

論 文

二段式電気集塵装置の基礎特性

—I. 小型モデルによる実験的検討—

林 憲 燦*, **, 八 塚 京 子*, 浅 野 和 俊*,¹

(1997年12月13日受理)

Fundamental Characteristics of a Two-Stage Electrostatic Precipitator

—I. Experimental Study—

Hun-chan LIM, *, ** Kyoko YATSUZUKA * and Kazutoshi ASANO*,¹

(Received December 13, 1997)

Recent concerns of environment preservation accelerates to use a compact electrostatic precipitator (ESP) in hospitals, offices and also small machine shops. In such a compact ESP, two-stage types are widely used with positive corona discharge. A two-stage ESP for machine shops requires compactness, handling of dense contaminated air, and also high precipitation efficiency. Since there are few scientific reports on a compact ESP, we have investigated the fundamental characteristics of a two-stage ESP. In order to simplify theoretical analysis, a model two-stage ESP is made with simple form. The ionizer section can be shifted against the collector electrode section. The experimental results revealed many interesting facts: The electric field in the collector electrodes affects the corona discharge of the ionizer. The concentration of particles after collector remarkably varied in the region between the high voltage and grounded electrodes. The precipitation efficiency right behind the high voltage electrode is much greater than that behind the grounded one. It is suggested that the total precipitation efficiency, calculated by integrating the particle concentration in whole measuring region, is greater when the high voltage electrode of the collector is located behind the discharge electrode. Those experimental results confirmed that the mutual position of the ionizer and collector electrodes affects the precipitation characteristics.

1. まえがき

電気集塵装置の実用化は1906年のCottrellから始まるとされている。そのため、今でも電気集塵装置のことをコットレルと呼ぶ人もいるくらいである。それ以来多くの研究者がこの分野に携わってきており、多くの研究成果、特許が出され、成書もたくさん出版されている¹⁻⁶⁾。

電気集塵装置は、フィルタ式に比べて圧力損失が少なく、ほとんどあらゆる種類の固体、液体の微粒子（ダスト、ミスト、ヒューム等）を、微細なものまで高効率で捕集でき、さらに、保守が容易などの特徴があるため広い産業分野で用いられている⁷⁻⁹⁾。さらに汚染源の種類や規模によってい

キーワード：集塵、二段式、小型集塵装置、正コロナ、電極配置

* 山形大学 (992-8510 山形県米沢市城南4丁目3-16)
Yamagata University, 4-3-16 Jonan, Yonezawa, Yamagata
992-8510, Japan

** 現勤務先：大邱工業専門大学（韓国大邱廣域市達西区本洞831）
Taegu Technical Junior College, 831 Bon-Dong, Dalsu-ku,
Taegu, Korea

¹ asano@eie.yz.yamagata-u.ac.jp

いろいろな形式のものが開発され、発電所や製鉄所など大工場で用いられる工業用の大型のものは、技術的にも完成度が高い。

しかし、近年、人々の環境への問題認識が高まってきて、室内での汚染防止に大きな関心が寄せられ、住宅、事務室、病院および作業場などの室内では小型のものが使われるようになってきた。とくに中小企業の機械工場のような小さな空間では機械装置が作業空間に開放された形態が多く、汚染粒子の室内への飛散が起こりやすい。飛散した汚染物質は空間へ拡散して室内を汚し、作業員の健康を害するばかりでなく、工作機械自体の寿命を縮める結果にもなる。

電気集塵装置の発展の過程を見ると、大きな処理能力に対処するためには負極性コロナが有利なことが確かめられている。とくに高温での負コロナが安定しているので、現在は大型集塵装置ではもっぱら負コロナが用いられている。ところがPenneyらは、電極が清浄なときは正の火花電圧の方が低いが、汚れているときは必ずしも正の方が低いとは言えず、また、二段式集塵装置では数kVから数十kVで十分なコロナ電流を得るために、直径の細い放電極

を用いるので、火花電圧が高い正コロナの方が負コロナより有利であるとしている^{1,3)}。さらに正コロナ放電では、人体に有害なオゾンの発生割合が負コロナに比べて著しく低い。これらの理由により、空気清浄用の電気集塵装置には正コロナ放電が広く用いられている²⁾。

一般家庭用のエアコンにも電気集塵装置が取り付けられたものが増加しており、単体の空気清浄用集塵装置や、前述の機械工場用の集塵装置も多数市場に出ている。これらに共通している点はいずれも二段式で、コロナ放電は正コロナを用いている点である。二段式にすると装置が複雑になるものの、最適条件を選ぶ自由度は高くなるので、ダストの種類や大きさに応じた柔軟な設計が可能となる。

このように正コロナを用いた二段式電気集塵装置が広く普及しているにも関わらず、これらについての研究報告は少ない¹⁰⁻¹²⁾。とくに、コロナを発生させるアイオナイザ部とコレクタ部との相互関係が集塵効率に及ぼす影響についての報告は全く見あたらない。本研究は、このような二段式小型電気集塵装置の基礎特性を解析容易な装置を用いて解明しようとするものである。

2. 実験装置および方法

二段式集塵装置の基本的考え方を Schmidt の特許をもとに Penney が発表したものが最初のものであろうとされている^{3,10,11)}。多くの文献で Penney の集塵装置は正コロナを用いているとしているが、Penney の論文¹⁰⁾では、負コロナを用いたものが記されている。正コロナを二段式に用いるようになったのは後のことであろうと思われる。

1 章で述べた二段式の利点に加え、もう一つの大きな利点はコロナ発生部とコレクタ部が独自に設計できる点である。これにより設計の自由度は高くなるが、逆にファクターが多くなり最適化が難しくなる。本研究の実験装置は、

理論的解明をしやすくするために、放電極 1 本のアイオナイザ部とコレクタ部で構成されている。とくにそれらの相対位置の影響が調べられるように、図 1 に示すようなアイオナイザ部を左右に動かせる構造とした。アイオナイザ部は、高さ 100 mm、幅 20 mm、厚さ 1 mm の接地平板電極（真鍮）を 40 mm の間隔で配し、その中に放電極として直径 100 μm のタンゲステン線を配置した。アイオナイザ部は、左右へ各 20 mm の範囲で移動できる。コレクタ部は、5 枚の平行平板電極を間隔 20 mm で配置し、高圧と接地電極が交互になるように接続している。材質はアイオナイザ部の平板電極と同じ真鍮で、高さ 100 mm、厚さが 1 mm である。電極としては、電極長が 100, 80, 60 mm の 3 種類のものを用いた。コレクタ電極はアクリル板に幅 1 mm の溝を切ってはめ込み、また、火花放電を防ぐため、エッジはやすりで滑らかに加工してある。本装置ではアイオナイザ部とコレクタ部の間隔は 10 mm である。

放電極には直流電源装置（Nichicon Capacitor Ltd., 出力 0~30 kV）から正の高電圧を印加した。その電圧は分圧比 1,000:1 の分圧器につないで測定した。放電極両側の二つの平板電極は連結して接地した。しかし、コロナ放電特性の電流測定時には、平板電極とアースとの間に電流計を直列に接続して測定した。コレクタ部にも正の直流高電圧電源装置（東和計測、出力 0~30 kV）を接続し、電圧測定には 10,000:1 倍の分圧器を用いた。

これらの電極は内径 155 mm の円筒形アクリルパイプの中に図 2 のように配置した。本実験では集塵装置内の微粒子の流れをとらえることを目的として、パイプ内の流速分布が一様な層流になるように、電極の前後に厚さ 100 mm の整流板（ハニカム板）を配置した。装置内部の風速分布は熱線風速計（日本科学工業、Anemomaster 24-6141）により測定し、ほぼ均一であることを確認している¹³⁾。

図 3(a) に実験装置の全体図を、図 3(b) に上流側の整流板をはずして撮った装置主要部の写真を示す。ダストとしては、JIS 規格 JISZ8901 で規定されている試験用ダスト 14

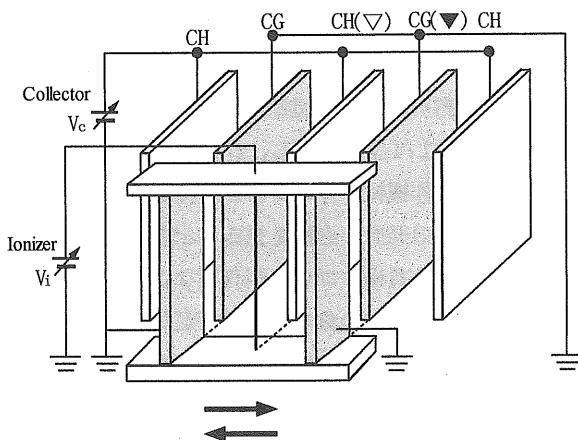
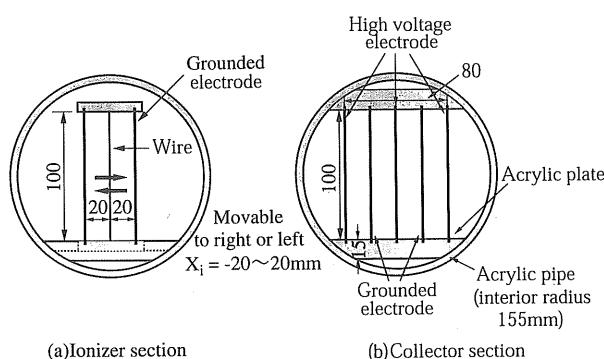


図 1 二段式小型電気集塵装置

Fig. 1 Two-stage electrostatic precipitator.
CH: high voltage electrode, CG: grounded electrode.



(a) Ionizer section

(b) Collector section

図 2 アイオナイザ部とコレクタ部の断面図

Fig. 2 Cross section of electrodes.

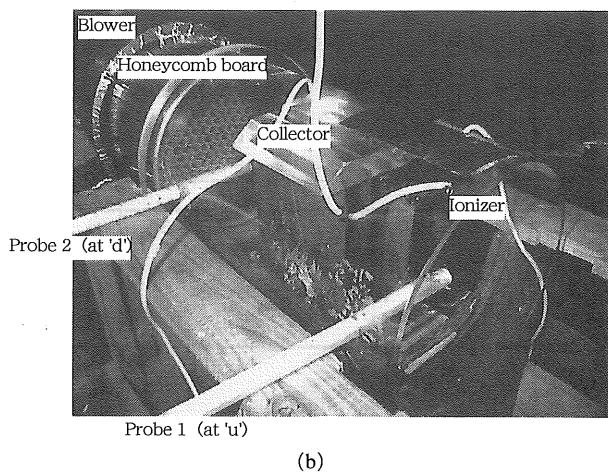
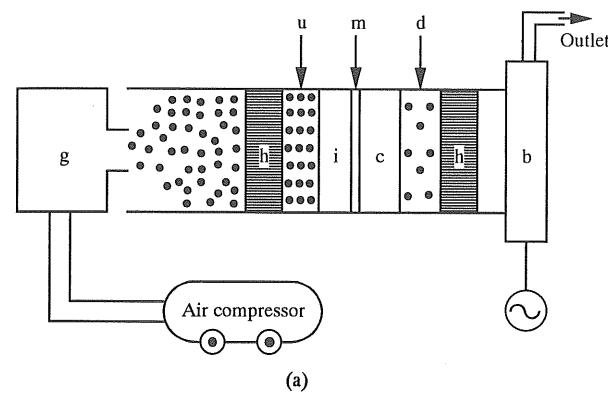


図3 実験装置全体図

Fig. 3 Experimental apparatus.

(a) Schematic diagram of experimental apparatus, (b) Main section of experimental apparatus.
g: Particle generator, h: Honeycomb board, i: Ionizer, c: Collector, b: Blower, u, m, d: Measuring points.

種のDOP (Diethyl Phthalate) を使用した。粒子発生装置から発生させたDOP粒子を集塵装置の組み込まれているアクリルパイプ中に送り込む。風速はプロアに印加する電圧を変えて変化させた。

DOP粒子濃度の測定は、アイオナイザ部の上流側（点u）、コレクタ部の下流側（点d）およびアイオナイザ部とコレクタ部の間（点m）で行った（図3(a)）。粒子濃度測定器（ATI, model TDA-2EL）では、DOP粒子の重量濃度が測定される。粒子の軌跡をとらえるために粒子濃度測定は図4に示すように、上流側と下流側が対応できる位置で2本のプローブを切り替えて行った。図にはアイオナイザ部上流とコレクタ下流の測定点（u, d）が示されている。また、アイオナイザ部での集塵効果を調べるために、アイオナイザ部上流（u）とアイオナイザ部とコレクタ部の間（m）での粒子濃度も測定した。アイオナイザ部はコレクタの電極間隔の分だけ移動できるので、左右へ最大移動した場合は、放電極の位置は次のコレクタの位置へくる。粒子濃度の測定はアイオナイザ部の位置によらず、アイオナイザ部の幅の分、すなわち、図に示すように40 mmの領域で行った。

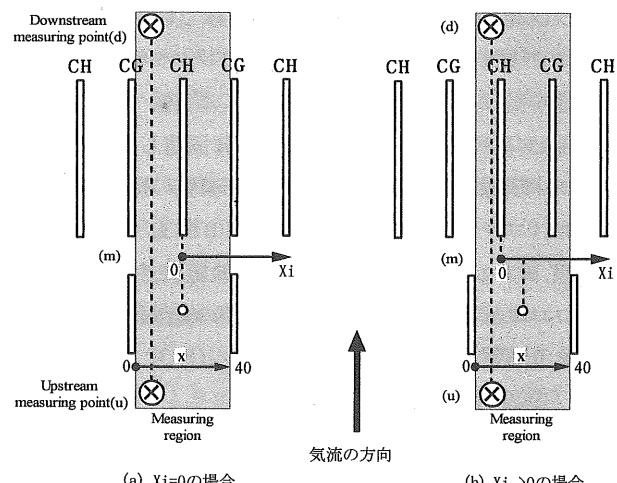
(a) $X_i=0$ の場合(b) $X_i > 0$ の場合

図4 測定範囲の説明図

Fig. 4 Explanation of measuring region.

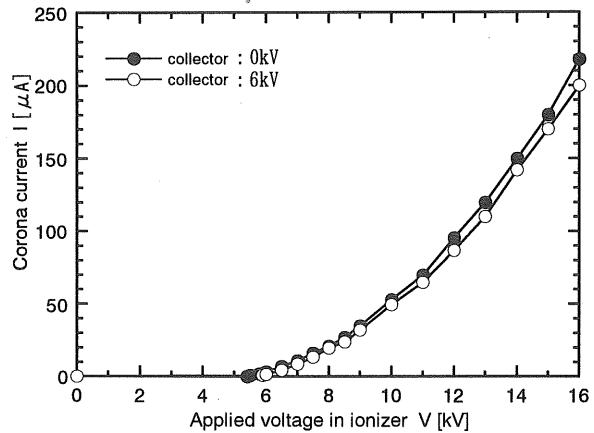


図5 アイオナイザ部のV-I特性

Fig. 5 V-I characteristics of ionizer.

それぞれの測定点の集塵効率 (η) は、集塵装置での上流側の粒子濃度 (C_1) と下流側の粒子濃度 (C_0) から、次式より求めた。

$$\eta = \frac{C_1 - C_0}{C_1} \times 100 \quad [\%] \quad (1)$$

3. 実験結果

3.1 コロナ放電特性

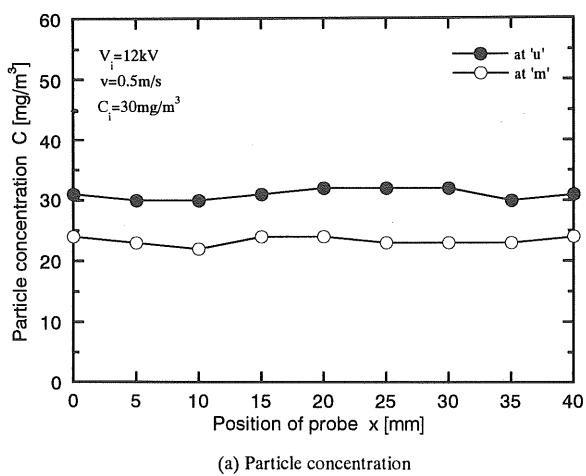
アイオナイザ部の正コロナ放電特性を図5に示す。このときのアイオナイザ部の位置は、図1の中心部、すなわち、放電極の下流にコレクタの高電圧電極がくる位置である。コレクタ部の電圧が0 kVの場合、コロナ放電は5.5 kVで始まり、19 kVで火花放電が起こった。コレクタ部に電圧+6 kVを印加した場合は、コロナ放電開始電圧は5.9 kVとなり、コロナ放電開始電圧は、コレクタ部に電圧を印加した方がやや高くなる傾向がある。また、コロナ電流は、コレクタ電極に電圧を印加したときの方が若干小さくなつた。これらの結果から、アイオナイザ部のコロナ電流は、

コレクタ電極の電位の影響を若干受けていることがわかる。コロナ電流はアイオナイザ部とコレクタ電極の距離でも影響を受けることが考えられるが、本実験ではアイオナイザ部とコレクタ部の間隔は 10 mm に固定している。

コロナ放電特性に及ぼす DOP 粒子濃度の影響を確かめるため、コレクタ電圧 +6 kV、風速 1.0 m/s、DOP 粒子発生濃度 30 mg/m³ の条件でもコロナ放電特性を測定したが、コロナ放電特性は変わらず、粒子の有無は、放電特性にあまり影響しないことがわかった。

3.2 集塵特性

予備実験から、アイオナイザ電圧およびコレクタ電圧を高くすることにより集塵効率が上がることがわかっているが、さまざまなファクターの影響をとらえやすくするため、集塵効率が大きく変化する比較的低めの電圧条件で実験を行った。本実験ではアイオナイザ電圧を +12 kV、コレクタ電圧 +6 kV を標準荷電条件とし、電極長は、電極長の影響の実験以外では、100 mm としている。



(a) Particle concentration

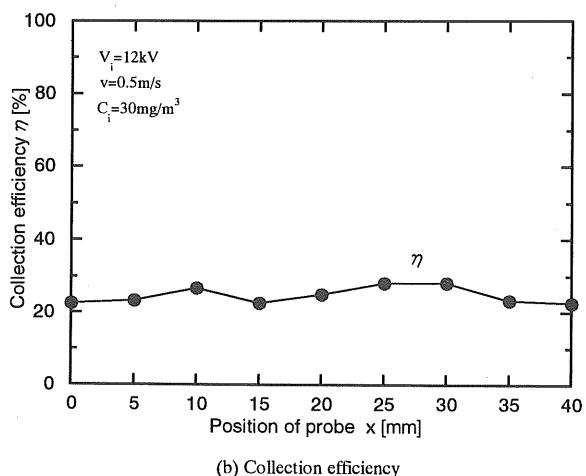
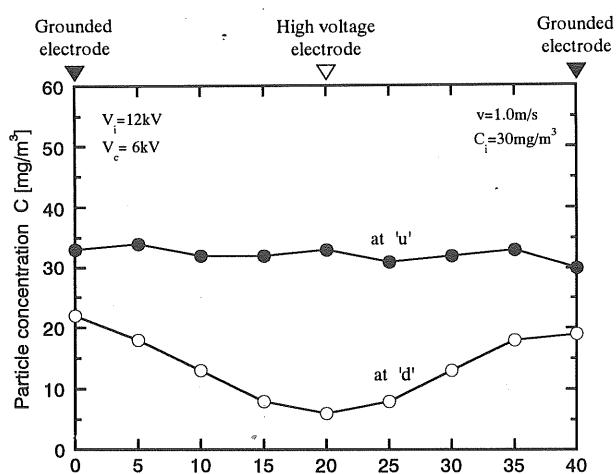


図 6 アイオナイザの上流と下流での粒子濃度と集塵効率

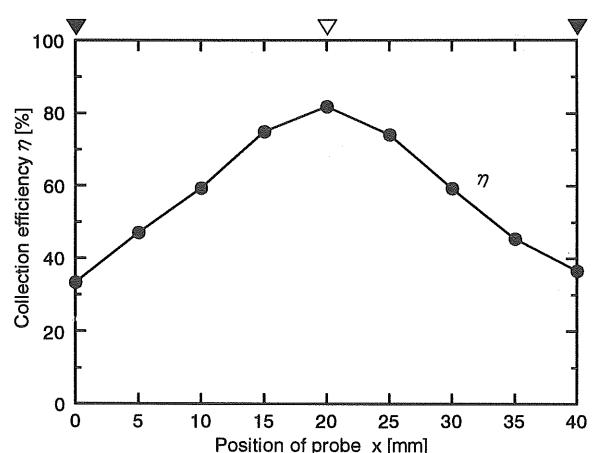
Fig. 6 Particle concentration and collection efficiency before and after ionizer.

3.2.1 アイオナイザ部での集塵

アイオナイザ部上流（測定点 u）とアイオナイザ部直後（測定点 m）での粒子濃度分布を図 6(a) に、式(1) より求



(a) Particle concentration



(b) Collection efficiency

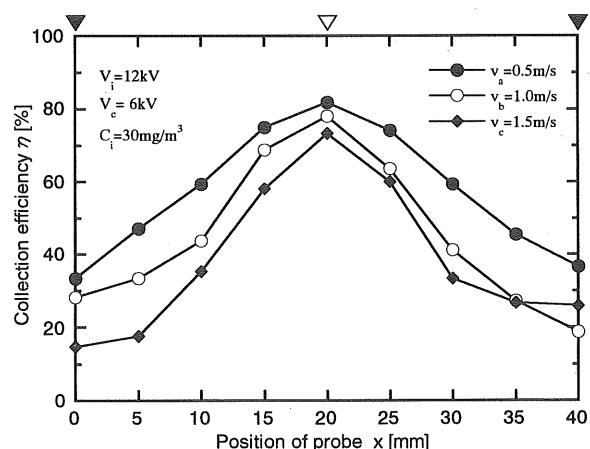
図 7 $X_i = 0$ mm での粒子濃度と集塵効率Fig. 7 Particle concentration and collection efficiency in the position of $X_i = 0$ mm.

図 8 風速と集塵効率の関係

Fig. 8 Relationship between collection efficiency and wind velocity.

めた集塵効率を図6(b)に示す。粒子発生濃度は 30 mg/m^3 、風速は 0.5 m/s であり、測定範囲はアイオナイザ部の平板電極間($x=0\sim40\text{ mm}$)である。コレクタ電極はすべて接地し、アイオナイザ部は中央の位置すなわち、放電極と平板電極の真後ろにコレクタ電極がある。

図より、アイオナイザ部すでに約25%集塵されているものの、粒子濃度分布は一様で、コレクタ部にはDOP粒子がほぼ一様な濃度で入ってきてていることがわかる。

3.2.2 集塵効率のプローブ位置による変化

図7(a)は集塵効率を求める前の生のデータを示す。上流側のDOP粒子濃度を 30 mg/m^3 とし、アイオナイザ部は中央($X_i=0\text{ mm}$)、すなわち、放電極の真後ろにコレクタ部

の高圧電極(CH)がくる位置に設置している。 X_i は -20 mm から $+20\text{ mm}$ まで変化できる。測定範囲は前述のとおり、アイオナイザ部の二つの接地電極間である(図4)。測定プローブを 5 mm ずつ右に水平に移動してアイオナイザ上流とコレクタ下流で粒子濃度を測定した。上流側から見てプローブが左側の接地電極にあるときを $x=0\text{ mm}$ とし、右側の接地電極にあるときを $x=40\text{ mm}$ とする。放電極は常に $x=20\text{ mm}$ の位置にある。図7で、▽はコレクタ部の高圧電極(CH)、▼は接地電極(CG)の位置を示す。この図でわかるようにアイオナイザ上流側の粒子濃度はほとんど一定しているが、コレクタ下流側では減少しており、 $x=20\text{ mm}$ で最小となる分布を示している。これらの

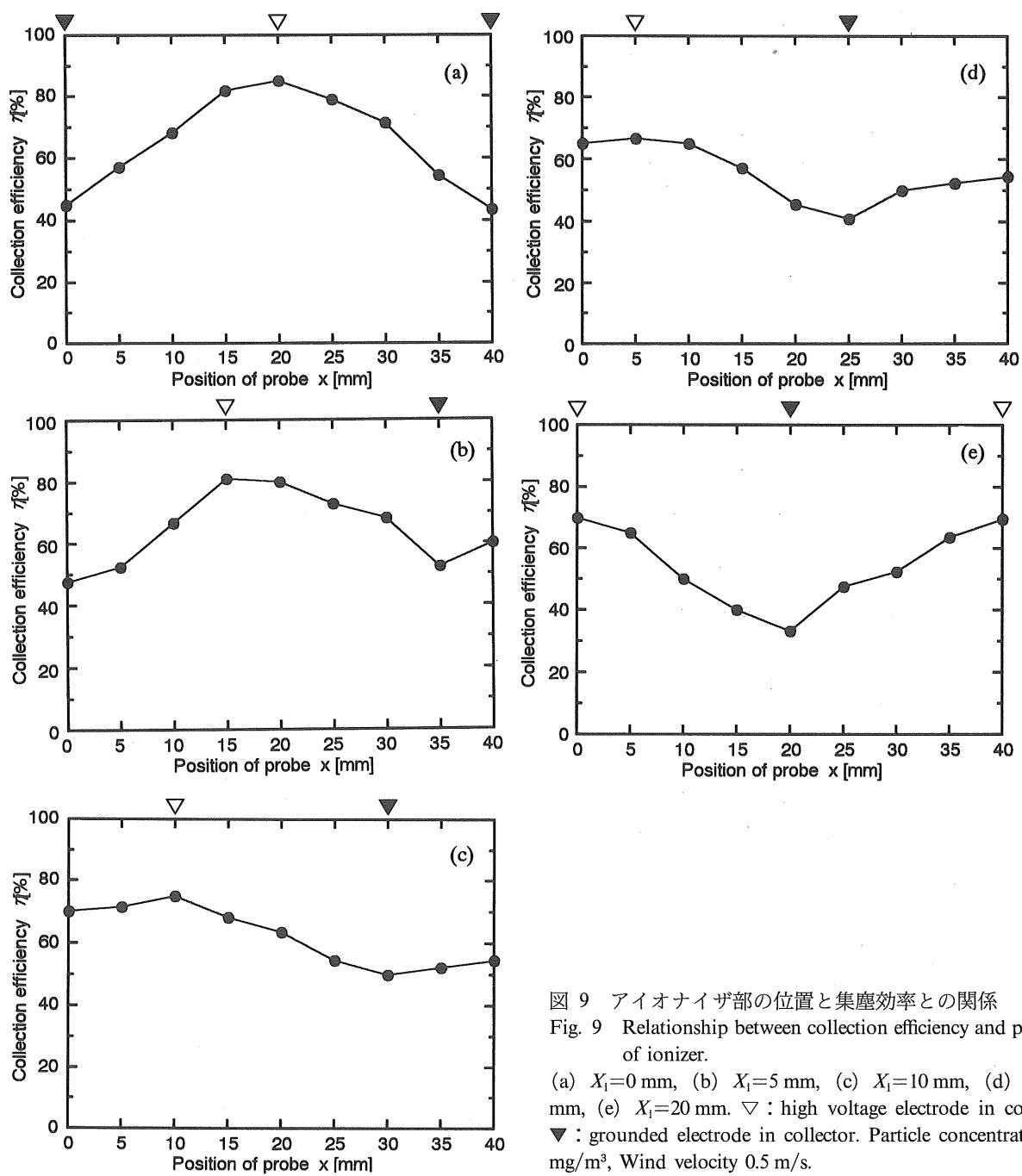


図9 アイオナイザ部の位置と集塵効率との関係

Fig. 9 Relationship between collection efficiency and position of ionizer.

(a) $X_i=0\text{ mm}$, (b) $X_i=5\text{ mm}$, (c) $X_i=10\text{ mm}$, (d) $X_i=15\text{ mm}$, (e) $X_i=20\text{ mm}$. ▽: high voltage electrode in collector, ▼: grounded electrode in collector. Particle concentration 20 mg/m^3 , Wind velocity 0.5 m/s .

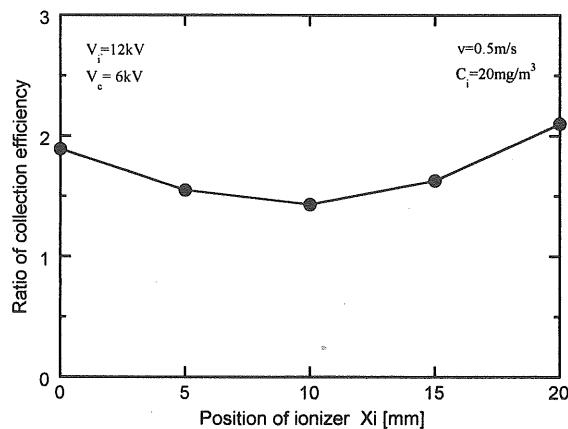


図 10 放電極の位置 X_i での集塵効率 η の最大値/最小値の比

Fig. 10 Ratios of the maximum and minimum value of collection efficiency with respect to the position of ionizer.

値から (1) 式を用いて集塵効率を求めた結果を図 7(b) に示す。集塵効率は、 $x=0$ mm および $x=40$ mm で 35% 程度、 $x=20$ mm で 82% の極大値を持つ。

3.2.3 風速の影響

図 8 は、標準配置すなわち、放電極の背後に高圧電極が来る状態 ($X_i=0$ mm) で、風速を 0.5, 1.0, 1.5 m/s と変化させた場合の集塵効率の変化を示している。この図から、コレクタ部下流の粒子濃度は一定でなく、高圧電極付近では低く、接地電極付近では高くなることがわかる。この現象については後で詳しく考察する。

この結果には風速の影響がはっきりと現れており、一般にいわれるよう低風速ほど集塵効率は高い。コレクタ部の高圧電極の後方と接地電極の後方の集塵効率の比は、風速 0.5, 1.0, 1.5 m/s のとき、2.5, 2.8, 5 倍となっている。すなわち、風速が速いほど、集塵効率の最大値と最小値との差は大きくなっている。

3.2.4 アイオナイザ部の位置の影響

図 9 は、アイオナイザ部とコレクタ部にそれぞれ +12 kV, +6 kV の電圧を印加し、アイオナイザ部のコレクタ部に対する相対位置を中央から右方向に 5 mm ずつずらしながら ($X_i=0 \sim 20$ mm), 粒子濃度を測定して集塵効率を求めた結果である。粒子濃度は 20 mg/m^3 , 風速は 0.5 m/s で一定である。集塵効率は、いずれの場合もコレクタ部の接地電極の後方より高圧電極の後方の方が高い傾向が見られる。 X_i の各位置における集塵効率の最大値と最小値の比を取ったものを図 10 に示す。この図でわかるように、放電極の位置がコレクタの高圧電極の位置に来たときの値が大きい。放電極の位置がコレクタ電極の中間では効率がならざれる傾向にある。このことは、アイオナイザ部とコレクタ部の相対的な位置関係が集塵効率に影響を及ぼす可能性がある。

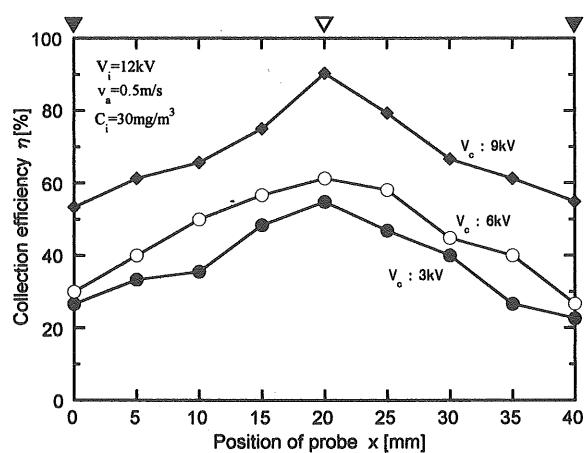


図 11 コレクタ印加電圧と集塵効率の関係

Fig. 11 Dependency of collection efficiency on collector voltage.

あることを示唆している。

3.2.5 コレクタ部の印加電圧

図 11 にアイオナイザ部の電圧 12 kV , 上流側粒子濃度 30 mg/m^3 , 風速 0.5 m/s 一定としたときの、コレクタ電圧の集塵効率に与える影響を示す。アイオナイザ部は $X_i=0$ mm の位置に置かれている。コレクタ部の電圧を増加させると、コレクタ部での偏向電界が大きくなり、荷電粒子の偏向量が増加するので集塵効率はよくなる。しかし、集塵効率は必ずしも電圧に比例してはいない。高圧電極と接地電極後方の集塵効率の比は、次第に小さくなる傾向はあるが、おのおの 2.1, 2.0, 1.7 倍とその比率はそれほど変化はしていない。

3.2.6 相対位置と総合集塵効率

集塵装置の上流側と下流側で測定した DOP 粒子濃度を、測定領域の全区間 ($x=0 \sim 40$ mm) にわたっておのの積分し、その値から (1) 式により総合集塵効率を求めた。図 12 にアイオナイザ部のコレクタ部に対する相対位置 (X_i) と総合集塵効率の関係を示す。

総合集塵効率は、 $X_i=0$ mm の位置が最も高く、 X_i の増加とともに若干減少する傾向がある。風速 $0.5, 1.0 \text{ m/s}$ では、 $X_i=20$ mm のときの総合集塵効率は、 $X_i=0$ mm のときより、10% 低い値を示している。風速 1.5 m/s でも、粒子濃度の変動や測定値のばらつきを考慮すれば、総合集塵効率は、 X_i の増加とともに減少したと言える。この減少の様子も $X_i=0$ mm から $X_i=20$ mm に向かって直線的に低下するというよりも上に凸の曲線で低下するようである。 $X_i=0$ mm のときには、放電極の真後ろにはコレクタ部の高圧電極があり、 $X_i=20$ mm では、接地電極が位置している。原因として、接地電極が後方にあると、電気力線の分布が変化してコロナ放電により生成されたイオンが直接コレクタ電極に向かって DOP 粒子の荷電に利用されていない。

い可能性がある。このことより放電極の真後ろにはコレクタの高圧電極を配置するのが望ましいと思われる。

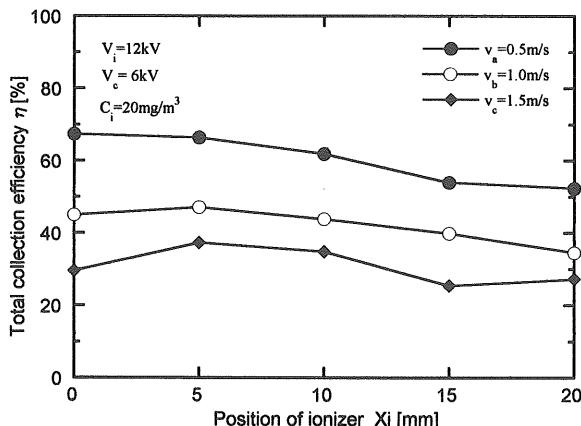


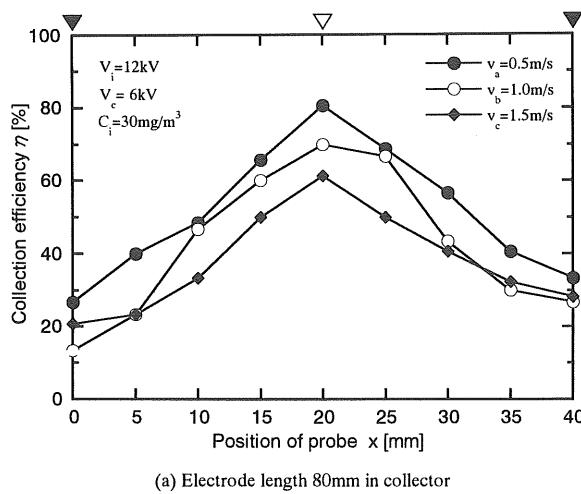
図 12 アイオナイザ部の位置と総合集塵効率の関係(電極長 100 mm)

Fig. 12 Relationship between total collection efficiency and position of ionizer in case of electrode length 100 mm.

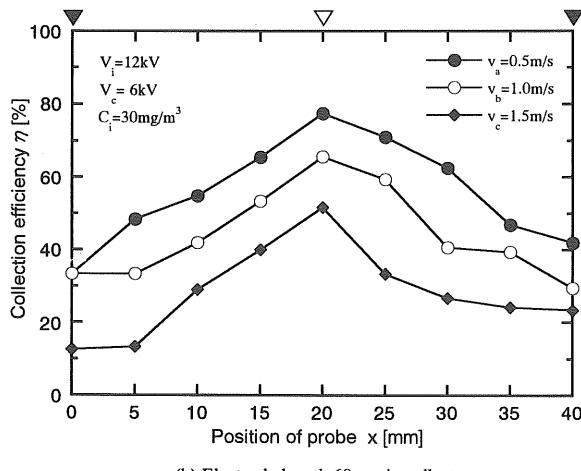
3.2.7 電極長の影響

今まで述べた実験結果はすべて電極長が 100 mm の場合であったが、図 13 には、電極長を 80 mm, 60 mm と変化させたときの集塵効率の変化を示す。図 13(a) はコレクタが 80 mm の場合、図 13(b) は 60 mm の場合である。風速の影響、アイオナイザ部とコレクタ部の相対的位置の影響も 100 mm の場合と類似の傾向が得られた。図 8 と図 13 を比較してわかるることは、いずれも高圧電極後方で最大効率が得られていることである。この効率の最大値に注目すると、風速が遅い場合はコレクタの長さによらずほとんど一定であるが、風速が速くなるとコレクタ長が短くなるにつれて顕著に低下する。

図 14(a) は 80 mm の場合の総合集塵効率、図 14(b) は 60 mm の場合である。図 12 と図 14 より、コレクタ長が短くなると、アイオナイザ部の相対位置の影響は図 12 で示したコレクタ電極長 100 mm の場合ほどは明確ではなくなるが、少なくとも風速の遅いところでは、電極長 100 mm の場合



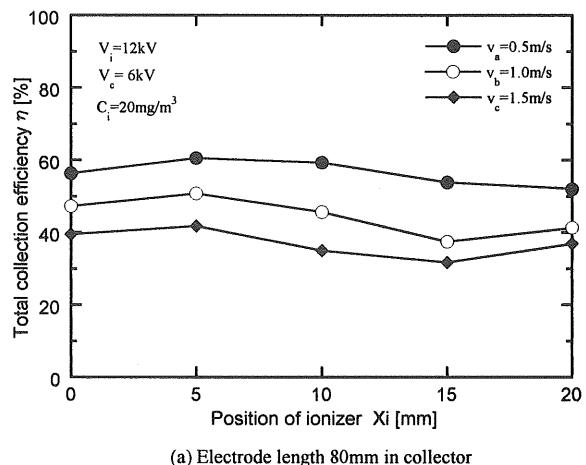
(a) Electrode length 80mm in collector



(b) Electrode length 60mm in collector

図 13 風速と集塵効率の関係(電極長 80 mm, 60 mm)

Fig. 13 Relationship between collection efficiency and wind velocity in case of electrode length 80 mm and 60 mm.



(a) Electrode length 80mm in collector

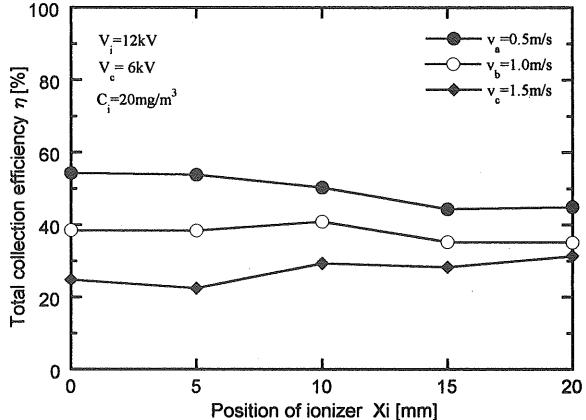


図 14 アイオナイザ部の位置と総合集塵効率の関係(電極長 80 mm, 60 mm)

Fig. 14 Relationship between total collection efficiency and position of ionizer in case of electrode length 80 mm and 60 mm.

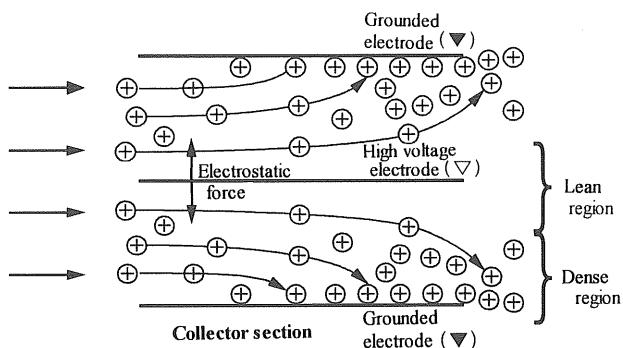


図 15 コレクタ部における帶電粒子の捕集過程
Fig. 15 Mechanism of collecting process.

と似た傾向を示すことがわかる。

4. 結果に対する考察

実験結果に対する定量的な検討は別稿にて行うこととし、ここでは定性的な検討を加える。

図 7 や図 8 に示すように電気集塵装置内の粒子濃度分布は想像以上に大きく変化することがわかった。そのことについて以下のように検討する。

まず、アイオナイザ部でコロナ放電により粒子が正極性に帶電される。この帶電は一様ではないが、近似的に一様と仮定して、荷電した粒子がコレクタ部で捕集される過程を模式的に表すと図 15 のようになる。DOP 粒子がアイオナイザ部で帶電し、空気流に乗って下流側に設けられたコレクタ部の平等電界中に流入すると、静電気力により接地電極の方向に偏向される。したがって、コレクタ部の後方においては DOP 粒子濃度は、高圧電極近くでは低くなり、接地電極付近では偏向された粒子が集まるので、高くなる。風速が速くなると、帶電した DOP 粒子がコレクタ電極に捕集されるのに十分な偏向量を得る前にコレクタ部を通過してしまうため、集塵効率が下がる。

5. まとめ

2 段式小型電気集塵装置をモデル化した装置で実験を行って、得られた基礎特性についての結果を以下に示す。

1) アイオナイザ部のコロナ放電特性について、コロナ開始電圧はコレクタ部に電圧を印加しない方が +6 kV 印加した場合より低く、また同一電圧時のコロナ電流はやや

高くなる。すなわち、コレクタ部への電圧の印加がアイオナイザ部の電界分布に影響を及ぼし、コロナ放電特性を変化させる。また、アイオナイザ部とコレクタ部の相対位置もコロナ放電特性に影響を及ぼすと考えられる。

2) 粒子濃度はコレクタ電極間水平方向で大きく変化する。集塵効率でいうと、コレクタ部の接地電極後方より高圧電極後方が高い傾向にある。また、風速が速いほど集塵効率の最大値と最小値との比が大きくなる。

3) 測定範囲全領域にわたって粒子濃度の分布を積分して求めた総合集塵効率は、アイオナイザ部とコレクタ部との相対的位置により変化することがわかった。総合集塵効率は、放電極の後にコレクタ部の高圧電極があるとき高く、接地電極があるときに低くなる傾向にある。

定量的検討は別稿にて行う。

本研究は田村恒一技官、院生の崔暢洛君、学部生の伊藤正喜君の協力の下に行われたことを明記し、感謝の意を表する。また、本研究の一部が東北精機工業(株)の研究援助によって行われたことに対し謝意を表する。

参考文献

- 1) 高分子学会編：静電気ハンドブック，第 4 章，地人書館，東京（1967）
- 2) 静電気学会編：静電気ハンドブック，第 16 章，オーム社，東京（1981）
- 3) 橋本清隆，足立良：静電気とその工業への応用，東京電機大学出版局，東京（1969）
- 4) H.J. White : *Industrial Electrostatic Precipitation*, Addison-Wesley, Reading, Mass (1963)
- 5) S. Oglesby and G.B. Nichols : *Electrostatic Precipitation*, Marcel Dekker, New York (1978)
- 6) J. Bohm : *Electrostatic Precipitators*, Elsevier, Amsterdam (1982)
- 7) 諫早典夫：静電気学会誌, 7 (1983) 351
- 8) 浅野和俊，大橋朝夫：静電気工学演習，朝倉書店（1985）
- 9) J. Cross : *Electrostatics : Principles, Problems and Applications*, Adam Hilger, Bristol (1987)
- 10) G.W. Penney : *Elect. Eng.*, 56 (1937) 159
- 11) 鳥山四男，斗ヶ沢賢治，市村 豊：電気学会雑誌, 58 (1938) 629
- 12) 橋本清隆：日立評論, 22 (1939) 227
- 13) C. Choi, H. Lim, K. Yatsuzuka and K. Asano : 静電気学会講演論文集 '97, p. 199, 静電気学会 (1997)