技術レポート

# コロナ放電を利用しない電気集塵装置

-静電植毛を施した電極板-

片谷 篤史\*.1, 細野 洋\*\*, 村田 光\*\*, 八幡 大志\*\*, 水野 彰\*\*\* (2015年2月21日受付: 2015年5月15日受理)

Electrostatic Precipitator without Using Corona Discharge – Pole-plates Coated with Electrostatic Flocking of Conductive Fiber – Atsushi KATATANI<sup>\*,1</sup>, Hiroshi HOSONO<sup>\*\*</sup>, Hikaru MURATA<sup>\*\*</sup>, Hiroshi YAHATA<sup>\*\*</sup> and Akira MIZUNO<sup>\*\*\*</sup>

 $({\it Received February 21, 2015}; {\it Accepted May 15, 2015})$ 

The authors have had an idea that the power consumption in electrostatic precipitators, ESPs, might be decreased drastically if particles are touching to a conductive electrode in electric field, and are charged by induction charging. One reason is the fact that, in a corona discharge, most of the energy of accelerated electrons near the discharge electrode is wasted by bombardment to neutral molecules without ionization. To verify this idea, the authors have carried out an experiment using two-stage-electrodes sets. The first set of electrodes is made of the flocking electrode covered with CF (Carbon Fiber). DC high voltage was applied to the electrodes set. The voltage value was adjusted to be below the corona starting voltage. The second set of electrodes made of flat plates works as a collector of charged particles. This is designated as "a two-stage ESP with induction charging". Varying the gas velocity inside the ESP, the collection efficiency of room-particles was measured. The result showed that the ESP was able to collect particles without corona discharge. This study implies the possibility of ESPs which can minimize the electrical power consumption.

# 1. はじめに

本研究の著者による先行研究として,参考文献1)に 示す「コロナ放電を利用しない電気集塵装置-電極板の 堆積状態」がある.この先行研究を行った理由は,著者 が次のように考えたからである.即ち,「電気集塵装置 (ESP)は従来から,コロナ放電を発生させ,この放電 空間を通過する粉塵を帯電させ,クーロン力で粉塵を捕 集するものであったが,コロナ放電を用いずに粉塵を帯 電させることができれば,ESPの消費電力を大幅に低減 できる可能性がある」という考えである.そして,参考

**キーワード**:静電気,電気集塵,静電植毛,再飛散 \*パナソニック環境エンジニアリング株式会社 (〒486-8524 愛知県春日井市鷹来町字上仲田 3905番3) Panasonic Environmental Systems & Engineering Co., Ltd 3905, Takaki-cho Kasugai-city, Aichi-pref., 486-8524, Japan

\*\* パナソニックエコシステムズ株式会社 (〒486-8522 愛知県春日井市鷹来町字下仲田 4017番) Panasonic Ecology Systems Co., Ltd 4017, Takaki-cho Kasugai-city, Aichi-pref., 486-8522, Japan

\*\*\* 国立大学法人 豊橋技術科学大学 (〒441-8580 愛知県豊橋市天伯町雲雀ヶ丘 1-1) Toyohashi University of Technology, 1-1, Hibarigaoka, Tenpaku-ku, Toyohashi-city, Aich-pref., 441-8580, Japan

<sup>1</sup> katatani.atsushi@jp.panasonic.com

文献1)の内容を要約すると、「平行平板に、コロナ放 電が発生しない程度の直流高電圧を印加し、ディーゼル 排ガスを通風させた後、極板に堆積した粉塵の痕跡を観 察した結果、極板端部の不平等電界部の近傍において、 いったん付着した粉塵が再飛散する時に、誘導帯電作用 により帯電し、電界中のクーロン力で粉塵が捕集される ことを確認した」というものである.

この先行研究を更に発展させるために、著者が注目に した研究は、参考文献 2) に示す「静電植毛電極を用い た電気集じん装置におけるサブミクロン粒子の捕集効 果」である.この研究では、コロナ放電式の帯電部と、 強電界の集塵部を用いている.そして、集塵部の極板に、 誘電体のナイロンパイルを静電植毛すると、植毛しない 場合より集塵率が高まることが示されている.その理由 として、パイル径が 20 µm と細く、植毛近傍で電界強度 が高まるのでグラディエント力が強くなり、集塵率が高 まると報告されている.

参考文献 1) および 2) を踏まえ, 著者が考えたことは, 「静電植毛により強いグラディエント力が得られるので あれば, コロナ放電による帯電プロセスが存在しなくて も, グラディエント力のみで粉塵を捕集できるのではな かろうか. そして, このようにして捕集された粉塵は再 飛散するであろうし, 再飛散する時, 誘導帯電により粉 塵は帯電するであろう.そうであるならば,静電植毛部分の後段に強電界を有する集塵部を配置することにより,再飛散時に誘導帯電した粉塵を,クーロン力で捕集できるのではなかろうか」というものである.

また、「参考文献2)では静電植毛する素材として誘 電体のナイロンパイルを用いていたが、むしろ導電性が ある素材の方が、粉塵が接触した際の電荷移動が容易に なるので、植毛用素材の細線として炭素繊維(CF; Carbon Fiber)を用いるのが良い」と考えるに至った。

この考えを、より具体的に述べると、前段に、CF が 静電植毛された平板電極を平行に配置し、この植毛極板 に、コロナ放電が発生しない程度の高電圧を印加し、強 電界部を形成する.これに室内大気を通過させれば、強 電界によるグラディエント力で粉塵を捕集できる可能性 がある.更に、粉塵がいったん極板上に捕集されたのち 再飛散するか、あるいは捕集されなくても極板に触れさ えすれば粉塵は誘導帯電により帯電される可能性があ る.このようにして得られた帯電粉塵を、平行平板で構 成される後段の集塵部で捕集できる可能性があり、これ がコロナ放電を利用しない ESP の基本原理である.

以上を図1にまとめる.図1(a)は、従来型の2段式 ESPである.前段部には、コロナ放電を発生させて粉塵 を帯電させる帯電部が設けられ、後段部には、強電界を 発生させてクーロン力で粉塵を捕集する集塵部が設けら れている.一方、図1(b)は、今回考案した新概念の2 段式 ESPである.前段の帯電部では、コロナ放電を発 生させることなく、静電植毛を施した電極板による強電 界で、粉塵を接触・付着・捕集させた後に、再飛散によ り粉塵を誘導帯電させる.後段の集塵部の機能は、従来 型と同様である.

今回の研究では,コロナ放電が無い状態で,帯電部の 植毛極板上に一時的に捕集された粉塵が再飛散すること



Fig.1 Conventional ESP and new ESP.

を念頭に置き,その再飛散した帯電粉塵を,集塵部で捕 集するという新概念の,低消費電力 ESP の実現可能性 を明らかにすることを目的とした.

#### 2. 実験装置および方法

#### 2.1 静電植毛された電極板の作製

帯電部に,静電植毛を施した電極板(以降,植毛極板) を使用するので,この製法について,図2を用いて説明 する.

図 2(a)は、植毛の基板となるステンレス板である、下 部両端部の穴は、この板を掴むのに用いられる。

図 2(b)は、銀ペーストとシリコン樹脂を主成分とす る導電性接着剤(ThreeBond 3303G)を、ステンレス板 に塗布した状態を示す.この接着剤は、180℃以上で硬 化する特性が有る.硬化後の体積抵抗率は、2.5×10<sup>6</sup>Ω・ cmである.尚、この接着剤は、片面のみに塗布した.

図2(c)は、静電植毛処理を行ったステンレス板であり、 この製法を説明する.静電植毛するための装置について は図示しないが、水平横置きの環状ダクトの形式である。 (市販品ではなく手作りの装置である、)この植毛装置は、 循環風を形成するためのファンを内蔵し、また、金属板 に高電圧を印加するための極板支持部と給電部を備え る. 導電性接着剤を塗布したステンレス板を, 植毛装置 内の支持部に配置するが、対向する接地板とのギャップ は 25 mm であり、印加電圧は dc -5 kV である. また、 植毛装置内の循環風の風速は、電極部で約2m/sである。 短く切断した CF を装置内に投入した後,植毛装置を稼 働させて循環風を形成し、電圧を印加する。約 120 s 間 の電圧印加で、投入した CF の一部が、誘電分極しなが ら接着剤に接触し、固定化されるものである. 使用した CFは、東レ製のトレカクロス CO6343(線径5から10 μm 程度) であり、この細線を約 6,000 本の束ごとに、 長さ約0.1から約3mmの範囲に入るように、裁縫用ハ サミを用い、せん断したものである.これを装置に投入 する CF パイルとした.

図2(d)は、植毛極板を横から眺めた様子である.植 毛された CF は、極板平面に対し垂直に立っておらず、 概ね45度以下の角度で「寝ている」ことが伺える.こ れは、印加電圧を-5 kV 程度迄しか上昇できなかったこ とに起因する.理由は、この数倍の高電圧を印加したか ったのだが、導電性繊維である CF パイルを用いて静電 植毛を行う場合、印加電圧を上昇し過ぎると、植毛装置 内に散乱した CF パイルを通じて漏れ電流が生じ、パイ ルから発火する.これを防ぐ為に、印加電圧を-5 kV 程 度に抑制せざるを得なかったのである.



Fig.2 Manufacture process of pole-plate with electrostatic-flocking.

### 2.2 帯電部における電極板の配置

帯電部内の植毛極板の配置形態兼電気回路を図3に示 す.

図2(c)に示す植毛極板の裏面には静電植毛が施され ておらず、片面のみの植毛である.図3に示すように、 この植毛極板12枚を、帯電部用ダクト内の風上側に、 10mm間隔で平行に配置した.図の最上部の極板1枚に ついては図2(a)の状態であり、植毛は無用である.同様に、帯電部の風下側にも、風上側と同数の極板を同一 ギャップで配置したが、植毛された面は、風上側の植毛 面とは逆にしてある.逆にした理由は、通風の流入側か ら見て、植毛面が空間的により多く分布していたほうが、 粉塵が植毛と接触する確率が増加すると考えたからであ る.無植毛の極板を、図中の最下部に配置した.

図3における同一の列上の風上側と風下側の極板は, 40 mmの間隔をあけてあるが,電気的には,接続されて おり同電位である.一列ごとに,接地ラインと電源(負 電圧)ラインが交互に現れるように電気回路を構成した. (負電圧値については,次項で決定する.)

### 2.3 帯電部の印加電圧の決定

実験目的から,今回の植毛極板を用いた帯電部では, コロナ放電を発生させない.しかし,出来るだけ強い電 界を形成したい.そこで,図3に示す帯電部のV-I特性 を見た上で,印加電圧(負)を決定することとした.

図4の実線部に帯電部のV-I特性を示す.また,参考 までに,帯電部の極板に一切,植毛極板を用いず,ステ



図3 帯電部における静電植毛極板の配置

Fig.3 Layout of electrode-plates with electrostatic flocking in the charger.



図 4 帯電部の V-I 特性 Fig.4 V-I characteristic of the charger.

ンレス表面地肌の極板のみを,図3と同じように配置した場合のV-I特性を,図4中に破線で示す.

植毛しない場合の特性(破線)は,-10.5 kV を超える 電圧付近から,急峻に電流値が増加しており,これは極 板端部の強電界部分からのコロナ放電によるものであ る.この場合のスパーク電圧は,約-12 kV であった.

一方、植毛極板の特性(実線)は、前記よりも遥かに 低い-2.5 kV付近から、急峻に電流値が増加しており、 植毛の有無で、特性に大きな違いがあることが分かった. この場合のスパーク電圧は、約-10 kV であった.

また,植毛極板がコロナ放電することにも触れる.図5に,帯電部用アクリルダクト内に収納・配置された植 毛極板の様子として,無電圧の状態(a)と,-7kVで コロナ放電している状態(b)を示す.(デジタルカメ ラDMC-FX01 Lumix (Panasonic)を使用,星空モード, 露出 60 s で撮影)(b)では極板の端部以外からもコロ ナ放電が発生している様子が伺える.しかし,今回の研 究では,このように CF からコロナ放電する条件で,集



(b) Corona discharge with -7 kV applied.

図5 植毛極板からのコロナ放電の様子

Fig.5 The aspect of corona discharge from electrode-plates with electrostatic flocking.

## 塵率測定の実験は行わない.

以上から,植毛極板を用いた帯電部の印加電圧を,「コ ロナ放電が殆ど発生せず,しかも最大の電界強度が得ら れる電圧,即ち-2.4 kV」とすることに決定した.

これで,帯電部の印加電圧を -2.4 kV とすることで, 放電電流を殆ど流さなくて済み,消費電力が殆ど発生し ない電気集塵装置を目指すことが可能となった.

#### 2.4 集塵部の構成

実験に用いる集塵部の電極板の配置形態兼電気回路を 図6に示す.集塵部に用いる極板は,総数13枚であり, 寸法は全て94×280mm(板厚0.4t)である.コロナ放 電用の突起も植毛も一切存在しない,ステンレス材 SUS304の長方形の板である.

接地極板7枚と荷電極板6枚を交互に平行に配置して おり,ギャップは10mmである.接地極板は荷電極板 に対して,13mm風上側にずらした配置としたが,この 理由は,ずらさなければ,隣接する極板の端部同志の距 離が最短になり,スパークが発生し易くなるからである. 荷電極板への印加電圧は-9kVとした.この電圧ではコ ロナ放電は発生しない.

#### 2.5 実験装置の構成と実験方法

図7は実験装置の系統を,表1は実験装置の仕様を示 す.

室内大気塵を除去対象の粒子とした.①②は入口ダクト及び接続ダクト、③は帯電部収納ダクト、④は接続ダクト、⑤①は接続ダクト、⑥⑦は接続ダクト及び出



図6 集塵部の極板配置 Fig.6 Layout of electrode-plates in the collector.

ロダクト, ⑧は可変速ファンである. ダクトは全てアク リル製である.

①から⑧を直列に接続し、これに室内大気塵を含む空 気を通風できるものを本実験の ESP とした。⑨⑩は直 流高圧電源で、帯電部収納ダクトと、集塵部収納ダクト に接続される。両高電圧回路の電圧と電流を、⑬電圧計 と⑭電流計で確認した.⑫風速計で、入口ダクトの吸い 込み位置の風速を計り、帯電部収納ダクトの内部風速が 2,5,8 および 11 m/s になるように、可変速ファンで4段 階の風速調節を行った。

①パーティクルカウンターで空気中の粉塵の個数濃度 を計測した.帯電部の入口と集塵部の出口で切り替えて 計測することにより、(1)式で表わされる集塵率を求めた.

```
集塵率 = [1-(出口個数/入口個数)] × 100%……(1)
```

尚, このパーティクルカウンターは, 粒径別に個数濃 度を計測できるもので, 粒径 0.3 μm 以上の全個数, 0.3 から 0.5 μm の 個 数, 0.5 から 1.0 μm の 個 数, 1.0 から 2.0 μm の 個 数, 2.0 から 5.0 μm の 個 数, そして 5.0 μm 以上の 個数を, 同時に計測することができる.

次の4ケースで集塵率の測定を行った.各ケースとも, 前述した4段階の風速で集塵率を計測した.

・ケース1:帯電部の電圧0kV,集塵部の電圧0kV

・ケース2:帯電部の電圧 -2.4 kV,集塵部の電圧 0 kV

・ケース3:帯電部の電圧0kV,集塵部の電圧-9kV

・ケース4:帯電部の電圧 -2.4 kV,集塵部の電圧 -9 kV

入口と出口の濃度計測を,各ケースの風速ごとに5回 行い,これを3回繰り返し,集塵率を確認するものとし た.また,各実験ケースにおける1回分の測定(3回測 定のうちの1回分)に先立ち,実験装置を各ケースの電 圧条件で最低60分間稼働させ,集塵率が安定したこと を確認した上で,本測定を開始するものとした.



図7 実験装置の系統図

Fig.7 Schematic diagram of test equipment.

### 表1 実験装置の仕様

Table 1 Specification of test equipment.

Items	Details			
Duct (#1,2,4,6,7)	W 121, H 140, L 200 mm (Inside)			
Charger duct (#3)	Duct ; W 121, H 32, L 180 mm (Inside) with slots for fixing electrode-plates			
Collector duct (#5)	Duct ; W 121, H 90, L 300 mm (Inside) with slots for fixing electrode-plates			
Fan (#8)	MU1238A-11B (Oriental Motor Co., Ltd.) Quantity ; 2 (tandem coupled) With a variable frequency controller			
High voltage power supply (#9)	MODEL-600F (Pulse Electric Engineering) Max. output; DC -15 kV, 30 mA Stability 0.005%			
High voltage power supply (#10)	APH-10K5N (Maxelec Co.,Ltd.) Max output voltage ; DC-10 kV Max current ; 30mA Ripple ; 0.02%			
Particle counter (#11)	KC-01E (RION), Light scattering method Range ; 0.3, 0.5, 1, 2, 5 over μm Sampling volume for individual measurement ; sample-mode of 283 mL (per 34 s)			
Wind velocity Meter (#12)	Climomaster MODEL6531 (Kanomax) Mode;1 s measuring & 10 times ave.			
Voltage meter & Probe (#13)	Digital multi meter type73303 (Yokogawa) Ratio;1/1000 (FLUKE), For high voltage			
Current meter (#14)	Type 201133 (Yokogawa) Range; 0.1, 0.3, 1, 3 mA			

### 3. 結果および考察

集塵率の測定を, 冬季 2 週間の期間内に行った. その 期間内の測定環境における温度は, 11 から 15℃の範囲 内にあり, 湿度は, 35 から 47% Rh の範囲内にあった.

本研究における濃度は、全て気体1L中の粒子個数を 指す個数濃度で示される.期間中の室内大気塵の濃度に ついて、0.3 µm 以上の全個数濃度が最小の時と最大の時

表 2 計測時の室内大気塵の最大および最小個数濃度 Table 2 The measured maximum and minimum concentration. (By counted narticle number in room atmosphere.)

( Dy	counted	particle	number	ш	100111	aunos	JIICI

Size of particle [ µm ]	Counted number per 1 L (1 x10 <sup>-3</sup> m <sup>3</sup> )			
	Max. concentration (ratio to all [%])	Min. concentration (ratio to all [%])		
5.0 over	0 ( 0%)	0 ( 0%)		
2.0 to 5.0	21 ( 0.1%)	2 ( 0.1%)		
1.0 to 2.0	123 ( 0.5%)	39 ( 1.1%)		
0.5 to 1.0	1,350 ( 5.6%)	382 (10.8%)		
0.3 to 0.5	22,518 (93.8%)	3,121 ( 88.1%)		
All over 0.3	24,012 (100.0%)	3,544 (100.0%)		

の各粒径毎の濃度値を表2に示す.最大時と最小時で, 全個数濃度には数倍の開きがあった.しかし,各計測日 の各回の計測中の全個数濃度は,概ね安定していた.

また,最大・最小いずれの場合でも,粒径0.3から 0.5 µmの粒子が,計測された粒子全体個数の約9割を占 めた.また,粒径が大きくなるにつれて,計測される粒 子個数は減る傾向にあった.特に粒径5.0 µmを超える 粒子は,計測されなかったので,集塵率の評価は,5.0 µm 以下の粒子で行った.

ー方で,全個数濃度が安定していても,粒径 1.0 から 2.0 μm と, 2.0 から 5.0 μm の個数濃度は変動した.従っ て,各ケースで計測した集塵率を論じる際には,各粒径 毎の個数濃度の変動幅を明記するものとした.

# 5.1 ケース1:帯電部の電圧0 kV,集塵部の電圧0 kV の場合の集塵率

ケース1は、帯電部の印加電圧を0kVに、集塵部の 印加電圧を0kVにした場合、即ち、帯電部にも集塵部 にも電界が存在しない場合の集塵率測定である.電界が 存在しない場合の、潜在的な集塵率を把握することを目 的とした.集塵率の測定結果を図8に、測定時の流入側 の個数濃度を表3に示す.

図 8(a)は、粒径 0.3 µm 以上の全粒子についての集塵 率である.(b)は粒径 0.3 から 0.5 µm の粒子の集塵率 であり、既述の通り、この粒径範囲の粒子数は、全粒径 の粒子数の約 9 割を占めるので、(a)と(b)は、ほぼ 同じ特性を示す.

また、この両者については、3回の測定結果のバラツ キが、実線に示す平均値に対し±1%程度であり、概ね 再現性があるといえる.風速が8m/sを超えるところで 集塵率が上昇しており、風速8m/sで極小値となってい る.この原因として、より小さい粒径範囲における粒子 の凝集、粒子の再飛散、また本実験装置に固有の特性等 が可能性として考えられるが、現状詳細は不明である.



表 3 流入側の個数濃度の範囲(帯電部 0 kV, 集塵部 0 kV) Table 3 The range of counted particle number. (Charger 0 kV, Collector 0 kV)

Size of particle [ µm ]	Range of counted particle-number per 1 L (Range-ratio [%] to the center value of range)			
	1 <sup>st</sup> measurement	2 <sup>nd</sup> measurement	3 <sup>rd</sup> measurement	
2.0 to 5.0	4-22 (± 69.2)	$3-11 (\pm 57.1)$	$1-7 (\pm 75.0)$	
1.0 to 2.0	86 - 130 (± 20.4)	$52 - 92 \ (\pm \ 27.8)$	39-68 (± 27.1)	
0.5 to 1.0	829-1,026 (± 10.6)	454 – 582 (± 12.4)	371 – 428 (± 7.1)	
0.3 to 0.5	14,846 – 17,156 (± 7.2)	3,987 - 4,155 (± 2.1)	3,121 - 3,654 (± 7.9)	
All sizes over 0.3	15,846 – 18,216 (± 7.0)	4,548 - 4,750 (± 2.2)	3,544 - 4,139 (± 7.7)	

どの風速でも集塵率は数%以下であり高くない.

(c)は粒径 0.5 から 1.0 µm の粒子の集塵率であり, (a),(b)と似たような傾向である.

一方,(d)は粒径 1.0 から 2.0 μm の粒子の集塵率で あり,3回の測定のバラツキが顕著である.粒子が大き いと,再飛散の影響が出るはずなので,負の集塵率が現 れる場合もあり,集塵率としては不安定になると思われ る.(e)の粒径 2.0 から 5.0 μm の粒子の集塵率につい ても同様のことが言える.

# 3.2 ケース2:帯電部の電圧-2.4 kV,集塵部の電圧0 kVの場合の集塵率

ケース2は、帯電部の印加電圧を-2.4 kV に、集塵部 の印加電圧を0 kV にした場合、即ち、帯電部のみに電 界が存在する場合の集塵率測定である。帯電部単体の集 塵率を把握することを目的とした。集塵率の測定結果を 図9に、測定時の流入側の個数濃度を表4に示す。

図 9(a)は、粒径 0.3 µm 以上の全粒子についての集塵

率である.(b) は粒径 0.3 から 0.5 µm の粒子の集塵率 であり、ケース1の場合と同様に、(a) と(b)の特性 は、ほぼ同じである.また、この両者について、3 回の 測定結果のバラツキが、実線に示す平均値に対し±1% 程度であり、再現性は保たれている.

また,ケース1ほど顕著ではないが,ケース2の場合 もで,風速が8m/sを超えたところで,集塵率が若干上 昇している.11m/s程度まで風速が速まると,植毛され たCFと気流の接触帯電・摩擦帯電の効果が増す可能性 があるのかも知れない.どの風速でも集塵率は数%以下 であった.-2.4kVの電圧を印加した場合(本ケース2) において,印加しなかったケース1の場合と大差はなか った.

(c)は粒径 0.5 から 1.0 μm の粒子の集塵率であり, (a),
(b) と似たような傾向ではあるが, 11 m/s の風速で集
塵率が高まる傾向は見られなかった.また,風速 5 m/s
では,3回の測定結果のバラツキが,実線に示す平均値



表4 流入側の個数濃度の範囲(帯電部 -2.4 kV, 集塵部 0 kV) Table 4 The range of counted particle number. (Charger -2.4 kV, Collector 0 kV)

Size of particle [µm]	Range of counted particle-number per 1 L (Range-ratio [%] to the center value of range)			
	1 <sup>st</sup> measurement	2 <sup>nd</sup> measurement	3 <sup>rd</sup> measurement	
2.0 to 5.0	8 – 28 (± 55.6)	$5-22 \ (\pm \ 63.0)$	$5-20 \ (\pm \ 60.0)$	
1.0 to 2.0	$107 - 173 (\pm 23.6)$	47 – 77 (± 24.2)	$62-97 (\pm 22.0)$	
0.5 to 1.0	$1,174 - 1,350 \ (\pm \ 7.0)$	597 – 753 (± 11.6)	448-527 (± 8.1)	
0.3 to 0.5	21,559 - 22,518 (± 2.2)	$12,245 - 13,243 \ (\pm \ 3.9)$	3,830 - 4,056 (± 2.9)	
All sizes over 0.3	22,904 - 24,012 (± 2.4)	12,986 - 13,969 (± 3.6)	4,408 - 4,647 (± 2.6)	

に対し±3%程度であり、より高風速の8,11 m/sと比べて大きかった. この理由は不明である.

一方、(d) は粒径 1.0 から 2.0 µm の粒子の集塵率で あり、3 回の測定について、多少のバラツキがあるもの の、概ね再現性がある、集塵率の平均値は、0 ± 5%程 度と、正負に跨っている、このクラスの比較的大きな粒 径になると、再飛散が活発になるはずであり、集塵率と しては不安定になることが考えられる、つまり、集塵率 は、-5%の時もあれば、+5%の時もあると理解すること もできるのではなかろうか、

(e)の粒径 2.0 から 5.0 µm の粒子の集塵率については, 実線で示す平均値で見ると,風速が上昇するにつれて, 集塵率が低下する特性を示した.しかし,3回の各測定 値は,特に風速 5 m/s 以上の領域で,最大で±20%程度 と大きくバラついている.よって,大粒径の場合におい ては,平均値で見るのではなく,集塵率がどの程度の範 囲でバラついているのかを見るほうが良いと考える.

ここで, 文献 3) には, コロナ放電の 2 段式 ESP にお ける帯電部単体の粒径別集塵率が示されていることに注 目する. その内容は, 風速 9 m/s の条件で, 粒径 0.3 か ら 0.5 µm の集塵率は約 20%であるが, 粒径が増すごと に集塵率が高まり, 粒径 2.0 から 5.0 µm の集塵率は 86 %となっている. 粒径が増す程, 集塵率が高まり安定し ていることが伺える. 今回のコロナ放電しない帯電部の 傾向は, これとは違っていることが判明した.

# 3.3 ケース3:帯電部の電圧0kV,集塵部の電圧-9 kVの場合の集塵率

ケース3は、帯電部の印加電圧を0kVに、集塵部の 印加電圧を-9kVにした場合、即ち、集塵部のみに電界 が存在する場合の集塵率測定である。集塵部単体の集塵 率を把握することを目的とした。集塵率の測定結果を図 10に、測定時の流入側の個数濃度を表5に示す。 図 10(a)は、粒径 0.3 µm 以上の全粒子についての集塵 率である.(b) は粒径 0.3 から 0.5 µm の粒子の集塵率 であり、前のケースと同様に、(a) と(b) の特性は、 ほぼ同じである.

また、この両者について、3回の測定結果のバラツキが、 実線に示す平均値に対し±1%程度であり、再現性は保 たれている.風速2m/sでは、集塵率が25%程度あり、 他の風速と比べ極めて高い値となっている.その理由の ひとつとして、集塵部の各極板の端部付近で不平等電界 が形成され、強電界部分が存在する<sup>1)</sup>ことが挙げられる. 風速が5m/sに達すると、集塵率は、7%程度まで一気 に低下し、それ以上の風速でも、同程度の集塵率となっ ている.一気に低下する理由のひとつとして、風速が速 くなったことによる再飛散の増大が考えられる.一方、 5m/s以上では、集塵率がほぼ一定になった.その理由 は不明である.

(c)は粒径0.5から1.0 µmの粒子の集塵率であり,(a),

(b)と似たような傾向ではあるが、3回の測定結果のバラツキが、実線に示す平均値に対し±3%程度となって、
(b)の場合より増えている.粒径が大きくなると、その時その時の再飛散の度合いに影響され、集塵率の不安定性が増すものと考えられる.

ー方, (d) は粒径 1.0 から 2.0 μm の粒子の集塵率で あり, 集塵率のバラツキが±5%程度となって, さらに 不安定さが増している. このバラツキが増す傾向は,(e) の粒径 2.0 から 5.0 μm の粒子の集塵率の場合に一層顕著 になっている. (d) も (e) も平均値は概ねフラットな 特性であり, 負の値にはなっていないので, 集塵率に不 安定さがあるものの「粉塵粒子を捕集できている」と見 ることもできる.

ここで,風速 5 m/s 以上の領域について,粒径 0.3 から 0.5 μm の粒子の集塵率(b)と,粒径 1.0 から 2.0 μm の粒子の集塵率(d)を比べると,(b)の集塵率が 7% 前後であるのに対し,粒径がより大きい(d)の集塵率



表 5 流入側の個数濃度の範囲(帯電部 0 kV, 集塵部 -9 kV) Table 5 The range of counted particle number.(Charger 0 kV, Collector -9 kV)

Size of particle [ µm ]	Range of counted particle-number per 1 L (Range-ratio [%] to the center value of range)			
	1 <sup>st</sup> measurement	2 <sup>nd</sup> measurement	3 <sup>rd</sup> measurement	
2.0 to 5.0	5 – 16 (± 52.4)	$7-23 (\pm 53.3)$	6-17 (± 47.8)	
1.0 to 2.0	53 – 78 (± 19.1)	48 – 77 (± 23.2)	48-77 (± 23.2)	
0.5 to 1.0	437 – 514 (± 8.1)	423 – 502 (± 8.5)	370-486 (± 13.6)	
0.3 to 0.5	5,383 - 5,977 (± 5.2)	5,053 - 5,457 (± 3.8)	4,754 – 5,176 (± 4.2)	
All sizes over 0.3	$5,897 - 6,560 (\pm 5.3)$	5,544 - 6,019 (± 4.1)	5,193 – 5,699 (± 4.6)	

が15%前後と高くなっていることに注目できる.この 理由として,粒径0.3から0.5µmの粒子が捕集された後 に肥大化して再飛散し,このとき誘導帯電で得た電荷が 作用し,再捕集された可能性も考えられる.

# 3.4 ケース4:帯電部の電圧 -2.4 kV,集塵部の電圧-9 kVの場合の集塵率

ケース4は、帯電部の印加電圧を-2.4 kVに、集塵部 の印加電圧を-9 kVにした場合、即ち、帯電部と集塵部 の両者に電界が存在する場合の集塵率測定である。2 段 式 ESP としての集塵率を把握することを目的とした. 集塵率の測定結果を図11に、測定時の流入側の個数濃 度を表6に示す.

図 11(a)は、粒径 0.3 µm 以上の全粒子についての集塵 率である.(b)は粒径 0.3 から 0.5 µm の粒子の集塵率 であり、以前の各ケースと同様に、(a)と(b)の特性 は、ほぼ同じである.

また、この両者について、3回の測定結果のバラツキが、 実線に示す平均値に対し±1%程度であり、再現性は保 たれている.風速2m/sでは、集塵率が40%程度あり、 他の風速と比べ極めて高い値となっているが、この傾向 は、ケース3の集塵部単体の特性と似ているので、集塵 部の影響を強く受けた特性といえる.但し、ケース3に おいて、風速2m/sでは25%程度の集塵率が、本ケース では40%程度に向上し、ケース3の風速5m/s以上の領 域で7%前後であった集塵率が、11%程度の集塵率にま で向上している.この理由として,ケース2で示したように,帯電部単体でも数%程度の集塵率があるので,集 塵部と帯電部の両者を稼働すれば,集塵部単体を稼働す るよりも集塵率が高まることが挙げられる.

(c)は粒径 0.5 から 1.0 μm の粒子の集塵率であり, (a),
(b) と似たような傾向ではあるが、風速 8 m/s のポイントだけ、集塵率のバラツキが大きくなっている.

一方,(d)は粒径 1.0 から 2.0 µm の粒子の集塵率で あり,集塵率のバラツキが±3%以上となり不安定さが 現れてきており,また大きく増減する特性となっている. この原因は,再飛散および流入側濃度の変動によるもの と考えられる.

また,(e)の粒径 2.0 から 5.0 µm の粒子の集塵率の 場合,バラツキは更に大きくなり,±3%以上となって いる.しかし,平均値は概ねフラットな特性であり,粉 塵粒子を捕集できている.

ここで,ケース2「帯電部のみ電圧印加した場合」お よびケース3「集塵部のみ電圧印加した場合」と,今回 のケース4「帯電部および集塵部に電圧印加した場合」 を以下に総合的に検討する.

今,集塵率 a%の集塵装置 A と,集塵率 b%の集塵装 置 B を直列に配置した場合の,合成した集塵率 c%は,(2) 式で計算できる.ただし,集塵装置 A と B は互いに影 響し合わない(干渉しない)ことが条件である.



Size of particle [µm]	Range of counted particle-number per 1 L (Range-ratio [%] to the center value of range)			
	1 <sup>st</sup> measurement	2 <sup>nd</sup> measurement	3 <sup>rd</sup> measurement	
2.0 to 5.0	3 – 18 (± 71.4)	$2-18 (\pm 80.0)$	5 – 19 (± 58.3)	
1.0 to 2.0	90-138 (± 21.1)	56-91 (± 23.8)	57-95 (± 25.0)	
0.5 to 1.0	988 - 1,158 (± 7.9)	627 – 694 (± 5.1)	473 – 544 (± 7.0)	
0.3 to 0.5	19,745 - 20,754 (± 2.5)	12,857 – 13,318 (± 1.8)	$3,976 - 4,208 \ (\pm \ 2.8)$	
All sizes over 0.3	20,917 - 21,985 (± 2.5)	13,613 – 14,070 (± 1.7)	4,591 - 4,788 (± 2.1)	

表6 流入側の個数濃度の範囲(帯電部 -2.4 kV, 集塵部 -9 kV) Table 6 The range of counted particle number.(Charger -2.4 kV, Collector -9 kV)

 $c = [1 - (1 - a/100) \times (1 - b/100)] \times 100\% \qquad \dots \qquad (2)$ 

今,或る風速時の或る粒径における帯電部単体の集塵 率と,同一風速かつ同一粒径における集塵部単体の集塵 率を,(2)式に代入することで,両者合成の集塵率を計 算することができる.

図12には、上記の考え方で、各粒径ごとに、帯電部 単体の集塵率と集塵部単体の集塵率から計算して得られ た合成集塵率を、破線の特性で示す.(帯電部、集塵部 の単体の集塵率としては、いずれも3回計測の平均値を 採用した.)図中の実線は、実測値の特性(既出)であり、 比較のために並べた.

図 12(a)は、粒径 0.3 µm 以上の全粒子についての集塵 率、また、(b) は粒径 0.3 から 0.5 µm の粒子の集塵率 であり、(a) と(b) の特性は計算値(破線部)におい てもほぼ同じである.

ここで,計算値(破線部)と実測値(実線部)の集塵 率の風速特性は似ているが,計算値よりも実測値の方が, 集塵率が高くなっていることに注目できる.その理由は, 帯電部と集塵部両者に電圧を印加すると,この両者は独 立しておらず干渉することを意味する.即ち,帯電部で いったん接触もしくは捕集され再飛散した粉塵粒子が, 誘導帯電により帯電され,後段の集塵部の強電界によっ て,静電気的に捕集される効果が加わったものと考えら れる.

文献 1) では、コロナ放電部が存在しない1段式 ESP を用いた粉塵の堆積・捕集状況が報告されている.ここ では、コロナ放電が存在しなくても、再飛散した粉塵粒 子が誘導帯電した後、強電界で再捕集されていることが 報告されており、今回の実験結果と相通じる.

(c) は粒径 0.5 から 1.0 µm の粒子の集塵率であり, 風速 5 m/s のポイントを除くと, (a), (b) と似たよう な傾向と言える.

(d) は粒径 1.0 から 2.0 μm の粒子の集塵率である. 実測値の集塵率と計算値の集塵率は交叉し, 関連性を読 み解くのは困難である. また, (e) の粒径 2.0 から 5.0 μm の粒子の集塵率の場合, 計算値と実測値の乖離が大 きく, これも両者の関連性の把握は困難である. 粒径が 大きい場合, 再飛散が影響し, 計算値と実測値の関連性 が, 見出しにくくなるものと思われる. また, 大きい粒 径の場合, 流入側濃度が安定しないことも原因となって いる可能性が考えられる.

#### 3.5 静電植毛の顕微鏡観察

ESP に植毛極板を使用した際,植毛極板上の CF 表面 に粉塵付着等の変化があるかを見るため,走査電子顕微 鏡による観察を行った.(日立 S-3600N,金蒸着,加速 電圧 10 kV, 3000 倍)

観察結果を図 13 に示す.図 13(a)は未使用の植毛極 板上の CF 表面である.図 13(b)は、本 ESP の帯電部に -2.4 kV を印加し、室内環境で、約 10 h 通風した後の CF 表面の画像である.

(a) (b) を比較すると、(a) には室内大気塵の付着
 は見られない.一方(b) では、CFの表面に1 µm より
 小さな大気塵が付着していることが分かる.

 (a) と(b) ではCFの太さが異なるが、両者とも、 CFの製品仕様に記載されている「線径5から10µm程度」
 の範囲内である。

この二つの画像から、その他の差異は見あたらなかった.

#### 4. 結論

炭素繊維を用いて静電植毛した金属極板を複数枚用 い,平行(ギャップ10 mm)に配置して,帯電部を構 成した.これにコロナ放電が発生しない程度の直流電圧 (dc-2.4 kV)を印加することとした.また,帯電部の後 段に,金属の平行平板(ギャップ10 mm)で構成され る集塵部(印加電圧 dc-9 kV)を設けた.この帯電部と 集塵部から構成される2段式 ESP に,室内大気塵を通 過させ,パーティクルカウンターで集塵率を測定した結 果,以下が判明した.

(1) 電圧印加の状態で実測された, 粒径 0.3 µm 以上





(a) 使用前の CF 表面

(a) The surface before using CF.



- (b) 使用後の CF 表面
- (b) The surface after using CF.
- 図13 CFの使用前後における観察
- Fig.13 The observation before/after using CF.

の全粉塵粒子に関する集塵率は、風速2m/sでは約40%であり、風速5m/sから11m/sでは約10%であった。

- (2)上記集塵率は、帯電部単体の実測集塵率と、集塵 部単体の実測集塵率から計算で求めた(帯電部と 集塵部の)合成集塵率よりも高い値であった。
- (3) その理由として、コロナ放電しない帯電部であっても、帯電部の植毛極板から再飛散した粉塵粒子が、誘導帯電により帯電しており、この誘導帯電により電荷を得た粒子が、後段の集塵部の電界の作用で捕集されることにより、実測値が計算値を上回った可能性が挙げられる。
- (4) 植毛極板上の炭素繊維には、1 μm より小さな室 内大気塵が付着していることが確認された.

## 参考文献

- 片谷篤史,細野洋,村田光,八幡大志,水野彰:コロナ 放電を利用しない電気集塵装置-電極板の堆積状態-. 静電気学会誌,39[1](2015)27
- 2) 成奉祚, Ahmed Aly, 李成華, 高島和則, 桂進司, 水野彰: 静電植毛電極を用いた電気集じん装置におけるサブミク ロン粒子の捕集効果, 静電気学会誌, 30 [2] (2006) 89
- 3) 片谷篤史,水野彰:電気集塵装置の低電力化に対する帯 電部の電極構造の効果.静電気学会誌,36[1](2012)
   50