

## 論 文

### 3 電極型電気集塵装置における電圧-電流特性の表示法について

増田 閃一\*, 小畠 貞二\*\*

(1980年11月4日受理)

#### Expression of Voltage-Current Characteristics of Tri-Electrode Type Electrostatic Precipitator

S. MASUDA\* and S. OBATA\*\*

(Received November 4, 1980)

The tri-electrode type electrostatic precipitator comprising the discharge, collecting, and the third electrodes located close to the discharge electrode have a voltage-current characteristics depending on two variables, one being the average field intensity between the discharge and collecting electrode,  $E_1$ , and another being that between the discharge and third electrodes,  $E_2$ . A method of expressing this characteristics has been presented, in terms of the voltage-current characteristics of a twin-electrode precipitator having an identical discharge and collecting electrode system, where an equivalent field intensity,  $E_3$ , as a linear combination of  $E_1$  and  $E_2$  so as to provide the same twin-electrode characteristics is used:  $E_3 = k_1 E_1 + k_2 E_2$ . The values of  $k_1$  and  $k_2$  are obtained for different electrode configurations of the tri-electrode type, and it is confirmed that these two quantities can be used as the constants so far as the values of  $E_1$  and  $E_2$  are changed within the restricted ranges. The use of a single equivalent field intensity,  $E_3$ , provides a simple method of expressing quantitatively the complicated voltage-current characteristics of a tri-electrode precipitator originally as a function of two variables,  $E_1$  and  $E_2$ .

#### 1. まえがき

筆者らは、従来の2電極型電気集塵装置(図1、以後EPと略記)と異なり、新しく放電極の近傍に第3電極を設けた3電極型電気集塵装置(図2、以後TEPと略記)について研究を行なってきたが、その過程でコロナ特性をいかにするかという問題に直面した。すなわちTEPの場合、印加される電圧が図2に示されるように主電圧 $V_B$ 、バイアス電圧 $V_A$ 、コロナ励起電圧 $V_P$ の3種類(ないし $V_A$ を除いた2種類)があるので、コロナ電流がこれらの関数となってその特性表示がいちじるしく複雑となるのである。そこで、筆者らは適当なパラメータ

をとることにより、TEPの特性をEPの特性に変換し、後者の特性を基礎として前者の特性を表現する方法を考察した。本稿ではこの特性表示法の原理とその問題点について論じる。

#### 2. 従来の TEP の特性の表示法

TEPのコロナ特性の表示方法としては図3のような直流静特性が用いられている<sup>1)</sup>。これは主電圧 $V_B$ 、バイアス電圧 $V_A$ を一定に保った状態でコロナ励起電圧 $V_P$ (横軸)を変化させたときの放電極コロナ電流 $I_P$ の変化をプロットしたものである。集塵装置としての運転においては $V_B$ 、 $V_A$ とも負極性にとり、 $V_P$ も負極性の範囲を利用する。この表示法を用いると、放電極にパルス電圧あるいは交流半波電圧を印加したときの動作の推定が容易となる。しかしながら、EPとの特性の比較が困難となり、また $V_A$ 、 $V_B$ を変化させたときは特性曲線が変化する、などの欠点もある。

#### 3. 新しい特性表示法

2電極型EPの直流コロナ特性は、横軸を放電極-対

\* 東京大学工学部電気工学科 (113 東京都文京区本郷 7-3-1)

Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, University of Tokyo, 7-3-1, Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo 113, Japan

\*\* 石川島播磨重工業株式会社技術研究所 (135-91 東京都江東区豊洲 3-1-15)

Research Institute, Ishikawajima-Harima Heavy Industries Co., Ltd., 3-1-15, Toyosu, Koto-ku, Tokyo 135-91, Japan

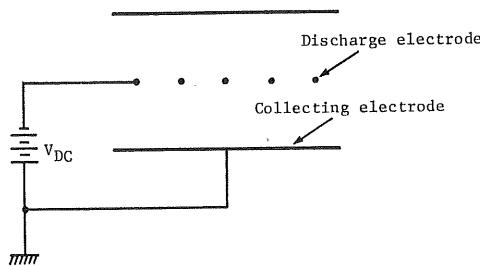


図 1 2 電極型電気集塵装置 (EP)

Fig. 1 Traditional electrostatic precipitator (EP).

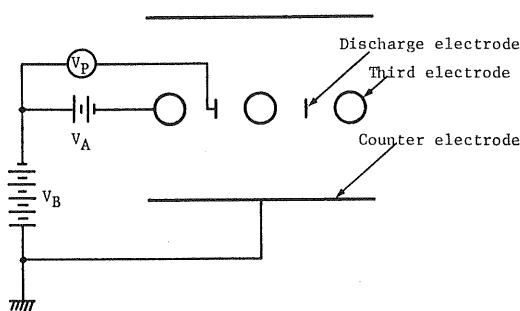


図 2 3 電極型電気集塵装置 (TEP)

Fig. 2 Trielectrode electrostatic precipitator (TEP).

向電極間の平均電界強度、縦軸を対向電極面上の平均電流密度とする図 4 に示すような曲線で示すことができ、この特性曲線は図示のように電極間隔にはあまり依存しない。この特性曲線をいま次式で表わす。

$$i_0 = f_0(E_0) \quad (1)$$

ここに

$i_0$ ：集塵電極上の平均電流密度 ( $= I_0/S$ )  
(mA/m<sup>2</sup>)

$E_0$ ：放電極-集塵電極間の平均電界強度 ( $= V_0/h_1$ )  
(kV/cm)

$I_0$ ：放電極全電流 (mA)

$S$ ：集塵電極または対向電極の総面積 (m<sup>2</sup>)

$V_0$ ：放電極電圧

$h_1$ ：放電極-集塵電極（または対向電極）間距離 (cm)

次に、TEP のコロナ電流特性について次のような関係が成り立つものとする。

$$i_1 = f_1(E_3) \quad (2)$$

$$E_3 = k_1 E_1 + k_2 E_2 \quad (E_0 \text{ と等価な電界パラメータ}) \quad (3)$$

$$i_1 = I_B/S$$

$$E_1 = V_B/h_1$$

$$E_2 = V_P/h_2$$

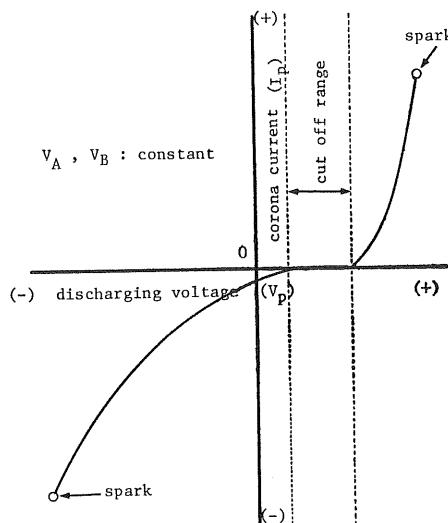


図 3 TEP の直流静特性

Fig. 3 D.C. static characteristic.

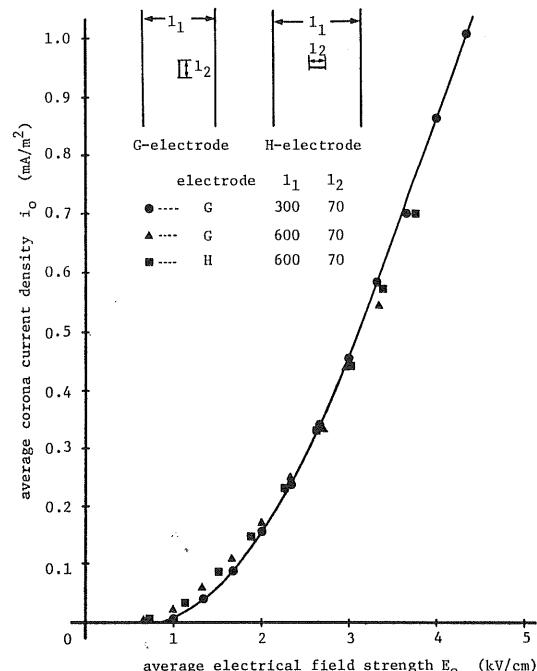


図 4 EP の電界強度-電流密度特性

Fig. 4 Relation between the field strength and the current density in EP.

$$i_1 : 対向電極面上の平均電流密度 \quad (\text{mA}/\text{m}^2)$$

$$E_1 : 放電極-対向電極間平均電界強度 \quad (\text{kV}/\text{cm})$$

$$E_2 : 放電極-第3電極間平均電界強度 \quad (\text{kV}/\text{cm})$$

$$I_B : 対向電極全電流$$

$$V_B : 主電圧 (第3電極-対向電極間)$$

$$V_P : コロナ励起電圧 (放電極-第3電極間)$$

$h_2$ : 放電極-第3電極間最短距離

$k_{1a}, k_{2a}$ : 定数

すなわち TEP に固有の二つの電界強度  $E_1, E_2$  を(3)式の線形結合により一つの  $E_3$  にまとめて、電流密度  $i_1$  との間の関係を一義的に定めようとするものであるが、ここでさらに次の関係が成り立つものとする。

$$f_0(E) = f_1(E) \quad (4)$$

この仮定が成り立つならば TEP における電界強度  $E_3$  は  $E_P$  における電界強度  $E_0$  とまったく等価なものとなり、 $i_1$  の値から  $E_P$  の特性曲線を用いて  $E_3$  が逆算出できることになる。すなわち TEP の直流特性は一つの測定点ごとに  $E_1, E_2, i_1$  の各 1 組のデータが求まるわけであるが、そのおのおののデータに対して 1 組の  $E_1, E_2, E_3$  の値が求まることになる。したがって(3)式において  $E_1, E_2, E_3$  は既知の値となり、 $k_1, k_2$  は未知の値となる。つまり(3)式は  $k_1$  を横軸、 $k_2$  を縦軸とする直交座標上において一つの 1 次直線を表わしている。一般に直流コロナ特性の測定では、多数の  $E_1, E_2$  の組に対する  $i_1$  の値を求めるので、(3)式で示される 1 次直線は多数求めることが可能となり、それらの交点として  $k_1$  および  $k_2$  の値が求められる。そのような交点を求めるには(3)式を次のように変形すると便利である。

$$k_1/(E_3/E_1) + k_2/(E_3/E_2) = 1 \quad (5)$$

(5) 式で表わされる 1 次直線は、 $k_1$  軸および  $k_2$  軸とそれぞれ  $E_3/E_1$  および  $E_3/E_2$  で交わるから、 $E_1, E_2, E_3$  が得られるとただちに 1 本の直線が得られる。

以上のような方法により求められた 1 次直線の交点が求める  $k_1, k_2$  を与えるが、その例を示すと図 5 のようになる。図にみられるように、各直線は  $E_2$  の大きい範囲と小さい範囲とで異なる 2 点に集中するが、その両方において集中度はかなりよいことがわかる。ここで、 $E_2$  の大きい範囲の  $k$  値を  $k_{1a}, k_{2a}$ 、 $E_2$  の小さい範囲の  $k$  値を  $k_{1b}, k_{2b}$  とする。このような  $k$  値は電極の幾何学形状と寸法が与えられれば一義的に定まり、その形状に固有な値となる。

図 5 で求めた  $k$  値を(3)式に代入して  $E_3$  を求め、(2)式により  $i_1 = f_1(E_3)$  のグラフを逆算により求めると図 6 に示すようになり、 $E_3$  が小さい範囲では TEP の特性は EP の基準曲線とよく一致している。 $E_3$  が大きい領域ではしだいにずれが大きくなる。

ところでこのようにグラフから  $k$  値を求める方法は次のような長所を有する。

(i)  $k$  値を求める手法が簡単である。

(ii)  $k_1, k_2$  の値が複数組に分岐するとき、グラフ上でそのことを容易に判別できる。

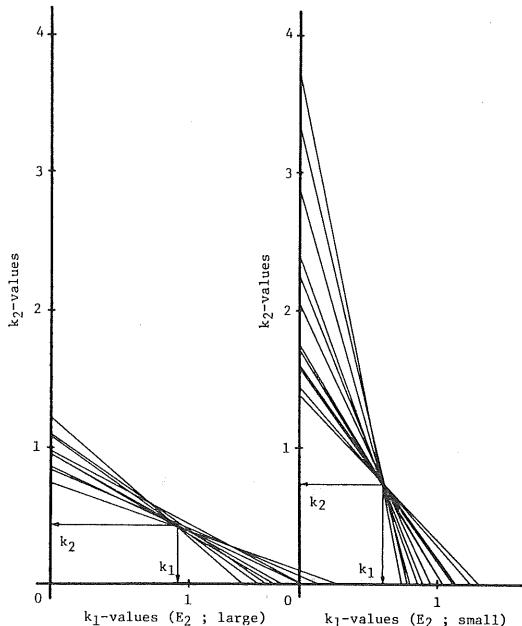


図 5  $k$  値を求めるための直線群  
(A型電極から求めた)

Fig. 5 The converging lines to get  $k$ -values.

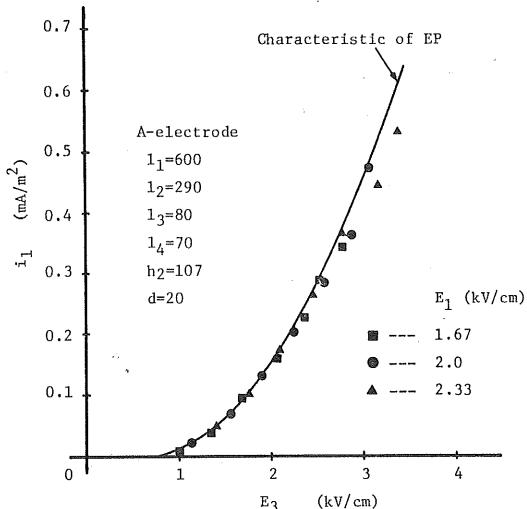


図 6 TEP の  $E_3-i_1$  特性

Fig. 6 Relation between  $E_3$  and  $i_1$  in TEP.

- (iii) データのばらつきによりグラフ上の直線群の収束点がある幅を有するような場合、目視により誤差の最小となる  $k$  値を選定することができる。
- (iv) 明らかな測定誤差によりある直線が収束点をはずれたとき、その直線を排除して正しい  $k$  値を求めることができる。

さらに種々の電極形状の特性を  $k$  値で表わすことには次のような利点がある。

- (i) TEP のコロナ特性を  $k$  値により EP のコロナ特性に変換することができる。そのため、基本的に異なる双方の特性を同じ尺度で比較することができる。
- (ii) TEP の動作特性を EP の動作特性から予測できるので、運転の制御が容易になる。
- (iii) 電流を  $E_1$  および  $E_2$  で制御するときの最適条件を容易に決定することができる。
- (iv) TEP の最適電極形状を  $k$  値から容易に選定することができる。

以上の  $k$  値による TEP の特性表示法と図 3 の直流静特性との比較であるが、直流静特性は  $E_1$  の値を一定として測定したものなので  $k_2$  に関する情報は含んでいるが、 $k_1$  に関する情報は含んでいない。したがって、 $k$  値による特性表示法のほうがより多くの情報を含んでいるうえに定量的であるので相互比較も容易である。

次に  $k$  値による TEP の電極形状評価について考えてみる。一般に電気集塵装置の集塵率はコロナ電流密度および空間の電界強度の両者により決定され、両方の値が高いほど高い集塵率が得られる。しかし  $E_1$  と  $E_2$  については火花によって限定される最大値が存在する。したがって、そのときの電流値をできるだけ高くするために  $k_1$  と  $k_2$  の値が大きければ大きいほどよいということができる。

#### 4. $k$ 値の導出結果

次に、各種の実用的な電極の  $k$  値について述べる。ここでは図 7 に示す A 型、B 型、C 型の各電極をとり、それぞれの  $k$  値を図 8 に示す。図 8 では対向電極間隔、および第 3 電極間隔をパラメータとして、それに対する  $k$  値の変化が示されている。これを見ると各電極の  $k$  値には次のような特徴がある。

- (i) A 型電極では  $k_{1a}$  と  $k_{2a}$  は互いに逆の傾向を示し、片方の減少をもう一方の増加で補い合う性質

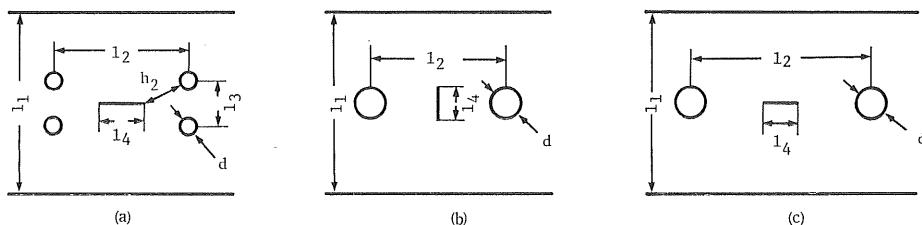


図 7 (a) A型電極, (b) B型電極, (c) C型電極  
Fig. 7 (a) A-electrode, (b) B-electrode, (c) C-electrode.

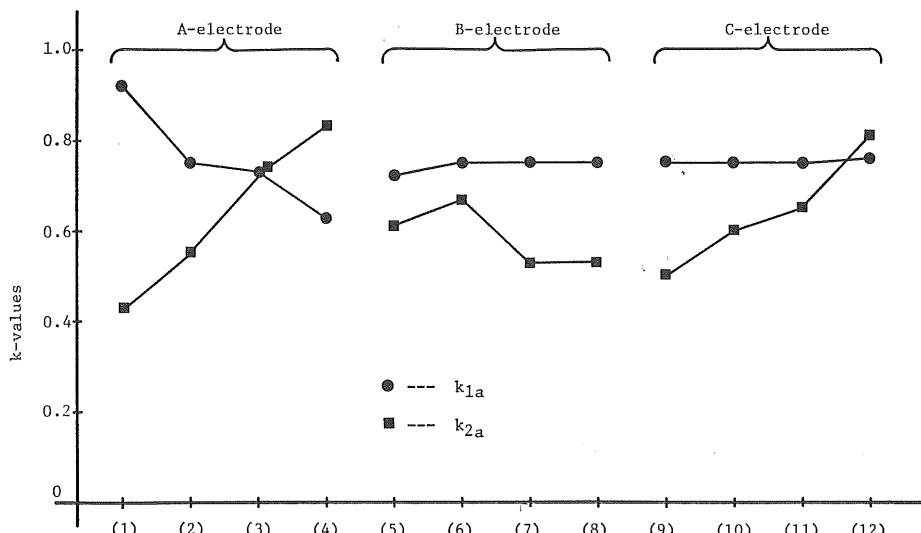


図 8 各電極形状における  $k$  値  
Fig. 8  $k$ -values of each electrode.

表 1 図 8 における各電極形状の各部寸法 (mm)  
Table 1 Each dimension of each electrode in Fig. 8.

No.	$l_1$	$l_2$	$l_3$	$l_4$	$h_2$	$d$
(1)	600	290	80	70	107	20
(2)	600	290	120	70	115	20
(3)	400	290	80	70	107	20
(4)	400	290	120	70	115	20
(5)	600	250	—	70	100	50
(6)	600	290	—	70	120	50
(7)	500	200	—	70	75	50
(8)	500	200	—	90	75	50
(9)	600	320	—	70	100	50
(10)	600	360	—	70	120	50
(11)	300	280	—	70	80	50
(12)	300	320	—	70	100	50

がある。このような傾向は、ここには示していない。第3電極間隔 ( $l_2$ ) の変化に対する傾向でも明瞭にみられた。一方  $k_{1b}$ ,  $k_{2b}$  についてはこのような傾向はあまり明確ではなく、常に  $k_{1b}$  よりも  $k_{1a}$  のほうが大きくなっている。

- (ii) B型電極では全般的に  $k$  値の変動はあまり大きくなく、 $k_{1a}$  では一定値となる傾向を示す。また、 $k_{1a}$  と  $k_{1b}$ ,  $k_{2a}$  と  $k_{2b}$  が一部完全に一致する。
- (iii) C型電極でも  $k_{1a}$  は一定値となる。また  $k_{2b}$  の変動がとくに大きくなっている。

A型電極はその構造上他の二つの電極よりも第3電極の電界支配域が広く、そのため放電極からのコロナ電流に対する第3電極の制御能力も強いと考えられる。この場合その制御能力は当然対向電極間隔や第3電極間隔等の大きさに左右され、したがって、A型電極の場合には各部寸法による  $k$  値の変化は、他の電極形状の場合よりも大きくなる。また第3電極の制御能力と  $k$  値の変化との関係であるが、これは第3電極間隔が広いほど、また第3電極と対向電極との間隔が狭いほど弱くなる。これに対し、 $k$  値は第3電極間隔が広いほど、その対向電極との間隔が狭いほど  $k_{1a}$  の値が小さく、 $k_{2a}$  の値が大きくなる傾向がある。つまり、第3電極のコロナ電流に対する制御能力が弱くなると  $k_{1a}$  は小さく、 $k_{2a}$  は大きくなる。

B型電極で  $k$  値の変化が少ないので、第3電極のコロナ電流に対する制御能力が弱くなっているからにほかならない。とくに  $k_{1a}$  はほとんど一定の値をとり、このような傾向は  $k$  値を TEP の特性表示に利用するうえで非常に有利となる。なぜなら、寸法を変化させても  $k$  値を

求め直す必要がなくなるからである。ただし、このときの  $k_{2a}$  については多少の変化がみられ、このことについては後で再び論じる。このB型電極で一部  $k_{1a}$  と  $k_{1b}$ ,  $k_{2a}$  と  $k_{2b}$  の値が完全に一致したのは、このときの条件においてB型電極のコロナ特性とEPのコロナ特性との間の相似性がとくによくなつたためと考えられる。このことはB型電極の構造からも納得できる。

C型電極では第3電極のコロナ電流に対する制御能力がA型電極とB型電極の中間にあると考えられ、そのため  $k$  値の変化も  $k_{2b}$  を除いて両者の中間にある。とくに  $k_{1a}$  はC型電極においても一定の値を示している。

第3電極のコロナ電流に対する制御能力と  $k_{2a}$  の変化との関係については、B型電極、C型電極とも制御能力が弱くなると  $k_{2a}$  が増大する傾向にあり、このことはA型電極の場合と同じである。 $k_{1b}$ ,  $k_{2b}$  の二つの  $k$  値についてはこのような一般的な傾向をみつけるのは困難であった。

## 5. 考 察

以上のような性質を有する  $k$  値について、二、三の点について考察する。まず、 $E_2$  の大きい範囲と小さい範囲において  $k$  値が分岐して異なる値を有することについては以下のように考えられる。 $E_2$  が小さいときには一般に放電極から対向電極のほうへ流れるコロナ電流は抑制され、小さくなる傾向がある。つまり、このときには先に述べた第3電極の放電極に対する制御力は抑制効果として作用する。一方、 $E_2$  がある程度大きくなると、その制御力は助長効果として作用するようになり、放電極からのコロナ電流は第3電極により助長される傾向を示す。 $k$  値が  $E_2$  の大きさにより異なるのは第3電極のこのような作用の相違に起因するものと考えられる。さらに、A型電極では全般的に  $k_{1a} > k_{1b}$ ,  $k_{2a} < k_{2b}$  の関係があり、 $E_1$  の係数は  $E_2$  の小さいときよりも大きいときのほうが大きくなり、 $E_2$  の係数は逆に  $E_2$  の大きいときよりも小さいときのほうが大きくなっている。このことは第3電極の制御力が抑制効果を示す範囲ではコロナ電流に対する影響力の点で  $E_2$  のほうが大きく、逆に制御力が助長効果を示す範囲では  $E_1$  の影響力のほうが大きくなっていることを意味している。

次に、 $k_{2a}$ ,  $k_{2b}$  の二つの定数について考えてみる。 $k$  値はいずれも(3)式により定義されるが、その際  $E_1$  および  $E_2$  を求めるための電極間距離  $h_1$  および  $h_2$  が問題となる。 $h_1$  は放電極と対向電極の間の距離で、TEPにおいても EPにおいて明確に決定され問題はない。一方  $h_2$  は TEP の電極構成により、ここで与えたような第3電極と放電極間の最短距離とすることに問題を生ずること

とがある。なぜならば、電界強度  $E_2$  を上昇させればそれにより放電極と対向電極の間の電界強度も上昇するからである。これを考えると、 $E_2$  を求めるときの距離の中に  $h_1$  に関する因子も含ませたほうが妥当と考えられる。前節でみられたように、 $k_{1a}$  の値が一定値となるにもかかわらず、 $k_{2a}$  の値には依然として変動がみられるのはこのためと考えられる。理論的に妥当な  $h_1$  の効果を導入する方法はいまのところ明確でないが、便宜上  $h_2$ 、 $E_2$  の代りに次の  $h_4$ 、 $E_4$  を定義し、新しく  $k_4$  を導入して各電極の  $k_4$  の値を求めてみた。

$$h_4 = \sqrt{h_1^2 + h_2^2} \quad (6)$$

$$E_4 = V_p/h_4 \quad (7)$$

$$E_3 = k_1 E_1 + k_4 E_4 \quad (8)$$

(このようにして求められた  $k_4$  の値は  $k_2$  の値とはまったく異なるが、 $k$  値についてはむしろその絶対値としての意味よりも相対値としての意味のほうが大きいのでそのことはあまり問題にならない。むしろ、各電極の寸法に対する  $k$  値の変動のほうが問題となる)。

その結果、 $k_{4a}$  ( $=k_{2a}$ ) についてはその変動が存在するもののかなり小さくなることが見いだされた。したがって  $k_{2a}$  についてはこのような方法をとるほうがより実

用的であろう。ただし、 $k_{4b}$  ( $=k_{2b}$ ) については、こうするとむしろその変動が大きくなり、別の点から考え直す必要があることがわかった。

## 6. 結 言

常温常圧の TEP と EP の特性について比較した結果次のような結論を得た。

- (1) TEP の特性表示方法としては直流静特性のほか  $k$  値による方法を用いることができる。
- (2)  $k$  値の求め方はグラフによる方法が簡単で便利である。
- (3)  $k$  値は  $E_2$  の大きい範囲と小さい範囲で異なった値をとる。
- (4)  $k$  値は TEP の電極形状と寸法に対して固有な一定の値となる。
- (5)  $k$  値は第3電極の放電極に対する制御能力と関係があり、制御能力が小さくなると  $k_{1a}$  は大きく  $k_{2a}$  は小さくなる傾向がある。

## 考 参 文 献

- 1) 土居義明：学位論文、東京大学 (1976).