UDC 621.315.618.9.015.52

論文

58-B 63

混合ガスのフラッシュオーバー電圧の計算法について

正員 岡部 成光 (東京大)

正員 千葉 政邦 (東京大)

正員 河野 照哉 (東京大)

1. ま え が き

高気圧ガスを絶縁媒体とするガス絶縁方式は、1960年代末に電力システムでの実用化が開始されて以来、今日まで目覚ましい発展を見せており、今後さらに重要な位置を占めることが期待される。現在、ガス絶縁変電所、管路気中送電などの絶縁媒体として使用されているガスは、特別な例外を除き SF_6 であるが、将来の電力の発生・輸送の大容量化・高密度化から、 SF_6 より優秀な性能を持つガスを得ることが望まれている。しかしながら代替ガスの可能性は、単独ガスでは極めて低いため、混合ガスによる代替を目的として、様々な混合ガスの絶縁耐力の特性と放電機構を解明する研究が、ここ数年盛んになってきた⁽¹⁾⁽²⁾。

混合ガスには無数の組合せがあるうえに、電極形状、ガス圧の他に分圧比というパラメータが加わるので、そのフラッシュオーバー電圧、絶縁特性を全て実験で求めるのは不可能に近い。従って、混合ガスのフラッシュオーバー電圧を理論的に予言できるか、あるいは成分ガスの値から予測できるならば、実用的にも放電機構の面からも極めて有用である。本論文はこの点から混合ガスのフラッシュオーバー電圧の計算法を検討したものである。混合ガスとしては、価格や液化温度の点で利用が考えられており、また、これまでに比較的信頼できる実験値の報告されている $\text{SF}_6\text{-N}_2$ を対象とした。

まず、最初に混合ガスのフラッシュオーバー (以下 F.O. と略す) 電圧を簡便に予測できる「宅間の式⁽³⁾」について検討した。次にこの式の前提とされている三つの仮定のうち F.O. 電圧の計算に最も影響の大きい

と思われるのは電子のエネルギー分布を考慮していないことであるが、ボルツマン方程式解析によってエネルギー分布を考慮して F.O. 電圧の計算値を求め、実験値との比較を行なった。ボルツマン方程式による解析は、近年の放電シミュレーションの研究の発展に伴い、既に応用の時代にはいっていると見ることもでき、 $\text{SF}_6\text{-N}_2$ の混合ガスに対する適用も報告されている⁽⁴⁾⁽⁵⁾。しかしそれらはいずれもスウォーム・パラメータなどの基礎的物理量を求めることを目的としており、また文献(6)は更に進んで実効電離係数 $\alpha-\eta$ が零になる臨界電界の混合比に対する変化を考察しているが、実際の電極形状と F.O. 電圧にまで言及したのは、本論文が初めてと考える。

2. 宅間の式

「宅間の式」は次の(1)式であるが、各成分ガスの F.O. 電圧から混合ガスのそれを予測する実験式として提唱され、実験結果をかなりうまく表わすことができる (例えば SF_6 と N_2 の混合ガスの図1⁽⁷⁾で $C=0.19$ のもの。図1の実験は平等電界で直流電圧印加)。

$$V_M = V_N + \frac{D}{D+C(1-D)} \cdot (V_S - V_N) \dots (1)$$

但し、 V は F.O. 電圧、 D は N_2 中の SF_6 の分圧比、 C は定数で、サフィックス M, N, S は各々、混合ガス、 N_2 、 SF_6 を表わす。

この式は、また次の三つの仮定を用いて理論的に導びかれた⁽⁸⁾。

仮定1: ガスの実効電離係数 ($\bar{\alpha} = \alpha - \eta$ を圧力 p で割った) $\bar{\alpha}/p$ は、F.O. に関係するような電界の範囲で E/p (E は電界) の一次関数である。即ち、

$$\frac{\bar{\alpha}}{p} = A \cdot \frac{E}{p} + B \dots (2)$$

仮定2: F.O. 電圧の計算は

Calculation Method of Flashover Voltage of Gas Mixtures. By Shigemitsu Okabe, Member, Masakuni Chiba, Member & Teruya Kono, Member (Faculty of Engineering, University of Tokyo)

岡部成光: 正員, 東京大学工学部電気工学科

千葉政邦: 正員, 東京大学工学部電気工学科

河野照哉: 正員, 東京大学工学部電気工学科

$$\int \bar{\alpha} dx = K \dots\dots\dots (3)$$

の条件を用いて行ない、(3)式の K (以下、単に K) は、成分である二つの単独ガス、および全ての混合比の混合ガスについて一定値である。

仮定3：混合ガスの実効電離係数は、各々の成分ガスのそれらの分圧比の和 (以下、分圧比による線形和を「分圧和」と書く) である。

これによると、(2)式の A を使って C は A_N/A_S となる。しかしこのようにして理論的に導出される値を「宅間の式」と比較すると、以下のような問題点がある。

④ $\text{SF}_6\text{-N}_2$ の場合、実験値と良く合う C が理論値 A_N/A_S よりかなり小さい。 $\text{CCl}_2\text{F}_2\text{-N}_2$ の場合でも Howard の実測値に関しては C が理論値の約1/2である。(図1の場合について後で説明する図4から理論的な C を求めると約0.5となり、実験値とよく合う $C=0.19$ よりかなり大きい。)

⑤ 分圧比 D の小さい (N_2 の成分比の大きい) ところで実験値と一致するような $C=C_1$ を選ぶと D の大きいところで計算値が実験値より大きくなり、逆に D の大きいところから得た $C=C_2$ を用いると D の小さいところで低い計算値が得られ、 $C_1 < C_2$ である。

以上 ④、⑤ は既に文献(8)に指摘されているが、文献(7)には次の記述がある。

⑥ 文献(8)では $\text{SF}_6\text{-N}_2$ の場合 $C=0.05\sim0.1$ を用いると実験値と良く合う計算値が得られると言われているが、本論文(文献(7))の場合は $C=0.19$ であった。

更に最近分圧比 D に対して F.O. 電圧が極大を示す (成分ガス単独よりも高い) 混合ガスが発見され、混合ガス研究熱に拍車をかけているが、(1)式は常に成分ガスの中間の F.O. 電圧を与えるため、このような特性を表わすことはできないことをつけ加えておく。

一方、文献(8)には「実際にこれまで F.O. 電圧が分圧比以下になる混合ガスは見出されていないが、 C の理論的導出過程は、F.O. 電圧は低い A が大きいガスがあれば、このような混合ガスの実現の可能性を示唆する」と述べられているのに対して、第4章で説明する実験条件で $\text{O}_2\text{-N}_2$ の混合ガスについて上述の特性が得られた (図2)。この原因については、第3章で説明する方法で厳密に計算した結果を他の機会に報告する予定であるが、「宅間の式」が第1近似として正しいことを示す一つの例と考えられる。

図1 宅間の式による近似

Fig. 1. Approximation by Takuma's formula.

図2 $\text{O}_2\text{-N}_2$ 混合ガスのフラッシュオーバー特性
Fig. 2. Flashover characteristics of $\text{O}_2\text{-N}_2$ mixtures.

3. 「宅間の式」についての検討

〈3.1〉 三つの仮定の意味 第2章の仮定2では、ギャップ間で $\bar{\alpha}$ は0にならない平等電界を前提としており、積分範囲は全ギャップ長である。ギャップ中で $\bar{\alpha}$ が負になることのある準平等電界への適用を後で試みるが、ここでの展開はさしあたり平等電界を考える。

いま、仮定3のみを用いた一般的な式を導く。

● SF_6 について

$$\int p A_s \left(\frac{E_s}{p} - B_s \right) dx = K_s \dots\dots\dots (4)$$

● N_2 について

$$p A_N \left(\frac{E_N}{p} - B_N \right) dx = K_N \dots\dots\dots (5)$$

● 混合ガスについて

$$\left[\left\{ D p A_S' \left(\frac{E_M}{p} - B_S' \right) + (1-D) p A_N' \left(\frac{E_M}{p} - B_N' \right) \right\} dx = K_M \dots\dots (6) \right.$$

(4)~(6)式は(3)の条件式を具体的に書き下したもので、便宜上 $\bar{\alpha}/p$ を E/p の一次式で表わしてある。 E は各ガスの F. O. 電界であり、この場合は $\bar{\alpha}/P = f(E/P)$ 上の一点 $(E_1/p, \bar{\alpha}_1/p)$ を通る直線を表わす一次式として (A, B) には無限の組み合わせがある。仮定1では A, B は一意に決まっているのに対し、この場合は A, B に対し自由度が1個残っているため仮定1は入っていない。

(6) - {(4) × D + (5) × (1-D)} を $\int E_i dx = V_i$ for $i = N, S, M$ を考慮して整理すると、

$$\begin{aligned} \{D A_S' + (1-D) A_N'\} V_M = \{D A_S V_S + (1-D) A_N V_N\} + p \int \{D (A_S' B_S' - A_S B_S) + (1-D) \cdot (A_N' B_N' - A_N B_N)\} dx \\ + \{K_M - \{D K_S + (1-D) K_N\}\} \dots\dots\dots (7) \end{aligned}$$

となり、仮定1即ち $A_S = A_S', B_S = B_S', A_N = A_N', B_N = B_N'$ を用いると右辺第2項が0、仮定2を用いると右辺第3項が0となつて、「宅間の式」(1)式となる。

仮定2では、 $K_S = K_N = K_M(D)$ for $0 < D < 1$ としているが、(7)式右辺第3項を0とするには、 $K_M = D K_S + (1-D) K_N$ 、即ち K についても分圧和という。はるかに緩い条件で十分であることがわかる。

さて、次節以下では、仮定1, 2, 3について検討しながら、次々にそれらを除去した計算法を考える。それは即ち、(7)式右辺第2項、第3項、第1項について検討を加えることを意味する。(仮定3については、「宅間の式」から独立した内容を持つため章を改める。)

〈3.2〉 仮定2について 筆者らは物理的根拠に基づいて K の式を検討したが、これは混合ガスというより放電一般に関しての新しい式の提案であるので、紹介は別の機会に譲りたい。ここでは、仮定2を「 K = 一定」から「 K は分圧和」に置き換えて、そのまま用いる。 K を分圧和とするのはもっともらしい近似であり、逆に言えば、この新しい仮定2で導びかれるからこそ「宅間の式」は実用的に望ましい結果を

図3 様々な C を使った宅間の式による近似
Fig. 3. Approximation by Takuma's formula with various ' C ' s.

図4 N_2 の α/p の近似
Fig. 4. Approximation of the α/p of N_2 .

与えることができたのであろう。

〈3.3〉 仮定1について 平等電界、大気圧、ギャップ長1 cm、直流電圧印加の Mulcahy 氏らの実験値⁽⁹⁾を例にとって検討する。

まず、仮定1を取り除いた計算値を求める。分圧和の $\bar{\alpha}_M/p$ 即ち $D \bar{\alpha}_S/p + (1-D) \alpha_N/p$ を用いて (図10の点線)、 $\int \bar{\alpha}_M dx = K_M \equiv D K_S + (1-D) K_N$ となる $\bar{\alpha}_M/p \rightarrow E_M/p \rightarrow V_M$ を求めれば良い。この V_M を X , Mulcahy 氏らの実験値を $\bullet$ として図3に書いた。なお、以上の計算に用いた $\bar{\alpha}_S/p$, α_N/p , および後掲の図4の α_N/p は、第4章で説明するボルツマン

方程式解析の結果である。また K_N , K_S の値としては、それぞれ 8⁽¹⁰⁾, 18⁽¹¹⁾ を用い、積分範囲は全ギャップ長である。

次に仮定 1 について検討しよう。仮定 1 では、一次式を成分ガス 100% での F.O. 電界 (およびそれに対応する $\bar{\alpha}/P$) ともう 1 点どの電界での点とを結ぶ直線にするかが問題となる。

SF₆ の $\bar{\alpha}_S/p$ の E/p に対する特性はほぼ直線と見なし、N₂ の $\bar{\alpha}_N/p = \alpha_N/p$ について考える。まず、N₂ 100% での F.O. 電界 (すぐ前に仮定 1 抜きで求めた電界 E_M/p) 41.4 V/cm·Torr での $\bar{\alpha}_N/p$ と、 $D=10, 20, 40, 60, 100\%$ (N₂ の分圧比は各々 90, 80, 60, 40, 0%) の F.O. 電界 (図 3 の ● でなく × に対応する) での $\bar{\alpha}_N/p$ をそれぞれ直線で結ぶ (図 4)。それらの直線の傾きと SF₆ の $\bar{\alpha}_S/p$ の傾きの比 A_N/A_S を C として「宅間の式」を用いる (仮定 1 の導入) と、各々もう一方の点として直線で結んだ混合比 D でのみ X と一致する F.O. 電圧の計算値が得られる (図 3)。図 4 より明らかなように、一致する D より小さい D では N₂ の $\bar{\alpha}_N/p$ を実際の値より大きく評価しているので低めの F.O. 電圧が得られ、大きい D では逆の結果となる。

「宅間の式」は、実は図 3 の × を表わそうとしているのであって、仮定 1 での本来の C の取り方は、全領域で × に近い ③ $C=0.280$ が、各成分ガス 100% で合わせた ⑤ $C=0.370$ のどちらかである。これは図 4 で A から B の α_N/p を ③ あるいは ⑤ の直線で近似するということである。ところが実験値 ● に対しては、① $C=0.178$ あるいはもっと小さい C を採用すれば良く合っているように見え、従来「宅間の式」はそのように適用されてきたが⁽⁷⁾⁽⁸⁾、後で述べるように ● と × の「電子のエネルギー分布の相違」などに起因する差も C で吸収していることになる。以上で第 2 章の問題点 ④ の説明ができる。問題点 ⑤ については、電子エネルギー分布の相違からの寄与もある、大体の傾向は次のように説明できる。即ち、分圧比 D の小さいところで合わせれば、N₂ の α_N/p は下に凸の曲線なので、高電界での α_N/p を小さく評価して大きい D での V_M の計算値は高くなる、ということである。また問題点 ⑥ については、図 1 の実験は圧力とギャップ長の積 pd が 40~80 Torr·cm であるのに対し、文献 (8) で扱っているのは pd が 1,000 程度であることに原因している。即ち、図 4 の (A , B) は $pd=760$ のものであるが、 $pd=40, 60, 80$ に対しては各々 (A_{40}, B_{40}) …… などとなり、 pd が小さいほど近似する直線の傾きが大きくなるので C

は大きい値となる。また pd が大きい (即ち A 点が高電界である) ほど、一つの直線による近似の度合いが良いものになることも予想される。

4. 電子のエネルギー分布の考慮

仮定 3 は各成分ガス、全ての混合比の混合ガスについて電子のエネルギー分布は変化しないということと等価であり、かなり大膽な近似である。仮定 3 を除去した F.O. 電圧を求めるだけであれば、SF₆-N₂ 混合ガスの $\bar{\alpha}_M$ の実測値⁽⁷⁾⁽¹²⁾ を用いればよい。しかしながら両文献間に 10% 以上値が異なる箇所があること、また電子のエネルギー分布の情報 (それに従って混合ガス中の各成分ガスの α , η の分担分) の分圧比の α , η からのずれ) も得たいため (図 8, 9) に、本論文では計算で混合ガスの $\bar{\alpha}_M$ を求める。理論的にエネルギー分布を考慮するために、ここでは Thomas 表示のボルツマン方程式⁽¹³⁾を Pulsed Townsend 法について解く。

Thomas 表示のボルツマン方程式を混合ガス用に書き直すと、 n を電子のエネルギー分布関数として、

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_0^\epsilon n(\epsilon, x, t) d\epsilon = R_c(\epsilon) + R_E(\epsilon) + R_x(\epsilon) - R_a(\epsilon) \dots \dots \dots (8)$$

$$\begin{aligned} R_c(\epsilon) = & \sum_i V_1 N_i \left\{ \frac{2\bar{m}}{M_i} Q_{mi} \cdot \epsilon^{3/2} \cdot n \right. \\ & + \sum_j \int_\epsilon^{\epsilon + \epsilon_{exij}} \epsilon^{1/2} \cdot Q_{exij} \cdot n d\epsilon \\ & + \left(\int_\epsilon^{\epsilon/(1-\Delta_i)} + \int_0^{\epsilon/\Delta_i + \epsilon_{i0i}} \right) \epsilon^{1/2} \cdot Q_{i0i} \\ & \left. \cdot n d\epsilon \right\} \\ R_x(\epsilon) = & - \frac{\partial}{\partial x} \int_0^\epsilon i d\epsilon \\ R_E(\epsilon) = & - E i(\epsilon, x, t) \\ R_a(\epsilon) = & \sum_i V_1 N_i \int_0^\epsilon \epsilon^{1/2} Q_{ai} \cdot n d\epsilon \\ i(\epsilon, x, t) = & - \frac{V_1 \epsilon^{1/2}}{3\theta a} \left[E \epsilon^{1/2} \frac{\partial}{\partial \epsilon} (n \epsilon^{-1/2}) + \frac{\partial n}{\partial x} \right] \end{aligned}$$

但し、サフィックスはそれぞれ

i : 成分ガス, j : 励起衝突, a : 附着, m :
運動量変換, io : 電離, ex : 励起, t : 全
(total)

を表わし、

m : 電子の質量, M : ガス分子の質量, V_1 :
1 eV の電子速度, ϵ : エネルギー, N : ガ
ス分子密度, Q : 衝突断面積, Δ : 電離後の

エネルギー分配比, $\theta_a = \sum_i N_i Q_i$

である。

(8)式は通常のボルツマン方程式をエネルギーで積分した形になっているが、(8)式の左辺、右辺第1項と第4項、右辺第2項、右辺第3項は、各々通常のボルツマン方程式の左辺第1項、右辺(衝突項)、左辺第3項、左辺第2項に対応するものである。

N_2 の衝突断面積は文献(14)の編集したセットを基本として、電離断面積の20 eV以上を1.3倍に変更して用いた。 SF_6 については、文献(15)の編集した断面積のセットを用いた。 N_2 の $\alpha n/p$, SF_6 の $\bar{\alpha} s/p$, 混合ガスの臨界電界($\bar{\alpha}_M=0$ となる電界)の計算値を実験値と比較して図5~図7に示す。 SF_6 の $\alpha s/p$, $\eta s/p$, 各成分ガス中の電子の移動速度 W についても図5~7と同程度の実験値との一致が得られているが、これらの結果は衝突断面積のセットおよび解法が適当であることを示すものである。

このボルツマン方程式解析により得られた、各成分ガスの α/p , η/p と分圧比のそれらを $D=40\%$ について図8に、電子のエネルギー分布の相違を図9に、混合ガスの $\bar{\alpha}_M/p$ を分圧和のそれと比較して図10に示す。これらを見るとガス中の電子のエネルギー分布は、高エネルギー領域では SF_6 中の方が N_2 中より幾分高めで、低エネルギー領域では N_2 中の方はピークを持ち SF_6 中よりかなり大きくなっていて、これは電界が小さいほど顕著である。また SF_6 中の分布には、電子付着のため0.2 eV付近で落ち込みが生じている。従って N_2 については $\alpha n/p$ が少々ふえ、 SF_6 については $\alpha s/p$ が少し減り $\eta s/p$ が大きくなり、混合ガスとしては $\bar{\alpha}_M/p$ は分圧和のそれより小さくなっている。

5. 実験装置および実験方法

図1, 図3の実験は平等電界であるので、準平等電界での計算を検討するために、次の実験を行なった。

実験容器は内径205 mm ϕ , 高さ410 mmの亚克力製円筒で、供試ガスの装てんに先立ち 5×10^{-2} Torr以下に排気した。電極は銅製38 mm ϕ の球一球、ギャップ長は6 mmで、電界利用率(平均電界/最大電界)は約0.90である。

使用したガスの純度は、 N_2 : 99.999%, SF_6 は99.5%以上であり、2 l/minの循環ポンプを用いてガスを混合した。

ガスを封入後、約1時間かく拌させて実験を開始し、測定間隔は約2分、上昇率が約100 V/sの直流電

図5 N_2 の α/p の計算値

Fig. 5. Calculated values of $(\alpha - \eta)/p$ of N_2 .

図6 SF_6 の $(\alpha - \eta)/p$ の計算値

Fig. 6. Calculated values of $(\alpha - \eta)/p$ of SF_6 .

図7 SF_6 の分圧による臨界電界の変化

Fig. 7. Limiting E/p values as a function of the fractional SF_6 partial pressure.

圧印加で、15~20回の測定値の平均を取った。

(a)

(b)

図 8 分圧およびボルツマン方程式解析による α/p , η/p , $(\alpha-\eta)/p$ の値

Fig. 8. α/p , η/p , $(\alpha-\eta)/p$ values calculated by weighting according to the partial pressure and by Boltzmann equation analysis.

6. 計算結果および実験値との比較

第3, 4章の計算結果, 即ち「宅間の式」(C をパラメータとする実験式として扱い適当な C を用いれば, 図1の様に実験値に近い結果が得られるのであるが, ここでは各仮定の近似度など理論的に検討するために, N_2 100%, SF_6 100% の F.O. 電界で合わせて C を決めた), 仮定1を除去した計算値, 仮定1, 3を除去した計算値と実験値の四つの値をまとめて, 図 11~13 に示す。各々の実験は, 図 11 が文献(7)

(a)

(b)

(c)

図 9 電子エネルギー分布

Fig. 9. Electron energy distributions.

によるもの (図1と同じ) で平等電界, 低 pd であり, 図 12 は文献(9) (図3と同じ) で平等電界, 高 pd , 図 13 は筆者らの実験で準平等電界, $pd=456$ cm-Torr である。なお平等電界での (3) 式の計算は <3.3> 節で述べた通りであるが, 準平等電界 (球-球ギャップ) では $\bar{\alpha}_M$ は電極に近い部分では大きくギャップの中央部では小さい (大い場合は負) ため, 陰極面から始めて陽極面に至るまで任意の点までの積分を考え, 最大の積分値が K_M を超える最低電圧を V_M とした。

$\bar{\alpha}/p$ を分圧和としても, F.O. 電圧が V_N と V_S を直線で結んだものより高くなるのは (図 11~13 の

図 10 二つの方法で計算した $\text{SF}_6\text{-N}_2$ 混合ガスの $(\alpha-\eta)/p$ の値

Fig. 10. $(\alpha-\eta)/p$ values of $\text{SF}_6\text{-N}_2$ mixtures calculated by the two methods.

図 11 フラッシュオーバー電圧の実験値と計算値 (1)

Fig. 11. Experimental and calculated flashover voltages (1).

×と点線以下単に図と書けば図 11~13 を意味する), 宅間氏の指摘通り, N_2 と SF_6 の $E/p-\bar{\alpha}/p$ 特性の傾きの違いに起因するものである。

図 11 の実験値⁽⁷⁾はかなり信頼できるものと思われ, 図 12 の実験値⁽⁹⁾は $D=20\%$ で高めであることが指摘されている⁽⁸⁾が, 電子のエネルギー分布を考慮した計算値は図 12 の $D=20\%$ を除いて実験値とよく一致 (図の●と△) している。また, 図 9 のエネルギー分布を見れば明らかな様に, 低電界である (N_2 の含有率が高い) ほど, 分圧和の $\bar{\alpha}_M/p$ を用いた計算値

図 12 フラッシュオーバー電圧の実験値と計算値 (2)

Fig. 12. Experimental and calculated flashover voltages (2).

図 13 フラッシュオーバー電圧の実験値と計算値 (3)

Fig. 13. Experimental and calculated flashover voltages (3).

(図の×) からの改善が大きい。

③ の条件式では図 10 のグラフの傾きが大きいいため, V は K にそれほど依存しないことが予想され, また最終的な計算値が実験値と良く一致していることから $\text{SF}_6\text{-N}_2$ の混合ガスについては, K_M を K_S と K_N の分圧和とするのは十分有効な近似であると思われる。

全般に図を見ると, 各仮定の近似によりどの程度計算値が実験値から離れてゆくかわかる。第 3 章で触れたように, pd が小さいほど F.O. 電界が高いので仮定 1 による誤差が小さい。また低電界であるほどエ

エネルギー分布の差が影響してくるので、 pd が大きくて D が小さいほど、仮定3による誤差が大きい。

7. む す び

混合ガスの F.O. 電圧を各成分ガスのそれらから推定できる「宅間の式」について検討し、その仮定を取り除いたより厳密な方法で計算値を求め、実験値と比較した。その結果、 pd が $40 \sim 1,500$ Torr·cm の平等電界・準平等電界の条件下で、(SF_6 , N_2) の組み合わせに対して次のことが判明した。

(1) 従来「宅間の式」の適用で疑問であった点は pd の大きさや電子のエネルギー分布の考慮により説明できる。

(2) 混合ガスの K_M として、各成分ガスの分圧和を用いることは、十分有効な近似である。

(3) 電子のエネルギー分布を考慮することは、各成分ガスの特性が出やすい低電界でフラッシュオーバーする場合に特に有効であって、最終的に実験値と良く一致する計算値が得られた。

フロン類などの高分子については殆ど衝突断面積が測定されていないが、そのようなガスに対し如何にエネルギー分布を考慮した方法を適用してゆくかが、今後の課題であろう。

最後に内容について種々御検討を頂きました電力中央研究所・宅間 董次長、有益な助言を頂きました東京農工大学・高橋雄造助教授、東洋大学・加藤正平助教授、本研究室・松本 聡氏に感謝の意を表します。

(昭和 57 年 12 月 7 日受付)

文 献

- (1) R.E. Wootton, et. al.: "Electric strength of some gases and gas mixtures" *Gaseous Dielectrics* II, 137 (1980)
- (2) D.R. James, et. al.: "New unitary and multicomponent gaseous dielectrics" *ibid* 115 (1980)
- (3) T. Takuma, et. al.: "Breakdown characteristics of compressed gas mixtures—" *Proc. Inst. Elect Engr* 119, 7, 927 (1972-7)
- (4) L.E. Kline, et. al.: "Dielectric properties for SF_6 and SF_6 mixtures predicted from basic data" *Gaseous Dielectrics* I, 258 (1978)
- (5) H. Itoh, et. al.: "Boltzmann equation analysis of the electron swarm development—" *J. Phys. D*, 13, 1201 (1980)
- (6) R.E. Wootton, et. al.: "Acritique of methods for calculating the dielectric strength—" *Gaseous Dielectrics* II, 32 (1980)
- (7) H. Itoh, et. al.: "Measurement of the effective ionization coefficient—" *J. phys. D*, 12, 2167 (1979)
- (8) 宅間・渡辺・北:「気体の放電特性(その2)——高気圧混合気体の閃絡特性の解析——」電力中央研究所報告(昭 45)
- (9) M.J. Mulcahy, et. al.: *Proc. 9th Electrical Insulation Conf.* 221 (1970)
- (10) A.J. Davis, et. al.: "Computer simulation of rapidly developing gaseous discharge" *Proc. Inst. Elect. Engrs* 118, 6, 816 (1971)
- (11) Pederson: "Criteria for spark breakdown in SF_6 " *IEEE Trans Power Apparatus Syst.* PAS-89, 8, 2043 (1970)
- (12) Th. Ashwanden: "Ionization and attachment coefficients in SF_6/N_2 -mixtures 3rd ISH" 31-12 (1979.8)
- (13) Thomas, et. al.: "The determination of the total excitation cross section in neon" *J. Phys. B* 2, 551 (1969)
- (14) T. Taniguchi, et. al.: "Boltzmann equation analysis of the electron swarm development in nitrogen" *J. Phys. D* 11, 1757 (1978)
- (15) T. Yoshisawa, et. al.: "Boltzmann equation analysis of the electron swarm development in SF_6 " *J. Phys. D* 12, 1839 (1979)
- (16) Daniel, et. al.: "The spatial growth of ionization currents in nitrogen—" *J. Phys. B*, 3, 363 (1970)
- (17) Frommhold, et. al.: "Eine Untersuchung der Elektronenkomponente von Elektronenlawinen" *Z. Physik* 160, 554 (1960)
- (18) Heylen, et. al.: "Townsend's first ionization coefficient in pure nitrogen" *Nature* 183, 1545 (1959)
- (19) Folkard, et. al.: "Experimental investigations of ionization growth in nitrogen," *J. Phys. B* 6, 214 (1973)
- (20) Jones, et. al.: "Ionization coefficients in nitrogen" *Brit. J. Appl. Phys.* 1, 769 (1968)
- (21) H.A. Boyd, et. al.: "Measurement of ionization and attachment coefficients in SF_6 " *Proc. Inst. Elect Engrs* 118, 1872 (1971)
- (22) M.S. Bhalla, et. al.: "Measurement of ionization and attachment in SF_6 —" *Proc. Phys. Soc.* 80, 151 (1962)
- (23) R. Geballa, et. al.: *Basic processes of gaseous electronics* 415 (1955)
- (24) M. Ermel: "Das N_2 - SF_6 -Gasgemisch als Isoliermittel—" *Elektrotech. Z. ETZ* 96, 231 (1975)