

論 文

超音波凝集を併用した電気集塵の実験

中根偕夫*,瀬谷浩一郎*

(1986年5月8日受理)

The Experiment of Electrostatic Precipitator with
Ultrasonic Agglomeration

T. NAKANE* and K. SEYA*

(Received May 8, 1986)

The electrostatic precipitator (EP) has a low collection efficiency for particles with a diameter of less than 1.0 μm . Therefore, it has also been thought that by enlarging the sub-micron particles to a point where they can be gathered in the EP. It was examined that after using an enlarging operation with ultrasonics on smoke particles the applied smoke particles increased in diameter and were gathered in the EP. There was an improvement shown in the collection efficiency. The results showed that with the implementation of a high-intensity ultrasonic wave of 20 kHz the collection efficiency could be raised. Also, in the first part of the report, due to the ultrasonic waves the smoke particles that were to be used were enlarged as ascertained from the particle diameter distribution statistics are shown.

1. まえがき

あらゆる集塵装置と同様に、電気集塵装置（以下 EP と略記する）は対象ダストの粒子径が細かくなるほど、その捕集性能が低下する¹⁾。このことは、サブミクロン粒子を大量に含む石炭フライアッシュなどで、集塵率の低下が著しくなり捕集困難になるといわれている¹⁾。

そこで、サブミクロン粒子を集塵の容易な粒径までに凝集肥大させ、集塵効率を良くすることが考えられ、その一方法として、強力空中超音波を煙霧へ照射する方法¹⁾がある。また、空中に浮遊する煙霧粒子の音波による凝集については、Bolt と Haideman らが理論的に検討²⁾し、その裏付の実験³⁾や、その応用としての音波集塵装置の試作⁴⁻⁶⁾がなされている。

著者らは煙霧粒子の超音波による凝集肥大化の作用を利用し、試料煙霧粒子径を大きくした後に EP を併用した場合の集塵効率の向上と、EP の装置内部を強力超音波音場とした場合の 2 例を実験的に試みたので報告する。すなわち、この報告の前段では、試料となる煙霧粒子径分布に超音波が与える影響について、アンダーセンサンプラーを用いた実験的考察を記述し、後半では、超音

波と EP の併用による集塵効率についての実験結果を述べた。

2. 実験装置および方法

2.1 実験装置

実験装置の概略を図 1 に示す。装置本体は断面が 18 × 18 cm のアクリル製のダクト状で、全長約 2.5 m とした。また、本体は空中強力超音波発生部と静電気による EP 部に大別でき、他はダクト内ガス流を整流する装置や吸引式の送風機等からできている。

煙霧粒子を凝集肥大化²⁾させる超音波発生部は、図に示すように EP 部の上流に位置させ、2 枚の高次モード曲げ振動板⁷⁾ (7 × 28 cm, 1 mm 厚のジュラルミン製) を半波長の縦共振棒 (12.5 cm, 太さ 7 mm) 2 本で接続し、ダクト内部に装置した。この共振棒はエキスピネシャルホンを経て π 型フェライト振動子 (周波数 20 kHz) に接続した。

ここで使用する強力空中超音波の周波数は、試料となる煙霧粒子（線香の煙）の径を考慮し、文献 2) の下記関係式および文献 8) を引用し、20 kHz とした。

$$\frac{X_P}{X_G} = \frac{1}{[1 + (\pi \rho_P D_P^2 f / 9 \eta)^2]^{1/2}} \quad (1)$$

ただし、 X_P ：煙霧粒子の振動振幅、 X_G ：媒質の振動振幅

すなわち、(1)式は定在波音場における煙霧粒子の凝

* 日本大学生産工学部電気工学科 (275 習志野市泉町 1-2-1)
Department of Electrical Engineering, College of Industrial Technology, Nihon University, 2-1, Izumicho 1-chome, Narashino, 275 Japan

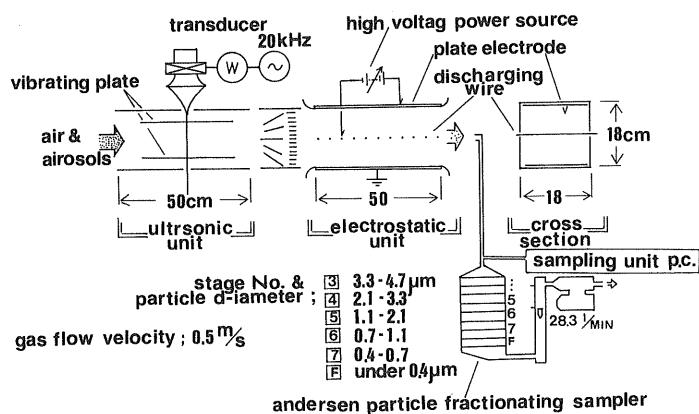


図1 実験装置(平板形EP)図

Fig. 1 Experimental apparatus for electrostatic precipitator with high intensity ultrasonic field. The particles were produced by burning incense sticks.

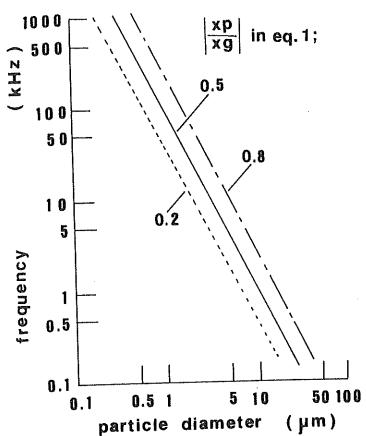


図2 音波凝集の周波数と粒径に関する図

Fig. 2 Optimum frequency versus particle size calculated by Eq. (1).

集について Brandt らが、音の粒子速度および振幅と煙霧粒子の相対速度効果による力学的凝集との見地より、理論的に求めた X_P と X_G の比である。 (1)式で $0.2 < X_P/X_G < 0.8$ の範囲を過渡領域 (transition range) と称して粒子の力学的凝集に有効な区域としている。そこでこの X_P/X_G を 0.5 とし、粒子密度 $\rho_P = 1 \text{ g/cm}^3$ ^{8,9}、媒質の粘性係数 $\eta = 180.9 \times 10^{-6} \text{ g/cm} \cdot \text{s}$ ⁹ の場合とし、粒子径対音の周波数の関係を計算したところ図2をえた。

図からもわかるように煙霧粒子径を凝集肥大化し $1 \mu\text{m}$ 以上にするためには、 100 kHz 以下の周波数の音波を用いることで、解決できるものと考えられる。そこで、著者らは騒音の防止のため、可聴周波数帯以上の周波数を考慮し、使用周波数を 20 kHz とした。

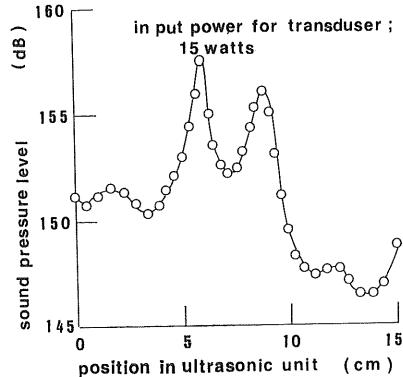


図3 音圧分布曲線図

Fig. 3 Distribution of sound pressure level.

そこで、この周波数でダクト内部を強力音場としたところ図3をえた。図はダクトの中心軸上で共振棒より 15 cm 間の音圧 (実効値) を測定した場合で、図中の曲線は振動子への入力 15 W の例である。この場合位置での平均的音圧は、図から 150 dB (re. $0 \text{ dB} = 20 \mu\text{Pa}$) と読み取った。

一方、EP部は図1に示すようにダクトの上下面に 55 cm 長、 18 cm 幅の集塵極にみたてたジュラルミン板2枚を装置し、その中心に、ガス流に対して直角に 5 cm 間隔で張った 10 本の $0.2 \text{ mm} \phi$ の線で放電極を構成した。また、電極間電圧 (負の放電極) は今回の場合 $0 \sim 30 \text{ kV}$ で動作させ実験を進めた。この場合の電極間電圧 (印加電圧) とコロナ電流の関係を図4に示した。

2.2 煙霧試料および計測器について

試料はサブミクロン粒子を凝集肥大させる意図から、今回は一般に入手しやすい線香の煙 (著者らの計測によ

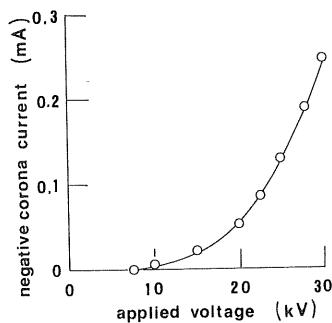


図4 電圧-電流特性曲線(平板形EP)図

Fig. 4 Characteristics of voltage-current curve for plate type EP.

ると平均粒子径約 $0.4\text{ }\mu\text{m}$ を用いた。この試料煙霧濃度は約 0.5 mg/m^3 と希薄なものと、粒子径分布測定での試料として 360 mg/m^3 の濃い場合の2種類とし、ダクト内のガス流速は 0.5 m/s で実験を行なった。

計測器については、粒子径分布測定(3.1.1, 3.1.2)ではアンダーセンサンプラー(日本カノマックス社製3351)を用いた。これは大気中の浮遊粒子状物質の粒径測定装置で、多孔多段式のインパクタ方式により、空気動力学的に捕集する分級サンプラーである。この分級は9ステージで $0.1\sim10\text{ }\mu\text{m}$ の分級であるが、6ステージのみ記した。

超音波凝集作用をEPに併用した実験(3.2.1, 3.2.2)では、光散乱式粒子計数器(リオン社製KC-01A、以後PCと記す)を用いた。これは粒子が測定器内部の照射領域を通過した個数を求め、一定の測定時間中の吸引空気体積と選別された粒子数によって粒子の個数濃度を求めるもので、この測定器の分級は $0.3\sim5\text{ }\mu\text{m}$ 以上の5レンジとなっている。また、ここでは4レンジのみ記した。

3. 実験結果

粒子径分布についての実験を3.1で、超音波凝集作用をEPに併用し集塵効率の向上の試みを3.2に報告する。

3.1 粒子径分布への各作用の影響

3.1.1 超音波凝集による粒子径分布の変化

装置本体内部に試料のガスを流動させ、装置排出口側で捕集した粒子径分布を測定したところ図5をえた。図はアンダーセンサンプラーで各粒子径範囲ごとに分級捕集した煙霧粒子重量を総合計し、各ステージごとの割合にして表わした。図の縦軸は全煙霧粒子重量の割合で、横軸は粒子径および各ステージの粒子径範囲である。また、パラメータは超音波作用のない場合と、音圧145, 150,

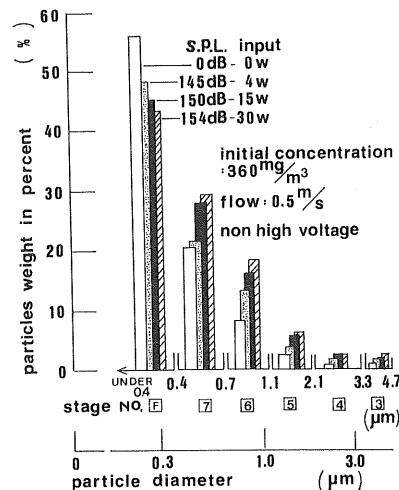


図5 アンダーセンサンプラーによる粒径分布測定(音波の影響)図

Fig. 5 Characteristics of particle size distribution with ultrasonic by andersen particle fractionating sampler.

154 dBの場合である。

図から、 $0\sim0.4\text{ }\mu\text{m}$ (Fステージ)の煙霧粒子重量の割合は、煙霧粒子に照射する音圧を大きくすることによって減少し(すなわち57%の割合だったのが154 dBの超音波照射することで43%へと変化した)、逆に $0.4\sim4.7\text{ }\mu\text{m}$ (7~3ステージ)の粒子径の大きい範囲の場合、重量の割合が増大(たとえば $1.1\sim2.1\text{ }\mu\text{m}$ では3%だったのが7%へと増大)する傾向がみられる。

これらのこととは、超音波の煙霧粒子の凝集作用によって、粒子が凝集肥大化し、小粒径から大粒径に分布が移行したものと考えられる。

3.1.2 粒子径分布から見たEPの集塵効率

前項と同様にアンダーセンサンプラーを用い、EPの排煙の粒子径分布を測定した。図6に各ステージごとの重量分布の結果を示した。図の縦軸は各煙霧粒子径の範囲での捕集重量を示し、横軸は前図と同じ粒子径である。パラメータには電極間の印加電圧を $0, 10, 20, 25\text{ kV}$ とした場合である。図から、文献1)にも述べられているように、サブミクロンの粒子径範囲で集塵の性能が低く、 $1\text{ }\mu\text{m}$ 以上の粒子捕集の効果が高いことがわかった。たとえば $0.4\sim0.7\text{ }\mu\text{m}$ (7ステージ)においては 115 mg/m^3 の排出煙濃度だったのが、 20 kV にすることにより 54 mg/m^3 へと変化し約62%の集塵効果を示している。一方、 $2.1\sim3.3\text{ }\mu\text{m}$ (4ステージ)の場合は30%で、効果が高いことが見られる。

これらのことから、試料となる煙霧粒子径分布が大の

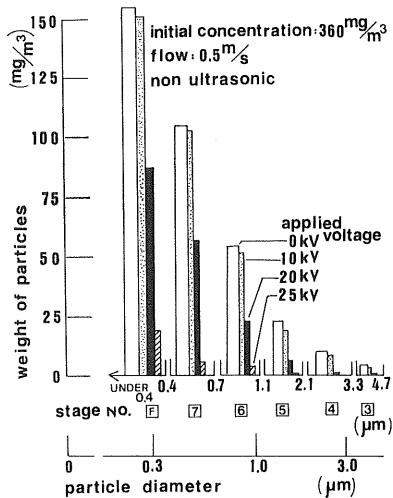


図6 アンダーセンサンプラーによる粒径分布測定(EPによる集塵の様子)図

Fig. 6 Particle size distribution with EP by Andersen particle fractionating sampler.

粒径であれば、EPによる集塵効果は高くなるのがわかる。

3.2 EPに超音波凝集作用を併用した実験

3.2.1 凝集肥大粒子をEPに加えた実験

排煙測定用のPCに1/10の希釈装置を付加し、排出煙の濃度を測定した結果を図7に示した。縦軸に装置排出口側での煙霧1l中の粒子数を、すなわち、PCの指示値を対数目盛上に示し、横軸には電極間電圧を示した。図中(1)(2)曲線は0.3~0.5 μmの粒子径範囲の粒子数を、(3)(4)および(6)(5)曲線はそれぞれ0.5~1.0、1.0~2.0 μmの場合を示した。また、白ぬき印の実線はEPのみ動作した場合の集塵であり、黒ぬき印の点線は超音波(図3の音場)を併用した場合を示した。

図から、粒子径0.3~0.5 μmの範囲で、電極間電圧が0kVの場合、すなわち印加電圧および超音波作用がともにない初期の濃度のとき 4.5×10^6 個/lであったものが、電極間電圧をたとえば30kVにすると、 5×10^4 個/lまで減少することがわかる。そこで、この状態に超音波を照射し、同様にEPを動作させると電極間電圧を0kV、すなわち超音波による煙霧粒子の凝集作用だけで、初期の濃度の 4.5×10^6 から 3×10^5 個/lまで排煙濃度が降下していることが見られた。このことは、強力超音波による粒子の凝集肥大化に伴う装置中央部の整流板への衝突および重量増大による沈降ではないかと考えられる。また、電極間電圧が30kVではEPのみで 5×10^4 だったのが 3.5×10^4 個/lとなり、EPのみ動作よりも集塵の効果が高いのがわかる。また、粒子径0.5~1.0

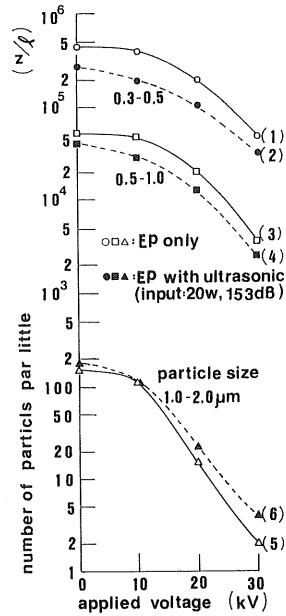


図7 EP動作による粒子数変化の様子図

Fig. 7 Shift of collected particles.

μmの範囲の場合も同様な傾向であるといえるが、1.0~2.0 μmの(5)(6)曲線が逆転となっている。このことは、超音波の煙霧粒子への凝集作用によって粒子が凝集肥大化し、小粒径から大粒径に分布が移行^{10,11}し、1.0~2.0 μmの範囲の粒子の量が増大したためと考えられる。

そこで、集塵の効率を検討するため、煙霧の初期濃度を基準とした集塵効率を次式のように考えた。

$$\eta = \frac{I_C - P_D}{I_C} \times 100 (\%) \quad (2)$$

ただし、 η : 集塵効率、 I_C : 初期の煙霧粒子濃度、 P_D : 集塵装置を動作した場合の濃度

(2)式を用いて図7を書き直したのが集塵効率図8である。図(a)(b)(c)は粒子径範囲別に示し、それぞれ0.3~0.5、0.5~1.0、1.0~2.0 μmの場合である。いずれの場合も白ぬき印実線はEPのみの集塵効率で、黒ぬき印点線の曲線が超音波作用をEPに併用した場合である。

この集塵効率の図から、サブミクロン粒子の範囲では超音波作用を併用することで、明らかに効率の向上が見られる。しかし1.0~2.0 μmの場合は超音波作用のみで、逆に127%にも粒子数が増大しているため、EPの電極間電圧を30kVとしても集塵効率97%となり、EPのみ動作の場合の99%には至らなかった。

3.2.2 EP内部を超音波音場とした実験

ここでは、前節で述べた超音波を照射した後の煙霧粒

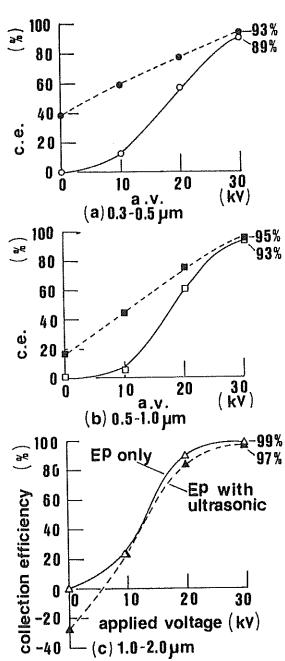


図 8 集塵効率(粒子径別)図

Fig. 8 Collection efficiency at 3 stages particle size.

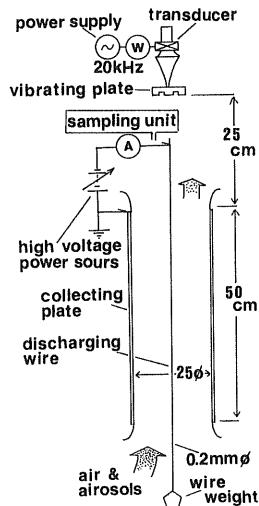


図 9 実験装置(円筒形 EP)図

Fig. 9 Schematic diagram of pipe type EP.

子を EP に導入した場合とは異なり、EP 内部自体を強力音場とし、超音波による煙霧粒子凝集作用を EP による集塵と同時に実験を行なった。

装置の EP 本体は円筒形に、超音波音源は指向性のある $8 \text{ cm} \phi$ の円形段付振動板¹²⁾とした。この超音波音源は実験装置図 9 に示すように EP 本体の排煙出口側に位

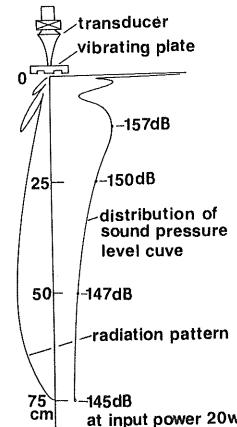


図 10 段つき円形振動板による放射パターンおよび音圧分布曲線図

Fig. 10 Sound pressure along the center axis.

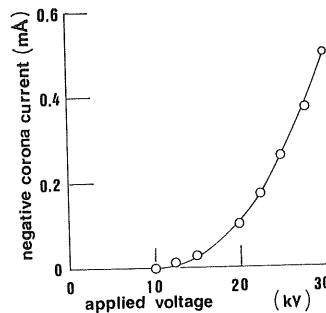


図 11 電圧-電流特性曲線(円筒形 EP)図

Fig. 11 Example of voltage-current curve for pipe type EP.

置させ、図 10 に示した音圧パターンが有効に EP 本体内に入るようにした。また、試料流量は 3.2.1 と同様であり、空筒部流速 0.5 m/s , $0.97 \text{ m}^3/\text{min}$ とほぼ同一の処理量で実験を行なった。また、この場合の装置の EP 部の $V-I$ 特性を図 11 に示した。

実験結果を図 12 に示す。図の縦・横軸ともに図 7 と同様である。図中(1)(2)曲線は $0.3 \sim 0.5 \mu\text{m}$ の範囲の粒子数を、(3)(4), (6)(5)曲線はそれぞれ $0.5 \sim 1.0$, $1.0 \sim 2.0 \mu\text{m}$ を示した。また、白ぬき実線は EP のみ動作した場合の集塵の様子であり、黒ぬりつぶし印破線は EP に超音波(図 10 の音場)を併用した場合を示した。

図から粒子径 $0.3 \sim 0.5 \mu\text{m}$ の範囲で、電極間電圧が 0 kV の場合、すなわち EP の電圧および超音波作用ともに初期の濃度 $7 \times 10^4 \text{ 個/l}$ であったものが、EP の電極間電圧を 30 kV にすることで $1.7 \times 10^4 \text{ 個/l}$ まで減少したのがわかる。そこで、この状態に超音波を照射

し、同様に EP を動作させると 1.3×10^4 個/l となり、EP のみの動作よりも集塵の効果が高くなるのがわかった。

また、粒子径が 0.5~1.0 μm の範囲の場合も同様な傾向を示したが、比較的大粒子径の 1.0~2.0 μm の範囲の(5)(6)曲線の場合は 3.2.1 と同様に実線と破線が逆転した。

すなわち、超音波音場を EP 本体内にすることで、装置の小型化ができたが、サブミクロン粒子の範囲での集塵効果は 3.2.1 の場合より約 6% 低いように見られる。

3.2.3 超音波併用の効果についての考察

超音波による煙霧粒子の凝集作用を EP に併用した場合の集塵の効果について考察するため、集塵効率図を

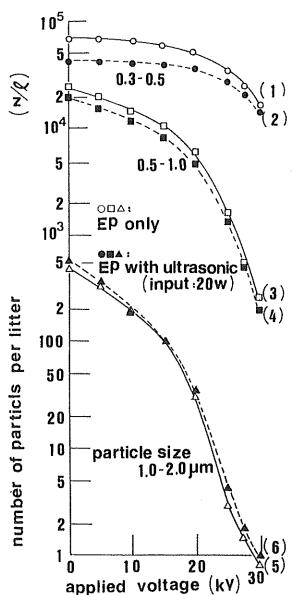


図 12 EP 動作による粒子数変化の様子 (円筒形 EP)

Fig. 12 Shift of collected particles (pipe type EP).

(2)式を用いたところ図 13 がえられた。

図中(a)(b)(c)は粒子径範囲別で、それぞれ 0.3~0.5, 0.5~1.0, 1.0~2.0 μm の場合であり、縦軸は集塵効率を、横軸は EP 部への電気入力 (電極間電圧にコロナ電流を乗じた値) である。いずれの場合も白ぬき印実線は EP のみ動作のときの効率で、黒ぬりつぶし印破線は超音波 (振動子への入力 20 W 時) を EP に併用した場合を示した。また、(1)(2)曲線が、超音波による凝集肥大粒子を EP に加えた実験である 3.2.1 の結果であり、(3)(4)曲線は EP 内部に超音波作用を加えた 3.2.2 の結果である。

小粒子径の図(a)を見ると、(2)曲線の EP のみでは、EP への電気入力がたとえば 7.2 W で 90% の集塵効率を示している。この状態に超音波 (振動子への入力 20 W) を併用すると、(1)曲線の 93% へと集塵効率が上昇した。また、この(1)(2)曲線の超音波併用時の効率の向上は EP への電気入力が低いときの場合が大きいことを示している。これらの傾向は、(1)(2)曲線よりは全体に集塵効率が低いが、(3)(4)曲線も同様であった。

また、別の見方をし、比較的大粒子径になる(b)(c)図の場合(1)(2)曲線部と(3)(4)曲線部が近づき、0.5 μm 以上の大きな粒子に対しては、3.2.1, 3.2.2 いずれの超音波併用型でも効果は同じといえそうである。

しかしながら、前項にも述べたが、1.0~2.0 μm の粗大粒子径の範囲では(c)図に示すように超音波を併用することによって、凝集肥大粒子による粒径分布の移行¹¹⁾すなわち図 5 のため集塵効率が低下した。このことから、EP の集塵効率の低い小粒子径の範囲で、また、EP の電極間の電気入力の小さいときに超音波の併用の効果がよいといえる。

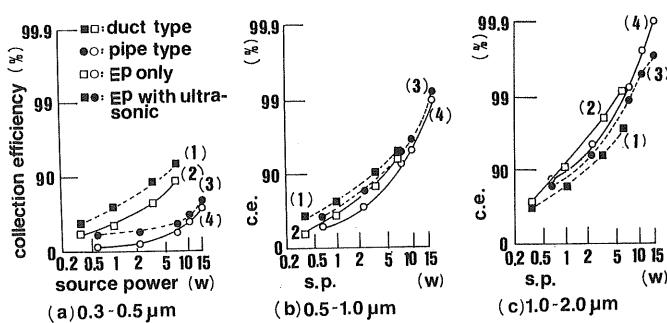


図 13 平板形および円筒形 EP の比較

Fig. 13 Efficiency of duct and pipe type EP.

4. ま と め

今回の実験から、超音波を併用することでEPの集塵効果を上げることができたが、とくに粒子径が0.3~0.5 μmと小さい範囲で顕著であった。

このことは、微小粒子を超音波により凝集肥大させ、その試料をEPで捕える3.2.1の場合が効果が高かったことから、サブミクロン煙霧粒子の凝集肥大は、EPの集塵効率の向上にとって有効な手段であると考えられる。

しかしながら、今回の装置の煙霧処理能力は毎分1 m³弱と小規模のため、超音波が有効となったが現有する音源から察して、大型化は現在のところ困難と考えられる。しかし、EPで捕えにくい試料とか、爆発性の試料などには超音波凝集作用を併用することを考慮する必要はあると思われる。

なお、静電界に超音波が及ぼす影響¹³⁾についても、今後検討を加えなければならない。

参 考 文 献

- 1) 静電気学会編：静電気ハンドブック，p. 542，オーム社 (1981)
- 2) T.F. Hueter and R.H. Bolt: *Sonics*, p. 213, John Wiley and Sons, Inc., New York (1955)
- 3) 川村雅恭：日本音響学会誌，17 (1961) 123
- 4) Y. Oyama, I. Inoue, Y. Sawahata and M. Okada: *J. Sci. Res. Instrum.*, 48 (1954) 260
- 5) 中根信夫, 瀬谷浩一郎：日本音響学会講演論文集, p. 441, 日本音響学会 (1977)
- 6) T. Nakane and K. Seya: *9 International Congress on Acoustics*, p. 604, Madrid (1977)
- 7) 山根宏之, 伊藤洋一, 川村雅恭：日本音響学会誌, 39 (1983) 380
- 8) C.N. Davies: *Aerosol Science*, p. 53, Academic Press, London and New York (1966)
- 9) 日本化学会編：化学便覧・基礎編II, p. 501, 丸善 (1973)
- 10) 中根信夫, 瀬谷浩一郎：電子通信学会技術研究報告, p. 13 (1983)
- 11) 中根信夫, 瀬谷浩一郎：日本音響学会講演論文集, p. 595 (1983)
- 12) 大塚哲郎, 瀬谷浩一郎：日本音響学会講演論文集, p. 675 (1984)
- 13) 中根信夫, 平田尚史, 瀬谷浩一郎：静電気学会誌, 9 (1985) 422