となる。また、リーダステップング時間が長いため、低ガス圧力では電圧がピークとなるときにリーダが存在しない場合が多い。

(3-3) リーダ形成までの時間が雷インパルスの場合よりも大幅に短い。これは波頭峻度が大きいこと、コロナ安定化作用が小さいことに起因すると考えられる。このため、V-t特性の短時間領域で雷インパルスよりもフラッシュオーバー電圧が低下する。

(3-4) 電圧振動の各ピークに対応する放電進展は雷インパルスと同様であり、電圧振動の極小値付近での逆放電あるいはリーダ進展の中断を考慮すれば、振動性インパルスのフラッシュオーバー電圧が雷イ

ンパルスよりも低下する要因は見あたらない。

- (4) 500kV系統に新たに導入された雷インパルス耐電圧試験電圧値の低減値(1425kV)を採用した機器に対しても、雷インパルスによる絶縁試験で断路器サージに対する機器の絶縁検証が可能である。

なお、現状ではGISの雷インパルス耐電圧試験電圧値は断路器サージの波高値よりも高いが、今後、避雷器の一層の高性能化やより合理的な配置などにより、絶縁レベルの低減がさらに推進される場合は、断路器サージが試験電圧を決定する要因となる可能性がある。また、UHV機器については雷サージと断路器サージの波高値が極めて近いので、別途検討が必要である。GISの現地試験については試験の簡便性から、振動性インパルスによる試験が有利となる可能性があるため、絶縁試験の方法や試験電圧波形の選定についてはなお検討すべき点がある。

3.4 電荷蓄積があるスペーサ沿面の絶縁特性

3.4.1 まえがき

ガス絶縁機器では高電圧導体を支持するために固体絶縁物(スペーサ)がどうしても必要となる。ガス絶縁機器で使用されるスペーサ材料は、一般にエポキシ樹脂を基材に機械的強度を高めるためアルミナやシリカなどのセラミックスを充填し、酸無水物系の硬化剤を用いて注型成形したものである。スペーサ自身は固体絶縁物のため一般に絶縁破壊強度はガスよりも高いが、沿面でのパーティクルの付着や電荷蓄積の可能性があり、ガスとの誘電率の違いにより金属導体との接続部に隙間があるとガス中の電界が上昇して部分放電を生じやすいこと、スペーサ沿面の金属導体との境界面(トリプルジャンクション)に著しく電界が集中する可能性があるなど、一般に絶縁上の弱点となりやすいことに留意が必要である。スペーサにもサージ性の過電圧は印加されるので、急峻波サージに対するガス絶縁機器の信頼性を高めるうえで、上記の事例も考慮した絶縁特性を十分に解明しておく必要がある。

スペーサ沿面を対象とした振動性インパルス絶縁特性の検討例⁽¹⁾⁽²⁸⁾によれば、パーティクルがない清浄な場合、雷インパルスよりも緩波頭の電圧に対してはスペーサの有無によるV-t曲線に有意な差はないが、振動性インパルスを使用した1 μ s以下の短時間領域では、正・負極性ともスペーサの存在によりV-t曲線がガスギャップよりも平坦となる特性が報告されている。この理由として、放電進展速度がガス中よりスペーサ沿面の方が速いことが考えられているが、詳細なメカニズムはまだ明確になっていない。

一方、スペーサ沿面にパーティクルが付着した著しい不平等電界に対しては、雷インパルスや交流、直流などの標準的な試験電圧波形による絶縁特性⁽²⁹⁾⁽³⁰⁾のほか、絶縁特性に及ぼすパーティクル付着位置の影響⁽³¹⁾、スペーサ表面に設けたひだなど沿面形状の効果⁽³²⁾⁽³³⁾、コロナからリーダへ転換する機構⁽³⁴⁾⁽³⁵⁾などが検討されている。振動性インパルスに対するパーティクル付着スペーサの絶縁特性は検討例が少なく、岡部氏ら⁽³⁶⁾によってV-t曲線が雷インパルスと同程度となること、さらに2~18MHzと振動周波数を変化させてもV-t曲線がほとんど変化しないこと⁽³⁷⁾、またコロナ放電発光様相の観測結果⁽³⁸⁾などが報告され

ている程度である。上記の振動性インパルスの振動周波数がV-t曲線にほとんど影響しない理由としては、スペーサ沿面ではリーダステッピング時間がガス中よりも大幅に短く、0.3MPaでおよそ9 ns(ステップリーダの発生周波数：約110MHz)、0.5MPaでおよそ6 ns(同：約180MHz)程度⁽³⁹⁾と電圧振動の周期よりも1~2桁短いため、電圧振動の1周期中にリーダが十分に進展するとの解釈が示されている⁽³⁷⁾。

ガス中と異なりスペーサ表面には空間電荷が長時間にわたって蓄積され得るため、これが絶縁上過酷な条件となる可能性がある。すなわち、蓄積した電荷の分布や極性によっては過電圧印加時に双方が形成する電界が相互に強め合って局所的な高電界を生じる場合があり、比較的低い過電圧でもフラッシュオーバーが生じることが考えられる。スペーサ表面にパーティクルが付着した場合、運転中の商用周波電圧、あるいは開閉器で負荷側を遮断した後に母線に残留する直流電圧によってコロナ放電が発生すれば、パーティクル近傍で部分放電電荷が表面電荷として蓄積される。この状態でサージ性過電圧が侵入する条件を考えると、電荷蓄積がない場合と比べてフラッシュオーバー電圧が低下することは十分に考えられる。実際、諸外国では断路器で送電線側回路を開放した後、再投入時に発生する断路器サージによって地絡事故が発生した例があり、負荷側開放中浮遊電位となった母線のスペーサに蓄積した電荷の作用が問題とされている⁽⁴⁰⁾。直流電界によるスペーサ表面への電荷蓄積は1.2節で述べたようにパーティクルが存在しなくても生じるが、パーティクルがある場合は複雑な分布の電荷蓄積がより短時間に生じる可能性がある。

このようなケースはGISの絶縁上最も過酷な条件と考えられるが、これまで詳細に検討された例はほとんどない。そこで、パーティクルを模擬した突起電極を付けたスペーサに予め直流電圧を印加してスペーサ表面に電荷を蓄積させ、その後で雷インパルスあるいは振動性インパルスを印加してフラッシュオーバー電圧がどの程度低下するかを検討する。事前の印加電圧としては運転中の商用周波電圧を想定することもできるが、蓄積した電荷の極性とフラッシュオーバー電圧との関係を明らかにすることも念頭におき直流電圧を使用する。なお、本節における実験はカナダ・マニトバ大学高電圧実験室で実施したものである。

3.4.2 実験装置

(1) モデルスペーサと実験タンク

実験に使用した突起電極付きモデルスペーサと実験タンクの概略を図3.21に示す。モデルスペーサは直径40mm、高さ60mmの円柱で、材質はPTFE(ポリテトラフルオロエチレン)である。この上下に図3.21(a)に示す形状の高電圧側および接地側アルミ製電極を取り付け、電圧印加実験に使用した。パーティクルを模擬した突起電極は直径1.6mmのステンレス棒から作成し、コロナ放電を起こしやすくするため先端を角形に加工した。これをモデルスペーサ表面に付着するように高電圧側電極に取り付け、先端が高電圧側電極の下縁面から接地電極側に10mm突出するようにした。

高電圧側電極の下縁面と接地側電極の上縁面間のギャップ長は40mmである。電極の外縁部は同図のように丸みを持たせ、またモデルスペーサとの接触部を電極内に設けた窪みの中に配置するようにして、突起電極先端以外での電界緩和を図った。これらの配慮により、電圧印加時に突起電極先端以外からのコロナ放電が生じないようにした。

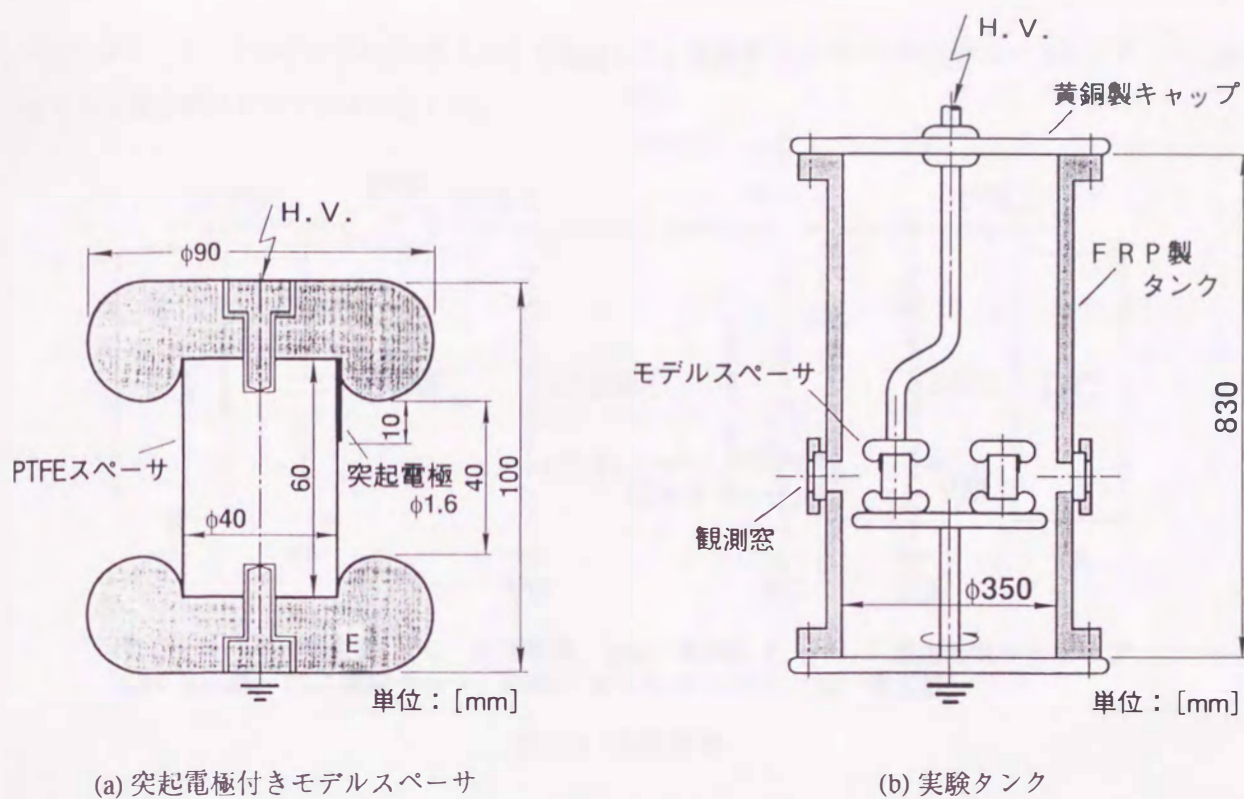


図3.21 実験装置の概要

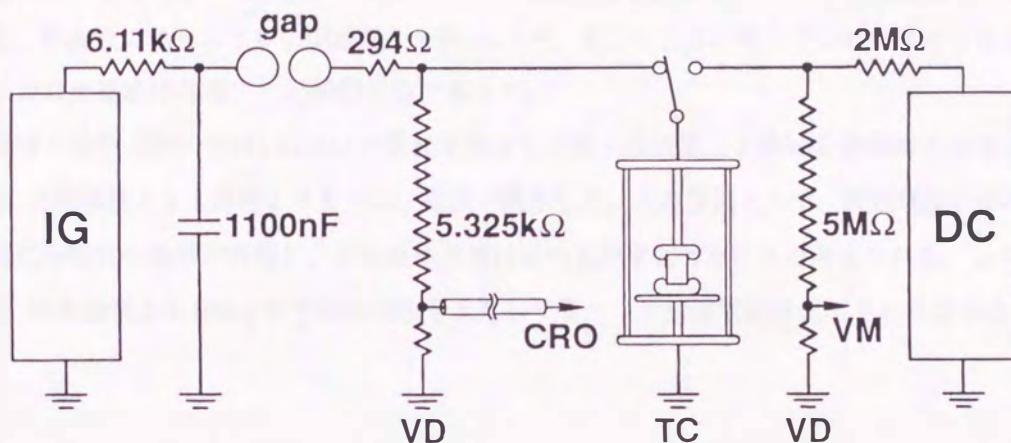
実験タンク内のターンテーブルには4組のモデルスペーサを同時に設置でき、ターンテーブルの回転によってタンクを開閉することなくモデルスペーサの交換が可能である。モデルスペーサ沿面はフラッシュオーバーにより劣化すると考えられるが、観測窓から毎回のフラッシュオーバー経路を観測し、フラッシュオーバーが同一の経路で生じない限りはそのまま引き続き実験に使用した。実験タンクにはSF₆ガスを封入し、ガス圧力(p)は0.1MPaまたは0.5MPaとした。

(2) 試験回路

実験に使用した試験回路を図3.22に示す。モデルスペーサの表面に電荷蓄積を生じさせるため、まず実験タンクに直流電源を接続して正極性または負極性直流電圧を約10分間印加し、突起電極先端でコロナ放電を発生させた。直流電圧印加中のコロナ放電電流を実験タンクと接地との間に挿入した1kΩのシャント抵抗により測定した。コロナ放電電流の最小測定感度は0.1μAである。

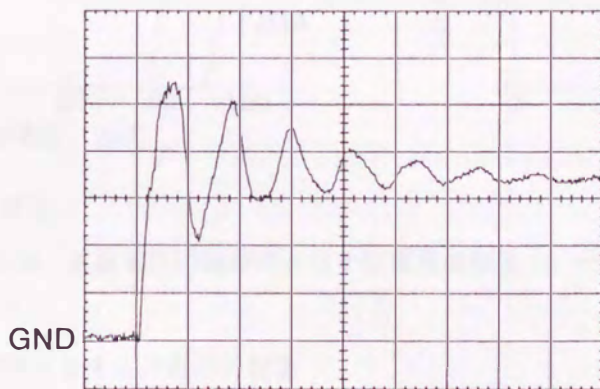
直流電圧を遮断後、実験タンクをインパルス発生器に接続し、雷インパルス(1.4/40μs)または振動性インパルス印加してフラッシュオーバー電圧を測定した。振動性インパルスの波形を図3.23に示す。振動周波数は4.4MHzで、電圧立上がり時間は120ns、電圧波高値で規格化した最初の極小値は0.38、電圧の立上がりから1μsおよび5μs経過時の電圧減衰率はそれぞれ0.71、0.62である。雷インパルスおよび振動性インパルスの極性はすべて正極性とした。インパルス電圧は実験タンクと並列に挿入したコンパクト型抵抗分圧器(立上がり時間：7ns)の出力波形をデジタルオシロスコープ(Tektronix TDS540—周波数帯域：400MHz、サ

サンプリングレート：1Gサンプル/s)に入力して測定した。振動性インパルス印加時のフラッシュオーバは第2波または第3波のピーク付近で生じた。



IG：インパルス発生器，DC：直流電源，gap：振動性インパルス発生用気中ギャップ，VD：分圧器，TC：実験タンク，CRO：オシロスコープ，VM：電圧計

図3.22 試験回路



電圧軸：15.7kV/div，時間軸：200ns/div

図3.23 4.4MHz振動性インパルス電圧波形

(3) 蓄積した電荷の観測

直流電圧印加後のモデルスペーサ表面の電荷蓄積状況を把握するため、ダストフィギア法を適用して正・負極性の電荷分布を観測した。使用したダストは正・負極性の判別が可能なカラーコピー機のトナー2種類(正極性電荷に付着しやすい青色と負極性電荷に付着しやすい赤色)である。ダストフィギア法による電荷分布の観測はモデルスペーサを実験タンクから取り出し、大気中で実施した。

3.4.3 実験結果

(1) コロナ放電電流特性

ガス圧力 $p = 0.1 \text{ MPa}$ に対して、正・負それぞれの極性について直流電圧を変化させながら測定したコロナ放電電流の特性を図3.24に示す。正極性の場合、コロナ開始電圧は約77kVで、電圧の上昇に伴ってコロナ電流は急激に上昇した(図中 実線)。各電圧でコロナ電流の変動が非常に大きく、変動幅のみを図中に示した。一方、負極性の場合にはコロナ開始電圧が約45kVで、電圧の上昇に伴ってコロナ電流は2次曲線状に増加した。コロナ電流は各電圧で比較的安定であった。

電圧下降時の特性(図中 破線)はコロナ電流を測定した最大直流電圧を約10分間維持した後で測定したもので、正・負両極性とも上昇時よりもコロナ電流が減少した。この要因として、突起電極近傍のモデルスペース表面に同極性の電荷が蓄積し、突起電極先端付近の電界を弱めたことが考えられる。 $p = 0.5 \text{ MPa}$ については正・負両極性とも100kVまで印加電圧を上昇してもコロナ放電電流は検出されなかった。

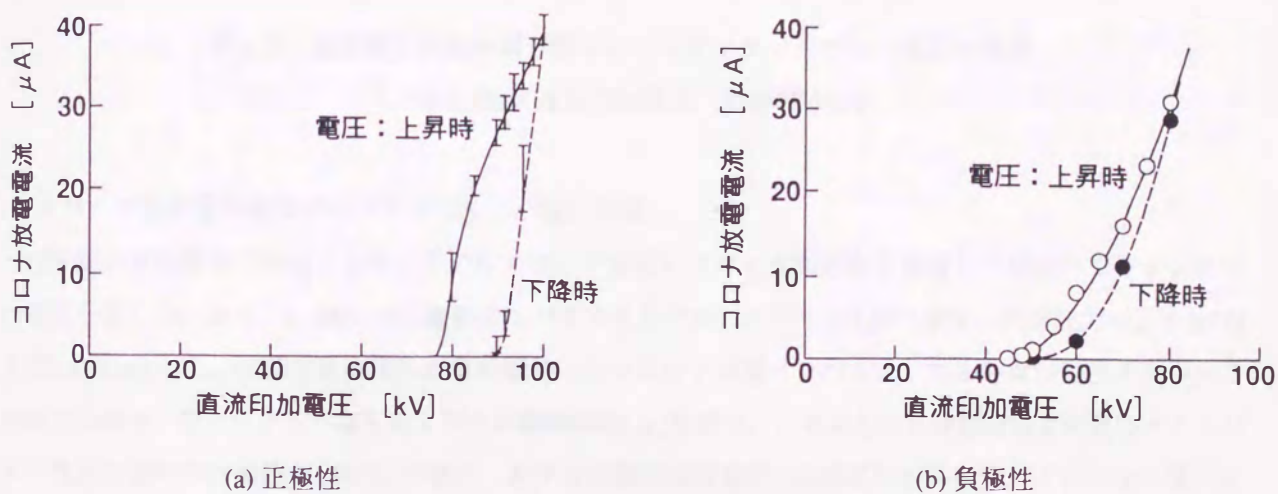


図3.24 直流電圧印加時のコロナ放電電流特性 ($p = 0.1 \text{ MPa}$)

(2) 直流電圧印加時間とフラッシュオーバー電圧の関係

直流電圧の印加時間と、直流電圧停止後に雷インパルス印加して測定したフラッシュオーバー電圧の関係を図3.25に示す。印加した直流電圧は負極性60kVで、 $p = 0.1 \text{ MPa}$ とした。図中左端のプロットは雷インパルス単独で測定した50%フラッシュオーバー電圧と標準偏差(σ)を示す。それ以外のプロットはフラッシュオーバーが生じた場合のフラッシュオーバー電圧(波頭フラッシュオーバーの場合は瞬時値、波尾フラッシュオーバーの場合は波高値)を○で、非フラッシュオーバーの場合の雷インパルス波高値を●で示す。同図より、直流電圧の事前印加により雷インパルスフラッシュオーバー電圧は25%程度低下し、この低下は15秒程度の直流電圧印加で生じ、印加時間を30分まで延ばしてもほとんど変わらないことが判明した。フラッシュオーバー電圧の低下は明らかに直流電圧の印加に起因しており、モデルスペース表面へのコロナ放電電荷の蓄積が作用していると考えられる。この結果から、コロナ放電によるモデルスペース表面への電荷蓄積がフラッシュオーバー電圧に及ぼす効果を評価する上で、本実験においては直流電圧の印加時間は10分程度で十分であると判断できる。

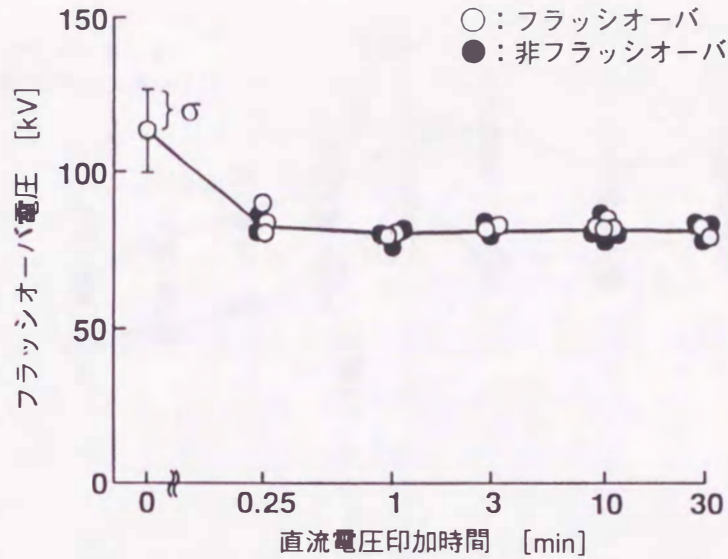


図3.25 直流電圧印加時間と雷インパルスフラッシュオーバー電圧の関係
($p = 0.1\text{MPa}$ 、直流印加電圧：負極性 60kV)

(3) スペーサ表面電荷蓄積時のフラッシュオーバー電圧特性

10分間の直流電圧の印加により、モデルスペーサ表面にコロナ放電電荷を蓄積した場合のフラッシュオーバー電圧を雷インパルス、 4.4MHz の振動性インパルスそれぞれについて図3.26に示す。ガス圧力は $p = 0.1$ および 0.5MPa とした。同図で直流電圧が零の縦軸上のプロットは雷インパルス、あるいは振動性インパルス単独での50%フラッシュオーバー電圧およびその標準偏差(σ)を示す。これより右半分領域は直流電圧とインパルス電圧の極性が同極性(正極性)の場合、左半分の領域は逆極性(直流電圧が負極性、インパルス電圧が正極性)の場合を示す。図中には各電圧でのコロナ放電電流の測定値を併記した。 $p = 0.5\text{MPa}$ ではコロナ放電電流は検出されなかった。各プロットは図3.25と同様に、フラッシュオーバーが生じた場合を○△で、非フラッシュオーバーの場合を●▲で示した。

同図(a)($p = 0.1\text{MPa}$ の場合)より、直流電圧とインパルス電圧が逆極性の場合、フラッシュオーバー電圧は雷インパルス、振動性インパルスとも直流電圧の上昇に対してほぼ直線的に低下することが判る。直流印加電圧が負極性 80kV のとき、フラッシュオーバー電圧の低下割合は雷インパルス、振動性インパルスとも直流電圧を印加しない場合と比べて約30%であった。コロナ電流が検出されていない領域(直流電圧： -20kV および -40kV)でも約10~20%のフラッシュオーバー電圧の低下が見られた。一方、直流電圧とインパルス電圧が同極性の場合、コロナ電流が検出されていない領域で雷インパルスフラッシュオーバー電圧が約10%低下したが、それ以外はフラッシュオーバー電圧が同等か、もしくは上昇する傾向が見られた。

上記と同様の傾向は $p = 0.5\text{MPa}$ の場合(同図(b))についても認められる。この場合はフラッシュオーバー電圧値は 0.1MPa の場合と比べて全体的に10%程度高い。直流電圧とインパルス電圧が逆極性のケースでは、 0.1MPa の場合と同様にフラッシュオーバー電圧は低下し、直流印加電圧が負極性 100kV のとき、低下割合は約20%であった。

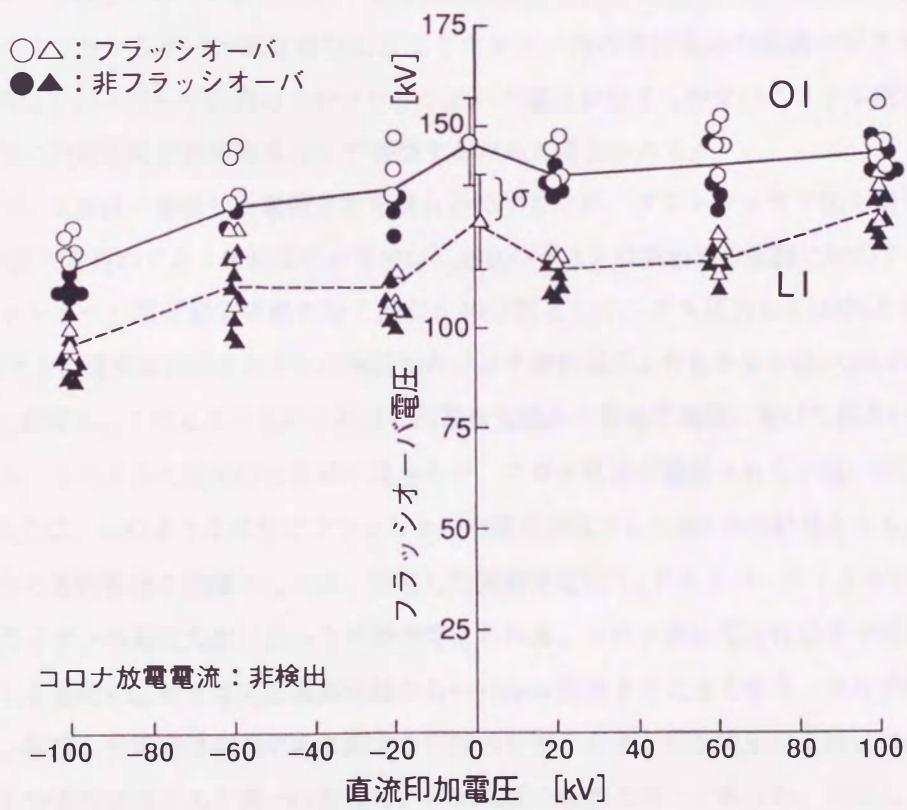
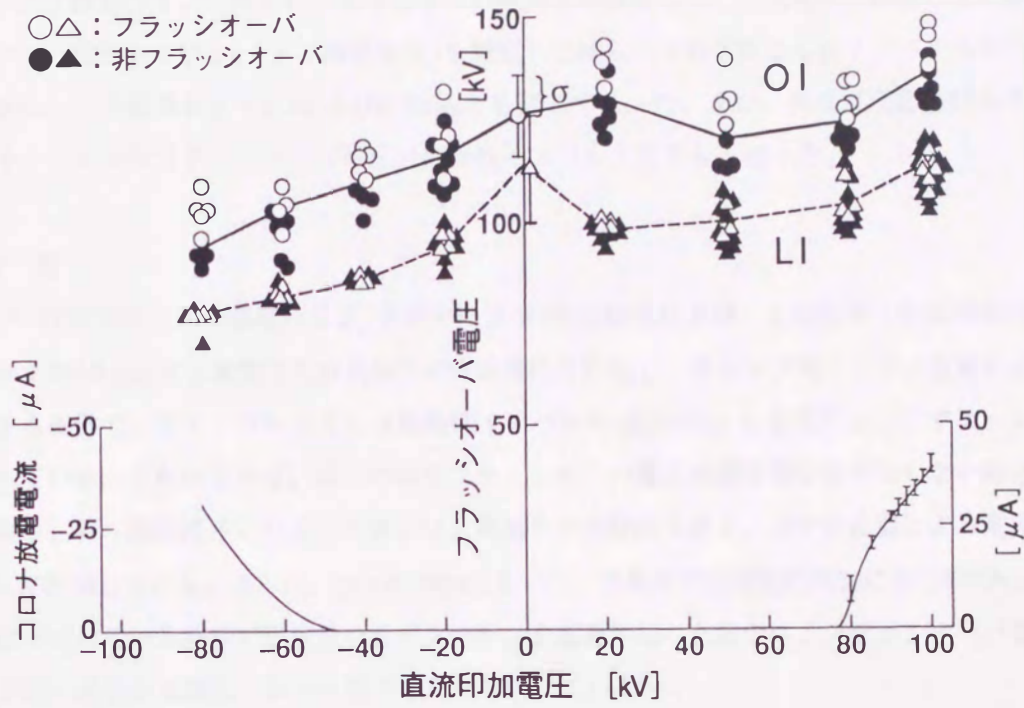


図3.26 モデルスベーサ表面電荷蓄積時のフラッシュオーバー電圧特性

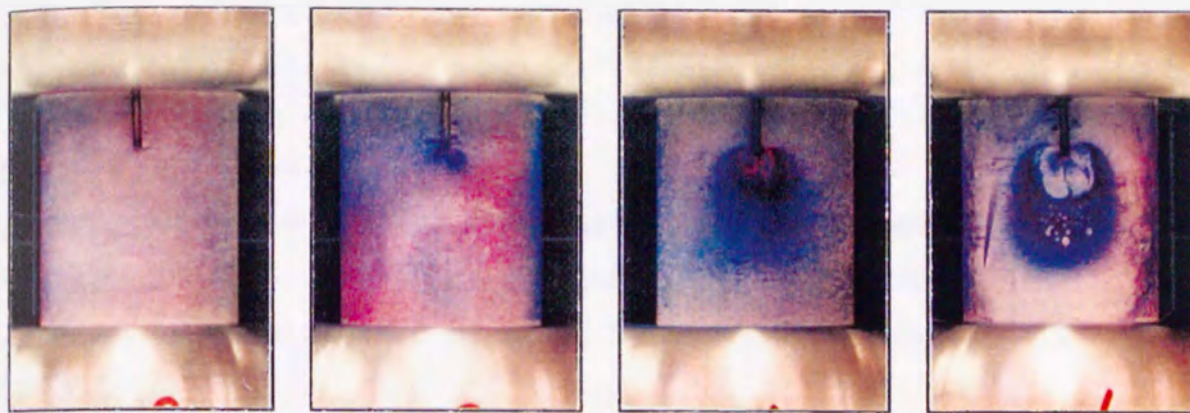
雷インパルスと振動性インパルスのフラッシュオーバー電圧を比較すると、直流電圧を印加しない場合、50%フラッシュオーバー電圧および 1σ (σ :標準偏差)を想定したばらつきの下限とも雷インパルスの方が低い結果が得られた。この結果は $p=0.1$ および 0.5MPa とも同じであった。また、直流電圧印加時もすべてのケースで雷インパルスのフラッシュオーバー電圧が振動性インパルスよりも下回った。

3.4.4 考 察

Siodla氏ら⁽⁴¹⁾は本実験と同一規模の SF_6 ガスギャップ(突起電極付き球-平板電極:突起電極先端と平板間のギャップ長40mm)に正極性または負極性の直流電圧を印加し、ギャップ間にコロナ放電による空間電荷が存在する条件で、雷インパルスまたは振動性インパルス(約7MHz)を重畳印加してフラッシュオーバー電圧を測定している。これによれば、多くの場合フラッシュオーバー電圧は直流電圧を印加しない場合と比べて上昇しており、特に振動性インパルスの場合には上昇割合が比較的大きく、コロナ放電による電界緩和をその要因として指摘している。さらに、 $p=0.1\text{MPa}$ において、負極性の直流電圧印加により約 $100\mu\text{A}$ のコロナ放電電流が流れている条件で正極性の雷インパルスを重畳印加した場合は、フラッシュオーバー電圧が雷インパルス単独の場合と比較して約15%低下したと報告している⁽⁴¹⁾。

本実験においても、負極性直流電圧と正極性雷インパルスの組合わせでフラッシュオーバー電圧が低下しているが、図3.26(a)から判るように、コロナ電流の観測値が上記のガスギャップの場合よりも $1/3$ 程度と小さいにもかかわらず、フラッシュオーバー電圧の低下割合は約30%と大きくなっている。このことは、雷あるいは振動性インパルスフラッシュオーバー電圧特性に及ぼすギャップ内の空間電荷の効果がガスギャップとスペーサ沿面とで異なり、スペーサ沿面の方がフラッシュオーバー電圧が低下しやすいことを示唆している。これはスペーサ沿面に空間電荷が表面電荷として蓄積するためと考えられる。

次にモデルスペーサ表面に蓄積した電荷分布を明らかにするため、ダストフィギア法を適用した結果を図3.27に示す。同図で青色のダストは正極性の電荷に、赤色のダストは負極性の電荷に対応する。直流電圧印加時間はフラッシュオーバー電圧測定実験の際と同じく10分間とした。ガス圧力は 0.1MPa とした。同図より、正・負両極性とも、電荷蓄積はそれぞれの極性でのコロナ開始電圧よりもかなり低い 20kV 程度の電圧から観測されることが判る。このときの電荷分布は突起電極先端から接地電極側に延びた長さ $1\sim 2\text{mm}$ の小さなブラシ状である。このように局所的な領域ではあるが、コロナ電流が観測されない低い印加電圧でも電荷蓄積が生じることは、このような条件でフラッシュオーバー電圧が低下した図3.26の結果とともに留意すべきである。この場合の電荷蓄積の機構としては、帯電した微細浮遊粒子(ダストパーティクル)やガスの自然電離により生じたイオンの電気力線に沿った移動が考えられる。コロナ開始電圧付近まで印加電圧を上昇させると、蓄積した電荷の広がりや突起電極先端から $4\sim 10\text{mm}$ 程度まで大きくなる。コロナ開始電圧以上の印加電圧では、蓄積した電荷は突起電極に接する円状の分布となり、印加電圧の上昇につれてこの円が大きくなる。以上の電荷はほとんど単一の極性で、印加電圧の極性と同一であった。ただし、正極性電圧を印加した場合の突起電極先端付近では、わずかな領域ではあるが負極性の電荷が観測された。



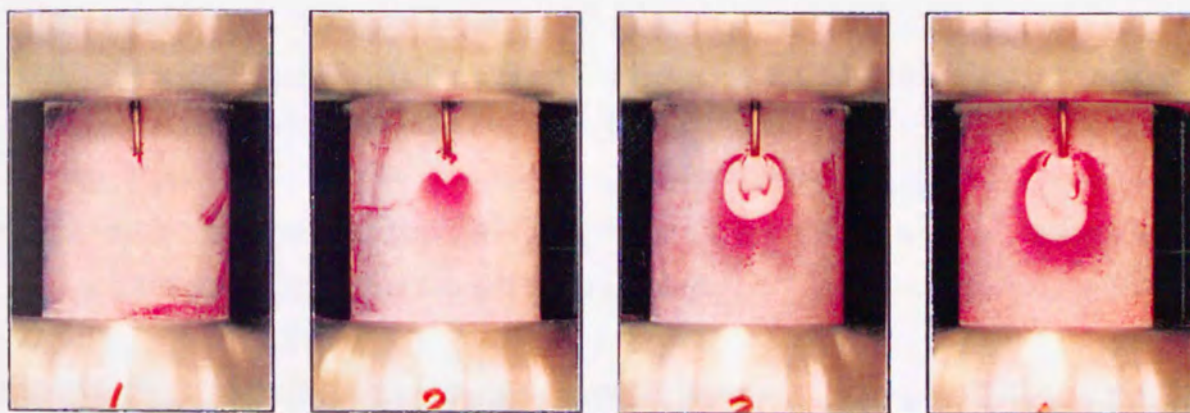
直流印加電圧：20kV

50kV

80kV

100kV

(a) 正極性



直流印加電圧：-20kV

-40kV

-60kV

-80kV

(b) 負極性

図3.27 モデルスペーサ表面の電荷蓄積の分布 (ダストフィギア法)

上記のように単一極性の電荷が突起電極先端付近で円状に分布すれば、これと逆極性の過電圧が印加された場合、突起電極先端の電界は電荷がない場合と比べて当然高くなり、フラッシュオーバー電圧は低下すると考えられる。逆に、同一極性の過電圧に対しては電界が緩和されて、フラッシュオーバー電圧は上昇すると考えられる。本実験ではフラッシュオーバーが生じる際の経路を詳細に観測したが、電荷蓄積の有無、あるいは電荷蓄積領域の大小にかかわらず、フラッシュオーバー経路に顕著な変化は見られなかった。このことは、蓄積された電荷にはフラッシュオーバー経路を偏向させる効果はほとんどなく、単に放電開始点となる突起電極先端付近の電界を変化させることでフラッシュオーバー電圧に影響を与えていることを示唆している。

本実験では、正極性の雷および振動性インパルスの両者に対し、モデルスペーサ表面に負極性の電荷蓄積が存在する場合、最大30%のフラッシュオーバー電圧の低下が観測された。したがって、スペーサ表面にパーティクルが存在して、これによって電荷蓄積が生じるとガス絶縁機器の絶縁性能を極めて低下させる要因となる。特に、コロナ放電電流が観測されない条件でも電荷蓄積が生じ、フラッシュオーバー電圧を10~

20%低下させる場合があることから、GISなどの診断技術を検討する上で、このような知見も考慮に入れる必要がある。

3.4.5 まとめ

突起電極付きモデルスペーサ表面に直流電圧印加によるコロナ放電電荷の蓄積がある条件で、雷インパルスおよび振動性インパルスフラッシュオーバ電圧特性を測定し、電荷蓄積の影響を明らかにした。さらに、直流電圧の極性や電圧値を変化させて、蓄積した電荷の分布形状などを測定した。主要な結果を以下にまとめる。

- (1) 直流電圧とインパルス電圧が逆極性の場合、フラッシュオーバ電圧は雷インパルス、振動性インパルスとも直流電圧の上昇に対してほぼ直線的に低下する。直流電圧とインパルス電圧が同極性の場合、コロナ電流が検出されていない領域で雷インパルスフラッシュオーバ電圧が約10%低下した以外はフラッシュオーバ電圧が同等か、もしくは上昇する傾向が見られた。
- (2) フラッシュオーバ電圧の低下割合は雷インパルス、振動性インパルスとも直流電圧を印加しない場合と比べて最大で約30%である。コロナ電流が検出されない条件でも10~20%のフラッシュオーバ電圧の低下が生じる。
- (3) 雷インパルスと振動性インパルスのフラッシュオーバ電圧を比較すると、50%フラッシュオーバ電圧および 1σ (σ :標準偏差)を想定したばらつきの下限とも、すべてのケースで雷インパルスの方が低い結果が得られた。
- (4) 電荷蓄積はコロナ開始電圧よりもかなり低い印加電圧で観測される。このときの電荷分布は突起電極先端から接地電極側に延びたブラシ状である。コロナ開始電圧以上の印加電圧では、電荷蓄積は突起電極に接する円状の分布となり、印加電圧の上昇につれてこの円が大きくなる。
- (5) 蓄積された電荷にはフラッシュオーバ経路を偏向させる効果はほとんどなく、放電開始点となる突起電極先端付近の電界変化がフラッシュオーバ電圧に影響すると考えられる。

3.5 結論

本章ではパーティクルの存在を想定したガス絶縁機器の急峻波サージに対する絶縁特性および放電進展機構について、試験電圧波形として使用される雷インパルスとの相違に着目して検討した。

3.2節ではSF₆中の突起電極付き不平等電界ギャップに対し、フラッシュオーバ電圧が低い正極性を中心に、0.96MHz~7.3MHzの各種周波数の振動性インパルスを印加してフラッシュオーバ電圧特性およびV-t特性を評価した。振動性インパルスに対するフラッシュオーバ電圧は、一般に同じギャップ条件での雷インパルスフラッシュオーバ電圧よりも高い。しかし、振動性インパルスの振動周波数が4MHz程度でガス圧力が実用の0.5MPa程度、さらに突起電極の直径が1mm以下の条件では、雷インパルス、振動性インパルス(4.2MHz)とも最低フラッシュオーバ電圧が同程度となる。特に、突起電極の直径が0.11mm以下の場合、振動性インパルスに対する最低フラッシュオーバ電圧が雷インパルスよりも最大10%程度低くなる。V-t曲線

は雷インパルスと振動性インパルス(4.2MHz)で異なり、多くの場合長時間領域では雷インパルスの方が低く、短時間領域では振動性インパルスの方が低くなる。

3.3節では3.2節と同様の不平等電界ギャップおよび電圧波形に対し、正極性を中心に放電進展機構を検討した。放電進展現象はコロナの発生からフラッシュオーバーに至るまでの全体で見れば、雷インパルスと振動性インパルスとは極めて異なり、それぞれガス圧力や印加電圧の極性などの影響を顕著に受ける。雷インパルスの場合、コロナの発生と消滅を繰り返した後、リーダが形成されてそれが間欠的な発光を伴うステップ状の進展をしてフラッシュオーバーに至るのに対し、振動性インパルスの場合にはリーダ形成までの時間が短く、電圧振動の極小値付近で逆放電の発光が観測されるか、もしくは振動周波数が高い場合はこの発光がなく、放電進展が中断された状態となる。振動性インパルスの場合でも電圧振動の各ピークに対応する放電進展は、同じギャップ条件に対する雷インパルスの場合とほとんど同じである。すなわち、放電進展現象からは振動性インパルスのフラッシュオーバー電圧が雷インパルスよりも低下する要因は見あたらない。

3.4節では実機器において絶縁上の弱点となりやすいスペーサ沿面に対して絶縁特性を検討した。特に、パーティクルを模擬した突起電極の先端で生じたコロナ放電電荷がスペーサ表面に蓄積した条件を想定した。蓄積した電荷と過電圧の極性が逆極性の場合、過電圧が雷インパルス、振動性インパルスの場合ともフラッシュオーバー電圧は電荷がない場合と比べて最大で約30%低下する。雷インパルスと振動性インパルスのフラッシュオーバー電圧を比較すると、50%フラッシュオーバー電圧および 1σ (σ :標準偏差)を想定したばらつきの下限とも、すべてのケースで雷インパルスの方が低い。蓄積された電荷にはフラッシュオーバー経路を偏向させる効果はほとんどなく、放電開始点となる突起電極先端付近の電界変化がフラッシュオーバー電圧に影響すると考えられる。

3.3節の結果に関連して、JEC-0102-1994「試験電圧標準」の制定に伴い、500kV系統に新たに雷インパルス耐電圧試験電圧値(LIWV)の低減値1425kVが導入されたが、このLIWVを採用した機器に対しても、雷インパルスによる絶縁試験で断路器サージに対する機器の絶縁検証が可能である。LIWVの低減により従来よりも機器の縮小化が可能となり、500kV級GISに対しては相分離型母線部で約10%、3相一括型主母線部で約20%程度のシース径の縮小が可能で、これによる相応のコスト低減が実現できる。

参考文献

- (1) W. Boeck, W. Taschner, J. Gorablenkow, G.F. Luxa & L. Menton: "Insulating behavior of SF₆ with and without solid insulation in case of fast transients", CIGRE Paper, No.15-07 (1986)
- (2) 電気協同研究会: "絶縁設計の合理化", 電気協同研究, 第44巻, 第3号 (1988)
- (3) 電気学会: "急しゅん波サージとGISの絶縁問題", 電気学会技術報告(II部) 第324号 (1990)
- (4) H. Hiesinger: "Statistical time-Lag in case of very fast transient breakdown", 6th Int. Symp. on High Voltage Engineering, 32.23, New Orleans, LA, USA (1989)
- (5) G. Riquel, Z.Y. Ren & L. Lefrancois: "Comparison between V.F.T. and lightning impulse breakdown voltages for

- GIS insulation in presence of defects on live-conductors", *ibid.*, 23.09 (1989)
- (6) S. Matsumoto, H. Okubo, H. Aoyagi & S. Yanabu: "Non-uniform flashover mechanism in SF₆ gas under fast-oscillating and non-oscillating impulse voltages", *ibid.*, 32.16 (1989)
- (7) A. Gibert, J. Dupuy & G. Riquel : "Dielectric behavior of SF₆ point-plane gap subjected to fast rising impulse voltage", *ibid.*, 25.04 (1989)
- (8) K. Möller & A. Stepken : "Leader formation in SF₆ for oscillating impulse voltages", *ibid.*, 32.02 (1986)
- (9) O. Farish, I.D. Chalmers, A. Gibert & J. Dupuy : "The streamer-leader transition in SF₆ and SF₆-freon mixtures", *ibid.*, 32.03 (1989)
- (10) W. Pfeiffer, V. Zimmer & P. Zipfl : "Insulating characteristics of SF₆ and SF₆/N₂-mixtures for very fast transient voltages (VFT)", *ibid.*, 49.06 (1989)
- (11) H. Hiesinger : "The calculation of leader propagation in point/plane gaps under very fast transient stress", Gaseous Dielectrics VI, L.G. Christophorou & I. Sauer, ed., Plenum Press, New York, pp.129-134 (1990)
- (12) W. Pfeiffer, V. Zimmer & P. Zipfl : "Time lags and optical investigations of pre-discharge in SF₆/N₂-mixtures at very fast transient voltages", *ibid.*, pp.231-236 (1990)
- (13) H. Fujinami & E. Kuffel : "Breakdown characteristics of non-uniform gaps in SF₆ under fast oscillating impulse voltages", *ibid.*, pp.247-252 (1990)
- (14) T. Ishii, M. Hanamura, S. Matsumoto, H. Aoyagi, H. Murase, M. Hanai & I. Ohshima : "Non-uniform field flashover characteristics in SF₆ gas under negative steep-front and oscillating impulse voltages", *ibid.*, pp.239-245 (1990)
- (15) Th. Dunz, L. Niemeyer & G. Riquel : "The effect of leader propagation of the V-t-curves under LI and VFT in GIS", *ibid.*, pp.255-260 (1990)
- (16) G. Luxa, E. Kynast, W.Boeck, H. Hiesinger, A. Pignini, A. Bargigia, S. Schlicht, N. Wiegart & L. Ullrich : "Recent research activity on the dielectric performance of SF₆ with special reference to very fast transients", CIGRE Paper, No.15-06 (1988)
- (17) J.P. Reynders, R. Modry & J. Meppelink : "Volt-time curves of disconnector-generated fast transients inside GIS", Gaseous Dielectrics V, L.G. Christophorou, ed., Pergamon Press, New York, pp.491-496 (1987)
- (18) 鷗瀬, 松本, 青柳, 村瀬, 柳父 : "SF₆ ガスの絶縁特性に及ぼす金属異物の太さの影響", 平成2年電気学会電力・エネルギー部門全国大会, 70 (1990)
- (19) F. Pinnekamp & L. Niemeyer: "Qualitative model of breakdown in SF₆ in inhomogeneous gaps", Journal of Physics D: Applied Physics, Vol.16, pp.1293-1302 (1983)
- (20) S. Yanabu, H. Murase, H. Aoyagi, H. Okubo & Y. Kawaguchi: "Estimation of fast transient overvoltage in gas-insulated substation", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol.PWRD-5, No.4, pp.1875-1881 (1990)
- (21) T. Takuma, T. Watanabe, K. Kita & Y. Aoshima : "Discharge development of long gaps in SF₆ gas", Int. Symp. on High Voltage Technology, Munich, pp.386-390 (1972)

- (22) I. Gallimberti & N. Wiegart : "Streamer and leader formation in SF₆ and SF₆ mixtures under positive impulse conditions: I. Corona development", J. Phys. D: Appl. Phys., 12 pp.2351-2361 (1986)
- (23) I. Gallimberti & N. Wiegart : "Streamer and leader formation in SF₆ and SF₆ mixtures under positive impulse conditions: II. Streamer to leader transition", *ibid.*, 19 pp.2263-2379 (1986)
- (24) I.D. Chalmers, I. Gallimberti, A. Gibert & O. Farish : "The development of electrical leader discharges in a point-plane gap in SF₆", Proc. R. Soc. Lond. A412, pp.285-308 (1987)
- (25) 宅間, 渡辺, 青島, 北 : "SF₆ ガス中の放電進展機構", 電力中央研究所 技術第一研究所報告 71019 (1971)
- (26) 松本, 青柳, 村瀬, 柳父 : "不平等電界における SF₆ ガスの急しゅん波インパルス放電特性", 電気学会論文誌 B, 110巻 9 号, pp.769-777 (1990)
- (27) 山崎, 小林, 村上, 中川, 三宅, 小坂田, 横田 : "東京電力(株)新群馬開閉所納新形550kVガス絶縁開閉装置", 平成3年電気学会全国大会, 1423 (1991)
- (28) A. Bargigia, G. Mazza, A. Pignini, L. Thione & B. Mazzoleni : "Study of the dielectric strength of SF₆ insulated metal-clad substations and application to their design and testing", CIGRE Paper, No.33-12 (1982)
- (29) H. Kuwahara, S. Inamura, T. Watanabe & Y. Arahata : "Effect of solid impurities on breakdown in compressed SF₆ gas", IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, Vol.PAS-93, No.5, pp.1546-1554 (1974)
- (30) Li Ming & A.E. Vlastos : "Particle-initiated flashover of a disc spacer in SF₆ under standard and oscillating switching impulse voltages", 5th Int. Symp. on High Voltage Engineering, 12.10, Braunschweig, Germany (1987)
- (31) M. Hara, H. Tobata, K. Hidaka & H. Yakabe : "Influence of conducting particles on insulation performance of conical spacer in SF₆ gas under dc voltage", *ibid.*, 15.03 (1987)
- (32) 原, 李, 江頭, 小山 : "SF₆ ガス中の金属粒子汚損直流沿面フラッシュオーバーに対する沿面形状の影響", 電気学会論文誌 B, 110巻 7 号, pp.568-575 (1990)
- (33) T. Yamagiwa, T. Ishikawa & F. Endo : "Particle-initiated breakdown characteristics on a ribbed spacer surface for SF₆ gas insulated switchgear", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol.PWRD-3, No.3, pp.954-959 (1988)
- (34) 羽馬, 井波, 藤井, 大石, 吉村, 仲西 : "SF₆ ガス中正極性沿面放電のリーダの発生と進展", 電気学会論文誌 A, 114巻 5 号, pp.397-406 (1994)
- (35) 羽馬, 井波, 吉村, 仲西 : "SF₆ ガス中沿面放電のリーダに及ぼす電圧極性の影響", 電気学会論文誌 A, 114巻 6 号, pp.467-475 (1994)
- (36) 岡部, 向當, 小林, 遠藤, 山極 : "GIS用スパーサの急峻振動波に対する絶縁特性", 平成6年電気学会電力・エネルギー部門大会, 420 (1994)
- (37) S. Okabe, M. Koto, F. Endo & K. Kobayashi : "Insulation characteristics of GIS spacer for very fast transient overvoltage", IEEE PES 95 WM006-7 PWRD (1995)
- (38) Th. Flohr, W. Pfeiffer, V. Zimmer & H. Koch : "Spacers stressed by very fast transient voltages", 8th Int. Symp. on High Voltage Engineering, 30.05, Yokohama, Japan (1993)
- (39) L. Niemeyer & F. Pinnekamp : "Leader discharges in SF₆", J. Physics D: Applied Physics, Vol.16, No.6, pp.1031-

1045 (1983)

- (40) S.A. Boggs : Discussion on "H. Fujinami, et al.: Mechanism and effect of dc charge accumulation on SF₆ gas insulated spacers", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol.PWRD-4, No.3, p.1772 (1989)
- (41) K. Siodla, E. Kuffel & H. Fujinami : "Breakdown of SF₆ in non-uniform field gaps under combined dc, fast oscillating impulse and standard lightning impulse voltages", IEEE Trans. on Electrical Insulation, Vol.EI-28, No.2, pp.253-260 (1993)

第4章 ベーパミスト誘電体の絶縁特性と絶縁耐力向上要因

4.1 はじめに

ガス絶縁機器の主絶縁媒体として使用される SF_6 は高い絶縁耐力や優れた消弧性能に加えて、不燃性、無毒、軽量、誘電体損失が小さいなどの利点を有し、変電所機器の縮小化、高信頼化、環境調和に大きく貢献している。一方、より高性能なガス絶縁媒体の探索を目的として、新ガスや混合ガスに関する研究が進められている。これらの研究では SF_6 よりもさらに高い絶縁耐力を有するガスの探索のほか、不平等電界での絶縁特性の改善、液化温度の低減、絶縁油なみの冷却性能を持たせることなども目標となっている。

これらの研究のなかで、特に注目されるのは、James氏ら⁽¹⁾、Wootton氏ら⁽²⁾による混合ガスのシナジズム特性(絶縁耐力が成分ガスのいずれよりも高くなる特性)の発見と、Harrold氏^{(3)~(5)}によるベーパミスト誘電体(vapor-mist dielectrics)の提案である。ベーパミスト誘電体はハロゲン化炭素系液体を霧(ミスト)状に微粒化して、その気化ガス(ベーパ)とともにガス中に混合したもので、ガスの絶縁耐力が大幅に向上する可能性がある。この両者は実用の可能性があるだけでなく、絶縁耐力が向上するメカニズムについても非常に興味もたれる。特に、ベーパミスト誘電体は絶縁耐力の向上が大きいという点に加え、気体と液体の混合という発想が極めて斬新であることから、わが国を中心に関心が高まり、各種ガスと液体の組合せで絶縁特性が調査されている^{(6)~(28)}。ベーパミスト誘電体ではガス中に浮遊するミストが決定的に重要な役割を果たしており、気体の電離係数や付着係数などの物理的特性から予想して提案された混合ガスとは経緯が異なり、先に絶縁媒体が提案され、後から高い絶縁耐力の原因が検討されたものである。

SF_6 中に固体や液体を混合して絶縁媒体としての特性を改善する試みとして、これまでもガス絶縁流動床変圧器⁽²⁹⁾(gas-insulated fluidized bed transformer: SF_6 中にガラスやフッソ樹脂の微粒子を充填し、流動状態で使用する)やガス絶縁変圧器⁽³⁰⁾(SF_6 中で液体のパーフロロカーบอนをシャワー状に散布する)などの例がある。しかし、両者とも固体や液体の役割は冷却性能の改善を主眼としており、絶縁耐力がある程度上昇することも示されてはいるが、絶縁媒体としての積極的活用はなされていない。

ベーパミスト誘電体は、アメリカ EPRI (Electric Power Research Institute) の委託を受けたWestinghouse社により、ガス絶縁変圧器の冷却性能の改善を目的とする研究のなかで発案されたものである。その第1報は、1981年に同社のHarrold氏により報告されている⁽³⁾。これによれば、供試電極のギャップ長が1mmという小規模な実験ではあるが、大気圧 SF_6 の交流フラッシュオーバー電圧が、超音波圧電振動子で発生させたテトラクロロエチレン(C_2Cl_4)のミストの混合により、約2倍に上昇した例が示されている。その後の同氏の検討で、インパルスフラッシュオーバー電圧特性⁽⁴⁾、ミストの粒径、蒸発、帯電、熱交換性などの物理的特性⁽⁴⁾、さらに不平等電界における部分放電抑制作用⁽⁵⁾についても報告されている。

アメリカではガス絶縁媒体として、高い絶縁耐力、冷却性能、不燃性といった特性が得られる可能性が期待され、EPRIはWestinghouse社とともに1984年のIR-100 Award (アメリカ Industrial Research & Development 誌が年間100件の優秀な先進技術に対して贈る賞)を受賞している。しかし、ミストの発生に動力を要

することや構造が複雑になるなどの問題が指摘され、実用化への関心はさほど持たれなかったようである。EPRI自身、ベーパーミスト誘電体のガス絶縁機器への適用には消極的であり、その後実用化研究は行っていない。これには上記の問題に加えて、ミスト用液体に使用するハロゲン化炭素系液体の毒性や、熱分解による炭素の析出なども懸念されたと推察される。ベーパーミスト誘電体は1985年のCIGRE SC/15-03委員会でも紹介されたが、やはり同様の問題が指摘され、諸外国の反応は低調であったようである。Westinghouse社は1987年より大出力マイクロ波(8.2~12.4GHz)の発信・受信セルの絶縁媒体への適用を目的とした検討⁽³¹⁾を開始しており、絶縁媒体としてのとらえ方がかなり推移していることが窺える。

これとは逆に、わが国ではガス絶縁機器の絶縁媒体に直接適用できる可能性に関心が持たれ、1985年より北海道大学、筆者(電力中央研究所)、三菱電機、武蔵工業大学などが相次いで基礎実験を開始した。北海道大学^{(6)~(13)}と電力中央研究所^{(14)~(19)}は、大気圧空気や SF_6 を主成分ガスとし、 C_2Cl_4 やパーフロロカーボン系液体をミストとして混合したベーパーミスト誘電体に対し、各種電圧波形を印加して絶縁特性を検討している。一方、三菱電機^{(20)~(23)}と武蔵工業大学^{(24)~(28)}は主成分ガス自身を凝縮させたミストが浮遊するベーパーミスト誘電体について検討している。これらの検討から、ベーパーミスト誘電体の絶縁特性には印加電圧の波形が大きく影響することが知られている。大気圧空気に C_2Cl_4 のミストを混合したベーパーミスト誘電体の例では、準平等電界における雷インパルスフラッシュオーバー電圧が大気圧空気に対して6.8倍にも上昇するが、交流や直流フラッシュオーバー電圧は1~2倍程度に上昇するのみとされている⁽¹⁰⁾。

上記の検討例はベーパーミスト誘電体の組成、供試ギャップ、電圧波形などの各種条件に対して基本的な絶縁特性を明らかにしているが、ガス圧力を変えた場合の絶縁特性や絶縁耐力が向上する要因を解明するには至っていない。すなわち、実験条件や実験内容について以下の問題がある。

- (1) 供試電極の規模が極めて小さい(大部分はギャップ長1~5mmである)。
- (2) ガス圧力が大気圧およびそれ以下に限られており、実際のガス絶縁機器で使用される数気圧のガス圧領域での絶縁特性が不明である。
- (3) ギャップ内に浮遊するミスト、および電極表面の濡れ(液膜)やしずくの課電時の挙動、さらにその絶縁耐力への影響については全く検討されていない。
- (4) 放電進展機構や絶縁耐力の向上要因が不明のため、ミストを有効に活用できる条件や、ベーパーミスト誘電体の特性がどのような分野に適用できるかは不明である。

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検討する。このうち、4.2節では主成分ガスを窒素(N_2)または SF_6 とし、 C_2Cl_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、数気圧のガス圧力領域まで明らかにする。さらに、4.3節ではミストの混合により絶縁耐力が向上する要因を検討し、ミストの効果として絶縁耐力の向上に寄与する効果と、逆に異物としての効果を印加電圧波形の関連も含めて整理する。