

放電パラメータ測定 (26)

—— $\text{CO}_2 + \text{SF}_6$ 混合ガスにおける γ_i と δ_p の検討 ——

長谷川 博 一*・下 妻 光 夫**

Measurement of the Gas Discharge Parameter (26)

Examination of γ_i and δ_p in $\text{CO}_2 + \text{SF}_6$ mixtures.

Hirokauz HASEGAWA and Mitsuo SHIMOZUMA

要 旨

$\text{CO}_2 + \text{SF}_6$ 混合ガスの電離係数 α_L , 正イオンによる二次電離係数 γ_i , 光子による二次電離係数 δ_p を $200 \leq E/p \leq 1200$ V/cm Torr の範囲で混合率 k をパラメータにして Lucas の式により, 線形化最小二乗法で算出した。高 E/p では, γ_i に δ_p の凸の傾向が相乗されて, γ_T が凸の傾向を示していると考えられる。

Abstract

The ionisation coefficients α_L , and γ_i and δ_p are the secondary electron coefficients for emission by positive ions and photons, have been deduced by applying the Lucas equation for E/p as a function of percentage pressure in the ranges 200–1200 V/cmTorr. It is considered that the total secondary coefficients γ_T have the maximum in high E/p , because the maximum of δ_p added to γ_i .

1. は じ め に

筆者らは, 混合気体絶縁材料として研究されている $\text{CO}_2 + \text{SF}_6$ 混合ガスの電離係数や直流絶縁破壊電圧 V_s を測定し報告してきた¹⁾²⁾。その結果, 図1のように $E/p \geq 600$ V/cmTorr (E : 電界, p : 圧力) の領域では二次電離係数 γ_T は, SF_6 の混合率 $k=10\%$ で最大値を持つ傾向を示した。この二次電離作用のため, $p \cdot d$ (d : ギャップ長) = 1 ~ 2 Torr cm では混合ガスによる相乗効果 (synergism) がマイナスの効果になり, V_s が下に凸の傾向を示し, この範囲では絶縁耐力は低下した。そこで筆者らは, この γ_T の上に凸の特性をさらに考察するため, 混合率 k をパラメータにして, γ_T を正イオンによる γ_i と光子による δ_p に分離する解析方法として Lucas の式³⁾を用いて線形化最小二乗法で算出することを試みたのでここに報告する。

2. 二次電離係数 γ_T の検討

γ_T は, Townsend の電離成長式⁴⁾における陰極面での全二次電子放出係数であり, 放電開始条件 (電気絶縁破壊) を決定する重要な定数で次式のように表わすことができる。

$$\frac{\gamma_T \cdot \alpha}{(\alpha - \eta)} \cdot (\exp(\alpha - \eta) ds - 1) = 1$$

ただし α : 電離係数

η : 電子付着係数

ds : ギャップ長 (絶縁破壊時)

また γ_T は, 一般に

$$\gamma_T = \gamma_i + \gamma_p + \gamma_m$$

と表される。

ただし γ_i : 正イオンによる電子放出作用

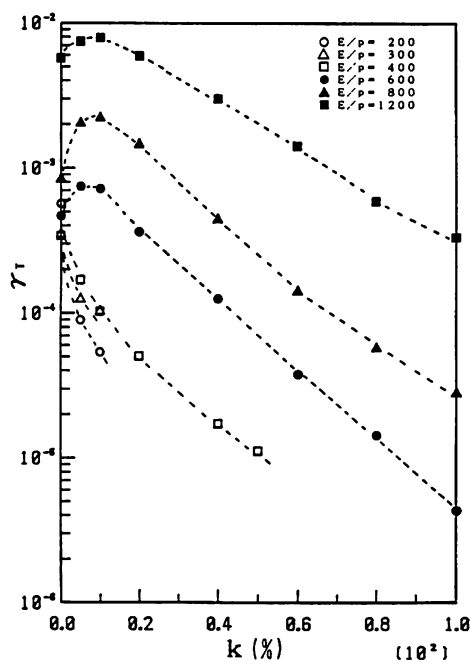
γ_p : 光子による電子放出作用

γ_m : 準安定励起分子原子による電子放出作用

CO_2 には, 準安定励起分子は無いため, 本研究では γ_m は, 考慮してない。しかし, Townsend の電離成長式では γ_i と γ_p の分離は出来ない。田頭ら

* 助 手 電気工学科

** 助教授 北海道大学

図1 γ_T - k 特性

は、すでに H_2 , N_2 の解析に Lucas の式を用い、 γ_i と $\delta_p(\propto \gamma_p)$ の分離を行なっている。そこで筆者らは、 CO_2+SF_6 混合ガスに Lucas の式を適用して解析を試みた。

3. 解析方法

ギャップ長 d に対する電離電流 I の測定データから、各放電パラメータを算出するのに使用した Lucas の電離電流成長式は

$$I = I_{o1} \Sigma \frac{2 J_1(\theta_s a)}{\theta_s a} \times \frac{2 \exp(\alpha_L d)}{\theta_s b J_1(\theta_s b)} \times [1 / \{1 - \gamma_i (\exp(\alpha_L d) - 1)\}] - \delta_p \frac{\alpha_L}{\alpha_L - \theta_s} \times \{(\exp(\alpha_L - \theta_s) d) - 1\}]$$

である。

ただし α_L : Lucas の式による電離係数

γ_i : 正イオンによる二次電離係数

δ_p : 幾何学的因子を考慮しない光子による二次電離係数

I_{o1} : Lucas の式による初期電子電流

a : 陰極の紫外線照射面半径(使用電極により約 1 cm)

b : 放電に有効な電極面半径(使用電極により約 2.6 cm)

$$\theta_s / \theta_s : 0.75 \quad (b/d > 2)$$

$$0.762 - 0.028 d/b - 0.064 (d/b)^2 \quad (2 > b/d > 1)$$

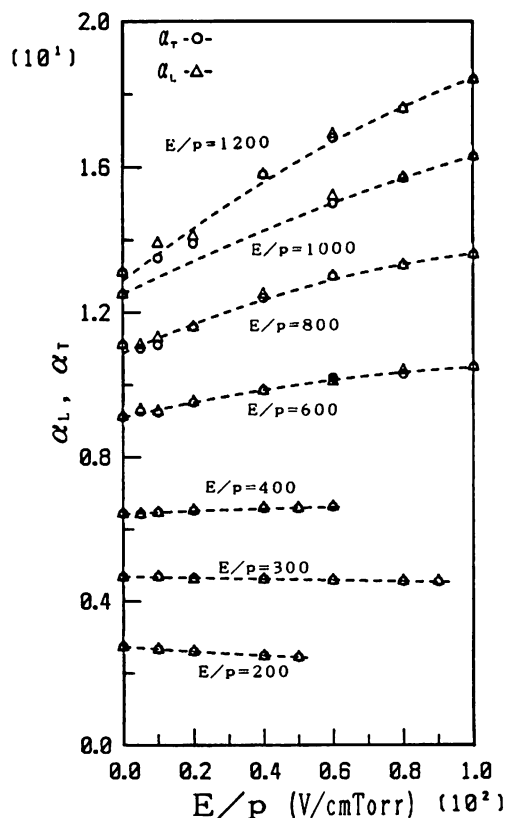
θ_s : 0 次ベッセル関数 $J_0(\theta b) = 0$ に対する θ の値

$J_1(\theta_s b)$: 1 次ベッセル関数

この式に線形化最小二乗法を適用して各係数の最適値を算出した。なお、多倍長計算用 BASIC を使用することで演算時間の高速化や有効桁の改善ができ、0 次ベッセル関数や 1 次ベッセル関数の解をあらかじめ 10~12 桁で求めてファイル化したため、16 bit パーソナルコンピュータでも算出が可能となった。言語は、MS-FORTRAN を使用して行なった。

4. 解析結果および考察

$200 \leq E/p \leq 1200$ V/cmTorr の範囲で各係数を算出した。図 2 に Lucas の式による電離係数 α_L と Townsend の式による電離係数 α_T を示す。 α_L は、 α_T とよく一致しており、両解析方法が理論的

図2 α_L , α_T - E/p 特性

に合っていることが確認できる。これに対して二次電離係数 γ_i や δ_p は必ずしも 4 つの未知数 (I_{01} , α_L , γ_i , δ_p) が収束せず, 求められない場合もあった。また正の値を取らない場合もあった。負の値については, 図示していない。図 3 は, CO_2 単ガスの γ_i , δ_p , γ_T の算出結果である。 γ_i は, 算出した E/p の範囲で $E/p=1200 \text{ V/cmTorr}$ 以外は 10^{-4} のオーダーにあり, E/p の増加に対して大きな変化はしていない。 δ_p も E/p の増加に対し $10^{-4} \sim 10^{-3}$ と増加しているが大きな変化はしていない。図 4 は, 10% SF_6 混合ガスの算出結果である。 $800 \leq E/p \leq 1000 \text{ V/cmTorr}$ では γ_i と δ_p は, 算出できず, データが少なくなるが SF_6 の混合により CO_2 単ガスのそれと比べ γ_i と δ_p とも $200 \leq E/p \leq 400 \text{ V/cmTorr}$ で 1 桁小さくなっている。しかし, E/p の増加するにしたがい混合ガスの γ_i の値は増加し, $E/p=600 \text{ V/cmTorr}$ で CO_2 単ガ

スより $\text{CO}_2+10\% \text{SF}_6$ のそれは, 約 4 倍小さくなる。 δ_p は $10^{-5} \sim 10^{-3}$ と増加しているが, $E/p=600 \text{ V/cmTorr}$ では CO_2 単ガスより減少している。しかし γ_i の増加が主になり γ_T としては混合ガスの方が大きくなっていると考えられる。図 5 は k をパラメータにしたときの γ_i の値である。 $E/p \leq 400 \text{ V/cmTorr}$ では γ_i は k が増加するにしたがい減少している。 $600 \leq E/p \leq 800 \text{ V/cmTorr}$ では $k=10\%$ で凸の傾向が出てくる。さらに $E/p=1200 \text{ V/cmTorr}$ では減少となっている。図 6 は k をパラメータにしたときの δ_p の値である。 δ_p も $E/p \leq 600 \text{ V/cmTorr}$ では k が増加するにしたがい減少している。しかし, $E/p \geq 800 \text{ V/cmTorr}$ では, $k=20\%$ 程度で凸の傾向を示している。図 5, 6 より高 E/p では γ_i に δ_p の凸の傾向が相乗されて, γ_T が凸の傾向を示していると考えられる。

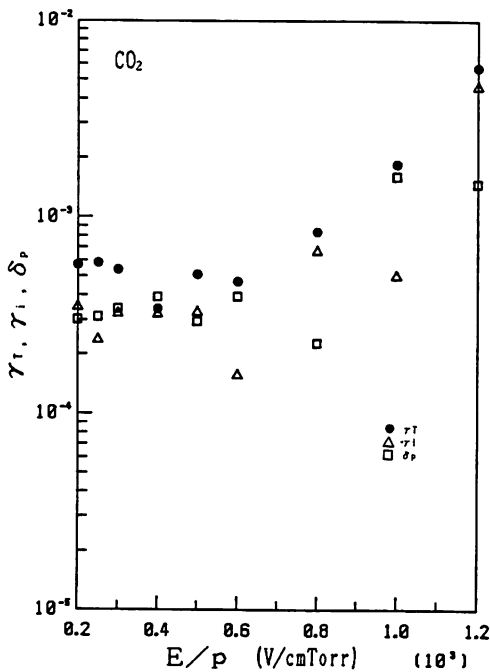


図 3 CO_2 単ガスの γ_T , γ_i , δ_p

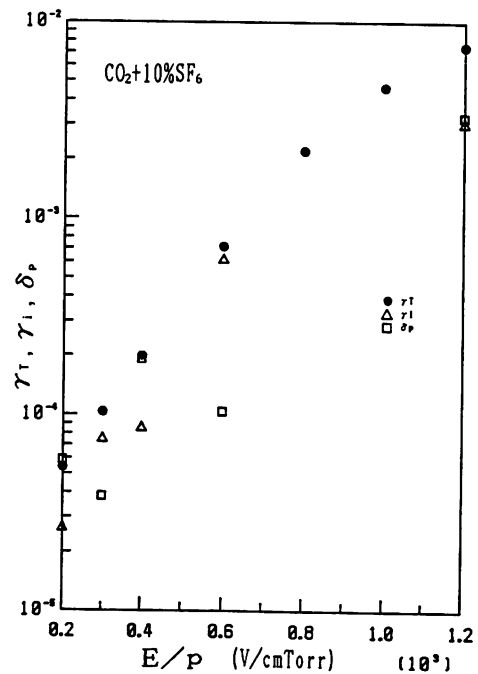
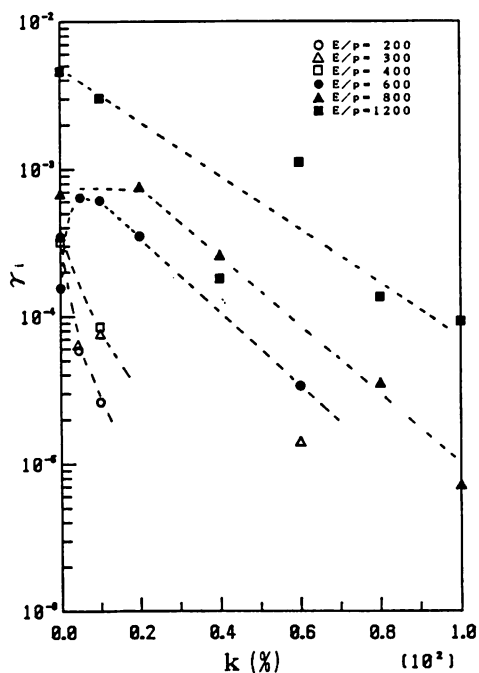
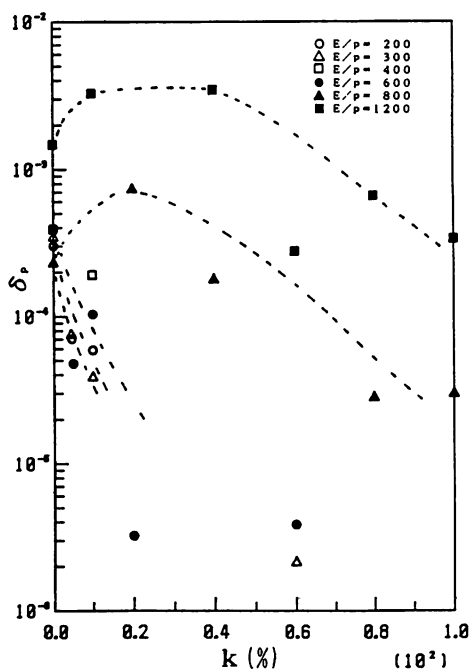


図 4 $\text{CO}_2+10\% \text{SF}_6$ 混合ガスの γ_T , γ_i , δ_p

図5 γ_1-k 特性図6 δ_p-k 特性

5. お わ り に

CO_2+SF_6 混合ガスの放電パラメータ解析に、Lucas の式を初めて適用した。また、Lucas の式を $E/p \geq 600 \text{ V/cmTorr}$ の高電界に適用したのも初めてと思われる。未知数が4つあり、Townsend の式の係数算出から較べると最適値に収束しない場合もあった。また、算出値もバラツキが大きく傾向の検討が困難であった。しかし、高 E/p では γ_1 に δ_p 凸の傾向が相乗されて、 γ_T が凸の傾向を示していることは考察できたと考えている。最後に本報告に御指導御助言いただきました北海道大学工学部田頭教授に深く謝意を表すとともに快く多倍長計算用 BASIC の使用法を教えていただいた北海道大学工学部菅原君および解析に御協力いただいた23期生渡部君に感謝いたします。

参 考 文 献

- 1) 長谷川他, 1989, 放電研究会資料, ED-89-65
- 2) 長谷川他, 平成二年電気学会全国大会, 158
- 3) Tagashira and Lucas Brit. J. Appl. Phys., 1969, 2, Vol. 2
- 4) 長谷川他, 1981, 苫小牧高専紀要第16号

(平成2年11月30日受理)