UDC 621.315.62.015.52:620.199.2

論文

57-B 44

人工汚損試験によるがいしの耐電圧の信頼度

正員 石井 勝 (東京大)

正員 松本 隆 宇 (東京大)

正員 河村 達 雄 (東京大)

1. はじめに

屋外に長期間曝露された、がいし、ブッシングなどの沿面絶縁耐力が大幅に低下することは周知の事実であるが、電力系統の運転電圧の上昇に伴って、絶縁設計の中で、その耐電圧を外部絶縁として考慮すべき比重が増している。

通常の気中ギャップの絶縁耐力の種々の特性については、数多くの研究がなされているのに対し、汚損がいにしについては、50% フラッシュオーバー電圧または耐電圧についての研究は数多く見られるが、その放電率曲線形状、印加電圧種類の影響、極性効果などについては未だに研究が十分でなく、統計的な絶縁設計に取り入れられるには至っていない。その理由の1つとして、再現性の良好な実験を行なうのが困難なことが挙げられる。

人工汚損試験に限っても、他の種類の絶縁耐力試験に比して、試料作成の過程が複雑であり、試料間のばらつきはかなり大きく、多くの場合試料の作成から試験の終了までに長時間を要するが、その間、試験環境を同一に管理することは困難であり、気中ギャップに対するのと同数の実験を施すことは不可能に近い。更に気中ギャップの放電電圧の変動係数が雷インパルスで約3%、開閉インパルスで約5%であるのに対して、汚損面について報告されている数値は6~12%⁽¹⁾と大きく、変動係数自体のばらつきも大きくなっている。変動係数がばらつくことは、汚損沿面放電現象が非常に多くの要因に影響されるためと推定されており、放電自体の持つ特性であるのか、あるいは試験環境の違いによるものか否かについては、放電電圧の環境依存性⁽²⁾⁽³⁾や、変動係数の汚損度に対する依存

性⁽⁵⁾について若干の報告がある程度で、現在の所十分明らかにされていない。また、放電率曲線形状についての研究も既に述べた様に、実験回数に制限があるために十分には行なわれていない。

以上のように、汚損がいの耐電圧値の決定に関しては未知の要素が少なくないが、今回、一般に行なわれる汚損がいの耐電圧実験においてはフラッシュオーバー電圧の分布が正規累積分布と見なせることを等価霧中法による実験で検証し、それをもとに、4回耐電圧法と昇降法により得られる耐電圧値の関係を明らかにした。更に、電圧上昇法によって得られる耐電圧値の性質を理論的に明らかにし、実験結果と良く一致することを示して、解析に用いた仮定の妥当性を確めた。

2. 等価霧中電圧突印法⁽⁶⁾での実験

一定電圧を印加する方式の人工汚損試験の電圧印加手順として、我が国では以前から4回耐電圧法が用いられていたが、最近は昇降法での試験結果も発表されている。これらはいずれも毎回の電圧印加で、フラッシュオーバーするか(×で表わす)しないか(○で表わす)というデータのみが得られる試験法であり、毎回の電圧印加でフラッシュオーバー電圧値(FOV)が得られる電圧上昇法と性格が異なっている。4回耐電圧法は4回ともフラッシュオーバーしない最高電圧をもって耐電圧とする試験法である。昇降法は、放電率が印加電圧に対して正規累積分布をなし、各電圧レベルでの試験結果が二項分布となることを仮定して、隣り合った電圧レベルで得られた[×]と[○]の組になったデータから、最尤法を用いて50% FOV (V_{50})と標準偏差(σ)を推定する手法であり、有効な電圧印加回数は、[×][○]どちらか少ない方の2倍となる。これは V_{50} 以外の特定の放電率を示す電圧値を求めるための最適の手法ではないが、 V_{50} と σ の推定値の信頼度いかによっては十分その目的にも使い得る。但し人工汚損試験に昇降法を採用する場合、他の電圧印加手順と同様に、先に述べた試験環境維持が困難であるなどの理

Reliability of Measured withstand Voltages of Artificially Contaminated Insulators. By Masaru Ishii, Member, Takaie Matsumoto, Member & Tatsuo Kawamura, Member (Institute of Industrial Science University of Tokyo),

石井 勝: 正員, 東京大学生産技術研究所

松本隆宇: 正員, 東京大学生産技術研究所

河村達雄: 正員, 東京大学生産技術研究所

由により、少ない回数の電圧印加しか行なえない。

実験は 250mm 標準懸垂がいし (250S) 3 個連を用いて行なった。汚損耐電圧試験においては、先にも述べたように種々の外的要因の変動から耐電圧値の変動を生じる。今回の実験では特にこの点に留意し、外的要因の管理を厳密に行ない、霧室 (10m³) 内の気温・相対湿度、汚損液の導電度および液温の変動幅を気温 $\pm 0.3^{\circ}\text{C}$ 、湿度、 $\pm 2\%$ 、導電度 $\pm 1\%$ 、液温 $\pm 0.2^{\circ}\text{C}$ 以内におさえた。汚損液は、とんこ 40g/l、食塩 20g/l の懸濁液を使用した。また、汚損面作成の過程で入る汚損度のばらつきを低くおさえるために、手作業の部分を極力少なくして半自動化した。液温が 10°C のときのがいし汚損度の変動係数はサンプル数 10 個で 8.2% であった。

交流電圧電源の印加電圧付近での短絡電流は約 7 A である。直流電圧電源には、交流主変圧器一次側にサイリスタを挿入して構成した安定化電源を使用した⁽⁷⁾。

電圧突印は汚損面更新の 3 分後に行ない、最大課電時間 1 分とした。実験条件は気温 24°C 、湿度 91%、液温 24°C 、等価塩分付着密度 $0.034\text{mg}/\text{cm}^2$ (全面) で、電圧印加手順は主として電圧ステップ幅 0.5kV の昇降法を用いた。なお、交流電圧印加時には、予備実験を含めて 32 回のフラッシュオーバーのうち、40 秒をこえてフラッシュオーバーした例は皆無であり、最大課電時間は 1 分で十分なことを確認した。直流電圧印加時には 31 回のフラッシュオーバー中 3 回が 40 秒をこえてから発生しており、1 分の課電時間ではやや不足であった可能性がある。この影響は後に検討する。

交流電圧の印加は 48 回行なったが、そのうち 32 回は昇降法の手順に従い、残り 16 回は試行回数の少なかった電圧レベルでの電圧印加を行なった。その結果昇降法で $V_{50}=10.2\text{kV}/\text{個}$ 、変動係数 $\sigma/V_{50}=2.7\%$ を得た。この値を用いて、48 回全部の実験に対して、各電圧レベルでの実験結果が二項分布に従うものと仮定し、信頼限界 90% で正規性の検定を行なった結果を図 1 に示す。図中の上・下限内に全ての実験値が入っており、正規性の仮定は棄却できない。また塩分付着密度 $m(\text{mg}/\text{cm}^2)$ のばらつきが、FOV(V_0) の変動 σ_m に及ぼす影響は、 $V_0 \propto m^{-0.2}$ と仮定すると、 m の実測結果の変動から信頼限界 90% で、 $1.3\% < \sigma_m/V_{50} < 2.9\%$ であり、今回のように厳密な環境管理を行なった場合に観測される V_0 の変動は、汚損度の変動により生じるとの仮説も棄却できない。

直流電圧では、正極性、負極性で各々 14 回、22 回の昇降法による実験を行ない、各々 $V_{50}^+=9.1\text{kV}/\text{個}$ 、

図 1 人工汚損がいしの放電率の正規性の検証
Fig. 1. Test on the distribution of flashover voltages of artificially contaminated insulators.

$\sigma^+/V_{50}^+=1.5\%$ 、 $V_{50}^-=8.0\text{kV}/\text{個}$ 、 $\sigma^-/V_{50}^-=1.1\%$ の結果を得た (添字は電圧極性を示す)。また、日数を経て同じ条件で実験した場合、交流電圧、直流電圧印加時共に V_{50} の差は 2% 以内であり、再現性は非常に良好であった。なお、直流電圧印加時の最大課電時間がやや不足だった場合の影響についてであるが、課電時間が長ければ昇降法の最低電圧印加レベルでのフラッシュオーバーが 1 回発生したと仮定して V_{50} の変化を計算したところ、何れも〈3・2〉節で述べられているそれぞれの変動範囲に十分入っており、本論文における議論には影響しないことが明らかとなっている。

以上の実験から得た結果は、従来の試験結果に比して、 σ/V_{50} が昇降法では小さめに推定されることを考慮しても大幅に小さくなっているが、その原因は厳密な実験環境の管理に求められると思われる。なお、等価霧中法では、気圧の変化が FOV に及ぼす影響は小さいが⁽⁴⁾、温度の影響はかなり大きいことが判明しており⁽²⁾⁽³⁾、FOV の気温による変動を $\pm 5\%$ 程度におさえるためには、試験中の気温ならびに汚損液の液温の変動を $\pm 5^{\circ}\text{C}$ 程度におさえるのが望ましい。従って試験条件をそれほど厳密に管理せずに行なわれる一般の試験では、FOV の変動を招くような種々の外的要因がある範囲で統計的に変動していると考えられるため、その結果得られる放電率曲線は正規累積分布をなすと仮定して差支えないと思われる。

3. 4 回耐電圧法と昇降法の関係

前章の実験により、一定電圧を印加する方式の試験は、一般にその FOV の分布が正規累積分布をなすと考えて良い事がわかった。以下では、それをもとに、FOV の分布が $N(0, \sigma^2)$ の規格化された正規分布に従うものとして解析を行なう。

図 2 4回の電圧印加のみに着目した4回耐電圧値の信頼性

Fig. 2. Reliability of 4 times withstand voltage based on the result of 4 times of test.

I X↑0000 ↓: Voltage down
 II OX↑0000
 III OOX↑0000
 IV OOOX↑0000

図 3 4回耐電圧試験の試験経過

Fig. 3. Processes of the 4 times withstand test.

〈3・1〉 4回耐電圧法⁽⁴⁾ この試験法で得られた耐電圧値のみに着目して考えると、真の放電率 p の電圧印加レベルで4回耐電圧を示す確率は $(1-p)^4$ となる。この確率 p を横軸に取って図2に示す。この場合例えば $p=5\%$ の点が4回耐電圧試験の耐電圧値とみなされる確率は81%であるが、 $p=44\%$ の点でこの試験の耐電圧値となる確率が10%存在する。このように、「耐電圧値」での4回のみ電圧印加で試験を終了した場合、かなり高い放電率を持つ電圧を「耐電圧値」とみなす可能性が少なくない。

しかしながら現実の試験では、この試験の性格上電圧印加回数が4回のみということは有り得ず、「耐電圧値」より1ステップ高い電圧レベルで必ずフラッシュオーバーが1回経験されているはずである。1ステップ高い電圧レベルから試験終了までの経過は、図3に示すように4通り存在する。それを各々タイプI～IVとする。各々の場合耐電圧値の存在する範囲は、電圧ステップ幅 dV と放電率曲線形状から算出できる。すなわち、電圧 V の関数として、放電率を $p(V)$ 、耐電圧値を V_w とすれば、各タイプに対して、耐電圧値 V_w を得る確率 $P(V_w)$ は各々以下に示される。

$$I: P_I(V_w) = p(V_w + dV) \{1 - p(V_w)\}^4$$

$$II: P_{II}(V_w) = p(V_w + dV) \{1 - p(V_w + dV)\} \times \{1 - p(V_w)\}^4$$

(a) タイプI

(b) タイプIV

図 4 4回耐電圧値の存在確率

Fig. 4. Probability distribution of the 4 times withstand voltage.

表 1 4回耐電圧値の存在確率の累積確率

Table 1. Normalized voltages corresponding to cumulative probabilities of the existence of measured 4 times withstand voltage.

Type	I	II	III	IV
累積確率				
90%	-0.37	-0.72	-0.96	-1.15
95%	-0.16	-0.50	-0.76	-0.95
99%	0.28	-0.11	-0.39	-0.60

($dV=1.0\sigma$)

$$III: P_{III}(V_w) = p(V_w + dV) \{1 - p(V_w + dV)\}^2 \times \{1 - p(V_w)\}^4$$

$$IV: P_{IV}(V_w) = p(V_w + dV) \{1 - p(V_w + dV)\}^3 \times \{1 - p(V_w)\}^4$$

$dV=\sigma$ のときの $P(V_w)$ をタイプI, IVについて、図4に示す。 $V=0, -1, -2$ の各点はそれぞれ50%, 16%, 2.5% FOVに相当する。図中に示した縦の破線は、 P をそこまで積分して得られる累積値が、 P を全電圧にわたって積分した数値の90%である事を示す。この累積確率が90%, 95%, 99%になる電圧をタイプI～IVについて表1に示す。これから、タイプIの場合、得られた耐電圧値が $V=-0.37$ 、すなわち36% FOVより低い確率が90%であり、タイプIVの場合同じく耐電圧値が $V=-1.15$ 、すなわち13% FOVより低い確率が90%であることがわかる。これらの図にみられる存在確率の分布形は、電圧に対して対称に近く、最頻値と平均値はほぼ等しい。また、電圧ステップ幅の大小にかかわらず、各タイプはI～

図 5 4 回耐電圧値の存在範囲

Fig. 5. Ranges of the existence of the 4 times withstand voltages.

図 6 種々の試験法による耐電圧値の存在範囲

Fig. 6. Ranges of the existence of various withstand voltages.

IVの順に生じにくくなる。

耐電圧値より 1 ステップ高い電圧での電圧印加の結果まで考慮した 4 通りの試験結果について、耐電圧値の存在確率の範囲を、電圧ステップ幅を横軸に取って、累積確率 90% 値と 50% 値について図 5 に示す。電圧ステップ幅が大きいと、得られる耐電圧値はより低い放電率を示す電圧に相当するが、その存在範囲が広がる事がわかる。同じ手法で 2 ステップ以上の電圧値にわたる試験結果を考慮して、得られた耐電圧値の信頼度を計算するのも容易である。

以上のように、得られる耐電圧値の存在範囲は、電圧ステップ幅と σ の比 dV/σ によって大きく影響されるが、この電圧印加手順では、 σ に関する情報はほとんど得られない。また、図 5 より、同じ 4 回耐電圧値でも、試験の経過によって、耐電圧値の存在範囲がかなり変わってくるのがわかるが、これは試験の経過によっては必ずしも 4 回フラッシュオーバーしないことを確認せずに、耐電圧値の存在する電圧領域をかなり限定できることを意味する。参考として、タイプ III の試験経過をたどったものにつき、耐電圧レベルでの試験を 3 回で終了した場合の 3 回耐電圧値の存在範囲を図 6 に示す。図 5 と比較すると、この場合の 3 回耐電圧

値はタイプ II と III の場合の間にあることが明らかである。

〈3.2〉昇降法⁽⁵⁾ この試験法は先に述べたような性格を持つが、有効な電圧印加回数が 30 を超える場合、 V_{50} と σ の推定値はかなり高い信頼性を持っている。ここでは、4 回耐電圧法と同等かやや多い程度の、有効な電圧印加回数が 8 回および 10 回のものについて計算を行なった。

有効な電圧印加回数が $2k$ 回のとき、起り得る全ての試験の場合の数 n は $2^k C_k$ となり、 $2k=8$ および 10 で各々 $n=70, 252$ となる。これを V_{50}, σ を推定するための計算式で変数となる、試験電圧の各レベルでの $[\times]$ または $[\circ]$ の個数で整理し直すと、各々 8 および 16 種類の場合に整理される。

昇降法で推定した V_{50} の値は、真の値を中心とした正規分布をなし、その標準偏差は電圧印加回数に依存する。例えば、電圧印加回数 8 回で母集団の標準偏差の約 0.5 倍、10 回で約 0.45 倍となり、試験電圧のステップ幅にそれほど依存しない⁽⁶⁾。一方、この程度の電圧印加回数では σ の推定値の信頼度はかなり低い。図 7 に電圧ステップ幅が $0.5\sigma, \sigma, 2\sigma$ のときに得られる標準偏差の推定値 $\hat{\sigma}$ の分布とその出現確率を、有効電圧印加回数 10 回の場合について示す。計算される推定値は図中の記号で示される点に離散的にしか発生せず、10 回の電圧印加では、10 通りの値しか存在しない。これが 8 回の電圧印加では、6 通りとなる。全体的に推定値 $\hat{\sigma}$ は、真の値 σ よりかなり小さく、また拡がりも大きい。図 8 は別の見方をしたもので、図中に示したような試験結果が得られる確率の電圧ステップ幅に対する依存性の例を示したが、電圧ステップ幅を 2 倍程度変えても、その出現確率があまり変動しない部分が生じることが明らかである。その範囲は試験結果により異なり、図 8(a) の例では $0.5\sigma \leq dV$

図 7 昇降法による標準偏差の推定値の理論分布 (有効電圧印加回数 10 回)

Fig. 7. Theoretical distribution of standard deviation estimated by UP-DOWN method. (Ten times of voltage application)

図 8 昇降法で図中に示したような試験経過となる確率の電圧ステップ幅に対する依存性

Fig. 8. Occurrence probability of the test process shown in the figure versus voltage step in UP-DOWN method.

$\leq \sigma$, 図 8(b) の例では $\sigma \leq dV \leq 2\sigma$ の範囲であることがわかる。また、図中の矢印は $\delta=1$ になるときの dV/σ の値であり、有効電圧印加回数が少ない場合でも、その δ の位置を、発生確率の最大値付近として推定していることを示している。

以上により、汚損耐電圧試験において昇降法で V_{50} を推定する場合には、電圧印加回数は 8 回程度で十分だが、 σ の推定には 10 回程度の電圧印加回数では不十分であり、 σ の推定値は、ほぼ真の値から、その約 1/5 までの間に存在しているという程度の意味しか持たないことは認識しておく必要があるだろう。

最後に昇降法による試験結果から耐電圧値を算出する場合について述べる。このような場合には、 V_{50} の推定値 $\hat{V}_{50}$ から σ の推定値 $\hat{\sigma}$ の何倍かを引いた値を耐電圧値とすることになるが、10 回の電圧印加の結果得られる $\hat{V}_{50}, \hat{\sigma}$ を用いて、 $\hat{V}_{50}/2\hat{\sigma}$ の存在範囲を、 dV/σ をパラメータとして図 6 中に示す。但し、昇降法で、電圧印加レベルが二つにしかならない場合は、 dV が σ を求めるためには過大であることが一見してわかるので、この解析からは除いている。図 6 から dV が大きいと 4 回耐電圧値よりも $\hat{V}_{50}-2\hat{\sigma}$ の存在範囲が狭くなっている。しかし、 dV/σ が 1 より小さい範囲では、 $\hat{V}_{50}-2\hat{\sigma}$ の存在範囲は 4 回耐電圧値よりも危険側となり、それを避けようとして、より低い電圧 (例えば $\hat{V}_{50}-4\hat{\sigma}$) を耐電圧値とする場合には、そ

の存在範囲の広がりが極めて大きくなる。 dV/σ がどの程度となるかは、10 回程度の電圧印加ではほとんど知ることができないので、 $\hat{V}_{50}$ と $\hat{\sigma}$ から求めた耐電圧値の信頼度は、4 回耐電圧法によるものよりも劣る。

また、昇降法の最低電圧印加レベルの存在範囲は、 dV/σ に大きく影響されるため、 dV/σ の値が図 7 に示される程度にしかわからない実際の試験時には、最低電圧印加レベルの存在範囲は、ほとんどの場合 4 回耐電圧値の存在範囲よりも広い。従って、 V_{50} のほかに 4 回耐電圧値以上の信頼度で耐電圧値を推定する場合には、最低電圧印加レベル付近で何回か耐電圧試験を追加する必要がある。

4. 電圧上昇法

電圧上昇法は、毎回の電圧印加で FOV が得られる点で前記の試験法と性格を異にしている。この電圧印加法で得られる結果を解析するに当たって以下の仮定を置いた。すなわち、フラッシュオーバーは、印加電圧がフラッシュオーバーの発生し得る最低電圧 (V_0) を越えて後、時間遅れ T を経て発生する。フラッシュオーバーの発生確率は過電圧 ($V-V_0$) の関数であり、過電圧が大きいほど確率が增大する。使用する記号の意味は次の通りである。

t : 時間

V : 印加電圧

V_0 : 最低 FOV

k : 電圧上昇率 ($V=kt$ とする)

V_0^* : 上昇法での FOV

T : フラッシュオーバーまでの時間遅れ ($V=V_0$ で $T=0$)

$\sigma_{V_0^*}$: V_0^* の標準偏差

σ_T : T の標準偏差

$f(T)$: 時間遅れの分布

$F(T)$: 時間遅れの累積分布

n_0 : フラッシュオーバーに到る可能性をもつ部分アークの発生頻度 (個/s)

W : 部分アークがフラッシュオーバーに至る確率

ここで、 T の中に含まれる放電路の形成時間遅れは十分小さいので、 T は統計的時間遅れのみで考える⁽⁸⁾。

時刻 T と $T+dt$ の間でフラッシュオーバーが発生する確率 $d(F(T))$ は、

$$d(F(T)) = (1 - F(T)) n_0 W dt$$

$$\therefore 1 - F(T) = \exp\left(\int_0^T -n_0 W dt\right)$$

ここで、 n_0W は過電圧 ($V-V_0$) の関数で、 $V \leq V_0$ では 0 と考えるが、過電圧が小さい範囲では、それを ($V-V_0$) で展開して二次以上の項を無視し、 $n_0W = A(V-V_0) = AkT$ (A : 定数) で表わされると仮定する。上式から、

$$F(T) = 1 - \exp(-AkT^2/2) \quad (T \geq 0)$$

$$f(T) = \frac{dF(T)}{dT} = AkT \exp\left(-\frac{Ak}{2}T^2\right) \quad (T \geq 0)$$

T についての平均値 $\bar{T}$ は次式で与えられる。

$$\bar{T} = \int_0^\infty T f(T) dT = \sqrt{\frac{\pi}{2Ak}}$$

$\bar{T}$ を使って $\bar{V}_s^*$ は表わされ

$$\bar{V}_s^* = k\bar{T} + V_0 = \sqrt{\pi k/2A} + V_0 = V_{s0}^*$$

標準偏差についても同様に計算されて、

$$\sigma_T^2 = \int_0^\infty (T - \bar{T})^2 f(T) dT = \frac{4 - \pi}{2Ak}$$

$$\therefore \sigma_T = \sqrt{(4 - \pi)/2Ak}, \quad \sigma_s^* = \sqrt{(4 - \pi)k/2A}$$

以上の結果を見ると、フラッシュオーバー発生確率の分布は、正規分布ではなく非対称性を持っており、 k が大きいと $\bar{V}_s^*$, σ_s^* も大きいことがわかる。

ここで、一般に電圧上昇法で得ている耐電圧値 V_s^* の持つ意味を考える。計算される V_s^* は、 $f(T)$ の分布形を考慮することなしに $\bar{V}_s^* - 1.64\sigma_s^* = V_s^*$ で求められると考えられるが、その最頻値 ($\tilde{V}_s^*$) は次のようになる。

$$\begin{aligned} \tilde{V}_s^* &= \sqrt{\frac{\pi k}{2A}} + V_0 - 1.64 \sqrt{\frac{(4 - \pi)k}{2A}} \\ &= V_0 + 0.18 \sqrt{\frac{k}{A}} \end{aligned}$$

すなわち、最低 FOV (V_0) が一定の場合、 k が過大でなければ、 $\tilde{V}_s^*$ は V_0 に近い値となることがわかる。

実際の試験においては、 V_0 も統計変動すると考えられ、その統計変動幅は一般の人工汚損試験では、試験条件の管理が十分厳しく行なえないため、第 2 章における値より大きくなる。 V_0 が正規分布をなすと仮定すると、電圧上昇法の FOV の見掛け上の累積分布 $P(V_s^*)$ は次のようになる。

$$\begin{aligned} P(V_s^*) &= \int_{-\infty}^\infty G(V_s^* - V') \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \\ &\quad \times \exp\left[-\frac{(V' - V_{s0}^*)^2}{2\sigma^2}\right] dV' \end{aligned}$$

ここに、

$$\begin{aligned} G(V_s^* - V_0) &= \begin{cases} 0 & (V_s^* < V_0) \\ 1 - \exp\left\{-\frac{A}{2k}(V_s^* - V_0)^2\right\} & (V_s^* \geq V_0) \end{cases} \end{aligned}$$

σ : V_0 の統計変動の標準偏差, V_{s0} : V_0 の平

表 2 上昇法による試験結果 (250 S 3 個連)

Table 2. Test results by voltage raising method. (250 S $\times$ 3).

dV/dt (kV/s)	5.0	3.5	1.4	0.91	UP-DOWN
V_{s0} (kV)	35.3	34.7	33.7	34.0	31.9
σ^* (kV)	2.11	1.05	1.05	1.88	0.44
V_s (kV)	31.8	33.0	32.0	30.9	—
V_{min} (kV)	31.0	32.0	32.5	31.0	—
フラッシュオーバーまでの時間 (s)	7.1	9.9	24.1	37.4	—
A (1/kVs)	0.68	0.70	0.68	0.32	—
σ_s^* (kV)	1.78	1.46	0.94	0.58	—

均値

5. 電圧上昇法による実験

実験は、電圧上昇率を変えるために直流の正極性で行ない、各種の k でそれぞれ、10 回の電圧印加を行なった。実験時の気温 16°C、相対湿度 94.5%、液温 15.8°C、等価塩分付着密度 0.056 mg/cm² (下面のみ) であった。同じ条件のもとで行なった 10 回の電圧突印による昇降法の結果も、比較のため合わせて表 2 に示す。以後、上昇法による統計量には * 印を付して、昇降法による結果と区別する。 $k=0.91$ kV/s の場合を除き、 V_{s0}^* , σ^* は k と伴に増大する傾向にある。また、10 個のデータの出現頻度は最低 FOV のの方にかたよった非対称性を持つ傾向がうかがわれた。但し、 $k=0.91$ kV/s の場合は、最低 FOV (V_{min}) 付近と、 V_{s0}^* よりかなり高い電圧の所とに極大を持つ双峰性の分布となっており、汚損面の乾燥に伴って FOV がかなり上昇する場合があることを意味している。

以上の実験結果と前章での解析結果を比較すると、 k が 1.4~5 kV/s の範囲で V_{s0}^* , σ^* が増大しており、前章の解析結果と良い一致を示している。第 2 章の実験の結果、フラッシュオーバー電圧の標準偏差は非常に小さいことが判明しており、これは印加電圧が昇降法の V_{s0} より高いか、低いかによってフラッシュオーバーの有無が定まると考えても事実上差支えないことを意味する。このため V_0 が昇降法の V_{s0} と等しいと仮定して、 V_{s0}^* を使って求めた A の値と σ_s^* の値を表 1 中に示してあるが、1.4 kV/s $\leq k \leq 5$ kV/s の範囲で A はほぼ一定で、 σ_s^* と実測された σ^* も良い一致を示しており、前章での解析に用いた仮定は実際の現象を良く表現し得ると言える。一方、 $k=0.91$ kV/s の場合、先にも述べた理由から、前記解析にあてはまらない現象を含んでいることもわかる。

6. 検 討

一定電圧を印加したときの FOV の分布は、電圧上昇法における V_0 の分布と事実上等しいと考えることができ、電圧上昇法で得られる耐電圧値が、 V_0 の分布の何処に位置するかを検討することで、一定電圧を印加する方式の試験法と比較することができる。以後一定電圧を印加したときの $m\%$ FOV を単に V_m 、標準偏差を σ で表わし、 V_0 の分布に等しいとする。

$V_{50}=0$ として、 σ と印加電圧を $\sqrt{k/A}$ で規格化して計算した上昇法の試験結果の分布 $p(V_0^*)$ を図 9 に同じ条件で 10 回の電圧印加を行なったときに算出される V_{50}^* の推定値 $\hat{V}_{50}^*$ の分布を 500 回のモンテカルロ・シミュレーションにより求めたものを図 10 に示す。図 11 には、それらの結果から算出される各種統計量を示す。図中に矢印で示される数字は、 V_0 の累積分布の % 値、すなわち何 % FOV であるかを示しており、 $\hat{V}_{50}^*(90)$ は $\hat{V}_{50}^*$ の累積分布の 90% 値を示している。図 9 から、 σ が大きくなるにつれて $P(V_0^*)$ の非対称性が小さくなり正規分布に近づくが、その平均値 V_{50}^* は図 11 に示されるように V_0 の平均値とは異なっているのがわかる。上昇法による試験で評価される $\hat{V}_{50}^*$ の平均値 $\bar{V}_{50}^*$ は $0.4 < \sigma$ で V_{50} より低い値を持つ事がわかるが、その 90% 累積値を考えると $1.2 < \sigma$ になるまで V_{50} より高い値を持つ事がわかる。第 5 章における実験では、 $\sqrt{k/A}$ は V_{50} の 4~8% であり、規格化した σ の値は 0.17~0.31 に相当する。実験で得た V_{50}^* は $k=0.91 \text{ kV/s}$ の場合を除き、 V_{50} と同程度かやや大きい値になっており、この解析結果と一致する。

A の値はその性質からがいし連結長に比例すると考えられるため、フラッシュオーバーまでの時間 T が同一のとき、 $\sqrt{k/A}$ の値はがいし連結長によらない。がいし形状が 250S と異なる場合には、 $\sqrt{k/A}$ の値が本実験と異なることが予想される。各種がいしを用いて k を変えて実験を行なった報告⁽⁹⁾によると、 k を大きくした場合 V_{50}^* の上昇の度合いが、がいし形状、印加電圧極性により異なっており、250S に比して長幹がいしは $\sqrt{k/A}$ が大きくなっている。また、第 4 章での解析は直流電圧印加時を想定しているが、交流電圧を印加した場合を考えると、フラッシュオーバー直前のアーカの発生からフラッシュオーバーまでの時間は、数サイクルである。従って、その間の電圧波高値は一定とみなせるような、より長い時間領域での電圧変化に着目した本解析は、 $\sqrt{k/A}$ の値を変えるのみで、交流電圧

図 9 電圧上昇によるフラッシュオーバー電圧の分布形

Fig. 9. Probability distribution of the flashover voltage in voltage raising method.

図 10 電圧上昇法による 5% フラッシュオーバー電圧の分布形

Fig. 10. Probability distribution of 5% flashover voltage in voltage raising method.

図 11 電圧上昇法で得られる各種統計量の $\sqrt{k/A}$ で規格化した σ に対する依存性

Fig. 11. Various statistics versus σ normalized by $\sqrt{k/A}$ in voltage raising method.

印加時にも適用できるものと考えられる。

一般の直流電圧印加時の電圧上昇法による試験での $\sqrt{k}/A$ の値は V_{50} の 3~8% 程度になると思われ、この場合、 $\sqrt{k}/A$ で規格化した σ の大きさは 1~2.5 程度に相当することが過去の試験結果⁽¹⁾⁽⁹⁾から推定される。この範囲で図 11 から $\bar{V}_5^*$ は $V_{12} \sim V_{24}$ であり、 $\bar{V}_5^*(90)$ は $V_{33} \sim V_{57}$ であることがわかる。

電圧上昇速度の選定は、現在経験的にフラッシュオーバーまでの時間が、10~30 秒になるのが好ましい⁽⁶⁾とされているが、極端に低い電圧上昇速度を採用することは、第 5 章に述べたように汚損面の過度の乾燥に伴う FOV の上昇を招くことになる。試験に採用した電圧上昇速度が適切か否かの判定は、FOV の分布が図 9 に示される形状に一致するか否かを見る事で可能である。表 2 の実験結果では、汚損面の過度の乾燥に伴う効果は、フラッシュオーバーまでの時間が 37 秒のものにすでに現われている。また、逆に電圧上昇率が過大の場合には、乾燥帯の形成を見ずにフラッシュオーバーに至るが、フラッシュオーバーまでの時間が 1~2 秒以内の場合がその領域となる。この場合には部分アーク進展中の印加電圧の変化が無視できなくなり、本解析の仮定から外れることになる。

7. 結 言

以上に述べたように、各種電圧印加法により得られる人工汚損がいしの耐電圧値の性質と信頼度を明らかにすると共に、それが実験結果を良く説明できることを示した。これをまとめると以下の通りである。

(1) 環境管理を厳密に行なうことにより、等価霧中突印法で得られる FOV の変動係数が、交流電圧、直流電圧に対してともに従来報告されていた数値より大幅に小さくなり、再現性も極めて良いこと、および一般の人工汚損試験では放電率が正規累積分布とみなして差支えない事を明らかにした。

(2) 4 回耐電圧法で得られる耐電圧値の信頼度が試験経過で異なることを示し、合わせて昇降法との比較を行なった。

(3) 電圧印加回数の少ない昇降法によって耐電圧値を求める場合の信頼度を解析し、低い放電率を示す電圧を求める場合、信頼度の低下を防ぐためには試験の追加を行なう必要があることを明らかにした。

(4) 電圧上昇法で得られる FOV の分布、その平均値、変動係数の電圧上昇速度依存性を解析し、等価霧中法による実験結果と良く一致することを示した。また、電圧上昇法の V_5^* と、一定電圧を印加する試験により得られる放電率との関係を求め、その信頼性について明らかにした。この解析は直流電圧印加時のみでなく交流電圧印加時にも成立するものと考えられる。

最後に、人工汚損試験の実施に際して多大な御援助をいただいた北条準一氏をはじめとする東京大学生産技術研究所 河村・石井両研究室の諸氏ならびに東京電機大学 中田暢之君（現日立製作所）に厚く御礼申し上げる。なお、本研究は文部省科学研究費の補助により行なわれたものである。

(昭和 56 年 6 月 23 日受付、同 56 年 11 月 12 日再受付)

文 献

- (1) S. Fujitaka, et al.: "Japanese Method of Artificial Pollution Test on Insulators", *IEEE Trans. Power Apparatus Syst.* PAS-87, 3, 729 (1968)
- (2) 河村, 他: 「汚損がいしフラッシュオーバー電圧への気温の影響」昭 55 電気学会大会 No. 1072
- (3) 石井, 他: 「交流汚損 フラッシュオーバー電圧の温度依存性」昭 54 電気学会東京支大 No. 112
- (4) T. Kawamura, et al.: "Pressure Dependence of DC Breakdown of Contaminated Insulators", *IEEE Trans. Elect. Insulation*, EI-17, 1, 39 (1982)
- (5) G. Karaday, et al.: "Statistical Method for Transmission Line Insulation Design for Polluted Areas", *IEEE paper*. A 76 220-4 (1976)
- (6) 電気学会: 絶縁試験法ハンドブック
- (7) T. Kawamura, et al.: "Stabilized DC Source for Testing of Polluted Insulators", 3rd I. S. H. paper. 43.09 (1979)
- (8) 野口・堀井: 「高気圧室中の交流破壊電圧と統計的時間遅れ」, 電学誌 87, 2477 (昭 42-12)
- (9) 永井・比留間: 「直流汚損試験における電圧上昇速度と汚損放置時間がフラッシュオーバー電圧に及ぼす影響」電気学会高電圧研究会資料 HV-81-30 (1981)