

論 文

粉 塵 セ ン サ 一

梶巻 正男\*, 中島 義博\*, 山本 弘\*

(1989年5月16日受理)

Dust Sensor

M. KAJIMAKI,\* Y. NAKAJIMA\*

and H. YAMAMOTO\*

(Received May 16, 1989)

The object of this study was to determine the feasibility of developing a relatively low cost, sensitive, simple and selective dust sensor equipped to air purifier to monitor and control cigarette smoke and aerosol. The sensor's output showed the linearity to gravimetric concentration of cigarette smoke and D.O.P. particles. The linearity is safely maintained from 0.01 mg/m<sup>3</sup> to 0.30 mg/m<sup>3</sup> of dust concentration range which is considered to be most useful and important to control and reduce the exposure of workers to dust for protecting their health. The mass response of this sensor was affected by several factors; such as discharge current of charging electrode, flow rate, polarity of collecting electrode, etc. The repeated tests are likely indicating that basic function of this sensor was related to the detection of the released charge at the collecting electrode from the charged smoke and dust as well as the ionic current intruding to the collecting electrode.

1. ま え が き

空気清浄についての意識が高まるなかで、近年、粉塵濃度をモニターし、空気清浄機の運転を制御しようとする試みが行われている。しかし現状は、室内の粉塵濃度域(0.30 mg/m<sup>3</sup>以下)を簡易に測定する装置がないためガスセンサー等を便宜的に用いて、空気の汚染度モニターとしている例が多い。我々は、高感度で、粉塵濃度のみを選択的に測定する簡易で低コストの粉塵センサーの開発を目的に、研究を進め、従来とはまったく異なる方法による粉塵濃度の測定法を見いだした。

従来より粉塵濃度測定法については次のものがよく知られている<sup>1)</sup>。

1.1 質量濃度測定法

天秤を用いて分離された粒子を秤量するもので、粒子を高い捕集率で分離するものとして、サイクロン、インピングシャ、バクフィルタ、静電式サンプラー、濾紙法などのサンプラーが活用されてきたが、高い捕集率が安定して得られ、便利という点で濾紙による濾過法が一般に使わ

れている。このほかに天秤による測定と等価なものとして水晶発振子上に捕集された粒子の質量が発振子の周波数変化から求められることから、静電方式や慣性衝突により水晶発振子上にエアロゾル粒子を捕集堆積させ、粉塵濃度が 1/178 μg/Hz という高感度で測定できる利点をもつ水晶発振子法がある。

また、濾紙上に吸引、捕集された粒子に対して β 線を照射して、天秤の秤量の代りに、β 線の減衰量から重量増加を求めるものとして、β 線透過法がある。前述の水晶発振子法と同様、1982 年 6 月に SPM (Suspended Particulate Material) の測定装置として環境庁より指定され、広範に活用されている。

1.2 個数濃度測定方法

単位体積中に含まれる粒子の個数を求める方法で、以前では慣性衝突、遠心力、熱沈着などの原理を用いて捕集体上に付着した粒子を顕微鏡で計数する方法も行われていたが現在は光散乱法などにとって代わられている。

粒子に光を照射したときの散乱光強度が、粒子の粒径、屈折率、光の波長、散乱角等の関数として表わされることを利用して、1 個 1 個の粒子に対する散乱光量から、粒径、濃度を測定する方法が、パーティクルカウンタ、ダストカウンタなどの名称で実用に供されている。

荷電粒子を平等電界内に導き、粒子はその粒径、荷電

キーワード：粉塵濃度センサー、電気集塵、環境測定

\* 株式会社ダスキン開発研究所研究開発部 (564 大阪府吹田市江坂町 3-26-13)

Research & Development Center of Duskin, 3-26-13, Esaka-cho, Suita, 564 Japan

量、電界強度に応じた一定の運動を行うことをを利用して分離し、その電荷量を測定することにより、粒子数濃度およびその分布を測定する方法で、静電気法とか電気移動度法などとも呼ばれている。

### 1.3 相対濃度測定方法

相対濃度とは、質量濃度、個数濃度などの絶対濃度との間に一定の関係を有する指示値を意味し、エアロゾル粒子の群に対する散乱光または透過光を光電管を用いて電流値に換算する方法、あるいは、多数の帶電粒子を捕集して電流値として求める方法が知られている。

我々が今回開発した方法は、既存の相対濃度測定方法に分類されるもので、帶電粒子を捕集して電流値として求める方法<sup>2-5)</sup>に属する。この測定法は従来の方法と比較し、簡易かつ低コストで製作できるだけでなく、他の方法より極めて高感度であることから、空気清浄機の粉塵量モニターだけでなく、煙検知器を含めた防災用センサーとして広く応用が可能であると考えられる。

## 2. センサー装置および測定法

今回開発を目指した装置は空気清浄機用の粉塵濃度モニター用で、そのため、形状、大きさ等はその用途を考慮して設計されているが、基本的な構成、機能の評価に制限となるものではない。

### 2.1 装置

粉塵センサーの装置の概要を図1に示した。基本的な構成は図に示したように、集塵部、検知部、比較校正部、送風器部より成り、濃度測定用のサンプリング部が付設されている。集塵部はSUS304の放電針、接地電極および、コルゲートコレクター<sup>⑥)</sup>(ポリプロピレンシートに導電層をシルク印刷)の積層部から構成されている。検知部はコルゲートコレクターの接地極から引き出され負荷抵抗を通じ接地されている負荷抵抗と、電圧降下(負荷抵抗を流れる電流をモニターするため)を測定する増幅器より構成されている。比較校正部は、検知部からの信号の増幅と送風器が運転時の信号と停止時の信号をそれぞれ記憶し比較する回路より構成されている。

装置全体は恒温恒湿室内に設置され、測定中温度、湿度の影響を最小限に抑えるように考慮され、サンプリング部は、粉塵の濃度のサンプリング用に、シリコンチューブ(内径8mmφ)を用い、リオン製パーティクルカウンタに接続され、粒径別の個数濃度を測定すると同時に適宜日本科学工業製ビエゾバランスに接続し粉塵の重量濃度を測定できるように設計されている。送風器は風量が4m<sup>3</sup>/min(線速度70cm/s)から2.3m<sup>3</sup>/min(線速度40cm/s)まで可変できるように設計されている。

粉塵発生は、タバコ煙粒子については、マイルドセブ

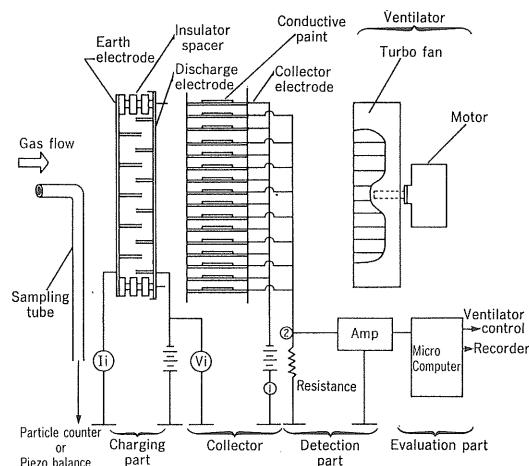


図1 装置の構成概要図

Fig. 1 Cross section and layout of dust counter.

ノを室内で適宜自然燃焼させる方法をとり、DOP粒子の発生はDOP発生装置(室外に設置)より室内にDOP粒子を導入する方法により行った。

### 2.2 測定法

センサーの機能(主に感度、粉塵濃度との直線性、粉塵の種類による感度差)を測定するため、前述の装置を用い、次のように実験を行った。

感度と粉塵濃度との直線性については、恒温恒湿室内で、タバコを自然燃焼(副流煙のみ)させ、集塵部の直前に置かれた、粉塵濃度計の重量濃度とコルゲートコレクターの接地極に流れる電流を同時にモニターしながら、送風器の運転、停止を繰り返し、運転時、停止時のコルゲートコレクターの接地極に流れる電流差と粉塵の重量濃度を相関させ評価する方法をとった。

粉塵の種類による感度差については、タバコ煙粒子とDOP粒子について同様の実験を行い評価した。

環境条件の変化による影響については、室内的温湿度を変化させ同様の実験を行い評価した。その他の測定については、測定結果の項で個別に言及することとする。

## 3. 結果

### 3.1 センサーの感度と直線性

前述の測定法により、センサー感度と直線性について測定した結果を図2に示す。このセンサーでは、電流の出力変化が粉塵の重量濃度とよい直線性を示すこと、また感度は、8nA/mg/m<sup>3</sup>程度の高感度を示し、0.05mg/m<sup>3</sup>の粉塵濃度が容易に検出可能であることが分かる。これは従来乗用車の車内粉塵濃度検出用に使用されている光散乱法によるセンサーや防災用の煙感知器に用いら

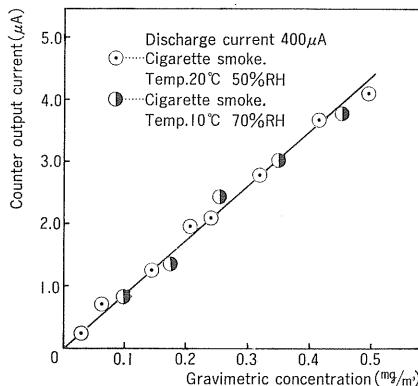


図 2 センサーの感度と直線性

Fig. 2 Dependence of counter output on gravimetric concentration.

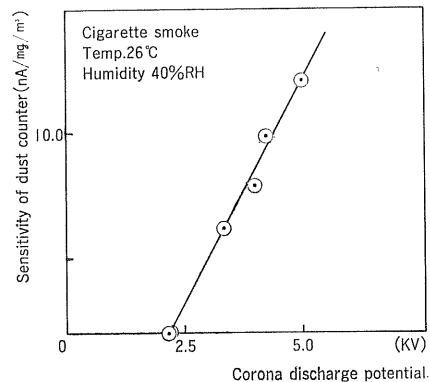


図 4 センサー感度のコロナ放電電圧依存性

Fig. 4 Effect of corona discharge potential on a sensitivity of counter output.

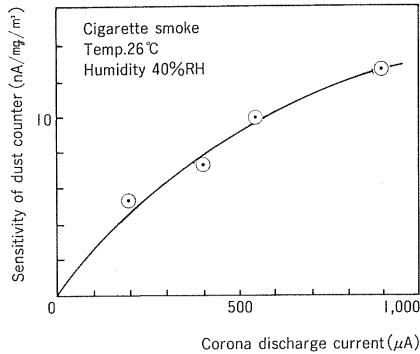


図 3 センサー感度のコロナ放電電流依存性

Fig. 3 Effect of corona discharge current on a sensitivity of counter output.

れているセンサーと比較して 10 倍以上の高感度であり、ピエゾバランスによる粉塵計の感度に匹敵するものである。

このセンサーの感度が、センサーの構造、放電電流、処理風量などの測定条件によりどのように変化するかを検討した結果を以下に示した。

### 3.1.1 センサー感度の放電電流（放電電圧）依存性

センサーは図 1 に示したように、集塵部の放電針よりコロナ放電を発生させる構造で、放電を停止させると、予測されるとおり、粉塵が存在しても感度は全く無くなる。放電電流をコロナ放電が持続する範囲で変化させた場合の感度変化の結果を図 3 に示した。依存性は直線的でなく、電流の平方根に比例した。一方同測定値を放電電圧でプロットすると図 4 に示すように感度と電圧の間には比例関係が得られた。

### 3.1.2 センサー感度の処理風量依存性

装置へ取り込まれる空気量（以下処理風量と呼ぶ）が

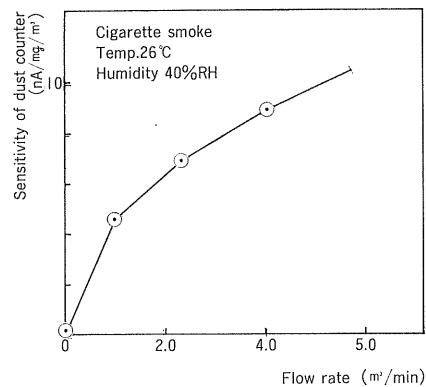


図 5 センサー感度の処理風量依存性

Fig. 5 Effect of flow rate on a sensitivity of counter output.

零の場合は当然ながら、粉塵濃度に対する感度は全く無くなるが、処理風量に対して、感度がどのように変化するかを図 5 に示した。結果は一定条件のもとでは、センサー感度は処理風量の平方根に比例することを示しており、処理風量の小さな小型センサーへの適用が可能であることを示している。

### 3.1.3 センサー感度の電極配置依存性

図 1 に示したように、本装置は集塵部に、粒子荷電用の放電極部分とそれに続く、粒子捕集用のコルゲートコレクター部分が設けられているが、放電極部分とコルゲートコレクター部分の間隙が、センサー感度にどのような影響を与えるのかの検討を行った。

図 6 は集塵部の断面図を示した。放電極は硝子により接地極より絶縁されており、放電極とコルゲートコレクターの極間距離は、硝子高さにより調整されている。硝子高さを変化させ、放電極とコルゲートコレクターの間

表 1 センサー感度の放電極性・検出極電位依存性

Table 1 Effects of polarity and potential of detector electrode on sensitivity.

| Experimental No. | Polarity of discharge (Voltage) | Collector plate & voltage monitoring current from (Voltage) | Sensitivity | Notes                  |
|------------------|---------------------------------|---|-------------|------------------------|
| 1                | Negative (-4.0 kV)              | Plate connected to earth (0 V)                              | 9.0         | Amp. is connected to ① |
| 2                | Negative (-4.0 kV)              | Plate connected to high voltage (-2.0 kV)                   | 0.5         | Amp. is connected to ② |
| 3                | Negative (-4.0 kV)              | Plate connected to high voltage (+2.0 kV)                   | 12.0        | Amp. is connected to ② |
| 4                | Negative (-4.0 kV)              | Plate connected to earth (0 V)                              | 0.1         | Amp. is connected to ① |

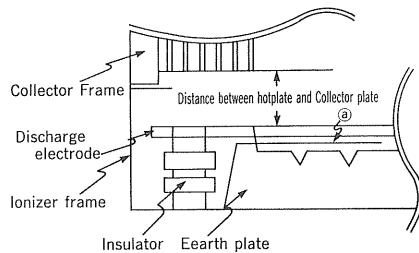


図 6 荷電および集塵部の詳細断面図

Fig. 6 Minute cross section of charging and collector parts.

隙を変えた場合の感度の変化を図 7 に示した。感度は極間隙が 10 mm のとき最大値  $9.0 \mu\text{A}/\text{mg/m}^3$  を示し、これより間隙が大きい場合も、小さい場合も感度が低下した。

### 3.1.4 センサー感度と電極の極性

本装置において、測定は負極性のコロナ放電を用い、検出はコルゲートコレクターの接地極で行っている。図 1 の①の接点を図中②の位置に変更することが可能であり、かつコレクター電極の印加電圧、極性を変えた時に感度にどのような影響を与えるかを次に検討した。表 1 は、放電電圧、検出位置(①、②の位置)、コレクター電極の極性および電位の組合せによるセンサー感度の変化を示した。実験 No. 1, 2 は放電電圧、コレクター電極の極性、電圧を従来測定してきたものと同じにとり、検出位置を①と②に変化させた場合を示し、実験 No. 3, 4 はコレクター電極の極性を反転させ、検出位置を①と②に変化させた場合である。結果は、センサー感度が、放電電極の電位と検出側電極電位の差(実験 No. 1 では  $4 \text{kV}$ )が対極(コレクター部で検出側電極と対向する電極)と放電電極電位の差(実験 No. 1 では  $2 \text{kV}$ )よりも大きい場合に、著しく大きくなること、(No. 1, 2 および No. 3, 4 の実験比較より)また、感度が大きい組合せの実験の比較より (No. 1, 3) 異なるコレクター電極極性

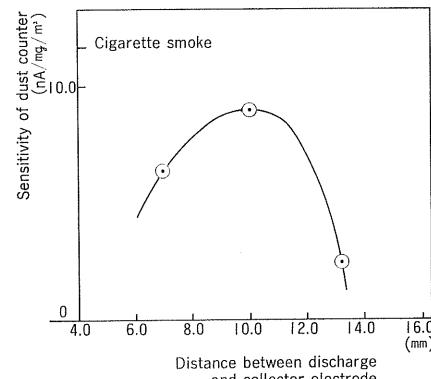


図 7 センサー感度の電極間距離依存性

Fig. 7 Effect of distance between discharge and collector electrodes on a sensitivity of counter output.

の場合にも同様に成り立つことを示している。

### 3.1.5 粉塵の種類とセンサー感度

粉塵の種類を変えた場合のセンサー感度の変化は、このセンサーが絶対濃度の測定を可能にするのか、相対濃度測定のみにとどまるのかを決める上で重要である。本来この測定法の原理からすれば<sup>5)</sup>相対濃度の測定にとどまるものと予想されるが、我々は、大気塵の模擬粉塵と考えられる DOP 粒子とタバコ煙粒子との測定感度の比較を行った。

図 8 に測定の結果を示したが、このセンサーによる粉塵濃度測定は、相対濃度測定にとどまっている。これは、この測定に用いたタバコ煙粒子と DOP 粒子の粒度分布の差が少ないと考慮すると、渡辺ら<sup>5)</sup>の示しているように、両粒子が荷電される(電界荷電)とき、粒子の比誘電率や体積固有抵抗の差によりその飽和比荷電量に差が生じ、比誘電率の高いタバコ煙粒子の方が高感度となつたと考えられる。

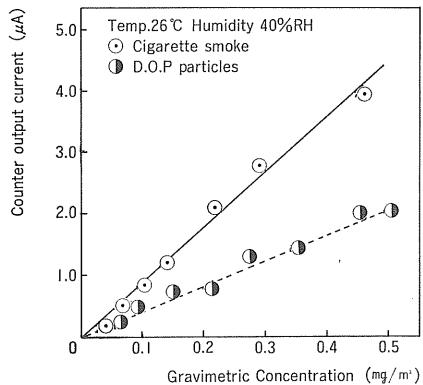


図 8 センサー感度の浮遊粉塵種依存性

Fig. 8 Effect of kinds of dust on a sensitivity of counter output.

表 2 放電電流の温湿度依存性

Table 2 Effects of temperature and humidity on discharge current.

## (a) Effect of temperature

| Temp. (°C) | Discharge potential (kV) |     |      |
|------------|--------------------------|-----|------|
|            | 3.5 kV                   | 4.0 | 4.5  |
| 9          | 270 μA                   | 712 | 1200 |
| 10         | 355                      | 727 | 1210 |
| 20         | 440                      | 842 | 1310 |
| 30         | 375                      | 767 | 1245 |
| 40         | 420                      | 812 | 1275 |
| 50         | 360                      | 722 | 1155 |

## (b) Effect of humidity

| Humidity (%RH) | Discharge potential (kV) |     |      |
|----------------|--------------------------|-----|------|
|                | 3.5 kV                   | 4.0 | 4.5  |
| 60             | 390 μA                   | 780 | 1240 |
| 70             | 365                      | 695 | 1130 |
| 80             | 395                      | 695 | 1100 |
| 90             | 420                      | 700 | 1090 |
| 95             | 440                      | 670 | 1035 |

## 3.2 環境条件その他の影響

センサーの実用化という面では、その安定性と信頼性が重要な評価の要点となる。実際に粉塵センサーを用いる場合に外部環境条件（温・湿度）や使用期間の経時変化などが大切なポイントとなってくる。

## 3.2.1 環境条件（温・湿度）の変化

既に放電電流の変化により、センサーの感度が変化することを述べたが、温・湿度の変化による放電電流への影響は実用的な範囲でほとんどないことが確かめられている（表 2）。

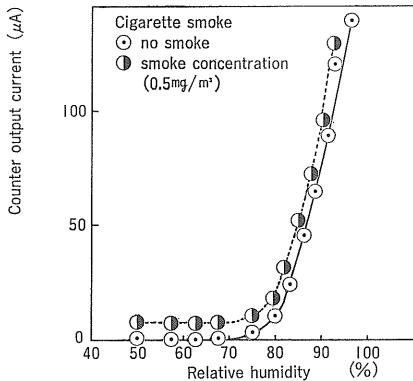


図 9 センサー感度の湿度依存性

Fig. 9 Effect of relative humidity on a sensitivity of counter output.

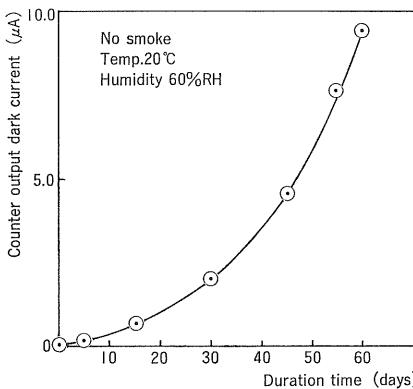


図 10 センサー暗電流の使用期間依存性

Fig. 10 Effect of duration time on dark current of counter.

センサーへの湿度増加による影響は、粉塵がない状態でコレクターの接地極へ流れる電流（暗電流）の増加をもたらすが、センサー感度には影響を与えない。図 9 は、粉塵が無い場合と粉塵濃度が  $0.5 \text{ mg}/\text{m}^3$  の場合についてコレクターの接地極へ流れる電流量（センサーの出力）の結果を示してある。図から、接地極へ流れる電流は粉塵の有無にかかわらず、相対湿度 70% 付近から急激に増加するが、粉塵の有無による電流値の差はほぼ一定でセンサーの粉塵感度が変化しないことが確かめられた。

## 3.2.2 使用期間の経時変化

このセンサーを  $0.5 \text{ mg}/\text{m}^3$  の粉塵（タバコ煙粒子）中で連続的に使用し、その経時変化を図 10 に示した。連続使用時のセンサーへの影響は、(1) 粉塵が無い場合の電流値を増大させる。（現象としては、湿度が増加した場合と同じ挙動を示す。）(2) イオン化電極の放電の有無により、コレクター接地電極への電流値の差が増加する。

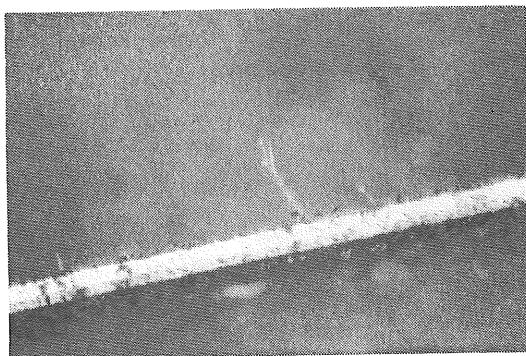


図 11 センサーの暗電流の増加原因となる放電電極の汚れを示す写真（倍率 × 30）

Fig. 11 Photograph of fibrous dust on the discharge electrode caused with the increase of dark current of sensor.

これらの影響は、(1) コレクター電極の汚染による、コレクター電極間の漏洩電流の増加、(2) 放電電極の汚れによる、放電からコレクター接地極へのイオン電流の漏洩によるものと考えられる。後者の原因は図 11 に示した放電電極のコレクター電極に対向する端辺(図 6 に④と記載)の汚れによるもので、端辺に付着する纖維状汚れから対向するコレクター電極へ放電が起こるために、端辺を清浄にするとこの電流は減少し、使用前のレベルに戻ることが確かめられている。これは、このセンサーが定期的なメンテナンスを必要とする欠点を有することを示すが、実験に用いた粉塵濃度が異常に高いことを考慮すれば、年1回程度の点検で十分であると思われる。

#### 4. ま と め

以上の結果を要約すると次のようになる。

- 1) 今回開発したセンサーの感度はタバコ煙粒子について、 $8 \text{ nA}/\text{mg}/\text{m}^3$  程度の高感度で粉塵センサーとして、実用可能であり、粉塵の相対濃度が測定できる。
- 2) センサーの出力電流は、環境湿度の変化により影

響を受けるが、吸引停止、または荷電極の放電停止などで得られる出力電流値を用い較正すれば、正しく粉塵濃度が測定できる。

3) このセンサーの測定原理は、荷電されたダストがコレクター電極で捕獲され、荷電された電荷を放すことにより、粉塵量に比例する電流を観測できることによる。一方、タバコ粒子について、粒径、粒度分布、荷電量(飽和荷電量まで荷電されると考えて)、集塵効果を考慮して観測される電流値を推定すると、実際に測定された電流値の方が推定値より約 10 倍大きいことが確かめられた。さらに、電極の極性や電極配置の変化によりセンサー感度が変化することから、放電部で発生したイオン流が一部コルゲートコレクター部に洩れ出しており、この洩れ出し量が、荷電された粉塵の通過またはコレクターへの捕獲により、大幅に変化するものと考えられる。

現在のところ、測定原理を单一のものに確定できないが、これまで感度を高めるために大規模、高価格になりがちな、この濃度域の粉塵センサーが本装置で小型化されることが十分に期待される。

最後に、本開発、研究を進めるにあたり、有益な討論をしていただいた、ミドリ安全工業株式会社、大山薰専務、杉田直紀氏、戸井田清志氏に深く感謝いたします。

#### 参 考 文 献

- 1) 田森行男：静電気学会誌, 8 (1984) 17
- 2) 石田 昭：島津科学器ニュース, 18 (1977) 15
- 3) 清山哲郎：化学センサ実用便覧, p. 216, フジテクノシステム (1986)
- 4) H.C. Siegmann : 4th Internat. Symp. Contamin. Contr., p. 69, USA (1978)
- 5) 渡辺金之助、稻垣傳也、斎藤俊行、小石眞純：空気清浄, 21 (1984) 47
- 6) 増田閃一、杉田直紀：第4回空気清浄とコンタミネーションコントロールに関する技術研究大会, p. 181, 東京 (1985)