

論 文

ダストの電気抵抗率測定装置の開発

—2種類の現場測定方式—

小暮信之*, 白波瀬雅明*, 吉山秀典*, 田森行男**

(1989年5月16日受理)

Development of Two Types of In-Situ Dust Resistivity Measuring Apparatus

N. KOGURE, * M. SHIRAHASE, *

H. YOSHIYAMA* and I. TAMORI**

(Received May 16, 1989)

The in-situ dust resistivity measuring apparatus which can apply easily into field measurement is very advantageous, but it has a lot of problems and is not used widely at present. For the purpose of improving the in-situ apparatus, two types of the portable measuring probes were investigated. One of them is the parallel plate electrode resistivity probe with dust filter, and the other is the cylindrical electrode resistivity probe with cyclone. Before the actual field test, the basic characteristics of these measuring probes were experimentally investigated and they were performed satisfactorily under the atmospheric conditions using fly ash as test powder. This paper describes some of the measuring condition and applicability of these probes.

1. はじめに

数年前、我が国の各種発生源ダストの排出規制が強化された¹⁾。当時、石炭へのエネルギー転換が強化され、それに伴う大気汚染が懸念されたことや高性能の集塵技術が普及しつつあるなどの背景があったからである。

我が国では、石炭燃焼ボイラ用集塵装置としては、もっぱら電気集塵装置(Electrostatic Precipitator: ESP)が普及しているが、この装置の性能は、生成したフライアッシュの見掛け電気抵抗率 ρ_d ($\Omega \cdot \text{cm}$) (以下、単に ρ_d という) に大きく左右されるので、この ρ_d を把握することは極めて重要である。一般に、 ρ_d の測定方法としては、集塵装置のホッパから回収したダストを実験室に持ち帰って測定する方法(実験室的方法)と、ESP の入口側ダクトから直接ダストを採取してその雰囲気中で測定する方法(現場的方法)がある。

キーワード: ダスト、電気抵抗率、現場測定法、ろ過、サイクロン

* 公害資源研究所大気環境保全部大気計測研究室

** 同研究所企画室 (305 茨城県つくば市小野川 16-3)
Air Quality Measurement Laboratory, Atmospheric Environment Protection Department, National Research Institute for Pollution and Resources, 16-3, Onogawa, Tsukuba, Ibaraki, 305 Japan

実験室的方法は、測定に際して実際の排ガス条件を正確に再現することが困難なことや、ダスト試料の質的な経時変化の影響を受けるなどの問題があるが、測定条件の設定や測定操作が簡便なこともあり、 ρ_d を推定する方法として一般に広く用いられている。我が国の静電気学会は、各種の電極を用いた実験室的方法の検討を行い、米国電気学会²⁾と同様に平行平板電極を標準の電極とし、測定方法の標準化について提案している³⁾。

一方、現場的方法は、現場の実排ガス条件下で直ちに測定できるという最大の利点があり、これまでに針-平板方式、サイクロン方式、ケバトロン方式などの原理を異にした幾つかの装置が試作、発表されている⁴⁻⁶⁾が、装置の特性や実用性に関する情報が少なく、その実施例はあまり知られていない。

そこで、この現場測定法に着目し、ろ過捕集と平行平板電極を組み合わせた方式、およびサイクロン捕集と同心円筒電極を組み合わせた方式の 2種類の ρ_d 測定装置(図 1, 2 参照)を試作してその実用化を図ることにした。実際の煙道測定に先がけて、温度約 20°C、湿度約 70% の実験室内の大気条件下で装置の基本的特性およびその実用性について実験的に検討したので以下報告する。

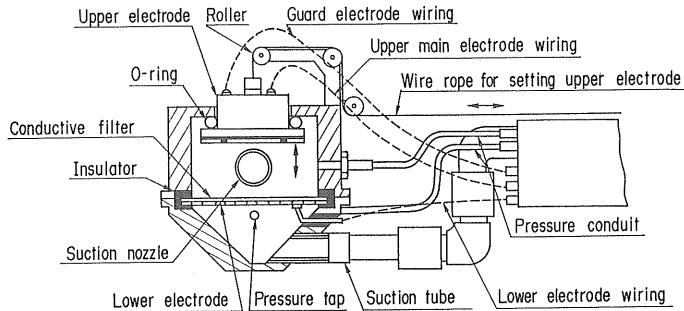
図 1 ろ過捕集式 ρ_d 測定プローブ

Fig. 1 In-situ dust resistivity measuring probe using conductive fibrous filter and parallel plate electrode cell.

2. 電気抵抗率の測定原理

ダストの見掛け電気抵抗率 ρ_d ($\Omega \cdot \text{cm}$) は、一定の厚さのダスト層に印加した直流電圧 V (V) と層内を流れる電流 I (A) との比として次式のように定義される。

$$\rho_d = KV/I \quad (1)$$

ここで、 K は測定電極の幾何学的形状によって定まる係数 (cm) で、平行平板電極および同心円筒電極の場合、それぞれ次式のように表される。

平行平板電極の場合：

$$K = S/t \quad (2)$$

同心円筒電極の場合：

$$K = 2\pi L / \ln(R_2/R_1) \quad (3)$$

ここで、 S は電極の面積 (cm^2)、 t は電極間の距離 (= ダスト層の厚さ) (cm)、 L は電極の長さ (cm)、 R_1 、 R_2 は内部および外部円筒電極の半径 (cm) である。

3. 試作装置および実験の概要

現場電気抵抗率測定装置は、本体プローブを煙道内に挿入したのち等速吸引によりダストのサンプリングを行い、一定量のダスト試料を捕集したのち、その状態でダストの ρ_d を測定する。したがって、プローブにはダストの捕集と ρ_d の測定を行う 2 つの機能が必要となる。ここでは、ろ過捕集と平行平板電極を組み合わせた方式、およびサイクロン捕集と同心円筒電極を組み合わせた方式の 2 種類のプローブを試作した。

3.1 ろ過捕集式 ρ_d 測定装置

本体プローブは、図 1 に概略を示すように、セルロース纖維にカーボン纖維を混抄させて試作した導電性ろ紙 (東洋ろ紙 (株) 製) と真ちゅう製の上部電極駆動式平行平板電極を組み合わせ、ステンレス材によって製作した。電導線にはテフロン被膜の白金線 ($\phi 0.4 \text{ mm}$) を、駆動線にはステンレス製ワイヤロープ ($\phi 0.5 \text{ mm}$) を用いた。

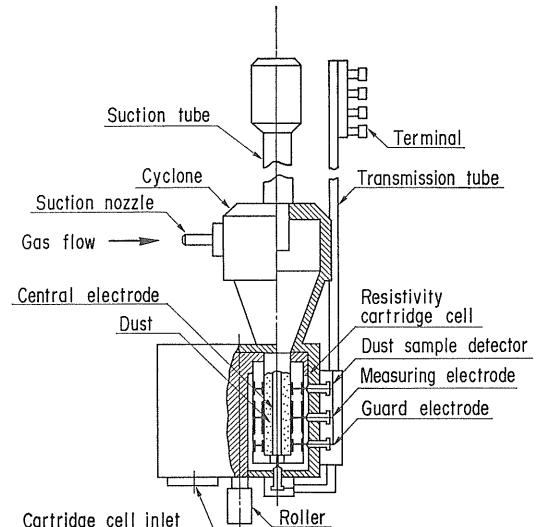
図 2 サイクロン捕集式 ρ_d 測定プローブ

Fig. 2 In-situ dust resistivity measuring probe using cyclone and concentric cylindrical electrode cell.

サンプリングに際して、上部電極は駆動線を用いたラチエット式巻取り機構により吊り上げ、上部壁に密着するようにした。吸引ノズルから吸引されたダストは、導電性ろ紙によって一定の厚さに達するまでろ過捕集される。その後、巻取り機構により駆動線をゆるめながら、ガード電極を併設した上部主電極 ($\phi 26 \text{ mm}$) をダスト層の上に降下させ、多孔質金属板の下部電極との間に一定の電圧を印加して電流値または抵抗値を測定する。ダスト層の厚さは、ろ過前後の圧力差から推定し、上部電極によりダスト層に加えられる荷重圧力は実験室的標準方法³⁾とし提案されている 10 g/cm^2 とした。

装置の基本的特性として、1) 圧力損失とダスト層厚、2) ダスト層厚と ρ_d 、および 3) 電界強度 (印加電圧/ダ

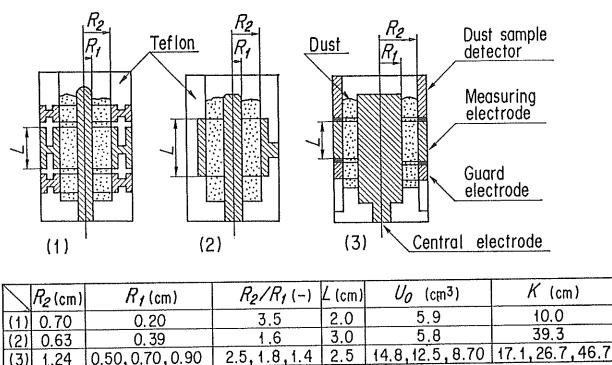


図 3 3種類の同心円筒電極セル

Fig. 3 Schematic diagram of three types of concentric cylindrical electrode cell (1)-(3).

スト層厚)と ρ_d との関係について、試験ダスト発生システムを用いて、以下のように実験を行った。なお、この発生システム¹⁾は、各種の試験用粉体を任意の流速の気流中に定量供給して分散させ、一定の濃度の試験ダストを安定して連続的に発生することができる。

測定では、まず本体プローブを直径 $\phi 15\text{ cm}$ の試験ダクト内に挿入し、 10 m/s の気流中に分散させたフライアッシュ(試験用粉体 JIS 10種:平均径 $D_p=5.1\text{ }\mu\text{m}$)について、圧力損失を圧力計でモニタしながら、等速吸引により一定時間ダストサンプリングを行った。そのうち、 ρ_d 、ダスト層厚およびダスト質量を測定した。しかし、ダスト層におけるろ過抵抗によりとくに層厚 2 mm 以上では過大な圧力損失が生じ、サンプリングシステムにおける吸引ポンプの能力上の制約から、一定のサンプリング条件を維持することができなくなった。そのため、層厚の大きい範囲では、本体上部をはずした吸引状態で、 $250\text{ }\mu\text{m}$ の標準ふるいを通してろ紙上にダストをふるいながら落下させ、任意に層厚を調整した。なお、層厚はノギスにより 0.05 mm まで、またダスト質量は上皿天秤により 0.1 mg まで測定し、抵抗値は高抵抗計(YHP 社製 RESISTANCE METER 4329 A:測定範囲 $10^6\sim 10^{15}\Omega$)を用い、電圧印加後の任意の一定時間経過値として2分値を求めた²⁾。

3.2 サイクロン捕集式 ρ_d 測定装置

図2に、本体プローブの概略を示す。吸引ノズルを通してサイクロン部に導入された試料ガス中から、一定の粒径(吸引流量 $q=20\text{ l/min}$ で50%分離径 $D_{p50}=0.5\text{ }\mu\text{m}$ として設計した)以上のダストが遠心力により分離され、ホッパ部にある孔($\phi 15\text{ mm}$)からカートリッジ状の同心円筒電極セル(外寸 $\phi 20\times 50\text{ mm}$)内へ捕集される。セル中にダスト試料が一定量捕集されたのち ρ_d の測定を行う。セルは図3の(1)のように、2つのガード

電極を有しており、上部のガード電極に電流計を接続することにより、ダストがこのレベルに達すると電流が流れることから、ダストの捕集状態が確認できる。ホッパ部内の回転体に4つのセルが装着され、1回の測定を終了するたびに1/4回転させて次の新しいセルに交換できるため、連続して4回の測定を行うことができる。

電極セルの形状を適正に決定することは、本体プローブの小型・軽量化を図るためにも重要であるので、形状が ρ_d に及ぼす影響を検討した。ここでは、後述する3種類の電極セル(1)~(3)(図3)を用い、サンプリングによらず $250\text{ }\mu\text{m}$ のふるいでフライアッシュをふるいながら落下させ、適度の衝撃をセルに加えることにより任意の充てん密度に調整した。そのうち、 ρ_d を測定し、基本的な ρ_d 特性として、1)印加電圧と ρ_d 、2)充てん密度と ρ_d 、および3)電極半径比と ρ_d 、との関係についてそれぞれ実験した。

セル(1)は、通常のダクトの測定孔($\phi 10\text{ cm}$)に挿入できる本体プローブの大きさを考慮し、全体の寸法から逆にセルの形状を決定して試作したもので、ガード電極を併設したカートリッジ状のもの、セル(2)はサイクロン式 ρ_d 測定装置(米国ワルコ社製:WAHLCO ダスト電気抵抗率測定器)として市販されているガード電極を備えていないもの、およびセル(3)は中心電極を取り替えることにより、電極半径比を変えることができるよう試作したものである。このうち、セル(1)と(2)の素材はテフロン、セル(3)は焼結金属を主体としている。それらの寸法として電極半径 R_1 、 R_2 、両者の半径比 R_2/R_1 、測定電極の長さ L 、捕集ダストの容積 V_0 および形状係数 K を図中に示す。

3.3 3種類の ρ_d 測定装置の比較

以上に述べた装置の基本的な特性試験結果を踏まえ、フライアッシュダストを試験ダスト発生システム¹⁾によ

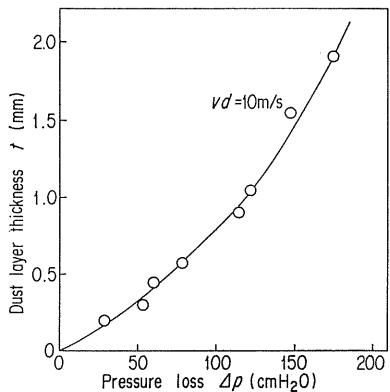


図 4 圧力損失とダスト層厚の関係

Fig. 4 Relationship between dust layer thickness of fly ash and pressure loss.

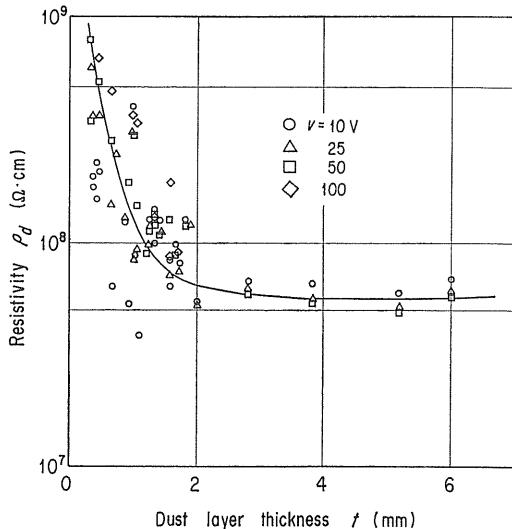


図 5 ダスト層厚-電気抵抗率特性

Fig. 5 Dependence of resistivity on dust layer thickness of fly ash at applied voltage of DC. 10, 25, 50, 100 V.

り発生させて一定の試験条件において、試作したろ過式とサイクロン式、および市販のサイクロン式測定装置により、相互の比較試験を行った。

4. 実験結果および考察

4.1 ろ過捕集式 ρ_d 測定装置

1) 圧力損失 Δp とダスト層厚 t : 図 4 に、流速 $v_d = 10 \text{ m/s}$ の排ガス中からフライアッシュダストを等速吸引したときの圧力損失と、上部電極によって 10 g/cm^2 の荷重圧力を加えたもののダスト層厚の関係を示す。圧力損失の増加に伴いダスト層厚も大きくなり、両者の間に一定の対応関係が認められた。したがって、ダストの

種類が特定できれば、ダスト層厚は圧力損失をモニタすることによって推定できることがわかった。

2) ダスト層厚 t と ρ_d : 図 5 に、印加電圧が 10, 25, 50, 100 V のときのダスト層厚と ρ_d の関係を示す。等速吸引とふるい落下によるダスト試料の粒子堆積状態には差があると考えられるが、上部電極により荷重圧力が加えられたので、同じような堆積状態として扱うこととした。なお、印加電圧が 100 V 以上では、使用した高抵抗計の測定レンジを超えたため、抵抗値が得られなかった。

ρ_d は層厚が大きくなるに従い急激に減少し、2 mm 以上ではほぼ平衡に達した。ダスト層厚が大きいほど上部電極を載せることによって粒子の充てん状態が密になり、また粒子同士あるいは粒子と両電極との接触も密となり接触抵抗が小さくなるため、 ρ_d が低くなったものと考えられる。また、2 mm 以上になると充てん状態は密のまま変化せず、接触抵抗が一定となるものと考えられる。層厚の小さい領域における ρ_d のばらつきは、層厚の計測誤差によるものと考えられる。一方、得られた層厚からダストの充てん密度を推定するとほぼ $0.6 \sim 0.9 \text{ g/cm}^3$ であったが、 ρ_d との間に明確な関係は認められなかった。ダスト層厚については、わずかなダスト層厚の違いによって ρ_d が大きく変化する 2 mm 以下を避け、代表値として一定した値が得られる範囲で採用するのが適当と考えられる。また、実際の ESP の集塵電極板上の捕集ダスト層厚を考慮しても、この 2 mm 以上における採用が妥当と考えられる。

3) 電界強度 E と ρ_d : 図 6 に、ダスト層厚をパラメータとして電界強度と ρ_d の関係を示す。 ρ_d は、層厚が約 2 mm 以下の場合、電界強度が 200 V/cm より大きくなるに従い高くなつたが、層厚が 2 mm 以上の場合、約 $40 \sim 200 \text{ V/cm}$ においてはほぼ一定となつた。2)で述べたように、層厚が 2 mm 以下の小さい領域では、粒子同士の接触が不十分のため、電界強度（印加電圧）を大きくしても、電流がほとんど流れなかつたことを示唆している。したがって、測定に際して用いる電界強度としては、ダスト層厚と同様に ρ_d が大きく変化しない範囲で採用した方がよいと考えられる。なお、実験室的標準方法による測定値を \times 印として参考のために記したが、層厚が 2 mm 以上のものと比較して測定値は若干低いが、同様の変化傾向が示された。

4.2 サイクロン捕集式 ρ_d 測定装置

1) 印加電圧 V と ρ_d : 図 7 に、充てん密度をパラメータとして印加電圧と ρ_d の関係を示した。なお、 \times 印は実験室的標準方法による参考値である。 ρ_d は、いずれの電極セルも印加電圧が大きくなるに従い減少し、セル

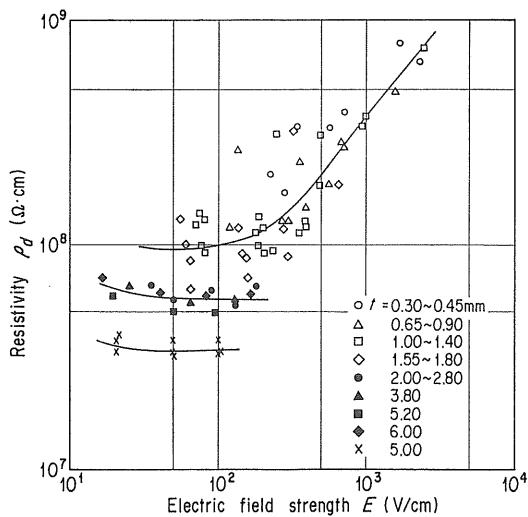


図 6 電界強度-電気抵抗率特性

Fig. 6 Dependence of resistivity on electric field strength at various dust layer thickness of fly ash.

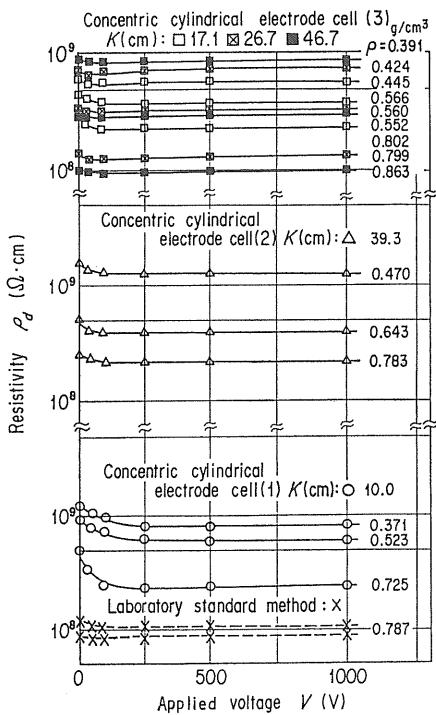


図 7 印加電圧-電気抵抗率特性

Fig. 7 Dependence of resistivity on applied voltage at various bulk density of fly ash.

(1)においては約 250 V、セル(2)と(3)では約 100 V から平衡に達した。印加電圧が小さい場合には ρ_d の変化が大

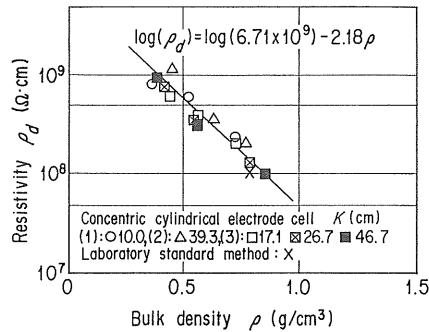


図 8 充てん密度-電気抵抗率特性

Fig. 8 Dependence of resistivity on bulk density of fly ash using concentric cylindrical electrode cell (1)-(3).

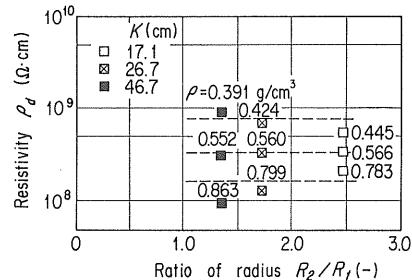


図 9 半径比と電気抵抗率の関係

Fig. 9 Relationship between resistivity and ratio of radius of concentric cylindrical electrode cell (3) as parameters of bulk density of fly ash.

きいので、測定時の印加電圧は、一定値となる範囲で採用した方がよいと考えられる。ここでは、以下の実験において 250 V の印加電圧を用いることにした。

2) 充てん密度 ρ と ρ_d : 図 8 に、セル(1)~(3)の電極セルおよび実験室的標準方法について、充てん密度と ρ_d の関係を示した。 ρ_d はセルの形状や電極の差異に関係なく、充てん密度が増加するにつれて、粒子同士あるいは粒子と両電極との接触抵抗の影響が現れ、次式の関係で減少した。

$$\log(\rho_d) = \log(6.71 \times 10^9) - 2.18\rho \quad (4)$$

サイクロンによってダストを分離・捕集する場合、セル中のダストの充てん密度を任意に設定することは困難であるが、図のようにダストの充てん密度によって ρ_d は大きく変化するので、測定条件として明記すべきであろう。

3) 半径比 R_2/R_1 と ρ_d : 図 9 は、3種類の半径の異なる中心電極を用いて、電極セル(3)の形状が ρ_d に及ぼす影響を示したもので、図中の数字は充てん密度を表す。

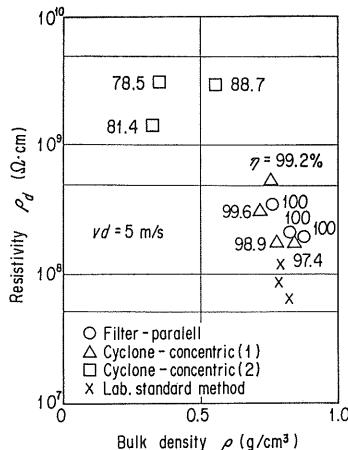


図 10 3 方式による電気抵抗率

Fig. 10 Comparison of resistivity of fly ash measured at test duct using three types of in-situ probe.

図 8 と同様に、 ρ_d は充てん密度が小さくなるに従い高くなるが、破線で示したように充てん密度が一定であるならば、半径比には依存しないと考えられる。したがって、セルの形状は測定電極の長さが一定であるならば、半径比を大きくとってもセルの幾何学的形態係数が小さくなるだけであり、捕集ダスト量が少なくてよいこと(したがって、ダスト試料の採取時間を短縮できる)や、本体プローブの小型・軽量化が図れることから、半径比は小さい方がよいと考えられる。すなわち、試作したカートリッジ状のセル(1)の中心電極半径 R_1 を大きくして半径比を 1.4 とすれば、捕集するダスト試料は約 3 cm³となり、本研究で最初に試作したセルの約半分のダスト量を捕集すればよいことになる。

4.3 3 種類の ρ_d 測定装置の比較試験

図 10 は、大気条件下でフライアッシュの質量濃度約 5 g/m³、ガス流速約 5 m/s の試験ダクト条件において測定した ρ_d を充てん密度に対してプロットした。なお、×印は実験室的標準方法による参考値であり、数字はバックアップフィルタを用いて求めた各装置の捕集率 η (%) を表す。それぞれの測定時における温度・湿度条件は多少異なるが、ろ過捕集方式(○)と試作サイクロン方式(△)の ρ_d はほぼ等しく、市販品(□)は、これらに比べて約 1 衍高くなった。この差異は、捕集率の数値からわかるように、ダストの捕集性能に差が生じたためと考えられる。すなわち、市販品のサイクロンの吸引条件では微小粒子まで効率よく分離・捕集することが困難であったため、充てん密度が小さくなり ρ_d が高くなつたものと推定される。一般に、ろ過捕集方式は高い

捕集率が得られて微小粒子の捕集も可能であるが、捕集ダストの増加とともに圧力損失が急激に増大し、ポンプの吸引限界に達するので注意が必要である。また、市販品のサイクロンを使用するにあたっては、粒子の限界分離径をより小さくするように吸引流量を大きくとるなど、操作条件を適正に選定する必要がある。一方、高い捕集率が得られても、充てん密度はダストの性状や吸引ガス流量などの影響を受けるので、一定の充てん密度を得ることは困難であるが、 ρ_d の測定値を記載するにあたり充てん密度を明記した方がよいと考えられる。

5. おわりに

現場の煙道内の排ガス条件下で、ダストの見掛け電気抵抗率を容易に測定できるよう、ろ過捕集と平行平板電極、およびサイクロン捕集と同心円筒電極を組み合わせた 2 つの方式の ρ_d 測定装置を試作した。

実際の煙道測定に先がけて、フライアッシュダストを発生させて実験室内の大気条件下で行った特性試験結果を要約すると、以下のようになる。

ろ過捕集式 ρ_d 測定装置:

- 1) ρ_d はダスト層厚が増大するに従い減少し、約 2 mm 以上では一定値に達した。
- 2) ρ_d は電界強度が約 200 V/cm 以下ではほぼ一定値となるが、それ以上の電界強度になると、ダスト層厚が約 2 mm より小さい場合には増大した。

3) 試作した導電性ろ紙の捕集率は極めて高く、十分にダストを捕集することができたが、捕集ダスト量の増加に伴い圧力損失の急激な増大が生じた。このため、 ρ_d 測定に必要な最低限のダスト量を得るために、強力な吸引ポンプが必要である。

4) 試作したサイクロン捕集式 ρ_d 測定装置と比較測定した結果、同一試料に対してほぼ等しい ρ_d 測定値が得られた。これらの現場測定法の測定値は、実験室的標準方法と比べると若干高い値となつた。

サイクロン捕集式 ρ_d 測定装置:

- 1) ρ_d は充てん密度 ρ が大きくなるに従い減少し、その関係は次式で表された。

$$\log(\rho_d) = \log(6.71 \times 10^9) - 2.18\rho$$

- 2) ρ_d は印加電圧が大きくなるに従い減少し、250 V 付近から一定値に達した。

3) ρ_d は同心円筒電極セルの半径比が 1.4~2.5 においてほぼ一定となつた。

4) 試作したサイクロンの捕集率は、市販のサイクロンと比べて高く、 ρ_d 測定値は約 1 衍低くなつた。

以上、一連の特性試験から、現場ダスト電気抵抗率測定装置を用いた ρ_d 測定を行う場合、考慮すべき幾つか

の測定条件の特性が確認された。今後は、実際の高温多湿の発生源に対する試験を行い、装置特性や実用性について検討する予定である。

参考文献

- 1) 総理府令：第24号5月28日(1982)
- 2) IEEE Std. 548-1981: Criteria and Guidelines for the Laboratory Measurement and Reporting of Fly Ash Resistivity
- 3) 静電気学会：技術報告，第1号(1986)
- 4) S. Oglesby, Jr. and G.B. Nichols : *Electrostatic Precipitation*, p. 344, Marcel Dekker Inc., New York and Basel (1978)
- 5) H.J. White : *Industrial Electrostatic Precipitations*, p. 294, Pergamon Press, Oxford, London, Paris and Frankfurt (1963)
- 6) L. Cohen and R.W. Dickinson : *J. Sci. Instrum.*, **40** (1963) 72
- 7) 小暮信之, 吉山秀典, 田森行男, 斎藤俊行, 渡辺金之助: 粉体工学会誌, **23** (1986) 8
- 8) 小暮信之, 白波瀬雅明, 吉山秀典, 田森行男: 粉体工学会誌, **25** (1988) 19