

# 電気集じん器用コロナ電圧計の試作と応用

浜田 満雄\*・池田 隆\*\*・足立 宜良\*\*

## The Trial Production of Corona-voltmeter and its Application to an Electrostatic Precipitator

Mitsuo HAMADA, Yutaka IKEDA and Takayoshi ADACHI

### Abstract

It is known that the efficiency of an electrostatic precipitation is concerned with the characteristic of applied effective voltage and corona current. This discharging characteristic is expressed a straight line on a log-log coordinate. Examining the slope of this line, the inside operating state of an electrostatic precipitation can be judged to improve on this efficiency. Cylindrical and square type corona-voltmeters to measure an applied effective voltage for an electrostatic precipitation were made. The characteristics of these voltmeters were considered and they were applied to practice electrostatic precipitation.

The results are as follows.

- 1) Considering the practice field intensity and the discharging stability, the diameter of discharging wire for the cylindrical type corona-voltmeter (dia. 10cm $\phi$ ) suits with 2~4 mm $\phi$ .
- 2) The discharging characteristics of these corona-voltmeters are composed of two straight lines, and authors call the potential of intersect point for these lines the starting corona voltage. Referring Peek's theorem and analyzing the wave forms of corona current, authors confirm the significance of the above assumption for practical use.
- 3) Their corona-voltmeters for the electrostatic precipitator (having three collecting rooms) in the cement factory of T Co. LTD. were used. As the discharging characteristic slope for the first collecting room is much larger than that for other collecting rooms, it is considered that this room is bad operating state. This cause is investigated and that is cleared away.

### 1. 緒 言

電気集じん器は種々の除じん装置の中において設備費は高額であるにもかかわらず高い性能を持っているために火力発電所、製鉄・製練所、セメント工場、化学工場などに単独または他の装置たとえばサイクロンなどと組合わされて設置され、大気汚染問題解決の一翼を担っている。しかしながら、高性能であるべき電気集じん器も運転管理が不十分なため、せっかくの高額な設備投資にもかかわらずその性能を十分に発揮しきれずに低い効率で運転されているのを見かけることがある。

電気集じん器の集じん効率を高めるための必要条件の一つとして、コロナ電流を多く流して除じん対象の

粒子に十分な電荷を与えることが、まず必要であるが<sup>1)</sup>、コロナ電流の増大につれて高電圧回路に接続されているせん絡防止用の保護高抵抗ならびに変圧器や整流機器のインピーダンスによる電圧降下の値も増大し、したがって、電気集じん器の放電線と集じん極間の電圧、すなわち実効電圧  $E$  の値は、コロナ電流の増加につれて低下する。

集じん効率を向上するには変圧器二次電圧  $V_2$  を高くすれば、目的を達するかのよう思われがちであるが、集じん効率を知る目安としては、変圧器の二次電圧  $V_2$  の値ではなく、実効電圧  $E$  の値とそれに対するコロナ電流  $I$  の放電特性が重要視される<sup>2),3)</sup>。この  $E-I$  放電特性を両対数にとった場合、折線からなる特性を示し、この直線勾配  $\beta$  の値を知ることがもつ

\* 工業短期大学部電気工学教室

\*\* 電気工学教室

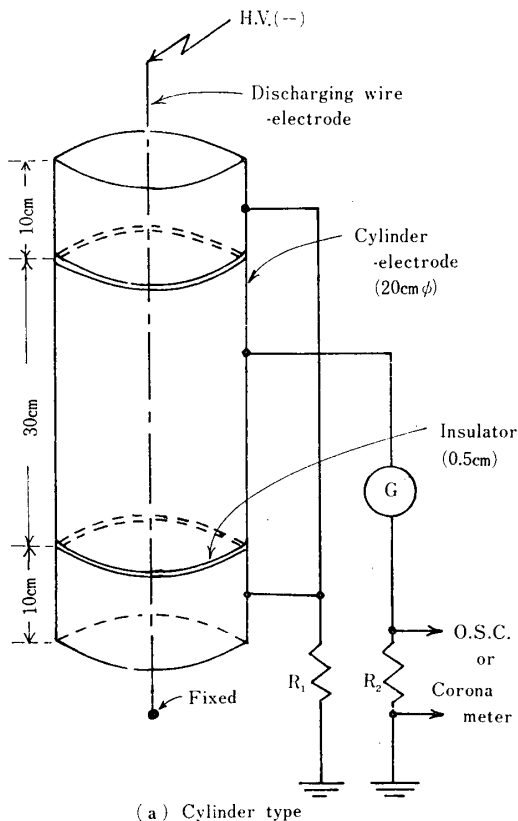
とも重要と考えて、実効電圧  $E$  を測定する簡便なるコロナ電圧計を試作し、この試作装置について特性実験を行なった。その特性の吟味とまた実際の集じん器管理への応用を試みたのでその結果を報告する。

2. 試作装置の概要と特性実験の要領

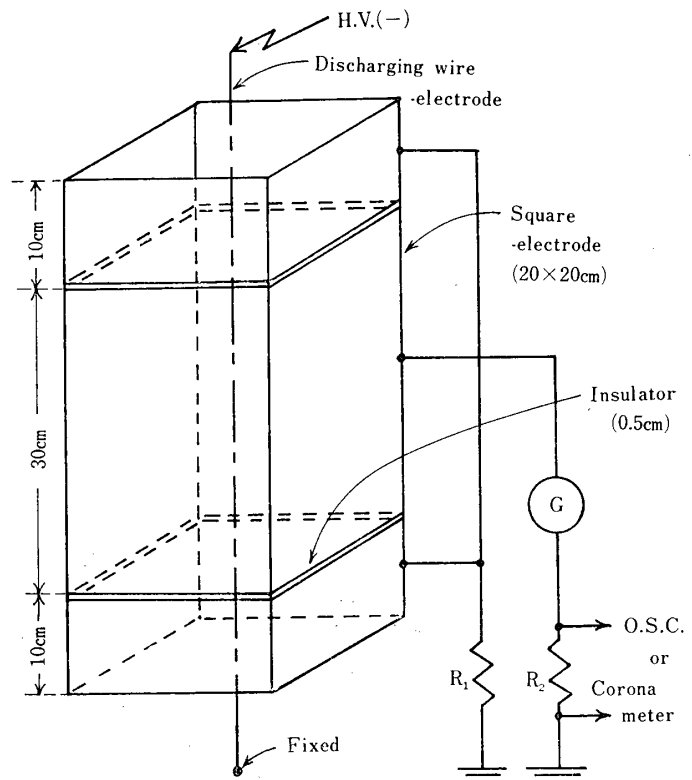
特性実験を行うに際して使用した高電圧発生回路としては試験用変圧器の容量 5 kVA、巻数比 250、平滑用コンデンサー  $3.3 \times 10^{-6} \text{F}$ 、高電圧用整流管 150kVP の熱電子整流管、保護抵抗  $30 \text{k}\Omega$  から構成される直流電源を使用した<sup>4)</sup>。

Fig. 1 にコロナ電圧計の試作装置を示す。Fig. 1 (a) は直径 20cm $\phi$ 、長さ 30cm、厚さ 0.6mm の亜鉛引鉄板製の円筒で円筒の中心に放電線を支持し、この同心円筒の両端には End-effect を防止するための考慮として、同心円筒と同径の長さ 10cm の円筒を 5mm の厚さのペークライトリングで絶縁したものを用い、これを接地した。また Fig. 1 (b) は  $20 \times 20 \text{cm}$  で、長さは Fig. 1 (a) の同心円筒と同長の角筒電極である。

ここで Fig. 1 の G はコロナ電流測定用検流計、 $R_2$



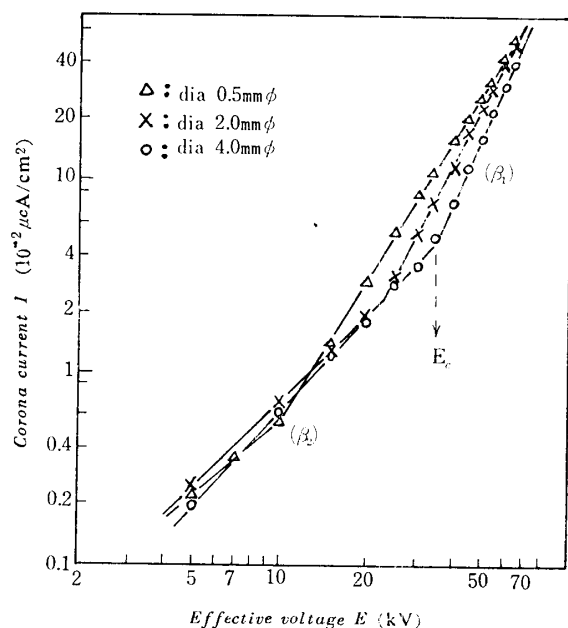
(a) Cylinder type



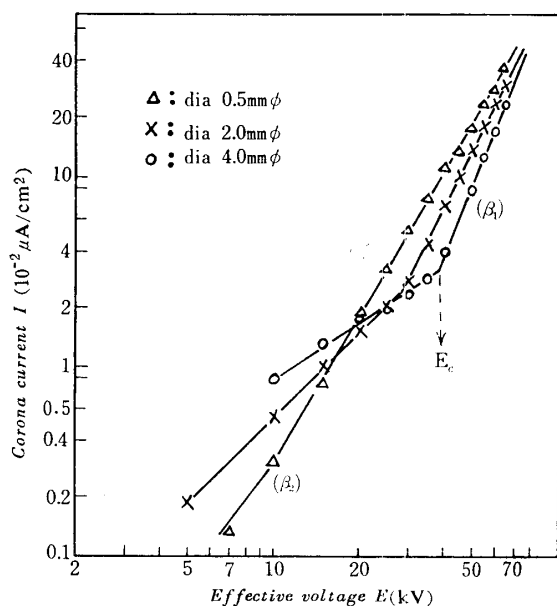
(b) Square type

Fig. 1 Illustrative drawing of the corona-voltmeters

は波形観測ならびにコロナパルス測定用の抵抗で  $10 \text{k}\Omega$ 、 $R_1$  は  $R_2$  と検流計内部抵抗の和である。円筒ならびに角筒について  $20 \text{cm}\phi$ 、 $20 \times 20 \text{cm}$  の大きさに定めたことは、実用集じん器の印加電圧の最高が約  $70 \text{kV}$  であり、この電位に十分に耐え得ることを考慮したものである。また、円筒半径ならびに角筒等価半径を考慮に入れて、装置上下の End-effect 対策として実用上十分な  $10 \text{cm}$  の長さにした。これらの装置でもって放電線直径  $0.5 \text{mm} \sim 5.2 \text{mm}$  の範囲のもの数種類用い、負の高電圧を  $5 \sim 70 \text{kV}$  にわたって印加した。印加電圧とコロナ電流の関係を求め、それらの特性を Fig. 2 に示す。Fig. 2 (a) および Fig. 2 (b) はそれぞれ円筒形電極および角筒形電極の  $E-I$  特性であり、両者の特性比較すなわち同一電圧に対する電流値、直線勾配ならびに二直線交点電位などの解析、検討については後で述べることにする。



(a) Cylinder type



(b) Square type

Fig. 2 Discharging characteristics for the corona-voltmeters

### 3. 直線勾配 $\beta$ について

#### 3.1 電気集じん器の $\beta$

印加電圧とコロナ放電流の関係は放電線対平板電極、放電線対円筒形電極、放電線対金網電極、針端対平板電極または針端対金網電極などの電極の組合せによって若干異なるが、一般的につぎの実験方程式で示される<sup>5)</sup>。

$$\log I = \beta \log E + C \quad (1)$$

$I$  : コロナ電流 [ $\mu A$ ]

$E$  : 印加実効電圧 [ $kV$ ]

$\beta$  : 電離とイオン再結合の関係および電離の主役による定数、換言すれば放電極形式および寸法などによる定数

$C$  : 雰囲気ガスの状態や性質ならびに電極寸法などに関する定数

ここで筆者らはこれまでの種々の実験<sup>3)</sup>ならびに現場における実際の電気集じん器テスト(たとえば本論文第5章参照)を通じて(1)式の定数  $\beta$  ならびに  $C$  について考察し、その結果をつぎの3つの場合に分けて述べる。

1)  $E$  ならびに  $I$  の対数特性の概略を Fig. 3 に示す。この折線が負のコロナ放電特性とした場合、①の領域は電離と再結合が平衡状態にある場合で、集じんを行なうには電界強度が不足であり  $\beta$  値は 1~2 の位置にある。また集じん器において電圧が高いにもかかわらず、この小さい値をとるときは、がけ子等による漏洩電流の影響が原因で集じん効率が低下している。

②の領域においては電離は優勢となり、一般に最適な実用集じん電界強度であり、電極面の状態により  $\beta$  は 2.5~10 である。③の領域では電界強度が主として電荷の加速にあてられる状態のときで  $\beta$  値は 5 ぐらいである。

2) 正コロナ放電では直線④の傾向を示すが正イオンが電離にあづかるようになると  $\beta$  は 20~80 の急峻な傾斜を示すのが普通である。したがって、負コロナ放電装置においても正の電極面に突起性異物の付着があるか、あるいは正の電極が絶縁物層によっておおわれ、その層の内部にボイド放電があるときは④の状態あるいは①、②、③を経過した後に④の状態になる。これは電気集じんにおいて逆電離または、逆コロナ現象として知られている。

3) (1)式の  $\beta$  の値が同等で定数  $C$  が変化する場合について考察する。

a) 平板集じん電極と金網集じん電極ならびに、大規模な集じん装置と小規模な集じん装置を比較すると、ともに後者の方が  $E$  に対する  $I$  の値は小さいのが普通である。

b) 分散煙じん量(含じん量  $g/m^3$ )の増加、同等含じん量でも粒子径  $D_p$  が小で粒子の総表面積が大であると電荷が捕捉される率が高まり、平均イオン移動度低下のため  $I$  の値が低下する。

c) 電子親和性ガス成分たとえばガス中に  $SO_2$ ,  $O_2$  などが存在すると同じ理由で  $I$  の値が減少する。

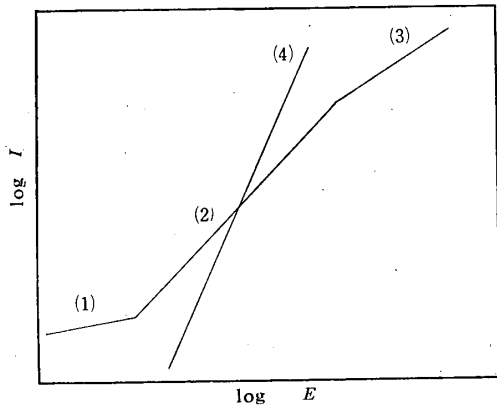


Fig. 3 Schematic discharging characteristics

H<sub>2</sub>, N<sub>2</sub> などの成分が多いと逆に  $I$  は増加する。  
 d) ガス温度が上昇あるいはガス圧が低下すると、所要電離エネルギーが小になるので  $I$  の値が増加し、また温度の低下やガス圧の上昇は  $I$  を減少させる。ただし状態が不変のもとでは  $I$  の増減率は一定している。

これらの条件を定数  $C$  としてあつかうことができる。したがって、放電境界の事情が変化するとき放電特性曲線において放電形式の変化が生ずれば  $\beta$  の値が変り、煙霧の性質、状態に変化がおこれば定数  $C$  の値の変化として現われる。その原因は上記のようであるから定数  $\beta$ ,  $C$  の変化から異常状態の発生を検知し、その原因の推定と対策の方向づけが可能になる。ただし  $\beta$  不変で  $I$  の増因と減因とが等効果に生ずることもあり得る。たとえば、高温煙霧中あるいは高温高圧ガスの気中の放電特性が常温空気中の放電特性とほぼ合致するなど状況によっては可能である。

3.2 コロナ放電々圧計試作装置の定数  $\beta$

試作した Fig. 1 の円筒形電極 および角筒電極のコロナ放電々流  $I$  と実効直流電圧  $E$  の関係を Fig. 2 に示したが、これらの装置における  $E-I$  特性も(1)式と同じ実験式で実用的に直線関係であらわすことができる。またこの  $E-I$  特性は勾配の異なる二直線にわけられることを前に述べたが、この二つの直線において電圧の高いところにある直線の傾きを  $\beta_1$  ならびに低い電圧のところにある直線の傾きを  $\beta_2$  と便宜上定めることにする。

放電線の直径と Fig. 2 から求めた勾配  $\beta$  との関係を示す Fig. 4 に示す。Fig. 4 から明らかなように、負コロナが優勢となる電界強度での  $\beta_1$  の値は放電線直径が大きくなるにつれてその値を増している。一方、弱電界強度の範囲での  $\beta_2$  の値は勾配1.5付近を上下しており不規則であって、放電線の直径による変化を見ること

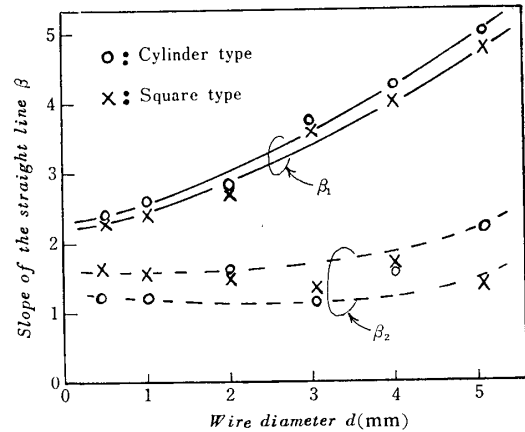


Fig. 4 Relation between wire diameter  $d$ (mm) and slope of the straight line (See Fig. 2)

ができず、図中にばらつきを点線で示した。ただし、この  $\beta_2$  の電界強度の範囲は、実用集じん器においては弱電界であり、実用範囲からはずれている。

実用の円筒形集じん電極の場合で、放電線の形状が丸線で直径0.5~6 mm を使用し、負荷として空気を流した場合の  $\beta$  の値は2.5~4.5であるが<sup>29)</sup>、筆者らがコロナ放電々圧計として試作した装置の円筒形電極および角筒電極の双方とも、放電線0.3~5.2 mm を使用した場合の  $\beta_1$  の傾向も2~5となった。

また  $\beta_1$  において、角筒電極が円筒電極に比較して勾配の値が低くなっていることは、放電線と角筒電極間の平均距離が円筒電極の距離よりも大きいため実効直流電圧に対するコロナ電流の変化が小さく、したがって、 $\beta_1$  の値が小さいものと考えられる。

4. 試作装置のコロナ開始電圧

Fig. 2 に示す勾配の異なる二つの直線の交点における電圧を、Fig. 1 の円筒形および角筒形装置について

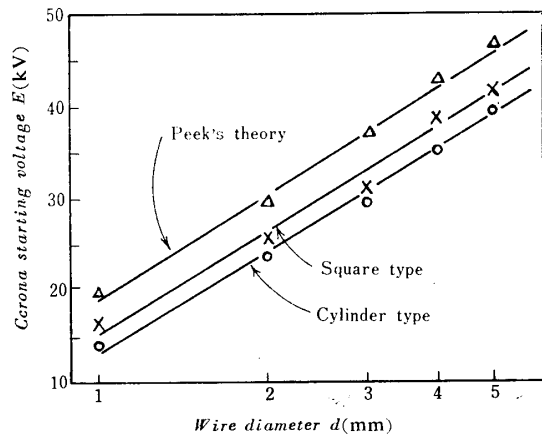


Fig. 5 Increase in corona starting voltage with corona wire diameter (See Fig. 2)

のコロナ開始電圧と考えて見ることにする。Fig. 5は放電線直径と Fig. 2 から得られたコロナ開始電圧の関係を示したものであるが、コロナ開始電圧は放電線直径が大きくなるにつれて、円筒形および角筒形の両方とも高くなっている。

Peek<sup>10)</sup>は平常状態の大気中における同心円筒電極のコロナ開始電界強度を求め、その関係を実験的に次式で表わしている。(ただし、単位はCGS静電単位系である。)

$$E_0 \doteq 100 \delta + 30 \sqrt{\frac{\delta}{r_0}} \quad (2)$$

ここに

- $E_0$  : コロナ開始電界強度
- $\delta$  : 相対空気密度 (0.392b/T)
- $r_0$  : 放電線半径
- $b$  : 測定時の気圧
- $T$  : 絶体温度

(2)式とコロナ開始電圧の関係は、同心円筒電極配置の場合次式で表わされる。

$$E_c = E_0 \cdot r_0 \log_e \left( \frac{R}{r_0} \right) \quad (3)$$

ここに、

$E_c$  : コロナ開始電圧

$R$  : 集じん極半径

この Peek の式に本実験における測定値を代入してコロナ開始電界強度を求め、さらにコロナ開始電圧を各放電線について計算して求めたものを Fig. 5 に付記した。Peek の式によるものは片対数グラフの直線上に乗らなければならないように思えるが、(3)式の係数のコロナ開始電界強度  $E_0$  が(2)式(近似式)で放電線直径により、それぞれ異なり定数とならないためである。筆者らが勾配の異なる二つの直線の交点をコロナ開始電圧と定めた曲線と Peek の式より計算して求めた曲線を比較すると、後者の方が高くなっている。角筒形についても傾向としては類似している。ここで、コロナ開始電界強度ならびにこれにもとづいて計算されるコロナ開始電圧は理論値より50~70%異なるのが一般的であるとされている<sup>10)</sup>。筆者らが二つの直線の交点をコロナ開始電圧と定めたことは、Fig. 5 について Peek の式から求めた値よりも最大の点で30%以下の誤差であることから有意義である。

上記のコロナ開始電圧を確認する意味で、円筒形電極に2mmの放電線を用いた場合について、コロナ測定器(安藤電気K・K, CNT-20型)とシンクロスコ

Table 1 Corona pulse counter between applied effective voltage and dB for corona meter

kV \ dB	17.5	20.0	22.5	25.0	27.5
12	1500~2500(cps)	2400~3600(cps)	2600~4200(cps)	no measure	no measure
14	500~ 650	700~1000	1200~1400	〃	〃
16	170~ 230	300~ 380	630~ 400	〃	〃
18	80~ 120	180~ 220	160~ 200	8500~9000(cps)	〃
20	37~ 45	70~ 90	60~ 84	6800~7200	〃
22	15~ 20	80~ 100	40~ 45	6000~6500	〃
24	15~ 17	70~ 80	〃	4000~4200	〃
26	〃	〃	〃	3000~3600	〃
28	〃	〃	〃	3500~4600	〃
30	〃	〃	〃	2800~3400	〃
32	〃	〃	〃	2200~2600	7400~10000(cps)
34	〃	〃	〃	1500~2000	8600~ 9500
36	〃	〃	〃	1800~2200	8600~ 9400
38	〃	〃	〃	800~1200	8400~ 9900
40	〃	〃	〃	〃	7500~ 8000
42	〃	〃	〃	〃	6500~ 7500
44	〃	〃	〃	〃	6500~ 6800
46	〃	〃	〃	〃	5000~ 5400
48	13~ 15	〃	〃	〃	3800~ 4200
50	0	0	0	50~ 100	900~ 1200

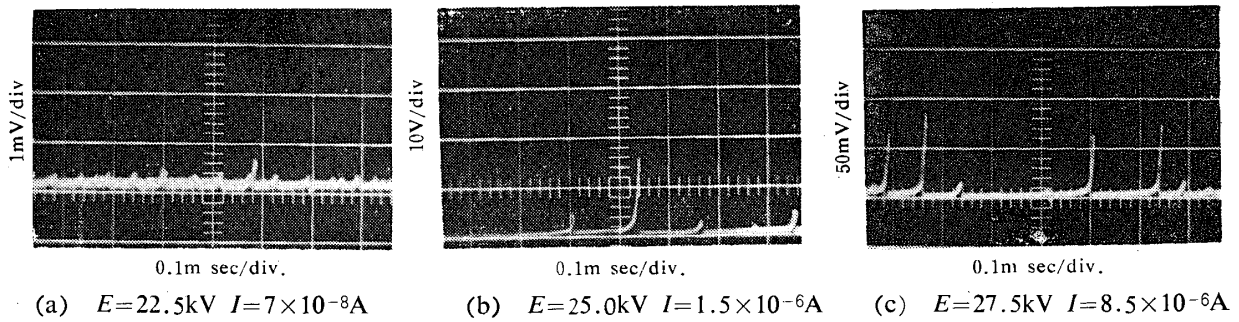


Fig. 6 Wave forms of corona current for cylinder type corona meter (Discharging wire 2mmφ)

ープを使ってコロナ放電の発生度合の測定と波形観測を行った。その結果を Table 1 および Fig. 6 に示す。

Table 1 より明らかなようにコロナパルスの発生頻度は印加電圧17.5kV~22.5kVの範囲では僅かながら上昇しているが、22.5kV~25kVの間で雪崩のような現象を呈し、急激に増加している。また、Fig. 6の放電波形の写真においても25kVにおいてパルスは急激に高くなっている。

Fig. 5 において円筒形電極構造で2mmの放電線を使った場合のコロナ開始電圧は24kVである。これらことから Fig. 1 のような装置においては、勾配の異なる二つの直線の交点をコロナ開始電圧と工学的実用上定めても大きな誤りはないものと考えられる。

また角筒形電極のコロナ開始電圧は円筒形電極のコロナ開始よりも若干高くなっているが、このことは3.2節のβのところでも述べたことと同様に、放電線と角筒形電極間の平均距離が大であるためと考えられる。

5. 実用集じん器への応用

Fig. 1 の円筒形電極に直径2mmの放電線を用いた装置をT社のセメント工場の集じん器に適用した。ここでT社の電気集じん器はガス流に対して、Fig. 7に

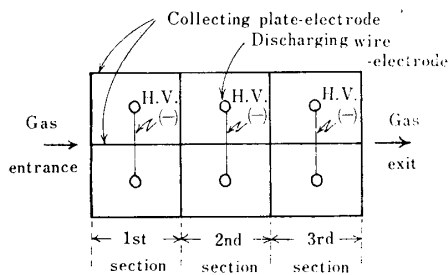
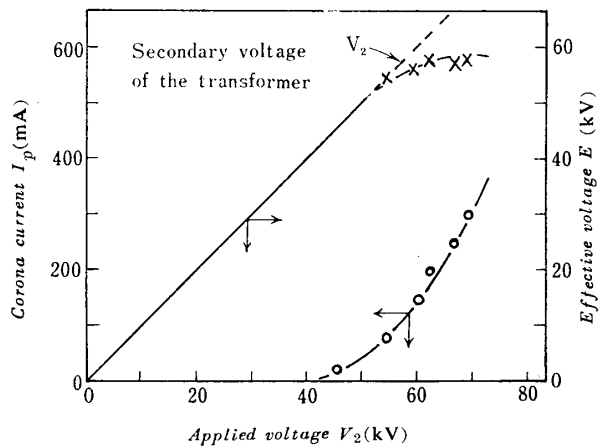
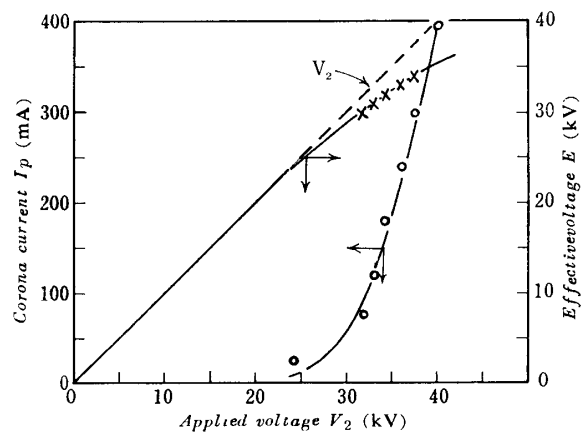


Fig.7 Arrangement of the electrostatic precipitator rooms for T Co. LTD.

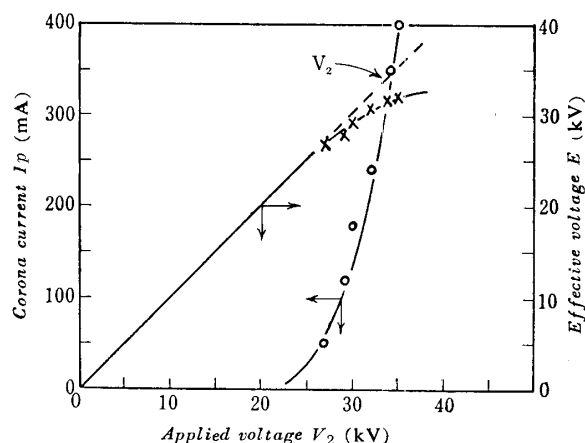
示すように1, 2, 3区の集じん室からなっている。円筒形装置の電流Iより逆に実効電圧Eを求め、変圧器二次電圧V<sub>2</sub>と集じん器コロナ電流I<sub>p</sub>、実効電圧Eの関係を各集じん室について求めたものを Fig. 8 に示す。このFig. 8 によって、さらに実効電圧Eと集じん器電流I<sub>p</sub>を両対数にとったものが Fig. 9 であり、Fig. 8 および Fig. 9 により求めた、直線の勾配βの値および変圧器二次電圧V<sub>2</sub>と実効電圧Eの関係を Table 2 に示す。Table 2 で明らかなように実効電圧Eの値は変圧器二次電圧の値よりも3.5kV~8kV低



(a) 1st section collecting room



(b) 2nd section collecting room



(c) 3rd section collecting room

Fig. 8 Discharging characteristics for collecting room (See Fig. 7)

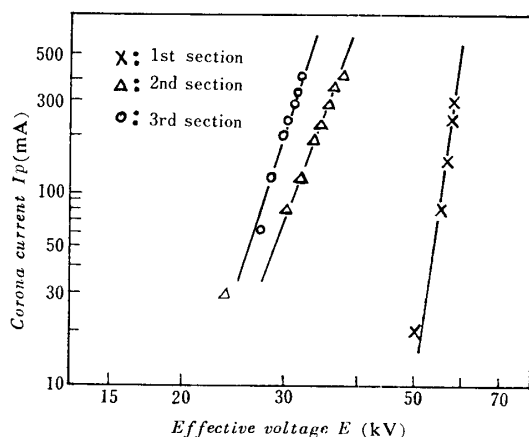


Fig. 9 Discharging characteristics of the electric precipitator for T Co. LTD.

Table 2 Relation among secondary voltage of  $T_r$ , applied effective voltage and slope of the straight line (See Fig. 8 and 9)

Room	$E$ (kV)	$V_2$ (kV)	$\beta$
1st section	58.0	66.0	28.1
2nd section	37.0	40.5	10.3
3rd section	31.5	36.5	14.0

下していることがわかる。そして  $\beta$  の一般的傾向は集じん室の順番に対してじょじょに減少するが、Table 2 において第 1 区集じん室における  $\beta$  の値は第 2 区、第 3 区集じん室における値と比較すると異常に高くなっている。このことは 3.1 節で述べたように集じん極面に突起性異物の付着あるいは集じん極が、絶縁物

層によっておおわれているが、その層にボイドがあり、集じん器の効率を低下させる一因となる逆電離現象を呈しているものと推測することができる。

さらに、3.1.1 章で述べた  $\beta$  値と比較すると Table 2 はすべて大きな値になっている。したがって、第 1 区集じん室だけでなく、第 2、第 3 区も同一原因で良好な運転とは言えない。Fig. 9 において  $C$  の値が集じん室の順番につれて大きくなっているのは (図中における右側の直線ほど  $C$  が小さい)、室内の粉じん量が集じんされて少なくなり、空間電荷効果の減小に原因する。

実際の集じん器への適用例として一例をかかげたが、今後多くの事例について本装置を適用し、その結果について解析検討を行ないつぎの機会に報告したい。

## 6. 結 言

実験結果ならびに考察を要約するとつぎのとおりである。

1) 一般的に実用集じん器において電離が優勢であり、集じん効率をもっとも良いとされる  $\beta$  値は、2~6 であるので、Fig. 4 の  $\beta$  および Fig. 5 のコロナ開始電圧; さらに、放電線の強度ならびに実用性の面から考えると 20cm 径の円筒電極または角筒電極についての放電線直径は 2 mm~4 mm 径のものもっとも適しており、放電線直径が太くなるにつれて  $\beta_1$  の値は大きくなる。

2)  $E-I$  の両対数特性における勾配の異なる二つの直線の交点の電圧を実用コロナ開始電圧と定めても (筆者ら仮定) Peek の式と比較して大きな誤差がないということも明らかになった。このことはコロナ電流波形観測ならびにコロナパルス測定によっても確認できた。

3) また実際の電気集じん器に、この装置を電圧計として使用すると実効電圧  $E$  の値を測定することができるだけでなく、 $E-I$  特性における定数  $\beta$  ならびに  $C$  の値を得ることができる。

4) 放電特性の Peek 方程式における定数  $\beta$ ,  $C$  についての説明があるが、さらに実際の電気集じん器の場合、 $\beta$  は電極面の粉じん層によるボイド放電などで大きく異なり、 $C$  は含じん量、粒子径などで異なる。したがって、この電圧計を使用することによって得られた定数  $\beta$  ならびに  $C$  にもとづいて、電気集じん器の動作状態を診断できる。

おわりに本報告をまとめるにあたり、終始ご懇切な

ご指導を賜わった西日本工業大学、橋本清隆教授ならびに熱心に実験を援助された本学43年度卒業生後藤叔彦君（現在戸田工業KK）、およびなにかとお世話になった本研究室所属の大学院生、前原弘典、陶山俊道、川崎元之の三君のご協力に対して厚く感謝する。

#### 参 考 文 献

- 1) 橋本清隆, 谷口 堯: 電気集じん装置の理論と実際, 電気書院 (1965) p. 38
- 2) 大気汚染研究会全国協議会第五委員会: 除じん装置ハンドブック, コロナ社 (1963) p. 183
- 3) 橋本清隆: 日立評論, 40, 7, 6 (1958)
- 4) 足立宜良, 池田 隆, 庄 靖彦: 山口大学工学部研究報告, 20, 255 (1969)

- 5) Crbmer & Davies: Chemical Eng. Prac. 3, 500 (1957)
- 6) たとえば, 庄靖彦, 足立宜良: 山口大学工学部研究報告, 20, 261 (1969)
- 7) 足立宜良: 山口大学工学部研究報告, 19, 81 (1968)
- 8) H. J. White: "Industrial Electrostatic Precipitator" Wesley Publishing co. (1963) p. 107
- 9) 橋本清隆, 足立宜良: 静電気とその産業技術, 東京電機大学出版部 (1939) p. 96
- 10) 文献 (1) のp. 39
- 11) 増田閃一: 電学誌, 80, 1482 (1960)

(昭和45年4月15日受理)