

絶縁油の耐力に及ぼす不純物， 電圧上昇速度及びその交互作用に就て

齊 藤 金 一
柳 瀬 秋 夫

The Effects of the Impurities, the Rising Rates of Voltage, and these Interaction on the Breakdown Voltages of Insulating Oil.

Kin-iti SAITO

Akio YANASE

The authors have investigated the effects of the impurities in the insulating oil, in relation to the rising rates of the voltages and the deviations of the breakdown voltages. And in this report, using the analysis of variance by the two-way layout in the stochastics, we analyze at the same time the factorial effects, which are the impurities, the rising rates of voltages and these interaction.

緒 言

絶縁油の破壊電圧に及ぼす不純物の影響に関しては古くから多くの研究がなされている⁽¹⁾。筆者等は比の問題を破壊値の「ばらつき」及び電圧上昇速度に関連させて研究を行って来た。更に本報では従来別個に処理されてきた破壊値を推測統計学の二元配置法による分散分析を用いて同時に処理してそれらの効果及びその交互作用効果を、放電現象に於ては相当大きいと思われる非決定論的に起る偶然誤差による変動と比較して検討したものである。

本 論

基礎試料に用いた絶縁油は JIS-C 2101 で定められた方法で測定値が 3.4 KV で之は普通用ひられるものの中では最上級のものと考えてよい。然し之に含まれる不純物、水分等の量及び化学的組成等全く不明のものである。実験は第一表Aに示す通り、此の基礎試料に対して、不純物 0.4mg/10000cc, 32mg/10000cc, 80mg/10000cc の4種の処理を施し、その各試料を夫々電圧上昇速度 0.65kv/sec, 3.0kv/sec 7.5kv/sec の交流電圧で破壊して測定値を得たものである。尚不純物としては綿巻線の木綿をこまかく切り乾燥器中 70.0°C で1時間乾燥したものをを用いた。測定に際しては要因即ち不純物の量及び電圧上昇速度以外は積極的に無作意化し、確率化しなければならないので、1回の破壊による温度上昇の影響を除くため5分間隔で行い全測定中の油温の変化を 3°C 以内にとどめた。又測定値は最初の3回の破壊を捨て第4回から第8回までのものを採用した。第一表Bは第一表Aの記号の説明である。

		電圧上昇速度 (j)								
		0.65 KV/sec			3.0 KV/sec			7.5 KV/sec		
0		v_{11}	v'_{11}	v_{11}^2	v_{12}	v'_{12}	v_{12}^2	v_{13}	v'_{13}	v_{13}^2
		27.4	7.4	54.76	28.5	8.5	72.25	33.5	13.5	182.25
		25.4	5.4	29.16	29.2	9.2	84.64	28.6	8.6	73.96
		29.2	9.2	84.64	30.1	10.1	102.01	28.0	8.0	64.00
		30.0	10.0	100.00	29.0	9.0	81.00	29.9	9.9	98.01
		26.0	6.0	36.00	27.1	7.1	50.41	32.0	12.0	144.00
不純物 (乾燥木綿) の量	4 mg / 10000 cc	$T_{11} = 38$ $T_{11}^2 = 1444$ $\bar{v}_{11} = 27.6$ $\sigma_{11} = 1.79$			$T_{12} = 43.9$ $T_{12}^2 = 1927.21$ $\bar{v}_{12} = 28.78$ $\sigma_{12} = 0.98$			$T_{13} = 52.0$ $T_{13}^2 = 2704$ $\bar{v}_{13} = 30.4$ $\sigma_{13} = 2.05$		
		v_{21}	v'_{21}	v_{21}^2	v_{22}	v'_{22}	v_{22}^2	v_{23}	v'_{23}	v_{23}^2
		24.5	4.5	20.25	26.9	6.9	47.61	29.8	9.8	96.04
		21.0	1.0	1.00	24.1	4.1	16.81	18.9	-1.1	1.21
		24.9	4.9	24.01	22.0	2.0	4.00	23.2	3.2	10.24
		18.2	-1.8	3.24	29.1	9.1	82.81	30.0	10.0	100.00
(i)	32 mg / 10000 cc	$T_{21} = 10.6$ $T_{21}^2 = 112.36$ $\bar{v}_{21} = 22.12$ $\sigma_{21} = 2.5$			$T_{22} = 23$ $T_{22}^2 = 529$ $\bar{v}_{22} = 24.6$ $\sigma_{22} = 3.04$			$T_{23} = 27.8$ $T_{23}^2 = 772.84$ $\bar{v}_{23} = 25.56$ $\sigma_{23} = 4.17$		
		v_{31}	v'_{31}	v_{31}^2	v_{32}	v'_{32}	v_{32}^2	v_{33}	v'_{33}	v_{33}^2
		11.8	-8.2	67.24	18.3	-1.7	2.89	16.1	-3.9	15.21
		16.1	-3.9	15.21	11.9	-8.1	65.61	20.8	0.8	0.64
		13.2	-6.8	46.24	17.1	-2.9	8.41	24.9	4.9	24.04
		10.9	-9.1	82.81	13.1	-6.9	47.61	18.1	-1.9	3.61
	80 mg / 10000 cc	$T_{31} = -34.4$ $T_{31}^2 = 1183.36$ $\bar{v}_{31} = 13.12$ $\sigma_{31} = 1.78$			$T_{32} = -24.6$ $T_{32}^2 = 605.16$ $\bar{v}_{32} = 15.08$ $\sigma_{32} = 2.39$			$T_{33} = -8.1$ $T_{33}^2 = 65.61$ $\bar{v}_{33} = 18.38$ $\sigma_{33} = 4.35$		
		T_{11}	T_{11}^2	\bar{v}_{11}	T_{12}	T_{12}^2	\bar{v}_{12}	T_{13}	T_{13}^2	\bar{v}_{13}
		14.2	201.64	27.6	4.23	1789.29	28.78	71.7	5140.89	30.4
		T_{11}	T_{11}^2	\bar{v}_{11}	T_{12}	T_{12}^2	\bar{v}_{12}	T_{13}	T_{13}^2	\bar{v}_{13}
		128.2	16435.24	27.6	1789.29	1789.29	28.78	5140.89	5140.89	30.4
		$C^2 = 2213.11$								

 v_{ij} 破壊値

$$v'_{ij} = v_{ij} - 20$$

$$T_{ij} = \sum_{\lambda=1}^5 v'_{ij} \lambda$$

$$T_{i.} = \sum_{j=1}^3 T_{ij}$$

$$T_{.j} = \sum_{i=1}^3 T_{ij}$$

$$T_{..} = \sum_i \sum_j T_{ij}$$

$$= \sum_i T_{i.} = \sum_j T_{.j}$$

$$C^2 = \sum_i \sum_j \sum_{\lambda} v'_{ij} \lambda$$

$$\bar{v}_{ij} = \frac{1}{5} \sum_{\lambda} v'_{ij} \lambda$$

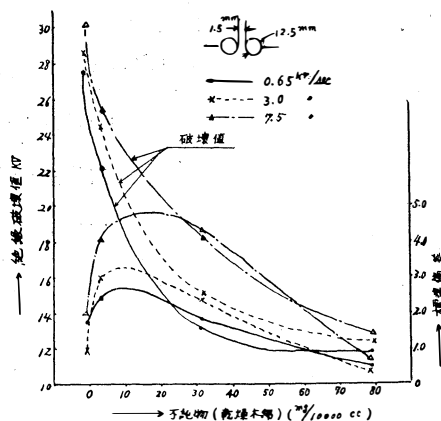
$$\sigma_{ij} =$$

$$\sqrt{\frac{1}{5} \sum_{\lambda} (v'_{ij} \lambda - \bar{v}_{ij})^2}$$

表-1 A, B,

I。

第一図は第一表中の破壊値平均 \bar{v}_{ij} 及びその標準偏差 λ_{ij} を図示したものである。即ち破壊値に就て既に報告されている結果と比較して、基礎試料の含む不純物殊に水分は極く少いものである事が解る。電圧上昇速度の影響に就ても筆者等が既に報告しているものと殆んど同様の結果が出ている。破壊値の偏差は各電圧上昇速度共不純物の量と共に増大し最大値を経て下降する傾向が認められる。そして筆者等の考察によれば此の偏差が増大している範囲の不純物の量が一般に使用出来る絶縁油の不純物の許容限度であると考えられる。それは不純物の量が大体此の値以内であれば、破壊放電によって不純物の影響は次第に小さくなり破壊値は次第に上昇するが、大体此の値以上では破壊放電によって絶縁油は更に劣化して耐力は下降の一途をたどるからである。之は絶縁油の破壊機構が不純物に関連しているという考えにも通ずるものである。更に絶縁油中の不純物の定量は困難であつて従来逆に破壊値を測定して不純物の量を推測する方法がとられたが、〔筆者等は此の許容限度までの不純物の量に対しては偏差を測定して不純物の量を推定する方法を提案したい。次に破壊値に及ぼす不純物の量、電圧上昇速度の影響及びそれ等の交互作用を次の様に求めた。



図—1

II。

第一表に求められた測定値は特定の基礎試料に特定の処理を施した標本に就て、独立に5回づつ測定を行つて得たものであるから、母数模型と考え、従つて之から得られる結論は厳密には此の絶縁油、此の測定条件のみに適用することが出来るわけであるが、其の傾向は一般絶縁油にも適用出来るものと考えられる。尚 80mg/10000cc の測定値は第一図からも解る通り劣化の程度が大きすぎるため今後の測定値の処理から除外することとする。

表中1つの測定値 v_{ijl} を実現値とする確率変数を v_{ijl} とすると

$$V_{ijl} = m_{ij} + W_{ijl} \dots \dots \dots (1)$$

と置く事が出来る。即ち m_{ij} は不純物の量 (i) 及び電圧上昇速度 (j) によつて変化する破壊値の部分で、 W_{ijl} は一般的には測定者に制御出来ない偶然誤差に起因する破壊値の変動部分で、之は正規分布 $N(0, \lambda^2)$ に従うものと考えてよい。ここで分散 λ^2 は第一図でも明らかな様に実際には (ij) 毎に異なるものであるが此処では平均として一定であると仮定する。

$$\text{更に} \quad m_{ij} = m + r_i + c_j + (rc)_{ij} \dots \dots \dots (2)$$

$$\therefore V_{ijl} = m + r_i + c_j + (rc)_{ij} + W_{ijl} \dots \dots \dots (3)$$

$$\text{と置き} \quad \sum_i r_i = \sum_j c_j = \sum_i (rc)_{ij} = \sum_j (rc)_{ij} = 0 \dots \dots \dots (4)$$

になる様に m を定めても一般性を失はない。こうすれば V_i は破壊値の中不純物の量のみで変動する部分を、 C_j は電圧上昇速度のみで変動する部分を、 $(rc)_{ij}$ は両者の交互作用によつて変動する部分を表わす事になる。従つて帰無仮説として

$$\left. \begin{aligned} H_0(R) : r_1 = r_2 = \dots \dots \dots r_l = 0 \\ H_0(C) : c_1 = c_2 = \dots \dots \dots C_l = 0 \\ H_0(RC) : (rc)_{11} = (rc)_{12} = \dots \dots (rc)_{lj} = 0 \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

をとり之を分散分析によつて検定するのである。

即ち実測値 $v_{ij\lambda}$ の総平方和 St は行間（不純物間）平方和 S_r ，列間（電圧上昇速度間）平方和 S_c ，交互作用平方和 S_{rc} ，及び残差級内平方和 S_{IN} の4成分に分解される。即ち

$$\begin{aligned} [St &= \sum_i \sum_j \sum_\lambda (\bar{v}_{ij\lambda} - \bar{v})^2] \\ &= [S_r = nI \sum_i (\bar{v}_i - \bar{v})^2] + [S_c = nJ (\bar{v}_j - \bar{v})^2] \\ &+ [S_{rc} = n \sum_j \sum_i (\bar{v}_{ij} - \bar{v}_j - \bar{v}_i + \bar{v})^2] \\ &+ [S_{IN} = \sum_j \sum_i \sum_\lambda (v_{ij\lambda} - \bar{v}_{ij})^2] \dots \dots \dots (6) \end{aligned}$$

ここで

$$\left. \begin{aligned} \lambda &= 1, 2, \dots \dots \dots n \text{ (各層一定)} \\ i &= 1, 2, \dots \dots \dots I \\ j &= 1, 2, \dots \dots \dots J \\ \bar{v} &= \frac{1}{nIJ} \sum_i \sum_j \sum_\lambda v_{ij\lambda} \\ \bar{v}_i &= \frac{1}{nI} \sum_j \sum_\lambda v_{ij\lambda} \\ \bar{v}_j &= \frac{1}{nJ} \sum_i \sum_\lambda v_{ij\lambda} \\ \bar{v}_{ij} &= \frac{1}{n} \sum_\lambda v_{ij\lambda} \end{aligned} \right\} (7)$$

次に $V_{ij\lambda}$, \bar{V}_{ij} , \bar{V}_i , \bar{V}_j , \bar{V} を夫々 $v_{ij\lambda}$, \bar{v}_{ij} , \bar{v}_i , \bar{v}_j , \bar{v} を実測値とする確率変数とし (6)式を実現値とする確率変数 S_r , S_c , S_{rc} , S_{IN} の標本分布を求めて整理すると

不純物間平方和

$S_r = nI \sum_i (\bar{V}_i - \bar{V})^2$ は自由度 $(I-1)$ の $\lambda^2_1 x^2$ 分布に従い

$U^2_r = S_r/f = S_r/(I-1)$ とおきその平均を $E(\bar{U}^2_r)$ とすれば

$$E(U^2_r) = \lambda^2_1 = \lambda^2 + \frac{nJ}{(I-1)} \sum_i r_i^2 \dots \dots \dots (8)$$

電圧上昇間平方和

$S_c = nJ \sum_j (\bar{V}_j - \bar{V})^2$ は自由度 $(J-1)$ の $\lambda^2_2 x^2$ 分布に従い

$U^2_c = S_c/f = S_c/(J-1)$ とおきその平均を $E(U^2_c)$ とすれば

$$E(U^2_c) = \lambda^2_2 = \lambda^2 + \frac{nI}{J-1} \sum_j c_j^2 \dots \dots \dots (9)$$

上述両者間交互作用平方和

$S_{rc} = n \sum_j \sum_i (\bar{V}_{ij} - \bar{V}_i - \bar{V}_j + \bar{V})^2$ は自由度 $(I-1)(J-1)$ の $\lambda^2_3 x^2$ 分布に従い

$U^2_{rc} = S_{rc}/f = S_{rc}/[(I-1)(J-1)]$ とおきその平均を $E(U^2_{rc})$ とすれば

$$E(U^2_{rc}) = \lambda^2_3 = \lambda^2 + \frac{n}{(I-1)(J-1)} \sum_i \sum_j (rc)_{ij}^2 \dots \dots \dots (10)$$

級内平方和

$S_{IN} = \sum_i \sum_j \sum_\lambda (V_{ij\lambda} - \bar{V}_{ij})^2$ は自由度 $IJ(n-1)$ の $\lambda^2 x^2$ 分布に従い

$U^2_{IN} = S_{IN}/f = S_{IN}/nIJ(n-1)$ とおき，その平均値を $E(U^2_{IN})$ とすれば

$$E(U^2_{IN}) = \lambda^2 \dots \dots \dots (11)$$

である。そして之等はすべて独立である。従つて(5)式の帰無仮説が成立すれば

$$E(U^2_R) = E(U^2_C) = E(U^2_{RC}) = \lambda^2$$

となり S_R は $f = (I-1)$ の $\lambda^2 x^2$ 分布

S_C は $f = (J-1)$ の $\lambda^2 x^2$ 分布

S_{RC} は $f = (I-1)(J-1)$ の $\lambda^2 x^2$ 分布

になり従つて (8) (11)式から

$$F_R = U^2_R / U^2_{IN} = \frac{S_R}{(I-1)} / \frac{S_{IN}}{IJ(n-1)} \dots\dots\dots (12)$$

は $f_1 = (I-1)$, $f_2 = IJ(n-1)$ の F 分布をなす

又(9) (11)式より

$$F_C = U^2_C / U^2_{IN} = \frac{S_C}{J-1} / \frac{S_{IN}}{IJ(n-1)} \dots\dots\dots (13)$$

は $f_1 = (J-1)$ $f_2 = J(n-1)$ の F 分布をなす。

次に(10) (11)式から

$$F_{RC} = U^2_{RC} / U^2_{IN} = \frac{S_{RC}}{(I-1)(J-1)} / \frac{S_{IN}}{IJ(n-1)} \dots\dots\dots (14)$$

は $f_1 = (I-1)(J-1)$ $f_2 = nJ(n-1)$ の F 分布をなす。もし(5)式の $H_{0(R)}$ $H_{0(C)}$ $H_{0(RC)}$ が成立しなければ $\lambda^2_1 > \lambda^2$ $\lambda^2_2 > \lambda^2$ $\lambda^2_3 > \lambda^2$ であるから此の場合(12)(13)(14)式の値は夫々 H_0 の成立する場合に比し大きくなるはずである。そこで

$$\left. \begin{aligned} P_1\{F_R > F(\lambda_1); H_{0(R)}\} &= \alpha_1 \\ P_2\{F_C > F(\lambda_2); H_{0(C)}\} &= \alpha_2 \\ P_3\{F_{RC} > F(\lambda_3); H_{0(RC)}\} &= \alpha_3 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (15)$$

になる様に $F(\alpha_1)$ $F(\alpha_2)$ $F(\alpha_3)$ をとり F 分布表から之等を求めて、有意水準 α_1 , α_2 , α_3 , をもつて(5)式の帰無仮説 H_0 を棄却するのである。尚此の分析は母集団が正規分布に従うという仮定のもとに行われているが、中心極限値定理により標本平均は常に正規型に近づくこと、及び F 分布、 x^2 分布等は正規型でない場合でも余り異つた結果はあたえないという性質があるので、本実験の測定値の処理に此の理論を適用しても大きな誤差は入っていないものと思う。さて実際の計算は次の方法で行う。尚算式はすべて差の平方和になつていたので計算を簡略にするために 実測破壊値 (第一表の v_{ij}) から一様に 20kv 引いた値 (v'_{ij}) を用い計て算を行う。

$$M = T_{..}^2 / IJn = 128.2^2 / 3 \times 3 \times 5 = 365.23$$

$$S_T = C^2 - M = 2213.11 - 365.23 = 1847.88$$

$$\begin{aligned} S_F (\text{要因効果}) &= \frac{1}{n} \sum_i \sum_j T_{ij}^2 - M \\ &= \frac{1}{5} \{38.0^2 + 10.6^2 + \dots\dots\dots (-8.1)^2\} - 365.23 = 1503.48 \end{aligned}$$

$$S_{IN} = S_T - S_F = 1847.88 - 1503.48 = 344.40$$

$$S_R = \frac{1}{Jn} \sum_i T_i^2 - M = \frac{1}{3 \times 5} \{133.9^2 + 61.4^2 + (-67.1)^2\} - 365.23 = 1381.67$$

$$S_C = \frac{1}{In} \sum_j T_{.j}^2 - M = \frac{1}{3 \times 5} \{14.2^2 + 42.3^2 + 71.7^2\} - 365.23 = 110.22$$

$$S_{RC} = S_F - S_R - S_C = 1503.48 - 1381.67 - 110.27 = 11.57$$

(5)
(12)(15)式及び F 分布表(5)から

$$F_R = \frac{S_R}{I-1} / \frac{S_{IN}}{IJ(n-1)} = \frac{138.67}{3-1} / \frac{344.40}{3 \times 3(5-1)} = 72.26 > F(0.1\%) \doteq 8$$

(13) (15)式及びF分布表から

$$F_c = \frac{sc}{J-1} / \frac{S_{IN}}{IJ(n-1)} = \frac{110.22}{3-1} / \frac{344.40}{3 \times 3(5-1)} = 5.76 > F(1\%) \approx 5$$

(14) (15)式及びF分布表から

$$F_{RC} = \frac{S_{RC}}{(I-1)(J-1)} / \frac{S_{IN}}{IJ(n-1)} = \frac{11.57}{(3-1)(3-1)} / \frac{344.40}{3 \times 3 \times 3(5-1)} = 0.302$$

$$< F(20\%) \approx 1.6$$

此の結果から不純物間変動は帰無仮説が 0.1% でも棄却されて非常に大きく、此の事は第一図からも明らかであるが、級内変動と比較して表したわけである。電圧上昇速度間の変動は1%の有意水準で帰無仮説は棄却されていて、放電現象の様な級内変動の大きい現象に対して、此の変動は相当大きいものと考えてよいだろう。次に前二者の交互作用効果は第一図からは相当大きい様に見えるが、此の計算では 20%でも検出されていない。之は要因効果の中前二者殊に不純物間の変動が大きすぎること、及び級内変動が相当大きい放電現象の特性によるものと考え。尚此の分散分析に於て級内変動の標準偏差 λ_{ij} が第一図に示す様に各層で相当異なるにもかかわらず一定と仮定して取扱ったため誤差が入っていると思うが此の問題に就ては更に検討したい。

結 論

- (1) 標準偏差は第一図に示す様に電圧上昇速度の高いとき顕著にあらわれている。
- (2) 標準偏差は不純物の量と共に増大し或値で 最大値となりそれより多いと下降する。そして此の最大値附近の不純物の量が実用出来る絶縁油の許容限であろうと考える。それは不純物が大体此の量以内の絶縁油は放電を行う事により破壊値が次第に上昇するのに対して、此の量を越えている場合は放電によって耐力は回復せず下降する傾向にあるからである。尚絶縁油中の不純物の定量は困難であつて逆に破壊値からそれを推定する方法もとられているが、筆者等は許容限までの不純物の量に対して偏差を測定して、その量を推定する方法を提案したい。
- (3) 不純物及び電圧上昇速度の絶縁耐力に及ぼす 影響を分散分析を用いて級内変動との比較に於て示した。
- (4) 前二者の交互作用効果は 検出出来なかつたが之は放電現象の特徴である級内変動の大きいためと、要因効果の大部分を不純物効果がしめたためであると思う。
- (5) 放電の様な非決定論的要素を多く含んでいる現象に対して、此の様な推計学的方法を適用して測定値を処理する事は、母集団の決定が困難である問題を除いて、よい方法であると考え。然し本実験は不純物による変動が大きすぎて余りよい結果をあたえていないが、実験計画を工夫すればよりよい結果が得られるという自信を得た。
- (6) 此の資料を用いて母数の推定(母集団を正規型と仮定して)、及び放電現象の研究に特に重要である級内変動の状態を知ることが出来るが、之等の処理は次の機会にする。

文 献。

- (1) 例えば、平井 電気学会誌 58, 193
- (2) 斉藤、柳瀬 昭32 電気学会支部連大
- (3) 英国電気工業協会 67, 750
- (4) 例えば 実験計画法 増山確率及統計、応物講座 第11巻
- (5) 統計数値表 統計科学研究会編