サンプリング管内におけるダスト沈着の対策*

小暮信之**、吉山秀典**、田森行男**
斉藤俊行***、渡辺金之助***

Countermeasure for Dust Deposited in a Sampling Tube

by

Nobuyuki KOGURE†, Hidenori YOSHIYAMA†, Ikuo TAMORI†

Toshiyuki SAITO†† and Kinnosuke WATANABE††

Dust deposition inside of sampling tubes was evaluated using a test system which consisted of a sampling nozzle with a 90° bend, a sampling tube with ten 20-cm glass pipes, an elbow and a dust collector. The deposition test was carried out as a function of suction gas velocity and tube diameter using calcium carbonate ($d_{p50}=3.8\mu\text{m}$, $C=300\text{mg}/\text{m}^3$) as the test dust. The test results showed that 33–68% of the test dust was accumulated, and most of the deposition occurred in the 90° bend of the sampling nozzle.

Grit injection into the 90° bend of the sampling nozzle was tried using large sand particles ($d_{p50}=300\mu\text{m}$) as a countermeasure of dust deposition. About 93% of the dust deposited inside of the sampling nozzle could be blown off within four minutes of grit injection. Simultaneous grit injection with dust sampling was also confirmed to be fully efficient.

1. はじめに

ダクト内を流れるダストの濃度や粒径などを測定するために、各種のセンサーを用いた測定器が活用されるが、センサー部を含む装置をダクト外に設ける場合（ダスト濃度測定に関する J I S¹⁾ではこの方法を2形法と呼んでいる）、排ガスの一部を一定長さのサンプリング管を介してセンサーまたは捕集器に導き測定する。この場合、サンプリング管内でのダスト沈着現象が問題となる²⁾ので、その対策としてサンプリング終了時に管内の沈着ダストを回収し補正しなければならない

が、回収操作は煩雑で時間がかかるために極めて困難である。一方、測定条件等を考慮して沈着ダスト量を計算により推定して補正する方法³⁾も考えられるが、ダクト内のダスト及び排ガス条件などが変動する場合には適用が困難となる。このようなダスト沈着防止に関する研究は極めて少ない⁴⁾。

そこで、固気2相流による管内沈着ダストの再飛散効果⁵⁾を応用し、粗粉吹込みによる沈着防止を用い、実際のダスト測定操作条件を設定してその実用性を実験的に検討した。

2. 実験装置および試験粉体

2.1 実験装置

Fig. 1 に装置および測定系の概略を示す。全体は、A；試験ダスト発生システム、B；サンプリングシステムとしてB₁およびB₂の2つのシステム、すなわち、B₁；ダスト沈着特性実験用、B₂；沈着防止効果実験用システム、C；試験ダクト内の温度、速度およびダスト濃度の監視システム、D；速度調整システム、から構成される。

試験ダスト発生システムは、試験ダクト(φ100mm)

昭和60年7月11日受付

* 粉体工学会昭和60年度春期研究発表会にて発表(1960.5 大阪科学技術センター)

** 公害資源研究所(〒305 茨城県筑波郡谷田部町小野川16-3)
TEL 0298-54-3124

*** 三協電業(株)(〒152 東京都目黒区中央町1-8-11)

† National Research Institute for Pollution and Resources,
Onogawa 16-3, Yatabe-machi, Tsukuba-gun,
Ibaraki 305

†† Sankyo Dengyo Co., Ltd., Chuo-cho 1-8-11, Meguro
-Ku, Tokyo 152

Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

内の分散器⁶⁾にダストを溝型テーブルフィーダ（大盛工業K.K. 製スムーズオートフィーダCF 53N）によって連続的に定量供給して分散させ、安定した濃度を発生させるシステムである。サンプリングシステムは実験操作上ダスト沈着特性実験用と沈着防止効果実験用システムの2つに分けて、分散器から約3.5 m下流のサンプリング孔にセットした。ダスト沈着特性実験用システムは、ダクト内に挿入したサンプリングノズルから $\phi 25 \times 90$ mmの円筒ろ紙（東洋No.86 R）を内蔵したダスト捕集器まで、約2 mのサンプリング管で連結した。サンプリング管の直径は $d = \phi 6, \phi 10, \phi 14$ mmの3種類、長さは各部位で沈着したダストを秤量できるよう20 cmとし、これを10本連ねてそれぞれをテフロン製熱収縮チューブで連結した。管内ダストの沈着あるいは再飛散の様子が観察できるよう材質を透明ガラス製とした。沈着防止効果実験用システムは、かき取り型テーブルフィーダ（三協電業K.K. 製マイクロフィーダ）によって粗粉を吹込んで管内の気流中に供給し、一定の吹込み濃度にして吸引ノズル内へ吹込むシステムである。沈着ダストを飛散した後の粗粉は小型サイクロンにより、ダストは円筒ろ紙によりそれぞれ捕集した。

監視システムは、任意に設定したダクト内の気流速

度およびダスト濃度を監視するためのものである。気流速度は、ダクト内に挿入した小型のL形ピトー管により気流の動圧を検出し、流速計（濁川理化学工業K.K. 製NG-V-1）の圧力変換器を介して電気信号に変換したのち、演算して求める。一方、ダスト濃度は光透過式ダスト計（東洋制御K.K. 製SI-21-S1）を用い、ダストによって減衰した光の透過光量をフォトマルで検出して電気信号に変換したのち、演算して求める。いずれの測定値も、2ペンレコードにより記録した。速度調整システムは、試験ダクト内の気流速度を設定

Fig. 2 Sampling nozzle with grit injection nozzle

し試験ダストを集じんするシステムで、本実験では気流速度 $v_d = 10 \text{ m/s}$ に設定した。

Fig. 2 は、沈着したダストを効果的に再飛散させるために設計した粗粉吹込みノズルの概略図である。通常のサンプリングノズルを改造し、ダスト沈着が特に多い 90° ベンド部に粗粉を吹きつけられる構造にした。図中の表は粗粉の吹込み流量の効果を調べるため、サンプリングノズル径 d に対して採用した吹込みノズル径 d' の関係を示す。

2.2 試験粉体

Fig. 3 に、試験ダストとして用いた炭酸カルシウム (密度 $\rho_p = 2.62 \text{ g/cm}^3$) の粒径分布曲線を示す。原粉体の状態 (×印) では液相沈降法 (セイシン企業 K.K. 製 ミクロンフォトサイザ SKN-1000) により、ダクト内の浮遊状態 (○印) では慣性衝突法 (ダイレック K.K. 製 カセット式カスケードインパクト) により測定した。それぞれの平均径は $d_{p50} = 4.3 \mu\text{m}$ および $3.8 \mu\text{m}$ であり、浮遊状態の方が原粉体より幾分小さい。使用した分散器により試験ダストがよく分散していることが推定できる。

一方、吹込み粗粉としては、ダストと粒度の大きく異なるケイ砂 (平均径 $d_{p50} = 300 \mu\text{m}$, 密度 $\rho_p = 2.21 \text{ g/cm}^3$) およびケイ砂とはほぼ同等な粒度を有し、形状の異なるアトマイズアルミ粉、さらにガラスビーズを用いた。これらはいずれも標準ふるいにより整粒し、 $210 \sim 350 \mu\text{m}$ の範囲で実験に供した。

3. 実験条件および実験方法

3.1 実験条件

1) 試験ダスト

Fig. 3 Particle size distribution of CaCO_3

Fig. 4 Relation between dust concentration and revolution number of feeder motor

フィーダにより一定量の試験ダストを分散器へ供給し、無じん気流速度 $v_d = 10 \text{ m/s}$ のダクト内へ分散させた。このときのダスト濃度特性を **Fig. 4** に示す。実験は $N = 400 \text{ rpm}$, $C = 300 \text{ mg/m}^3$ に一定させて行った。相対湿度 $RH = 40 \sim 80 \%$ における試験ダストの水分的収量は約 0.13% と少ないので、使用に際しては乾燥など特に前処理は行わず、 $RH = 80 \%$ 以上あるいは雨天時には実験は行わなかった。

2) 吹込み粗粉

粗粉の吹込み濃度 C' は吹込み空気流量 q' によって変化するので、フィーダの回転数を適宜調整しながら一定の吹込み濃度になるよう操作し、実験は $C' = 10 \sim 100 \text{ g/m}^3$ の範囲で行った。

3.2 実験方法

1) ダスト沈着特性

Fig. 1 の B_1 に示す実験システムを用い、試験ダクトから吸引速度 $v = 5, 10, 15 \text{ m/s}$, 吸引時間 $t = 20 \text{ min}$ でダストサンプリングを行った。その後、各部位をそれぞれ分離し、秤量した。

2) 沈着防止効果

Fig. 1 の B_2 に示す実験システムからサイクロンを取除き、上記と同様にダストサンプリングを行い、吹込みノズル内のダスト沈着量を求めた。吹込みノズルを再びもとの状態に接合し、この沈着ダストに対して粗粉を種々の条件で吹込んだ。再飛散して減少した沈着

ダスト量を再び秤量した。次に、サイクロンを組込んだB₂の実験システムの状態で、粗粉を吹込みながら一定時間ダストサンプリングを行った場合のダスト沈着防止効果について検討した。さらに再飛散後のダストと粗粉の分級捕集用としてサイクロンの適用性を検討し、最後に粗粉の種類、とくに形状に関する再飛散効果について検討した。

4. 実験結果および考察

4.1 ダスト沈着特性

Fig. 5 に、吸引時間 $t = 20$ min のダストサンプリングによって管内に生じたダスト沈着の特性を示す。この場合の沈着率 D は、サンプリングノズル(1)から直管最後部(11)までに沈着したダストおよびダスト捕集部(12), (13)に捕集されたダストの全質量 M に対する各部位での沈着ダスト質量 m_i の割合であり、次式で示される。

$$D = \frac{m_i}{M} \times 100 \quad [\%] \quad (1)$$

最初のサンプリングノズル(1)で $D = 15 \sim 45\%$ 、その後の直管部(2)～(11)で $D = 1 \sim 4\%$ の沈着が生じ、ダスト捕集部(12), (13)に入るまでに $D = 46 \sim 68\%$ もの大きなダスト沈着を生じた。図示しないが、 $d = \phi 10$ お

Fig. 5 Deposition profile of dust deposited in sampling line

よび $\phi 14$ mm ではサンプリングノズル(1)で $D = 22 \sim 32\%$ および $D = 14 \sim 23\%$ 、その後の直管部(2)～(11)でいずれも $D = 1 \sim 4\%$ の沈着を生じ、ダスト捕集部(12), (13)に入るまでに $D = 43 \sim 55\%$ および $D = 33 \sim 49\%$ のダスト沈着が生じた。これらのダスト沈着の傾向は Elder ら²⁾の報告とよく一致している。管径が大きくなるに従いサンプリングノズル(1)でのダスト沈着が減少し、逆にその分がダスト捕集部(12), (13)に捕集された結果となった。管内ダスト沈着量が最も多いサンプリングノズルについて、ノズル径 d をパラメータとして速度比 $\bar{v}$ (吸引速度 v /ダクト内速度 v_d) と沈着率 D との関係を Fig. 6 に示した。沈着率は速度比の増加に伴い減少し、やがて一定値に近づく。 $\bar{v} = 0.5$ の場合、管内の通過速度が小さいために、90° ベンド部の底部に重力沈降に基づく多量のダスト沈着を生じている。 $\bar{v} > 1.0$ で沈着率が減少して一定値に近づく理由は、吸引速度の増加に伴い気流の分離力(せん断力)が大きくなり、沈着したダストに対する飛散効果を増大させるが、一方、管内壁に強く付着した微小粒子は飛散できず、一定量が残存したためと考えられる。なおサンプリングに際して、一般には等速吸引が前提とされるが、この場合にはサンプリングによる濃度の変化を問題にしていないので非等速吸引としている。

以上の結果から、ダストの管内沈着を減少させる方策として、①管径を大きくする、②吸引速度を大きくする、③サンプリング管の長さを短くする、④サン

Fig. 6 Deposition percent of dust deposited in sampling nozzle

リングノズルの曲率を大きくとり、曲がり部を少なくする、ことを図ればよい。実際には種々の測定条件による制約を受けるので、 $D=14\sim45\%$ とダスト沈着量が最も多いサンプリングノズル部に着目し、沈着防止対策について検討した。

4.2 沈着防止効果

吹込ノズルの 90° ベンド部に沈着したダストに対して種々の条件で粗粉を吹込んだ結果、各種の粗粉吹込み操作条件に対する沈着ダストの減少効果すなわち飛散効果は以下ようになった。

1) 粗粉吹込み時間 t'

実験結果の一例を、 $d = \phi 6$, $d' = \phi 3$ mm の吹込みノズルを用いた場合について Fig. 7 に示す。吸引速度 v と吹込み速度 v' をパラメータとして、吹込み時間 t' と沈着ダストの減少率(飛散率⁵⁾ともいう)との関係で表した。一定時間のダストサンプリングで生じた吹込みノズル管内沈着ダストの質量を m 、これに対し空気を1分間、次いで粗粉を2, 4, 6分間吹込んで減少した沈着ダストの質量を Δm とすると、減少率 R は次式のようになる。

$$R = \frac{\Delta m}{m} \times 100 \quad [\%] \quad (2)$$

1分間の空気吹込みにより沈着ダストの2~82%が減少したが、吹込み速度との顕著な対応関係は認められなかった。この広範な変化は、空気のダストに対する

Fig. 7 Effect of air and grit injection for dust deposited in sampling nozzle

直接の飛散効果よりも、沈着ノズル管の実験システムからの取はずし、秤量、取付け時など、実験操作上のわずかな衝撃によるものと考えられる。空気の吹込み時間をさらに長くしても再飛散効果に著しい改善が認められなかったので、空気吹込みは1分間にとどめ、次に粗粉吹込みによる飛散効果を調べた。

粗粉の吹込みの結果、いずれの条件でも $t' = 2 \sim 4$ min で減少率は $R = 93\%$ に達した。

このレベルで沈着ダストの飛散は終了し、残りの沈着ダストは付着力の強いサブミクロン粒子により構成されていると考えられる。その他の管径についても、粗粉の吹込み時間はいずれも $t' = 2 \sim 4$ min で飛散が終了したので、以下の実験では4分値を吹込み時間として採用した。実験の過程で、粗粉は旋回しながら沈着ダストに衝突してダスト飛散を誘発し、しだいに侵食しながら一掃する様子が観察できた。

2) 粗粉吹込み流量 q'

Fig. 8 は、流量比 $\bar{q}$ (吹込み流量 q' / 吸引流量 q) に対して減少率 R をプロットした一例である。流量比が大きくなるに伴い空気($\circ$, $\bullet$)の場合の減少率は大きく減少したが、粗粉(Δ , $\blacktriangle$)ではほとんど減少がみられなかった。吸引流量に対して吹込み流量が大きくなるとサンプリングノズル内での空気の緩衝効果も大きくなって、逆に沈着ダストの飛散効果が小さくなるためと考えられる。

一方、粗粉吹込みの場合、同様な空気の緩衝効果は存在するものの沈着ダストの再飛散に効果的な粗粉の慣性力はわずかにしか衰えないために、減少率はさほ

Fig. 8 Effect of injection flow rate for dust deposited in sampling nozzle

Fig. 9 Effect of grit concentration for dust deposited in sampling nozzle

ど低下していない。実験では $\bar{q} < 0.1$ の領域においてデータを得ることができなかったが、流量比は小さいところで選定して操作すればよいことが示された。

3) 粗粉吹込み濃度 C'

Fig. 9に、 $t = 20$ minのダストサンプリングで沈着したダストに対し、吹込みノズルへの粗粉供給量を $q'' = 0.21$ g/minとして吹込み流量をかせ、 $t' = 4$ min吹込んだ場合の吹込み濃度 C' と減少率 R との関係を示す。減少率は濃度とともに増加し、 $C' = 40$ g/m³付近で約93%の平衡値に達した。粗粉の濃度は大きいほど沈着ダスト層への単位時間、単位面積当たりの衝突ひん度が増してダストの再飛散を促進するが、あまり大きくとる必要はなく、 $C' = 40$ g/m³前後で選定して操作すればよいと考えられる。

4) 連続粗粉吹込み効果

以上述べた粗粉吹込み効果は、一定時間のダストサンプリングにより吹込みノズル内に沈着したダストに対して粗粉を吹込んだ場合のものであるが、ダストサンプリングの過程でも連続的に粗粉吹込みの実験を行った。

Fig. 10は、 $t = 15$ minのダストサンプリング中に連続的に粗粉吹込みをした場合(●, △)と粗粉吹込みをしない場合(○)について、沈着率 D および減少率 R を吸引流量 q および流量比 $\bar{q}$ に対してプロットしたものである。粗粉吹込みをしない場合は、Fig. 6に示されたダスト沈着率とほぼ同様な傾向を示し、沈着率は約35%から6~7%へ、粗粉を吹込んだ場合(●)には吹込まない場合の半分以下となり、約13%が2~3%へ減少した。一方、両者の関係から、Eq. (2)と同様にして減少率 R を求めると、 $q = 30$ l/min付近に約87%のピークをもつ曲線が得られた。このピークに対する流量比は $\bar{q} = 0.27$ で、Fig. 8の結果と異なるが、Fig. 8はサンプリングノズル内でいったん沈着したダストに対する粗粉吹込みのデータであり、連続吹込み

Fig. 10 Effect of continuous injection of silica grit for dust deposited in sampling nozzle

Fig. 11 Collection efficiency of test cyclone

の場合、このピーク付近で操作すればよいものと考えられる。

5) サイクロンによる粗粉とダストの分級

粗粉はサイクロンにより、ダストはダスト捕集器によりそれぞれ分級捕集できるなら、本実験が意図する

システムは完成する。そこで、粗粉を分級捕集する目的に小型サイクロンを設計試作し、その捕集特性の実験結果を Fig. 11 に示した。粗粉の捕集率は $\eta = 99.8$ で 99.9 % でダストは $\eta = 39.1 \sim 76.6$ % となった。すなわち、本サイクロンでは、ダストのかんりの部分を捕集してしまうので、粗粉との分級捕集は困難であるが、分離限界粒子径を粗粉とダストの中間において粗粉寄りにとり、設計し直した方が良いことがわかった。なお、沈着ダストを再飛散させた場合、粗粉にどの程度ダストが付着するかを電顕写真におけるダスト数を計測して調べた結果、20 分間のサンプルダスト量に対して付着したダスト量の割合は約 0.26 % で、質量に換算すれば約 0.26 mg と極めて小さく、無視できるオーダーであることが示された。

6) 粗粉の種類を変えた場合の沈着ダストの飛散効果

以上は、角のとがった不規則形状のケイ砂を粗粉として用いた実験結果についてであるが、表面が円滑な繭状のアトマイズアルミ粉および真球のガラスビーズに関しても同様な実験を行った。実験データはここでは省略するが、いずれもケイ砂の場合とほぼ同様な結果が得られ、ダスト飛散に及ぼす粗粉の顕著な形状効果は認められなかった。

5. おわりに

ダストサンプリング時に生じるサンプリング管内のダスト沈着特性および粗粉吹込みダスト沈着防止法に関する実験結果をまとめると次のとおりである。

1) $\phi 100$ mm の試験ダクト内速度 10 m/s の無い

ん気流中において、試験ダストとして炭酸カルシウム (平均径 $3.8 \mu\text{m}$) を用いて濃度約 300 mg/m^3 で発じんし、管径 $\phi 6 \sim \phi 14$ mm、長さ約 2 m のサンプリング管を用いて吸引速度 $5 \sim 15 \text{ m/s}$ の条件でダストサンプリングを行った。その結果、サンプリング管内に 33~68 % の大量のダスト沈着が生じた。とくに大きかったのは 90° ベンドを有する吸引ノズル部で、14~45 % ものダスト沈着が生じた。

2) 粗粉吹込みノズルを用いて一定時間のダストサンプリングを行い、沈着したダストに対して粗粉としてケイ砂 (平均径 $300 \mu\text{m}$) を吹込んだ結果、沈着ダストの約 93 % を飛散、除去できた。この場合の効果的な粗粉吹込み操作条件は次のとおりである。

吹込み時間 ; 4 min 程度でよい。

吹込み流量 ; 吸引流量の 1/10 程度でよい。

吹込み濃度 ; 40 g/m^3 程度でよい。

3) ダストサンプリングを行いながら連続して粗粉を吹込んだ場合には、粗粉の吹込み流量比 0.27 付近でダスト沈着量を約 87 % も防止できた。

4) 粗粉とダストの分級捕集のために、小型サイクロンは有効と考えられる。サイクロンの設計に際しての限界粒子径は、ダストの最大粒径以上、粗粉の最小粒径以下で選定する。

本実験の結果、平均径数 μm オーダーのダストが流れるダクト内でサンプリングを行う場合について、サンプリング管内のダスト沈着の実態が明らかとなり、このダスト沈着防止のために粗粉吹込み法が活用できる可能性が示された。

Nomenclature

C	: dust concentration in test duct	$[\text{kg/m}^3]$	q''	: mass flow rate of grit injection	$[\text{kg/s}]$
C'	: concentration of grit injected into nozzle	$[\text{kg/m}^3]$	$\bar{q}$	: ratio of flow rate of grit injection to suction flow rate	$[-]$
D	: deposition percent	$[\%]$	t	: dust sampling time	$[\text{s}]$
d	: sampling nozzle diameter	$[\text{m}]$	t'	: grit injection time	$[\text{s}]$
d'	: diameter of nozzle for grit injection	$[\text{m}]$	R	: reduction percent or reentrainment efficiency	$[\%]$
d_{p50}	: median particle diameter	$[\text{m}]$	RH	: relative humidity	$[\%]$
M	: total mass of deposited dust and collected dust	$[\text{kg}]$	v	: suction air velocity	$[\text{m/s}]$
m, m_i	: mass of dust deposited in sampling process	$[\text{kg}]$	v_d	: air velocity in duct	$[\text{m/s}]$
Δm	: mass of dust reduced against deposition by grit injection	$[\text{kg}]$	v'	: grit injection velocity	$[\text{m/s}]$
N	: revolution number of feeder motor	$[\text{rpm}]$	$\bar{v}$	: ratio of suction velocity to air velocity in duct	$[-]$
q	: suction flow rate	$[\text{m}^3/\text{s}]$	η	: collection efficiency of cyclone	$[\%]$
q'	: flow rate of grit injection	$[\text{m}^3/\text{s}]$	ρ_p	: density of particle	$[\text{kg/m}^3]$

References

- 1) JIS Z8808-1977: "Methods of Measuring Dust Content in Flue Gas"
- 2) Elder, J. C., M. I. Tillery and H. J. Ettinger : *J. Air Pollut. Contr. Ass.*, **31**, (1), 66(1981)
- 3) Kanaoka, C. : *J. Soc. Powder Technol., Japan*, **11**, (3), 170 (1974)
- 4) Ranade, M. B., D. K. Werle and D. T. Wasan : *J. Colloid Inter. Sci.*, **56**, (1), 42 (1976)
- 5) Masuda, H., S. Matsusaka and Y. Sumiura : *J. Soc. Powder Technol., Japan*, **20**, (7), 405 (1983)
- 6) Yamamoto, H., K. Yoshie, A. Suganuma and R. Aoki : *J. Soc. Powder Technol., Japan*, **18**, (12), 920 (1981)

★ 四分法の原稿を募集中!!

会誌がお手もとに届くと、まず「四分法」という方が多いようです
この人気ある四分法に気軽にご投稿されませんか……………
長さは575字以内で内容はできるかぎり粉に関連したものが
望ましいのですが、限定はいたしません。ご投稿を心よりお待ちしております。