— 論 文 —

水平直管煙道内排ガス中のばいじん濃度測定における試料採取点の実験的検討^{*1,*2}

(昭和44年3月31日受理)

水見 康二・森 修身^{*3}

一辺 270 mm の正方形断面を有する試験用模擬煙道内に 空気-フライアッシュ系, 空気-タルク系含じん気流を流し, その水平直管部分で同一断面における粉じん濃度分布を JIS Z 8808「煙道排ガス中のバイジン量の測定方法」に規定された方法で測定して実験的に煙道排ガス中のばいじん濃度測定における試料採取点につき検討した。

この結果粉じん濃度の垂直分布についてははっきりした規則性はえられなかったが, 水平分布については煙道管路中心から水平距離 y の位置にある点の粉じん濃度 c_y は, 中心におけるそれ c_0 , 管路の相当半径 r が与えられれば $c_y = c_0 / (r - y/r)^n$ で示されることがわかった。

そして分布度をあらわす指数 n は, 粉じんの慣性に影響し, 粉じんの密度 ρ_p , 速度 u_p , 直径 D_p , ガス粘度 μ としてこれを $\phi = \rho_p u_p D_p^3 / 18 \mu r$ であらわせば, $n = 0.19 \phi^{0.87}$ で示される。

このため粉じんとガスの性状, 管路中心濃度がわかれば, JIS に規定した他の採取点における粉じん濃度が見積れることがわかった。

1 緒 言

煙道排ガス中のばいじん濃度の測定は, 工業都市の大気汚染規制やばいじん防止技術の開発等に必要であるが, この実施のためのばいじん試料採取にあたり等速吸引とともに問題となっているのが試料採取点を煙道の測定位置断面内に多くとらねばならないことであろう。

すなわち煙道内を流れる排ガス中のばいじんの動きは複雑で測定位置として選んだ煙道断面でも一般にその濃度は不均一なため, ここに多くのばいじん試料採取点を選んで試料採取し得られた測定結果を平均している^{1,2)}。

そしてこの測定法を規定した JIS Z 8808^{1,2)} では原則として四点上, 煙道断面積に応じてさらに多くの採取点でばいじんを採取するようになっており, ばいじん濃度測定が厄介で人手を必要とし, 障害となっている。

そのうえ一般にこれら多くの採取点で同時採取できないので測定実施にあたっては一点ずつ順次採取していくのであるが, これではばいじん採取点ごとのばいじん濃度の位置的相違を得ているのか, 測定時間中のその時間的変動を測定しているのかあいまいとなり測定結果の意味にも問題を残すのである。

そこで測定の簡易化, 迅速化のためばかりでなく, 得た結果の精度上の問題からもこのように多くのばいじん採取点での試料採取は検討されるべきものである。

このため著者らはすでに報告した試験用模擬煙道^{3,4)} による実験により, 最も一般的な測定対象である水平直管煙道内排ガス中

の粉じん濃度分布を求めて, ばいじん採取点について検討し採取点に着目してこの測定の簡易化, 迅速化をはかろうとし, 二, 三の知見を得たので報告する。

2 実 験

2.1 実験方針

煙道排ガス中のばいじん濃度測定にあたり, 測定位置に選んだ煙道断面に多くの採取点を選んでばいじん試料を採取し, 得た結果を平均するのは前述のように同一煙道断面でもばいじん濃度に相違があるためである。

このため採取点につき検討するには測定位置のばいじん濃度分布の規則性を知る必要があるが, これをばいじん濃度の時間的変動のある実際の燃焼施設等の煙道を実験対象として考察するのは困難と考え, 真の濃度に対する測定濃度の百分率を求めることのできる試験用模擬煙道^{3,4)} を用いて, この直管部分の長く続いた測定位置における粉じん濃度分布を測定するモデル実験を行なうことにした。

2.2 実験方法

すでに報告した試験用模擬煙道^{3,4)} に空気を流し, その一端にあるホッパーおよび電磁フィーダーよりなる粉じん試料供給装置より一定速度で粉じんを供給して濃度のわかった含じん気流を作った。そして図1に示したその水平直管部に測定位置 A~F を設け, JIS Z 8808^{1,2)} に規定するダストチューブ法または口紙法を用いて煙道管路断面内における同一水平線, 垂直線内各点の粉じ

図1 試験用模擬煙道における測定位置

*1 本報告を「煙道または排気ダクト内のばいじん濃度測定の基礎的研究（第5報）」とする。

*2 前報（第4報）, 水見康二, 田中日出男, 産業公害, 3, 29 (1967)。

*3 Yasuji HIMI, Osami MORI 神奈川県工業試験所: 横浜市金沢区富岡町。

1) JIS Z 8808, “煙道排ガス中のバイジン量の測定方法”, 1963。

2) 水見康二, 分析化学, 12, 1110 (1963)。

3) 水見康二, 安全工学, 2, 185 (1963)。

4) 水見康二, 田中日出男, 村松富美雄, 工化, 68, 589 (1965)。

ん濃度を測定し、その全煙道管路断面平均粉じん濃度に対する百分率を(1)式で求め粉じん濃度分布を測定した。

実験の詳細は、粉じん採取点を移動し、等速吸引したほかは前報^{3,4)}と同じで、濃度測定のための粉じん採取と模擬煙道内への試料粉じんの供給の開始、終了時刻はそれぞれ一致させ各点で得た測定粉じん濃度と全煙道管路断面内平均粉じん濃度の粉じん採取中の平均値とを比較した。

$$R = \frac{c}{c_0} \times 100 \quad (1)$$

ここに R : 粉じん濃度百分率 (%)

c : 各採取点における粉じん濃度測定結果 (g/Nm^3)

c_0 : 煙道内空気通過量と試料粉じん供給量から計算した煙道管路断面内平均粉じん濃度 (g/Nm^3)

この実験のように管路内気流中に粉じんの供給して混合すると粉じんは次第に加速され定常状態に近づくが、この場合定常状態の濃度分布を得ることが望ましいので、試料粉じん供給装置からできるだけ離れた位置で実験すべきであろう。

そして後述するよう図1に示したA~Fの粉じん濃度測定結果から考え測定位置Eで実験することにした。

なお粉じん濃度はほぼ $0.5 \sim 1.3 \text{ g}/\text{Nm}^3$ 、平均空気流速はほぼ $8 \sim 20 \text{ m}/\text{sec}$ とし、一回の粉じん採取時間を $5 \sim 10$ 分間とした。

またこの実験における粉じん採取点は図1に示すとおり試料粉じん供給装置からの距離 x 、煙道断面中心からの水平線、垂直線に沿った距離 y, z で示し、これらを試験用模擬煙道の相当半径 r^{*4} との比で表わした。

2.3 試料粉じん

試料粉じんは空気中で変化せず、ばいじん排出施設から排出されるばいじんや集じん装置の集じん対象となる粉じんと同程度の性質のものを選ぶ必要があると考え、三種類のフライアッシュとタルクを選んだ。

図2は、 $0.003 \text{ mol}/\text{l}$ ヘキサメタリン酸ナトリウム水溶液を分散媒としてアンドレアゼンビベット⁵⁾を用いて得たこれらの粒径

図2 試料粉じんの粒径分布

a : タルク, b : フライアッシュ 1, c : フライアッシュ 2, d : フライアッシュ 3

*4 この実験の場合 r は模擬煙道管路の中心から壁面までの水平距離である。

5) 粉体工学研究会, “粉体粒度測定法”, 養賢堂 (1965) p. 102.

表1 試料粉じんの中心径と真比重

試料	フライアッシュ 1	フライアッシュ 2	フライアッシュ 3	タルク
中心径(μ)	12.4	17.0	42.0	9.7
真比重	2.28	2.23	1.99	2.99

分布である。

また表1はこれらの中心径とピクノメーター法で得た真比重測定結果を示したものである。

2.4 ガス流速測定法

ガス流速は粉じん濃度測定のための試料粉じん採取における等速吸引速度^{1-4,6)}や煙道管路内ガス流量の計算に必要であるが、前報^{3,4)}どおり JIS B 8330「送風機試験法」に規定するL形ビーターで動圧を測定して求めた。

なおこの場合、空気温度 0°C 、圧力1気圧における単位体積あたりの重量は $1.293 \text{ kg}/\text{Nm}^3$ とした。

2.5 粉じん濃度測定法¹⁻⁴⁾

前述のとおり JIS Z 8808「煙道排ガス中のパイジン量測定方法」に規定するダストチューブ法およびろ紙法による試料採取装置で試料粉じんを採取して粉じん濃度を測定した。

この場合試料採取管として普通形試料採取管を用いたので、計算した等速吸引速度の維持に注意した。

2.6 煙道管路内における試料粉じんの分散の観察法

煙道管路内に供給された試料粉じんは、はじめ凝集しているがやがて分散すると考えられる。

そして測定位置ではよく分散していることが望ましいので、分散状況の大略を確かめるため幅 17 mm の市販粘性セロハンテープをガラス棒に装置したものをガス流方向に直角になるよう測定位置に設置し、まず空気のみ流してから約1秒間実験条件と等濃度になるよう試料粉じんを供給し粘性セロハンテープに付着せしめ、これを光学顕微鏡で観察した。

3 実験結果と考察

3.1 測定位置の決定

図3は図1に示した測定位置A~Fにおける煙道内粉じん濃度の水平分布を示したもので、試料粉じん供給装置よりの距離 x が小さい測定位置A, Bにおいては、試料粉じん供給が管路中心で行なわれるため、粉じん濃度は中心で高くなっている。

しかし x が大きくなると、D~F でみられるように反対に煙道管路壁面付近が高くなる傾向を持っており、E, F では濃度分布はほぼ一致しているので、測定位置E, F で粉じん濃度分布はほぼ定常状態に達しているものと考えられる。

さらに測定位置Eで粘性セロハンテープで採取した粉じんの光学顕微鏡写真の一例を図4に示したが、重なり合っている粉じんも認められるが、ほぼ一粒一粒分散しているようである。

これらのことから考え測定位置Eでは粉じん濃度分布はほぼ定常状態になっており、粉じんの分散もよいものと考えられるので前述のとおりここで実験をすすめることにした。

3.2 煙道管路内の粉じん濃度分布

管路内含じん気流中の粉じん濃度分布については Soo⁷⁾ は濃度が低く粉じん粒径が小さく、重力の影響を無視した場合(2)式

6) 水見康二, 大気汚染, 2, 196 (1966).

7) S. L. Soo, Ind. Eng. Chem. Fundamentals, 1, 33(1962).

図3 測定位置 A~F における粉じん濃度水平分布

図4 試料粉じんの試験用模擬煙道内の分散

のような一般式を得ているが、管路壁面の粉じん濃度の定義がいまいなので実用できない。

$$c_y = c_0 - (c_0 - c_w)(y/r)^\alpha \quad (2)$$

ここに c_y ：管路中心より距離 y にある粉じん濃度， c_w ：管路壁面におけるそれ， c_0 ：管路中心のそれ， r ：管路半径， α ：定数

また新津⁸⁾は粉体の空気輸送の場合のように、粉体と空気との混合比の高い場合粉じん濃度垂直分布につき(3)式を与えているが、混合比、粉体粒径、実験法等に相違がある。

$$m = m_0 e^{-u_m(h-h_m)/\epsilon_m} \quad (3)$$

ここに m_0 ：風送濃度（重量混合比）(%)， u_m ：粒体の終速度 (m/sec)， h ：管底よりの高さ (m)， h_m ：風送濃度に該当する点の管底よりの高さ (m)， ϵ_m ：含粒気流

8) 新津 靖，後藤清市，富田 節，日本機械学会論文集（第2部），26，170（1960）。

9) S. L. Soo, G. J. Trezek, R. C. Dimick, G. F. Hohnstreiter, *Ind. Eng. Chem. Fundamentals*, 2, 98 (1964)。

の平均拡散係数 (m^2/sec)

3・2・1 粉じん濃度水平分布 図5は、図2、表1に示した四種類の試料粉じんを用い、平均空気流速を 12.3~13.2 m/sec に保って実験し、煙道管路中心をとる水平線上の粉じん濃度百分率 R を測定して粉じん濃度の水平分布を求めた結果を示したものである。

図5や前述の図3の結果から粉じん濃度はガス速度と反対に煙道壁面で大きく中心で小となっていることが認められるが、これは Soo⁹⁾ も実験的に認めている。

そして図5から認められるように R は煙道管路壁面からの距離と対数目盛上に直線関係にあるし、このことは流速を変えても認められたので、粉じん分布は(4)式のような簡単な関係にあることが確かめられた。

$$c_y = \frac{c_0}{\left(\frac{r-y}{r}\right)^n} \quad (4)$$

ここに c_y ：管路中心より水平距離 y (m) にある粉じん濃度 (g/Nm^3)， c_0 ：管路中心におけるそれ (g/Nm^3)， r ：管路相当半径 (m)， n ：定数 (-)

このため(4)式を用いると煙道管路中心における粉じん濃度と定数 n がわかれば水平分布は得られるので、同一水平線上の任意の測定点の粉じん濃度が求められ便利である。

さて粉じん濃度分布が(4)式で表わされる原因と分布の程度を示す定数 n を定める因子について考えてみよう。

一般に管路内を流れるこのような混相流中の粉じんの挙動は、粉じんと気体のエネルギー授受、粉じんと管路壁面や相互間の衝突、粉じんの回転、粉じんによる渦流の発生等に影響され、これを理論的に解明することは困難であるが、次のように考えてみた。

まず管路内のある断面における粉じん平均濃度は(5)式で与えられる。

$$c_0 = \frac{W}{Q} \quad (5)$$

ここに c_0 ：平均粉じん濃度 (g/Nm^3)， W ：粉じん通過重量 (g)， Q ：ガス通過容量 (Nm^3)

いま管路断面を通過する粉じん重量、ガス容量が、断面における位置 y, z と時間 t の関数と考え、一定時間 T の間に粉じんが速度 $u_p(y, z, t)$ 、単位空間に存在する重量 $w(y, z, t)$ の状態で通

図5 粉じん濃度の水平分布

a：タルク，b：フライアッシュ1，c：フライアッシュ2，d：フライアッシュ3

過し、ガスは $u_a(y, z, t)$ で同時に通過したとすれば、 W, Q について (6), (7) 式がそれぞれ成立する。

$$W = \int_{-r}^r \int_{-r}^r \int_0^T w(y, z, t) u_p(y, z, t) dy dz dt \quad (6)$$

$$Q = \int_{-r}^r \int_{-r}^r \int_0^T u_a(y, z, t) dy dz dt \quad (7)$$

このため平均粉じん濃度 c_0 は (8) 式で求められる。

$$c_0 = \frac{\int_{-r}^r \int_{-r}^r \int_0^T w(y, z, t) u_p(y, z, t) dy dz dt}{\int_{-r}^r \int_{-r}^r \int_0^T u_a(y, z, t) dy dz dt} \quad (8)$$

そして粉じんの水平分布を考えると z は一定であるし、重力の影響も同一で、管路内における粉じんの分散が等しく空間的にも時間的にも均一に存在していると仮定すれば、 $w(y, z, t)$ は y, t に無関係な値 w をとると考えることができる。

さらに粉じん速度、ガス速度も時間に関係なく一定とすれば、管路中心からの距離 y のみによって変化し、それぞれ u_{py}, u_{ay} なる値をとると考える。

以上の仮定と (8) 式から粉じん濃度の水平分布は (9) 式で示されるであろう。

$$c_y = w \frac{u_{py}}{u_{ay}} \quad (9)$$

ここに c_y : 管路中心より y (m) にある点の粉じん濃度 (g/Nm³), w : 煙道管路内単位空間中に存在する粉じん重量 (g/m³), u_{py} : 管路中心より y (m) にある粉じん速度 (m/sec), u_{ay} : 同ガス速度 (m/sec)

さて u_{ay} については現在考えている混相流においてガス速度分布は粉じんの存在しない場合と異なる⁹⁾ が、著者らの実験では粉じん濃度が低いので、ガスのみの場合と同じ分布を示すと仮定すれば、よく知られているように管路壁面付近でガス速度は減速されて (10) 式が成立する。

$$u_{ay} = u_{ac} \left(\frac{r-y}{r} \right)^{n'} \quad (10)$$

ここに u_{ay} : 管路中心より y (m) にある点のガス速度 (m/sec), u_{ac} : 管路中心のそれ (m/sec), r : 管路半径 (m), n' : 定数

一方、 u_{py} については水平直管における混相流の粉じん速度について森ら¹⁰⁾ はその分布は確率的であると述べており、今野ら¹¹⁾ は混合比が 2 より小さい場合、管路断面で垂直方向にはほぼ等しいといっている、これを y に関係ない一定値 u_p をとると仮定すると、(9), (10) 式から容易に (4) 式が成立することがわかる。

なおこの場合 (11), (12) 式を仮定しなければならない。

$$c_0 = w \frac{u_p}{u_{ac}} \quad (11)$$

$$n = n' \quad (12)$$

さて (11) 式から Soo ら⁹⁾ が十分発達した管路内乱流で認めているように、管路中心で粉じん速度とガス速度が等しくなり、この関係が成立すれば単位空間内粉じん重量は管路中心で粉じん濃度に等しくなるわけである。

一方、(12) 式は実験的に n と n' はほぼ一致した値をとっているが、完全な一致は認められなかった。

10) 森 芳郎, 菅沼 彰, 化学工学, 29, 615 (1965).

11) 今野宏卓, 斎藤正三郎, 前田 四郎, 化学工学, 31, 243 (1967).

これは森ら¹⁰⁾ が粉じん速度分布は空間性も持っているという壁面衝突や相互衝突もあり、ガス流線と異なる方向にも移動しているし、Soo ら⁹⁾ が得ているようにガス速度分布も粉じんが含まれると変化するので、以上の仮定が完全に満足されない要素が多く十分予想されるところである。

さて実験式 (4) は一応このように説明できるが、以上の考え方は管路内を流れるガスも粉じんもいろいろな方向で運動しているが、平均的動きを考えてみると水平分布については両者に相違のあることに注目して粉じん濃度分布を説明したものである。

すなわち、このような混相流においては水平位置の相違による粉じんのガスに対する相対速度の差、いいかえればスライディングの相違が主として粉じん濃度分布を生じているという考えを基礎にしている。そしてこれはガス速度は管路壁面で容易に壁面摩擦で低下するが、粉じんのようにな一粒一粒かなりの質量を持っているものはガスに比較して大きな慣性を持っているので、ガスのように壁面の影響で減速される程度が少なく、これと衝突すれば管路中心にもどって再び加速されるので、混合もよくその存在も一様性を保つという考えに基づいているわけである。

このようなことから、粉じんはその慣性が大きい場合ほど一様に混合して壁面により減速されがたく、より大きい濃度分布程度を持つものと予想されるが、これは図 5 において粉じん粒径の大きい場合ほど大きい分布を示す傾向を持つことからもうかがえることである。

そしてこのことを確かめるため、同様な実験を試料粉じんやガス速度を変え、 $z=0$ 以外の位置でも試みて n を求め、これと粒子の慣性との関係を検討してみた。

この場合、粉じんの慣性を示す方法として初速 u_p で静止流体中に粉じんを投射する場合、それが完全に停止するまでの運動距離を管路代表寸法としての相当半径 r との比で示して、無次元数とした (13) 式で与えた慣性パラメーターと同じ意味を持つ値 ϕ で示し、 n と ϕ との関係求めた。

$$\phi = \frac{\rho_p u_p D_p^2}{18 \mu r} \quad (13)$$

ϕ : 粉じんの慣性を示すパラメーター (—), ρ_p : 粉じんの密度 (g/cm³), u_p : 粉じんの速度 (m/sec), D_p : 粉じんの直径 (cm), μ : 空気の粘度 (g/cm·sec), r : 管路の相当半径 (m)

なお ϕ の計算にあたり D_p としては粉じんの代表直径として表 1 に示した中位径をとり、 u_p としては実験した場合の煙道管路内平均ガス速度を用いた。

図 6 ϕ と n

図6はこの結果得た n と ψ との関係で予想したように ψ の増加とともに n は増加し、両者は(14)式の関係があることが認められ、以上の考え方を確かめることができた。

$$n = 0.19 \psi^{0.97} \quad (14)$$

また(14)式から n はそう大きい値をとらないので、一般に水平分布は大きいものでないと考えられる。

3・2・2 垂直分布 図7は煙道中心を通る粉じん濃度の垂直分布の測定例を示したものである。

このように粉じん濃度は重力の影響で管路下面ほど濃くなる傾向にあり、すでに新津ら⁸⁾が(3)式の関係を得ており、これを今野ら¹¹⁾も確認しているが、図7の結果は傾向としてよく似ているが、必ずしも(3)式関係を完全に満足していない。

すなわち図7から認められるように、著者らの得た結果では垂直分布は(3)式のように連続的に変化するのではなく、管路中心付近で粉じんの等濃度帯の存在も認められ、この点上述の n の小さいことと合わせてばいじん採取に明るい見通しを与えている。

図7 粉じん濃度の垂直分布

ガス流速 —●—: 9.5 m/sec, --○--: 11.1 m/sec, —○—: 15.7 m/sec, —○—: 18.7 m/sec

さらにガス流速が大きい場合、管路上壁面でも部分的な粉じん濃度の増加の傾向のあることが認められるが、これは前述の水平濃度分布における管路壁面付近の濃度増加と同様に、ガスと粉じんの慣性差による両者のスライディングの差に原因する粉じん濃度の増加の傾向が、重力沈降による濃度減少のそれよりも大きくなっていることが原因と考えられる。

そして図7の結果が(3)式を満足しなかった原因については詳細は明らかでないが、新津ら⁸⁾、今野ら¹¹⁾の実験では測定点のとり方、装置の大きさ、粒子の粒径、混合比等が著者らの場合と異なっている。

以上のことから、粉じん濃度の垂直分布は重力のみでなく、管路壁面によっても影響され、重力の影響が等しい水平分布に比較してかなり複雑に変化するものと考えられる。

3・3 粉じん濃度分布から考えたばいじん採取簡易化

以上述べたように、しばしばばいじん濃度の測定対象となる水平直管煙道内の含じん気流のような希薄混相流中の粉じん濃度分布は、ガスと粉じんの速度差がかなり影響するものと考えられ、水平分布についてはよい規則性が認められたが、垂直分布については広い範囲の等濃度帯の存在が認められたとはいえ、必ずしもよい規則性は確認できなかった。

このため JIS Z 8808 に規定する測定点におけるばいじん濃度を簡単に見積るには水平分布の規則性を用いて、これが相似性を持つと仮定し、次のようにすればよいのではないかと考えられる。

すなわち、図8に示したように煙道断面を m 列、 l 段に分割し ml 個の測定点 $P_{11} \sim P_{ml}$ を必要とする場合、各段と同一水平線上にそれぞれあって、煙道中心を通る l 個の測定点 $P_{c1} \sim P_{cl}$ におけるばいじん濃度を実測し、粉じん粒径と煙道排ガスの性状とから(4)式における定数 n を計算して測定点の属する各段の水平濃度分布をそれぞれ求め、他の測定点のばいじん濃度を見積って、これを JIS Z 8808^{1,2)}の規定により平均するのである。

図8 測定点の簡略化

このようにすれば JIS^{1,2)}に規定する各測定点でのばいじん採取はかなり簡略化でき、採取時刻の相違による測定結果への影響もかなり防止できると考えられる。

また $P_{c1} \sim P_{cl}$ における平均濃度を一つのばいじん捕集器で等時間ずつ順次ばいじん採取して行なう移動採取法で得れば、以上の操作はさらに簡易化できよう。

そして水平分布が前述のように少なく、垂直分布も等濃帯があるため、このような直管煙道においては中心一点の採取でもかなりよい結果が得られるので、一点採取しか行なうことができそうもない自動ばいじん濃度測定装置の開発も測定位置さえ選べば、測定点の点では十分可能性のあるものであることがわかった。