

論 文

ハニカム型電気集塵装置の性能実験

高岡 龍太*, 横田 明博*, 松本 徹*

茂木 完治*, 足立 宜良**

(1987年8月29日受理)

Efficiency Test of Honeycomb Type Electrostatic Precipitator

R. TAKAOKA, * A. YOKOTA, * T. MATUMOTO, *

K. MOTEKI* and T. ADACHI**

(Received September, 1987)

Recently, electrostatic precipitators (ESP) for air cleaning are widely used in office and home. Since the collection efficiency of ESP depends on the specific collection area according to Deutsch equation, high collection efficiency can be obtained by increasing the area of collecting electrode if gas flow rate is selected optimally considering of dust-reentrainment. Honeycomb type ESP has the area of collecting electrode 2 times larger than that of parallel plate type ESP under a given volume. In this paper, the characteristics of honeycomb type ESP developed by the authors are reported on the basis of experimental measurement. As a result, it is confirmed that this type ESP is very effective for air cleaning because of the stable high collection efficiency regardless of the fluctuation of applied voltage. This type ESP can be made compactly at a low price.

1. まえがき

近年、空気清浄機の普及がめざましく、なかでも会議室や家庭用の小型の空調用集塵装置の普及率は年ごとに増加の傾向がある。ユーザー・サイドからは高性能で省スペースのための小型化や素人使用上の簡便さのための集塵極使い捨て方式などの要求が強い。簡便さを求めるフィルタ方式などがあるがガス流れ方向でのダスト捕集のため性能面で限界があるので、ガス流れ方向に対して垂直方向作用力（クーロン作用力）でダスト捕集する2段式¹⁾空調用電気集塵装置（以下、ESPと略）でこれらの要求を満足させることができるものと想定される。

このESPの集塵率は工業用ESPの設計基本式としてよく使用されるDeutschの式^{2,3)}で明らかに捕集対象のダストの性質を一定とすると集塵面積、電界強度、ガス速度などによって左右される。さらに電界強度ならびにガス速度を一定として、集塵率を変えずに小型

化するためには集塵面積を増加させなくてはならない。筆者らは十年余り空調用平行平板型ESPを作成し、これらの特性改善に努力してきたが、平行平板型ESPの同性能小型化では平行平板をより密に配置する必要があるが現実的には困難である。

これらのことから考慮してハニカム（蜂巣状）型の極板を使用したESPを試作した。ハニカム型極板の場合、同容積の平行平板型と比較すると集塵極板ピッチが同じでもほぼ2倍の集塵面積を得ることができる。また、明確な機械的強度条件から極板を薄いアルミ箔にできるので安価となり極板の使い捨て也可能である。これらの考え方に基づいて従来の平行平板型ESPに比較して半分の容積のハニカム型ESPを開発試作し、種々の実験を行い、多くの実験データについて検討を行なった。また、試作平行平板型ESPとも性能比較を行なった。

2. 実験装置および実験方法

2.1 ESP 性能試験装置

空調用空気清浄装置の集塵率の測定方法はJIS⁴⁾により定められている。その性能測定装置については空気清浄協会の空気清浄装置性能試験方法基準⁵⁾により、各測定装置について詳しく記述されている。今回の実験は基準の第2性能試験方法（中、高性能フィルタ）に定められた方式に基づきESP性能試験装置を製作して実験室

* ダイキン工業株式会社淀川製作所 (566 摂津市西一津屋1-1)

Yodogawa-Seisakusho, Dikin Industries Ltd., 1-1, Nishi-hitotsuya, Setsu, 566 Japan

** 大分大学工学部電気工学科 (870-11 大分市旦野原 700)
Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Oita University, 700, Dannoharu, Oita, 870-11 Japan

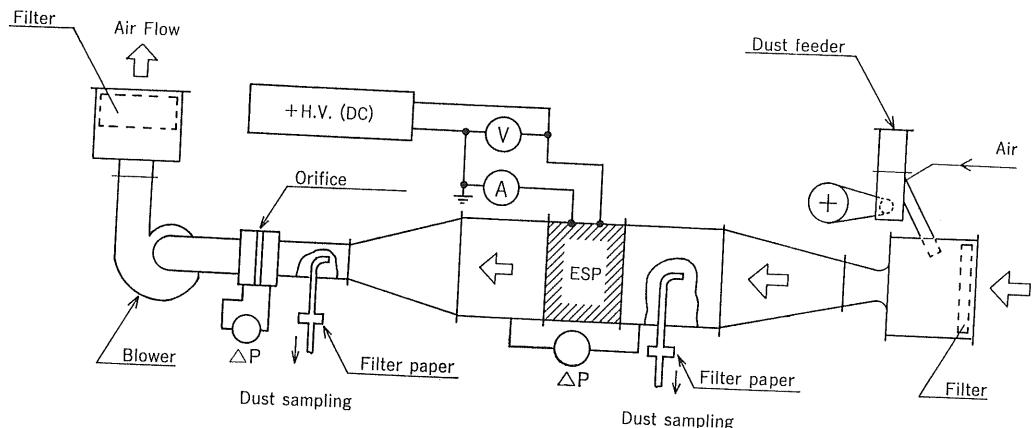


図 1 試験装置

Fig. 1 Experimental apparatus.

に設置して行なった。粉体供給装置、出入口の粉体サンプリング、ESP およびプロアなどからなる試験装置の概要を図 1 に示す。なお、図の中央部に試作 ESP を設置してあるダクト（テスト領域）内のガス流速分布を一定にするため、この領域前段ならびに後段に多孔式整流板を設置した。

試験粉体は試験用粉体 11 種（関東ローム、中位径の範囲は $1.6 \sim 2.3 \mu\text{m}$ 、真密度は $2.7 \sim 2.9 \text{ g/cm}^3$ 、化学成分は表 1 参照^⑥）を粉体供給装置（ダストフィーダ）にてダクト内に供給した。ESP 入口のダスト濃度はフィーダの所で調節したため正確な値は得られなかった。ただし、 $5.0 \sim 10 \text{ mg/Nm}^3$ のダスト濃度範囲は十分に守られている。

ESP の入口ならびに出口側で吸引装置を用いてガスサンプリングを行ない、化学滤紙 No. 5A を用いて粉体濃度を比色法にて測定した。そして ESP の集塵率 η を次式で算出した。

$$\eta = (C_i - C_o) / C_i \times 100 (\%) \quad (1)$$

ただし、 C_i は ESP 入口側滤紙の黒化度で、 C_o は出口側の黒化度である。

ここで ESP の集塵率について付記する。工業用 ESP の集塵性能は煙突出口のダスト濃度で公害規制を受け、この条件を満たすため ESP の性能改善だけでなく種々の対策、たとえばサイクロンとのハイブリッド方式などがある。結果として、工業用 ESP の集塵率は $95 \sim 99.5 \%$ の間で装置のそれぞれで値はことなる。これに対して、空調用 ESP では JIS^④ によりテストダストが定められ、所定の集塵率を得る必要がある。

2.2 実験用 ESP

実験用ハニカム型 ESP のハニカム部のセル 1 個の構造を図 2 に示す。負コロナ放電に比較してオゾン発生量

表 1 試験ダストの化学成分^⑥

Table 1 Composition of test dust.

Composition	Volume (%)
SiO ₂	34-40
Fe ₂ O ₃	17-23
Al ₂ O ₃	26-32
CaO	0-3
MgO	3-7
TiO ₂	0-4

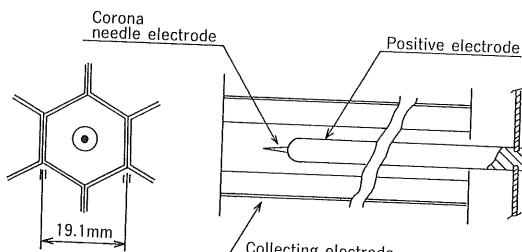


図 2 ハニカム型 ESP の素子

Fig. 2 Cell of Honeycomb type ESP.

がほぼ 1 衡少ない正コロナ放電^⑦を利用するため陽極棒に正の電圧を印加し、その先端に針状のコロナ放電極を取り付けている。この陽極の周りをアースした六角ハニカムの薄いアルミ箔（厚さ 0.1 mm ）の集塵極板で囲みセルを構成した。とくに針先端部がこの六角ハニカムのそれぞれの面と等距離になるよう設置し、針先端と 6 面電極のコロナ放電部すなわちダストに対しては荷電部を構成している。このハニカム型 ESP は陽極棒と集塵電極から構成される集塵部とこの荷電部が別々になっている 2 段式 ESP である。

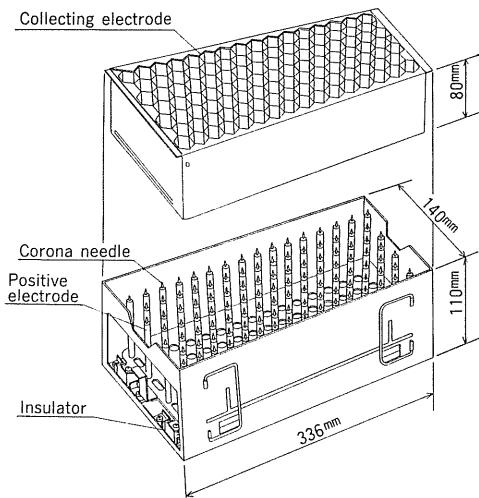


図3 ハニカム型 ESP

Fig. 3 Honeycomb type ESP.

図3はハニカム型ESPの全体の構造を示す。図2のセルを109個組み込んだ実験用ESPで、上部の図は使い捨てを考慮したハニカム型集塵極ではめ込み式になっている。下部の図は外枠から碍子絶縁され正の高電圧を印加する針電極付きの陽極棒群(109本)である。

ハニカムのピッチは19.1mmでアルミ箔極板の厚さがわずか0.1mmなので、陽極センター(針先端部)から集塵電極板までの最短距離は9.45mmである。ハニカムの大きさと針電極形状⁸⁾は一定とした。パラメータとして、集塵電極の長さを60, 80, 100mmの3種類および陽極棒の直径を3.0, 4.8, 6.4, 9.5mmの4種類をそれぞれ作成して実験を行なった。

試作ハニカム型ESPと性能比較するために、図4および図5に示す2段式平行平板型ESPを試作した。図4に示すように陽極板と集塵極板でダスト集塵部を構成し、陽極板前方15mmのところに粉体荷電のためのコロナ放電線を張って、前者と合わせて1個のセルを構成してある。このセルを5個組み込んで図5のように実験用2段式ESPを試作した。

集塵極板間のピッチは22mm、極板の厚さが1.0mmなのでコロナ放電線のセンタから集塵極板までの距離は10.5mmである。この値はハニカム型の最短距離9.45mmとほぼ同じ値である。集塵極板長80mmのハニカム型ESP(図3参照)の容積($5.17 \times 10^3 \text{ cm}^3$)を平行平板型ESPの容積($10.12 \times 10^3 \text{ cm}^3$)と比較すると約1/2であり、総合集塵極板面積はほぼ同じである。

陽極棒径4.8mm(半径 $r_0=2.4\text{ mm}$)の場合のハニカム型ESPと平行平板型ESPにそれぞれ6kVを印加した場合の、集塵電界の電界強度(kV/cm)特性を図

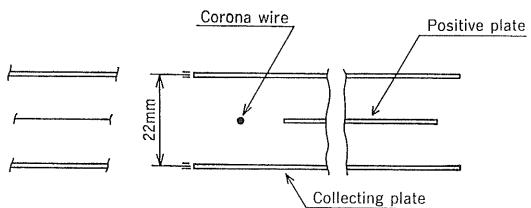


図4 平行平板型 ESP の素子

Fig. 4 Cell of Parallel-plate type ESP.

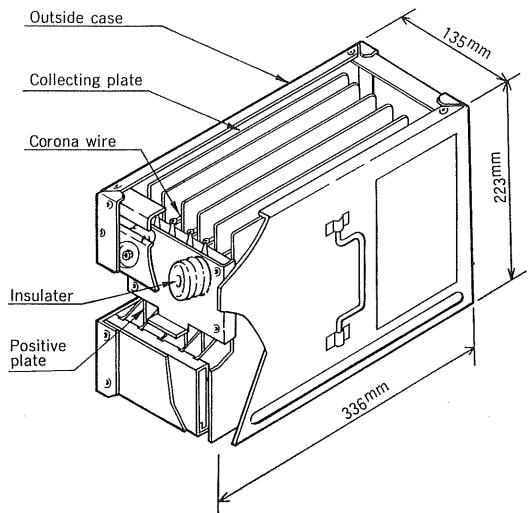


図5 平行平板型 ESP

Fig. 5 Parallel-plate type ESP.

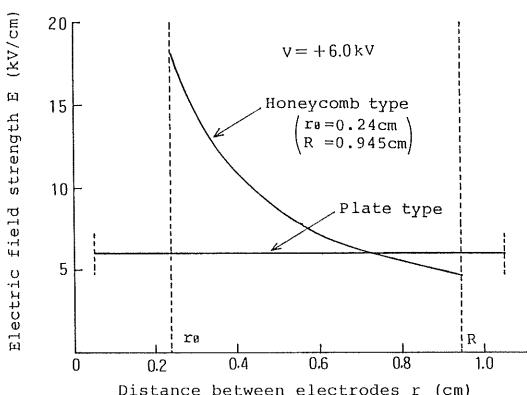


図6 平行平板型 ESP とハニカム型 ESP の電界強度特性

Fig. 6 Electric field strength characteristics of Parallel-plate type ESP and Honeycomb type ESP.

6に示す。ハニカム型ESPの電界は六角型の集塵極を近似的に半径 $R=9.45\text{ mm}$ の円と仮定してラプラスの式を円筒座標系を用いて計算した値である。荷電粒子に

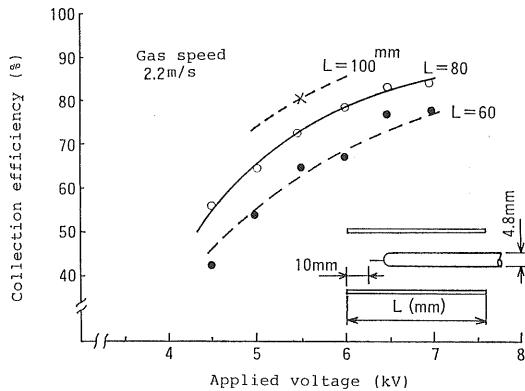


図 7 集塵極長さをパラメータとする集塵率特性

Fig. 7 Collection efficiency characteristics for parameter of length of collecting electrode.

作用する集塵作用力すなわち電界強度に比例するクーロン力は平行平板型 ESP では図 6 から明らかなように集塵空間すべてにおいて平等である。

ハニカム型 ESP の場合は図中の曲線から判断して集塵極に近づくにつれクーロン力が弱くなる欠点はさけられない。ただし、荷電ダストが集塵部に存在する場合、ポアソンの式¹²⁾の解は図 6 の曲線よりも空間電荷効果によってゆるやかになるはずで集塵作用力は増加すると考えられる。

3. 実験結果

ハニカム型 ESP の性能を決定する要因として Deutsch の式から明らかなように集塵極板の寸法、陽極棒の直径、コロナ針電極直径と先端削り角、印加電圧、ガス速度などが考えられる。今度はハニカムの大きさを一定(ピッチ 19.1 mm)として集塵極の長さ、陽極棒直径を変えた場合の性能特性ならびに風速の影響について実験を行なった。

3.1 集塵極板長さの変化

図 7 はガス速度 V_g を 2.2 m/s 一定としてハニカム型集塵極板の長さ L を 60, 80, 100 mm と変えた場合の印加電圧と集塵率に関する特性である。それぞれの集塵面積 S は 0.43, 0.57, 0.71 m² で、図から明らかなように集塵面積が大きいほど集塵率が高い。

ESP の集塵率 η は多くの仮定のもとに理論的に導出されたが、実験値とよく一致するので半実験式ともいわれて有名な Deutsch の式^{2,3)}を次に示す。

$$\eta = 1 - \exp(-sL\omega/AV_g) \quad (2)$$

ここで、 s は集塵面積 (m²)、 L は集塵極板の長さ (m)、 ω は帶電粒子移動速度 (m/s)、 A は装置断面積 (m²)、 V_g はガス速度 (m/s) である。

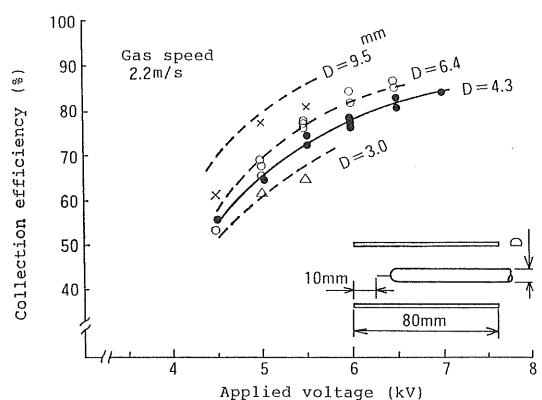


図 8 陽極棒直径をパラメータとする集塵率特性

Fig. 8 Collection efficiency characteristics for parameter of diameter of positive electrode pole.

(2)式は同軸円筒型 ESP について導出された式であるが比集塵面積が小さい平行平板型 ESP でも (2) 式と実測値がよく一致する¹³⁾。そこでハニカム型 ESP に (2)式を使用することにして、大胆な仮定として荷電電界強度を集塵平均電界強度 E と等しいとすると ω^9 は

$$\omega = KE^2 \quad (3)$$

となる。ただし、 K は比例定数である。

図 7 の $L=80$ mm、印加電圧 6 kV すなわち集塵平均電界強度 8.5 kV/cm における実験値 η を使用して ω の比例定数 K を算出する。この K を一定として、 $L=60, 100$ mm における η を (3), (2) 式から計算して結果を図 7 中に点線で記入した。図 7 から明らかなように計算値と実験値が非常によく一致している。

この計算手法を用いればダスト濃度 5.0~10 mg/Nm³ における $L=60\sim80$ mm, $V=4.5\sim7.0$ kV の範囲以内の任意の条件下的集塵率 η は (2) 式より簡単に算出される。したがって、この Deutsch の式は空調用ハニカム型 ESP 設計に有用である。

3.2 陽極棒直径の変化

図 8 はコロナ放電用針の形状条件は変えずに陽極棒直径を 3.0, 4.8, 6.4, 9.5 mm と変えた場合の集塵率特性である。陽極棒直径が大きくなると陽極棒とハニカム集塵極との空隙が小さくなり、同一印加電圧での集塵空間の平均電界強度が大きくなり、集塵作用力が高くなる傾向を示している。直径 4.8 mm、印加電圧 6 kV の結果を基準にして、3.1 節と同様の手法でダスト移動速度の比例定数を算出し、Deutsch の式で各陽極棒についての集塵率を計算した。

この計算結果を図 8 中に点線で記入した。計算結果は実験結果とよい一致を示しているが、直径 9.5 mm では

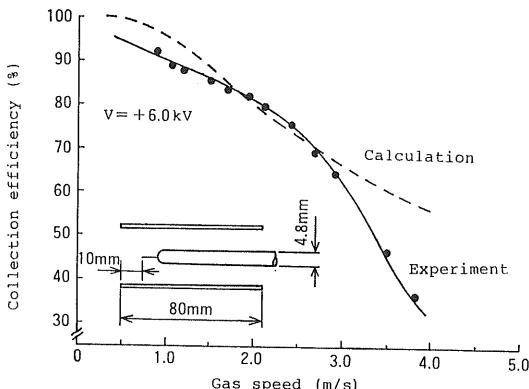


図 9 ガス速度と集塵率の関係

Fig. 9 Relation between collection efficiency and gas velocity.

計算値が実験値より大きい値になる傾向を示す。これは集塵平均電界強度のみを Deutsch の式に代入したためで、実際には陽極棒直径が大きくなると集塵部空間が小さくなり、ここでのガス速度が増加するためである。ダクト内のガス速度 2.2 m/s は一定であるが、直径 9.5 mm での集塵部ガス速度は直径 4.8 mm の場合に比較して 22% も増加するので、集塵部平均電界強度の増加効果がかなり減殺される結果と考えられる。

図 8 から判断して陽極棒直径 $D = 9.5 \text{ mm}$ を除いた $D = 6.4 \sim 3.0 \text{ mm}$ 、印加電圧 $V = 4.5 \sim 7.0 \text{ kV}$ の範囲内での集塵率は 3.1 節と同様に Deutsch の式で算出された計算値は実験値とよい一致を示す。したがって、この式はハニカム型 ESP 設計に有用である。

3.3 ガス速度変化

図 9 は図中に示す装置条件および印加電圧 6.0 kV を一定にして、プロアを調整してダクト内ガス速度を変化させた場合の集塵率特性である。ガス速度について付記すると、一般工業用 ESP は逆電離現象¹⁴⁾や、電極槌打時などのダスト再飛散現象対策ならびに高集塵率対策などのため 1.0 m/s 前後に設定する。しかし、空調用 ESP は構造が 2 段式なのでこれらの現象がほとんど発生しないことや高集塵率よりも小型化ならびにガス速度による堆積ダスト再飛散現象防止などを考慮して 2.0~3.0 m/s にガス速度を設定する。本研究の 3.1 節および 3.2 節では 2.2 m/s を選定して実験を行なった。

図 9 から明らかなように、集塵率はガス速度 2.5 m/s 以上になると急激な減少傾向を示している。ガス速度 2.0 m/s を基準点として、3.1 節に述べた荷電ダスト移動速度の比例定数を求め、Deutsch の式より算出した集塵率の計算結果を図中に点線で示す。

基準点近傍のガス速度 $V_g = 1.4 \sim 2.8 \text{ m/s}$ の中風速領

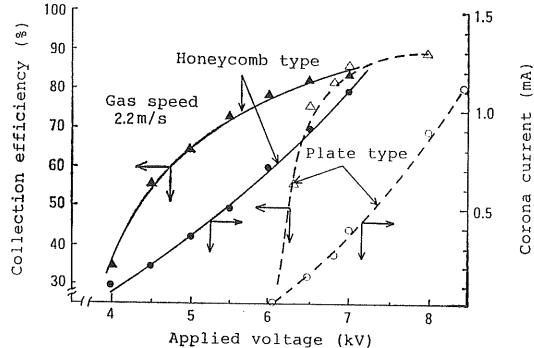


図 10 平行平板型 ESP とハニカム型 ESP の比較

Fig. 10 Comparison of Parallel-plate type ESP with Honeycomb type ESP.

表 2 平行平板型 ESP とハニカム型 ESP の仕様

Table 2 Specifications of parallel-plate type ESP and honeycomb type ESP.

	ESP type	
	Honeycomb	Plate
Volume (cm ³)	5,174	10,115
Collection area (m ²)	0.57	0.53
Collecting plate length (cm)	8.0	22.0
Distance of electrodes (cm)	0.705	1.05
Gas velocity (m/s)	2.2	2.2
No. of cell (-)	109	5

域では実験値と計算値は比較的よい一致がみられる。しかし、低風速領域（1.4 m/s 以下）および高風速領域（2.8 m/s 以上）の実験値は計算値よりも低くなる。低風速領域での集塵率低下の結果はハニカム集塵極入口付近でのコロナ放電に伴って発生するイオン風^{10,11)}による乱流効果¹⁵⁾で集塵部のガス流れに乱れが生じて集塵効果が低下したと考えられる。

高風速領域での集塵率の低下の原因是コロナ放電部でのガス滞在時間が短くてダスト帶電量不十分性と集塵部での滞在時間が短くてクーロン作用が十分に作用しないなどが考えられる。ただし、ガス風速 2.0 m/s でのダストのコロナ放電域滞在時間は約 0.005 秒で集塵部では約 0.04 秒である。

3.4 平行平板型 ESP との比較

図 10 はハニカム型 ESP と図 5 に示した平行平板型 ESP の印加電圧に対する集塵率特性である。これらの ESP の仕様比較を表 2 に示す。表から明らかなようにハニカム型は平行平板型に比較して容積は約 1/2 倍であるが集塵率に影響を与える集塵面積はほぼ同じであり図 10 中の集塵率が 6.5 kV 以上でともにほぼ同じ値にお

ちつくのが理解される。

印加電圧が 6.5 kV 以下になると平行平板型 ESP では急激に集塵率が低下するがハニカム型のほうは比較的安定した性能を示している。このことはハニカム型 ESP のコロナ開始時の集塵部平均電界強度は 4.2 kV/cm で平行平板型は 5.7 kV/cm と高い値を示し、また図中のコロナ放電特性ではハニカム型のほうが安定な放電領域が広いことと関連が深いと考えられる。

4. ま と め

空調用ハニカム型 ESP ならびに平行平板型 ESP を試作して種々の性能実験データを検討して、次のような結果が得られた。

- 1) 集塵極長さ $L = 60 \sim 100$ mm, 陽極棒直径 $D = 3.0 \sim 6.4$ mm, 印加電圧 $V = 4.5 \sim 6.5$ kV および入口ダスト濃度 $5.0 \sim 10$ mg/Nm³ の範囲において、実験データよりダスト移動速度の定数 K が決定されれば、Deutsch の式で算出される集塵率の計算値は実験値と非常によく一致する。したがって、Deutsch の式はこれらの条件下で設計に有効である。
- 2) ガス速度 $V_g = 1.4 \sim 2.8$ m/s の中速度領域では集塵率の実験値と Deutsch の式の計算値は非常によい一致が得られる。

3) ハニカム型 ESP は平行平板型 ESP に比較して容積は約 1/2 倍でほぼ同じ集塵面積が得られる。両者はほぼ同じ集塵率を示すが、前者は低い印加電圧でも比較的安定な運転ができる。

4) ハニカム型 ESP は小型で空調用としての高い集塵率が得られる。また、構造上薄いアルミ板（厚さ 0.1 mm）で集塵極が作成できることから安価となり使い捨て

が可能である。

以上の結果により、空調用ハニカム型 ESP は高性能、小型そして安価で集塵極使い捨て也可能であることが明らかになった。今後は実験をかさね装置改善へ努力する予定である。

最後に、ご支援いただいたダイキン工業（株）応武善郎部長ならびに実験などでお世話になった大分大学大久保利一助教授、赤峰修一技官、院生榎田達海君に深く感謝する。

参 考 文 献

- 1) 橋本清隆、足立宜良：静電気とその工業への応用、p. 63、東京電機大学出版局（1969）
- 2) H.J. White : *Industrial Electrostatic Precipitation*, p. 165, Addison-Wesley, Massachusetts (1965)
- 3) W. Deutsch : *Ann. Phys.*, **68** (1922) 368
- 4) JIS 空気清浄機 : C9615 (1976)
- 5) 空気清浄協会編：空気清浄ハンドブック、p. 368、オーム社（1981）
- 6) JIS 試験用ダスト : Z8901 (1984)
- 7) 大久保利一、浜崎俊作、赤峰修一、足立宜良：静電気学会全国大会論文集, 13aB3 (1987)
- 8) 高岡龍太、横田明博、松本徹、茂木完治：静電気学会全国大会論文集, 13aB5 (1987)
- 9) 文献 2) の p. 157
- 10) 足立宜良、増田閃一、阿久津顕祐：電気学会論文誌 A, **97** (1977) 259
- 11) 足立宜良、大久保利一：静電気学会誌, **11** (1987) 246
- 12) 浅野和俊：静電気学会誌, **11** (1987) 204
- 13) 藤村謙祐、足立宜良：静電気学会誌, **10** (1986) 177
- 14) 静電気学会編：静電気ハンドブック、p. 507、オーム社、東京 (1981)
- 15) 川崎元之、足立宜良：静電気学会誌, **5** (1981) 44