

論 文

樹脂被覆電極を用いたスクロール型電気集塵装置の性能実験

茂木 完治*, 河内山 泰彦*, 榎田 達海*

(1996年3月23日受理)

Efficiency Test of Scroll Type Electrostatic Precipitator Used
Resin Covered Electrode

Kanji MOTEGI,* Yasuhiko KOCHIYAMA* and Tatsumi ENOKIDA*

(Received March 23, 1996)

Two-stage type ESP (Electrostatic Precipitator) which consists of charging section and collecting section, is widely used as an air cleaning ESP. Development of a compact air-cleaning ESP with high performance is important for the installation of ESP in a room with limited space. It is possible to reduce the size of collecting section by making collecting electrode spacing narrow. However, it is necessary to prevent a spark discharge for narrower collecting electrode spacing. In this paper, the effects of covering the collecting electrode by resin on the surface potential and the performance of a scroll type ESP are studied experimentally. The ESP has a collecting section with grounded metal foil electrode and positively biased electrode covered by resin. As a result, it is found that the volume resistivity should be specified by taking into account of the surface potential of the positive biased electrode and the spark discharge characteristic of the collecting section. To obtain high collection efficiency under stable operation, resin with volume resistivity less than $10^{16} \Omega \cdot \text{cm}$ must be used and for practical use of the scroll type ESP, the volume resistivity of the resin should be about $10^{13} \sim 10^{15} \Omega \cdot \text{cm}$.

1. はじめに

2段式電気集塵装置(2-stage type electrostatic precipitator, 以下略して2段式ESP)は空調用集塵装置として広く使われている。空調用ESPは室内設置の制約から小型化、薄型化が要望されている。小型化には集塵部の極板間隔を狭くする方法がある。しかし極板間隔を狭めすぎるとスパークが発生してしまう。スパークを防ぐのに電極板を絶縁被覆する方法¹⁾がある。実用例として、樹脂板の片面に導電塗料を印刷した極板を用いたウェーハ型ESP²⁾等がある。筆者らも電極板を絶縁被覆したスクロール型ESPを開発³⁾した。

樹脂被覆電極を用いたESPの性能は絶縁被覆に用いる樹脂の電気的特性に影響される。そこでスクロール型ESPを用いて樹脂の種類や体積抵抗率を変えた実験を行った。その結果、適正な特性の樹脂を用いれば、小型化や薄型化に極めて有効であり、通常のESPと同じ集塵理論に従う

ことが確認できたので報告する。

2. スクロール型ESPの構造

実験に用いたスクロール型ESPはコロナ放電部、集塵部に分割可能な2段式ESPである。その構造を図1に示す。枠の大きさは前面が縦178 mm、横338 mmであり、ガス流れ方向長に対してはコロナ放電部25 mm、集塵部は25, 45, 85 mmの3種類の枠を作成した。

図2に示すように、コロナ放電部はコロナ放電線式である。コロナ放電線は直径0.1 mmのタングステン線で、有効放電線長264 mm、陰極板間隔25 mmである。コロナ放電線は2枚の陰極板の中央に設置され、+5.05 kVを印加し、コロナ放電電流を84 $\mu\text{A}/\text{m}$ とした。コロナ放電線と陰極板の組み合わせを1セルとして、それを6セル並設した。

集塵部はアースされた金属箔の集塵極板と電圧を印加する陽極板の帯をスクロール状(渦状)に巻いて金属の枠体に収めた。陽極板はアルミ箔の内部電極を樹脂フィルムで絶縁した。正の高電圧を内部電極に印加して樹脂フィルムの表面と集塵極板との間に集塵空間間に電界を作る構造である。陽極板のガス流れ方向長Lは20, 40 mmを作成した。さらに40 mmの陽極板を2段にして80 mmの物も作成し

キーワード：スクロール型ESP、樹脂被覆電極、Deutschの式、集塵率

* ダイキン工業株式会社汎用空調生産本部設計部 (591 大阪府堺市金岡町1304番地)
Design Department, Commercial Air Conditioning & Refrigeration Equipment Manufacturing Division, Daikin Industries Ltd., 1304 Kanaokacho, Sakai 591, Japan

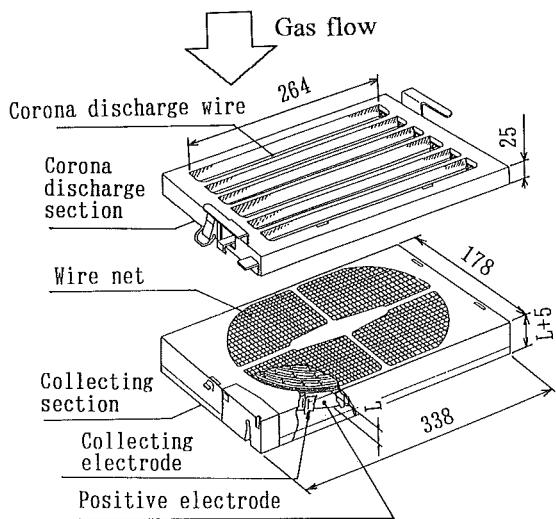


図 1 スクロール型 ESP

Fig. 1 Scroll type ESP.

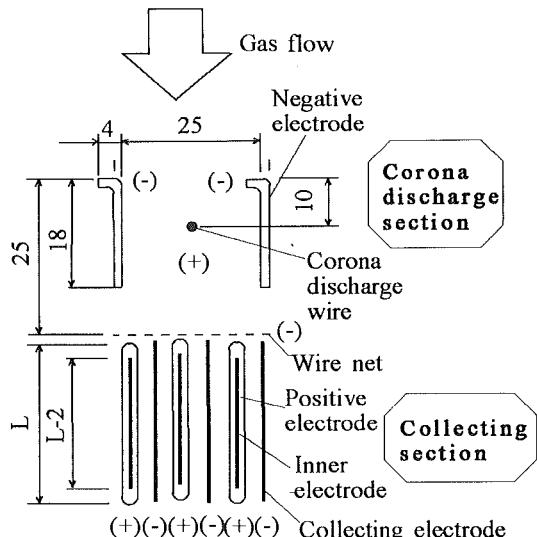


図 2 スクロール型 ESP の断面図

Fig. 2 Cross section of scroll type ESP.

て前述の枠に収めた。内部電極長は陽極板の全長より 2 mm 短い各々 18 mm, 38 mm とした。図 3 の集塵部の正面図に示すように、極板間隔の保持は集塵極板を 24 mm ピッチで波加工してスペーサーとした。陽極板の表面と集塵極板との間隔は約 1.5 mm である。内部電極に +2 kV を印加したとき、集塵空間の電界強度は約 1.3 kV/mm である。

3. 樹脂被覆電極の特性

電極を樹脂で絶縁被覆すると、樹脂の電気的特性がスクロール型 ESP の性能、安全性、耐久性に影響する。その中で性能についての実験結果について報告する。

3.1 樹脂表面電位の低下

樹脂で被覆された内部電極と集塵極板との間には、樹脂表面を境界とする樹脂層と集塵空間の 2 層の電界が発生す

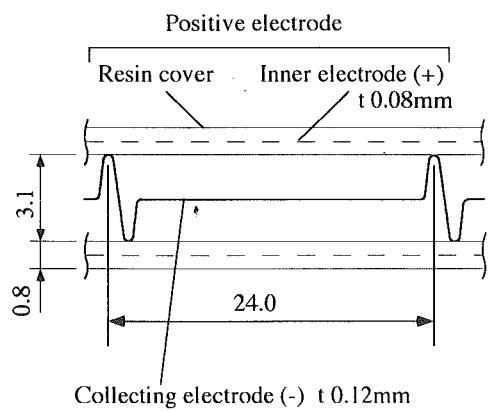


図 3 スクロール型 ESP の集塵部の正面図

Fig. 3 Front view of collecting section of scroll type ESP.

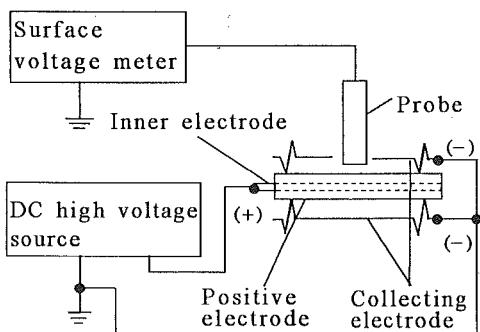


図 4 陽極板の表面電位の測定法

Fig. 4 Measurement system of surface voltage of positive electrode.

る。樹脂の種類によっては樹脂層の電界強度が経時に増加し、集塵空間の電界強度が減少して集塵率が低下する。そのとき、電界の境界である樹脂の表面電位は低下する。樹脂の種類と体積抵抗率を変えてその影響を実験で確認した。

3.1.1 実験方法と樹脂の種類

陽極板の樹脂の表面電位の測定方法を図 4 に示す。電位計は非接触型表面電位計（モンロー・エレクトロニクス、MODEL244）を用いた。実験室は気温 24°C、空調用 ESP は高湿度環境でも使用されることを考慮し、相対湿度 80% の試験環境とした。

体積抵抗率は 24°C、相対湿度 50% の条件で超絶縁計（川口電機、R-503 型）を用い、500 V を印加して測定した。樹脂の検体に電圧を印加すると突入電流が流れが数時間後に安定した電流値になる。その安定電流から体積抵抗率を測定した。

ポリ塩化ビニル PVC ($8 \times 10^{16} \Omega \cdot \text{cm}$)、ポリプロピレン PP(無延伸, $4 \times 10^{17} \Omega \cdot \text{cm}$)、ポリエチレンテレフタレート PET (2 軸延伸, $5 \times 10^{17} \Omega \cdot \text{cm}$) の 3 種類の樹脂フィルムで実験した。ただし、 $10^{17} \Omega \cdot \text{cm}$ 以上は測定器の測定の限界

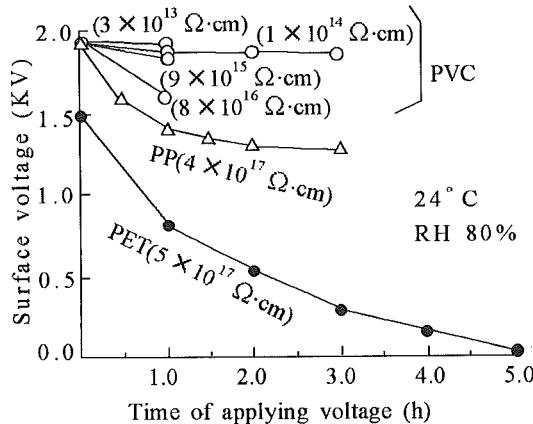


図 5 陽極板の表面電位の特性

Fig. 5 Characteristics of surface voltage of positive electrode.

であり、PP や PET の体積抵抗率はもっと高く、差も大きい可能性もある。

体積抵抗率は PVC にエチレン酢酸ビニル EVA を添加して調整した。調整後の体積抵抗率は $3 \times 10^{13} \Omega \cdot \text{cm}$, $1 \times 10^{14} \Omega \cdot \text{cm}$, $9 \times 10^{15} \Omega \cdot \text{cm}$ であった。PP と PET は $10^8 \Omega \cdot \text{cm}$ 程度以下の非常に低い体積抵抗率には容易に調整できるが、 $10^{13} \sim 10^{16} \Omega \cdot \text{cm}$ 程度への調整がうまくできず、体積抵抗率を変えての実験は行っていない。そのため樹脂による体積抵抗率の差は確認していない。

3.1.2 実験結果

表面電位の実験結果を図 5 に示す。表面電位の低下は PVC が最も少なかった。PET の低下は最も大きく、5 時間後に 0 V になった。体積抵抗率を調整した物の 1 時間後の表面電位の低下率は体積抵抗率 $8 \times 10^{16} \Omega \cdot \text{cm}$ の低下率が 17% であったのに対し、 $9 \times 10^{15} \Omega \cdot \text{cm}$ では 5% 低下、 $1 \times 10^{14} \Omega \cdot \text{cm}$ では 3% 低下、 $3 \times 10^{13} \Omega \cdot \text{cm}$ では 1% 低下であった。このように樹脂の種類に関わりなく $10^{16} \Omega \cdot \text{cm}$ 以上の体積抵抗率では表面電位の低下が増加する。体積抵抗率が小さいほど表面電位は低下しない。

体積抵抗率の影響について考察する。内部電極に正の電圧を印加すると、スペーサーを通して集塵板から負の電荷が供給され、樹脂表面に拡散すると考えられる。負の電荷は樹脂層を通って内部電極に逃げるが、体積抵抗率が大きいと負の電荷が表面に次第に蓄積され、表面電位が下がる。これは次の実験結果からも推定された。スペーサーである波部のピッチを狭くすると、波部間の中央の表面電位が低下した。また表面を水で濡らすとやはり低下した。

3.2 集塵率への影響

表面電位の低下する PP と PET、および低下しない PVC (体積抵抗率 $1 \times 10^{14} \Omega \cdot \text{cm}$ に調整) を用いたスクロール型 ESP の集塵率の経時変化の比較を図 6 に示す。実験は後の

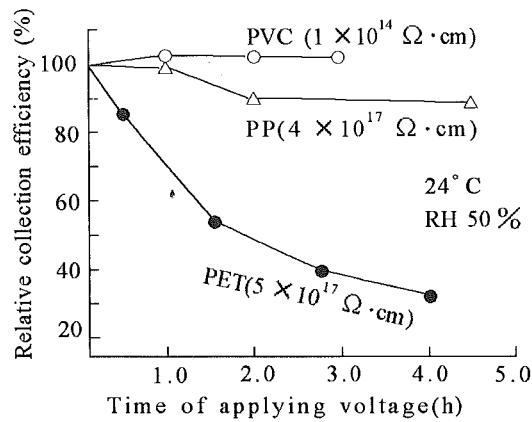


図 6 被覆材質による集塵率特性

Fig. 6 Characteristics of relative collection efficiency by cover resin.

4.1 節に述べる実験装置および実験方法によった。気温は 24°C 、相対湿度は 50% である。

PET は 2 時間足らずで集塵率が半減した。PP は緩慢であるが低下し続け、PVC の集塵率は安定であった。このように表面電位の低下する樹脂では通常の相対湿度の環境でも集塵率が低下する。したがって集塵率を実用可能に維持するには体積抵抗率を $10^{16} \Omega \cdot \text{cm}$ 以下にする必要がある。一方、樹脂の体積抵抗率を下げると絶縁破壊しやすくなり、製品寿命が短くなるので、体積抵抗率が高いのが望ましい。製造のばらつきや温度による体積抵抗率の変化も考慮して、常温 (25°C 前後) で $10^{13} \sim 10^{15} \Omega \cdot \text{cm}$ 程度が妥当⁴⁾ と考える。また樹脂としては PVC が体積抵抗率の調整も容易であり優れている。

4. スクロール型 ESP の性能実験

体積抵抗を $1 \times 10^{14} \Omega \cdot \text{cm}$ に調整した PVC を用いたスクロール型 ESP の集塵性能を Deutsch の式⁵⁾に基づいて検討した。また、樹脂被覆による効果を従来機種と比較した。

4.1 実験装置と実験方法

空気清浄協会の空気清浄装置性能試験方法基準⁶⁾に定める第 2 試験方法の集塵率測定装置を基本にして、図 7 に示す温湿度可変の実験装置を設計した。装置はミキシングチャンバーと、ダクトより構成される。ダクトは性能測定部、ガス流量測定部、送風機、HEPA フィルタを経てミキシングチャンバーに戻る閉回路である。性能測定部に実験用スクロール型 ESP を取り付け、コロナ放電部と集塵部の各々に電圧を印加して実験を行った。

集塵率は ESP の上流側と下流側のダスト濃度をパーティクルカウンター (リオン製 KC-01A 型、光散乱方式) を用いて測定した。これは 5 段階の粒径範囲 (0.3~0.5, 0.5

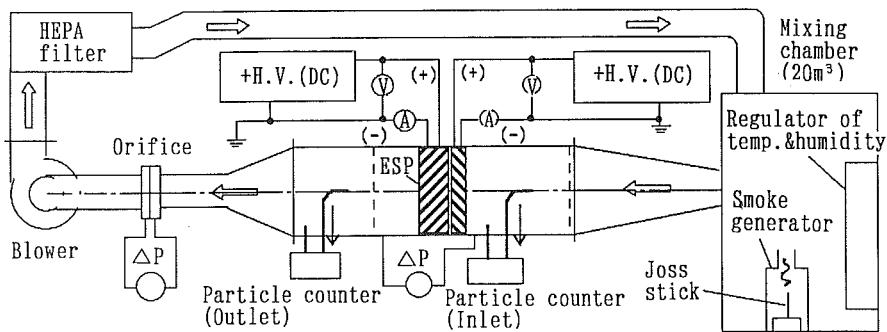


図 7 実験装置
Fig. 7 Experimental apparatus.

表 1 線香煙の粒径分布

Table 1 Distribution of particle diameter of joss smoke.

Particle diameter [μm]	Distribution [%]
0.3~0.5	96.22
0.5~1.0	3.29
1.0~2.0	0.39
2.0~5.0	0.08
5.0<	0.02

~1, 1~2, 2~5, 5 μm 以上) で測定可能である。スクロール型 ESP を適用する事務所や遊技場での浮遊粉塵の大部分は粒径 0.1~0.5 μm なので、集塵率は 0.3~0.5 μm の粒径範囲に限定して求めた。

試験ダストには線香煙を用いた。その粒径分布を表 1 に示す。大部分が粒径 0.5 μm 以下であった。実験のダスト濃度はパーティクルカウンターの濃度限界により、 5×10^7 ~ 1×10^8 個/ m^3 に調整した。これは粒子を密度 1 g/cm^3 の球形としても、0.007 mg/m^3 以下の重量濃度である。

4.2 陽極板印加電圧の影響

陽極板印加電圧は集塵部の集塵率に影響するので、集塵部集塵率と Deutsch の式の関係を検討した。集塵率はコロナ放電部集塵率と集塵部集塵率を合成したもので、次式で表される。

$$\eta = \eta_t + (1 - \eta_t) \eta_c \quad (1)$$

ただし、 η は集塵率、 η_t はコロナ放電部集塵率、および η_c は集塵部集塵率である。

そこで、陽極板のガス流れ方向長 L 20 mm, 40 mm の集塵部の印加電圧を変え、集塵率を測定した。

集塵部開口部のガス速度が 2.6 m/s のときの実験結果を図 8 に示す。陽極板印加電圧が 0 kV のとき、集塵率は約 4% であった。これはコロナ放電部の集塵率である。 $\eta_t = 0.04$ を (1) 式に代入すると

$$\eta = 0.04 + 0.96 \eta_c \quad (2)$$

となる。ここで、Deutsch の式を集塵部集塵率 η_c に適用す

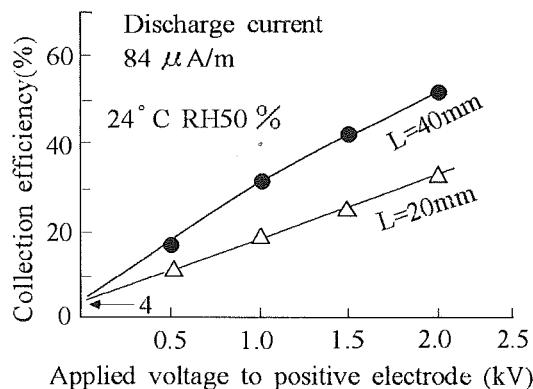


図 8 陽極板印加電圧と集塵率
Fig. 8 Relationship between applied voltage to positive electrode and collection efficiency.

ると、集塵空間電界強度に対して次式が成り立つ。

$$\eta_c = 1 - \exp(-\alpha E_c) \quad (3)$$

ただし、 α は定数、 E_c は集塵空間電界強度である。電界が平等電界であること、樹脂層と集塵空間の電界強度の比が一定であることを考慮すると、集塵空間電界強度は印加電圧に比例する。 η_c を印加電圧 V_c で表すと

$$\eta_c = 1 - \exp(-\alpha' V_c) \quad (4)$$

である。 α' は定数で、(2) 式より

$$\alpha' = -[\ln\{(1 - (\eta - 0.04)/0.96)\}] / V_c \quad (5)$$

である。

$L = 40 \text{ mm}$ のとき、 α' は集塵部印加電圧によらず一定で、0.33~0.36 (平均 0.345) であった。 $L = 20 \text{ mm}$ のとき、 α' は 0.17~0.18 (平均 0.175) であり、 $L = 40 \text{ mm}$ のときの半分の値であった。これは集塵面積が半分であるためで、それを考慮すると、印加電圧に対して Deutsch の式が適用できることが確認できた。

4.3 極板長 L の影響

極板のガス流れ方向長 $L = 20 \text{ mm}$ のときの実験結果より、Deutsch の式を用いて $L = 40, 80 \text{ mm}$ (80 mm の集塵部は 40 mm 陽極板を 2 段に使用) の集塵率を計算し、実験値と比較した。集塵部集塵率は次式で表される。

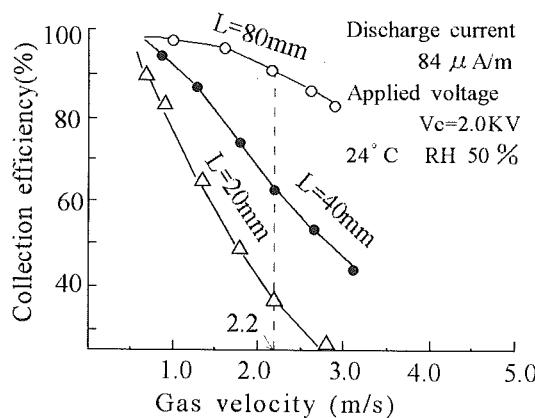


図 9 集塵部のガス速度と集塵率の関係

Fig. 9 Relation between collection efficiency and gas velocity at inlet of collecting section.

$$\eta_c = 1 - \exp(-2\omega L' W / A_c B_c) \quad (6)$$

ただし、 ω は(3)式を考慮すると電界強度に比例する定数である。 L' はガス流れ方向の有効極板長、 W は巻回長であり、 $2L'W$ は集塵面積である。 A_c は集塵部開口部の面積で $3.73 \times 10^{-2} \text{ m}^2$ であった。 B_c は集塵部開口部のガス速度で $A_c B_c$ はガス流量である。実験に用いた $L=20 \text{ mm}$ および $L=40 \text{ mm}$ の極板の巻回長は 10 m 、 $L=80 \text{ mm}$ の巻回長は 11.5 m であった。有効極板長 L' として内部電極長を用いた。これは陽極板の表面電位が内部電極の縁で急激に低下する測定結果が得られたためである。有効極板長は極板長 $L=20, 40, 80 \text{ mm}$ に対し各々 $18, 38, 76 \text{ mm}$ である。

陽極板に $+2.0 \text{ kV}$ を印加したときの実験結果を図 9 に示す。ガス速度 2.2 m/s のときの集塵率は $L=20 \text{ mm}$ は 37% 、 $L=40 \text{ mm}$ は 63% 、 $L=80 \text{ mm}$ は 91% であった。極板長 $L=20 \text{ mm}$ の集塵率の実験値 37% を(2)式に代入し、集塵部集塵率 34% を得た。これを(6)式に代入して ω を求めて、 $\omega=0.095$ を得た。

この ω を用いて $L=40, 80 \text{ mm}$ の集塵率を計算した。 $L=40 \text{ mm}$ のときの計算結果は $\eta=61\%$ であった。一方、 $L=80 \text{ mm}$ は 1.15 倍長く巻回され、極板間隔が密になるので、電界強度が 1.15 倍になる。そのため ω も 1.15 倍になるとして計算した。結果は $\eta=91\%$ であった。これは実験値に非常に良く一致しており、極板長、すなわち集塵面積に対して Deutsch の式を適用できることが確認できた。

4.4 ハニカム型 ESP との比較

ハニカム型 ESP は、スクロール型 ESP 開発の前に筆者らが開発した全金属製の空調用 ESP である⁷⁾。ハニカム型 ESP の構造を図 10 に示す。短径 19.1 mm の六角筒の中央に、先端に針放電極を取り付けた直径 5 mm の陽極棒が設置されている。それを 1 セルとして、140 セルを金属の枠体に収めている。これと $L=20 \text{ mm}$ の陽極板を用いたスク

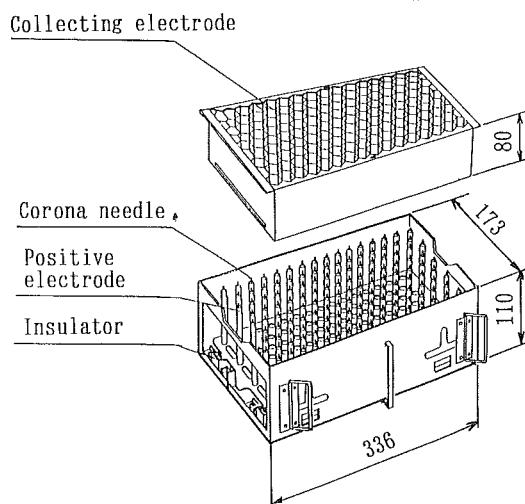
図 10 ハニカム型 ESP⁷⁾

Fig. 10 Honeycomb type ESP.⁷⁾

表 2 スクロール型とハニカム型の仕様と集塵率

Table 2 Specifications and collection efficiency of scroll type ESP and honeycomb type ESP.

	ESP type		
	Scroll	Honeycomb	
Front area	[cm ²]	602	582
Length	[cm]	5.0	11.0
Volume	[cm ³]	3010	6402
Collection area	[m ²]	0.394	0.732
Distance of electrodes	[cm]	0.15	0.71
Gas flow rate	[m ³ /s]	0.04	0.04
Collection efficiency	[%]	71	70

ロール型 ESP と性能の比較を行った。仕様および集塵率の実験結果の比較を表 2 に示す。結果はスクロール型 ESP はハニカム型 ESP の半分の大きさにもかかわらず、集塵率は同じであった。

スクロール型 ESP の電界強度は約 1.3 kV/mm である。ハニカム型 ESP の集塵極板と陽極棒との間の電界強度を、円筒形の電場に近似してラプラスの式⁸⁾で計算すると、集塵極板近傍では約 0.5 kV/mm であった。したがって、電界強度は 2 倍以上強くすることで、ESP を $1/2$ に小型化できることが確認できた。

5. まとめ

樹脂で絶縁被覆した電極を用いたスクロール型 ESP について性能実験および検討を行い、次の結論が得られた。

- 1) 被覆に用いる樹脂の体積抵抗率が $10^{16} \Omega \cdot \text{cm}$ 以上になると、表面電位が経時に低下し、集塵率が低下する。そのため、体積抵抗率は実用的には $10^{13} \sim 10^{15} \Omega \cdot \text{cm}$ 程度が妥当である。

2) ポリ塩化ビニル PVC が体積抵抗率を容易に調整できるので、材料として優れている。

3) スクロール型 ESP の設計においても、Deutsch の式を用いることができる。

4) 金属製電極板のハニカム型 ESP に比して、集塵空間の電界強度を約 2 倍程度に強くできるので、小型化が可能である。

以上により樹脂で絶縁被覆した電極を用いたスクロール型 ESP は、ESP の小型化、薄型化に効果のあることが明らかになった。今後はさらに性能の向上を求めて装置の改良に取り組みたい。

最後に、スクロール型 ESP の実験に当たり、御指導をいただきました大分大学工学部の大久保利一教授、金沢誠司講師、大分県職業能力開発課の足立宣良氏、ならびに樹脂の帶電について御教示をいただきました東京理科大学理工

学部の村田雄司教授に深く謝意を表します。

参考文献

- 1) 小林恒夫, 立松健三, 勝井保之, 細野弘大, 木村信三, 森継治郎: 特公昭 43-29789
- 2) 静電気学会編: 静電気ハンドブック, p. 548, オーム社 (1981)
- 3) 足立宣良, 長谷川寿, 横田明博, 伊藤日出男, 伊藤富夫, 河内山泰彦, 茂木完治: 静電気学会講演論文集 '89, p. 293, 静電気学会 (1989)
- 4) 茂木完治: 特開平 2-218454
- 5) W. Deutsch: Ann. der Physik, **68** (1922) 335
- 6) 空気清浄協会編: 空気清浄ハンドブック, p. 368, オーム社 (1981)
- 7) 高岡龍太, 横田明博, 松本 徹, 茂木完治, 足立宣良: 静電気学会誌, **12** (1988) 204
- 8) 静電気学会編: 静電気ハンドブック, p. 167, オーム社 (1981)