

スリットプローブによる粉じん濃度測定誤差*

吉田英人** 大杉 健***
増田弘昭** 井伊谷 鋼 一****

Dust Sampling Error Using a Slit Probe

by

Hideto YOSHIDA

(Department of Chemical Engineering, Kyoto University, Kyoto)

Takeshi OHSUGI

(Nihon Kogyo Co., Ltd., Okayama)

Hiroaki MASUDA and Koichi IINOYA

(Department of Chemical Engineering, Kyoto University, Kyoto)

To examine the error in measuring particle concentration due to anisokinetic sampling over a wide range of inertia parameters, theoretical and experimental studies have been conducted by using methyleneblue-uranine aerosol generated by a spinning disk and lycopodium spores in the small and large inertia regions, respectively. The theoretical results obtained assuming potential flow agree well with the experimental values in the small inertia region. On the other hand, the experimental result is smaller than the theoretical one in the large inertia region. It is also recognized that the concentration error becomes smaller as the sampling velocity becomes extremely high. The amount of particles deposited in a probe is also examined to show that this amount cannot be ignored in practical applications.

(Received Dec. 19, 1975)

緒 言

気流中の粉じん濃度をサンプリングによって測定するには等速吸引を行わないと誤差が生じる。しかし、測定装置の都合などで等速吸引ができない場合も多く、非等速サンプリングによる濃度測定誤差を知る必要がある。円形プローブの非等速サンプリング濃度誤差については、従来からの実験式⁴⁾や半理論式¹⁾が提出されており、筆者らの検討⁵⁾もある。一方スリットプローブについては Bartak²⁾の研究があるが、詳しい検討はない。しかし、スリットプローブは円形プローブと比較して実用上便利であるし、同一粒子慣性パラメータで吸引流量を大きくできるなどの特長がある。ここでは、スピニングディスクより発生した粒径 3~4 μm 程度のエアロゾルおよび 30 μm 程度の石松子を用いて、慣性パラメータの広い範囲にわたる実験を行なうとともに数値計算による理論解析を行なった。

1 理論計算

サンプリングプローブまわりの流れをポテンシャル流と仮定すると、無次元化した流れ関数は次のラプラスの方程式を満足する。

$$\frac{\partial^2 \bar{\psi}}{\partial \bar{x}^2} + \frac{\partial^2 \bar{\psi}}{\partial \bar{y}^2} = 0 \quad (1)$$

また、流れの \bar{x} 方向および \bar{y} 方向の速度はそれぞれ次式で表わされる。

$$\bar{u}_x = \frac{\partial \bar{\psi}}{\partial \bar{y}}, \quad \bar{u}_y = -\frac{\partial \bar{\psi}}{\partial \bar{x}} \quad (2)$$

一方粒子の運動方程式は次式で近似的に表わされる。

$$\left. \begin{aligned} P \frac{d^2 \bar{x}}{d\bar{t}^2} &= -\frac{C_D R_{ep}}{24} \left(\frac{d\bar{x}}{d\bar{t}} - \bar{u}_x \right) + \frac{\rho_p D_p^2 g}{18 \mu u_0} \\ P \frac{d^2 \bar{y}}{d\bar{t}^2} &= -\frac{C_D R_{ep}}{24} \left(\frac{d\bar{y}}{d\bar{t}} - \bar{u}_y \right) \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

ただし上式で C_D , R_{ep} は次式で表わされる。

$$\left. \begin{aligned} C_D &= \frac{24}{R_{ep}} (1.0 + 0.15 R_{ep}^{0.687}) \quad (0 < R_{ep} < 800) \\ R_{ep} &= R_{ep0} \sqrt{\left(\frac{d\bar{x}}{d\bar{t}} - \bar{u}_x \right)^2 + \left(\frac{d\bar{y}}{d\bar{t}} - \bar{u}_y \right)^2}, \\ R_{ep0} &= \frac{D_p \mu_0 \rho}{u} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

* 原稿受理 昭和50年12月19日

** 京都大学工学部 京都市左京区吉田本町

*** 日本鉱業(株) 倉敷市水島高砂町

**** 正会員 京都大学工学部 京都市左京区吉田本町

プローブ充分前方および後方では流れは一樣流であると仮定し, (1)式を緩和法によって解くと, (2)式から速度分布が得られる. これを(3)式に代入して数値積分を行なうと, 粒子軌跡が得られる. 種々の初期位置に対し同様の計算を行なって, 限界粒子軌跡を求めれば, 非等速吸引誤差が計算できる. Fig.1 は計算領域を示したものである. なお吸引速度が速いときは Fig. 1 の領域を拡大して速度比0.15まで計算した. Fig.2 はストークス則を用い, 重力を無視した場合の計算結果である. Bartak²⁾が Schwarz-Christoffel 変換を使用して計算したものと比較してあり, ほぼ数値解と一致している. また速度比が1以下の領域では, 濃度誤差 $(1-c/c_0)$ は一度大きくなった後再び小さくなる傾向が現われている. すなわち, 非常に高速で吸引すれば

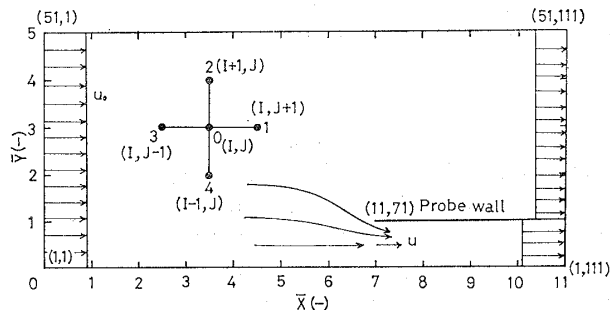


Fig. 1. Calculated region of anisokinetic sampling errors.

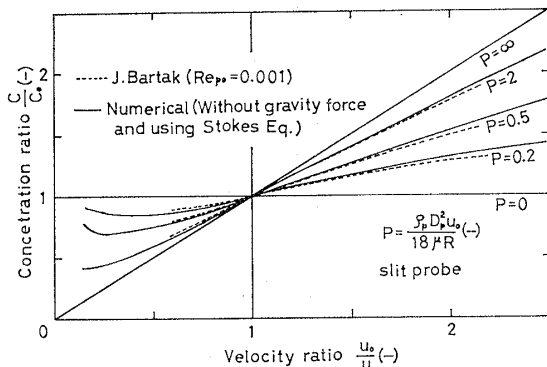


Fig. 2. Calculated concentration-ratio as a function of inertia parameter.

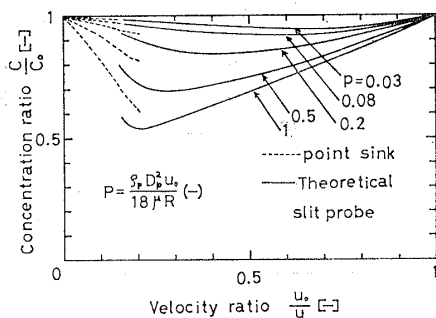


Fig. 3. Calculated results of anisokinetic sampling errors in a low velocity ratio region.

濃度誤差はかえって小さくなると思われる. Fig.3 は速度比 u_0/u が1以下の領域における計算結果である. 実線は上記の計算結果であり, 破線は点吸引とした場合である. 慣性パラメータ P が 0.08 以下では両者はよく一致している. 点吸引の濃度比が高い理由は, プローブ外壁により吸引粒子の一部が妨害される効果がないためであろう.

2 実験装置および方法

実験装置の概略を Figs.4 および5に示す. Fig.4 は粒子慣性パラメータの小さい領域に対する装置で, この場合はスピニングディスク (E.R.C. 製) より発生したメチレンブルー・ウラニン粒子を用いた. 主流

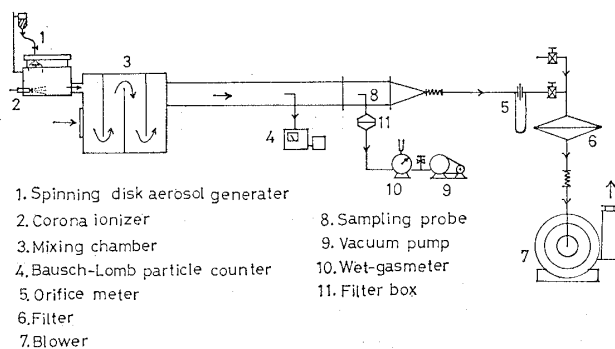


Fig. 4. Schematic diagram of horizontal experimental apparatus (methyleneblue-uranine produced by spinning disk generator).

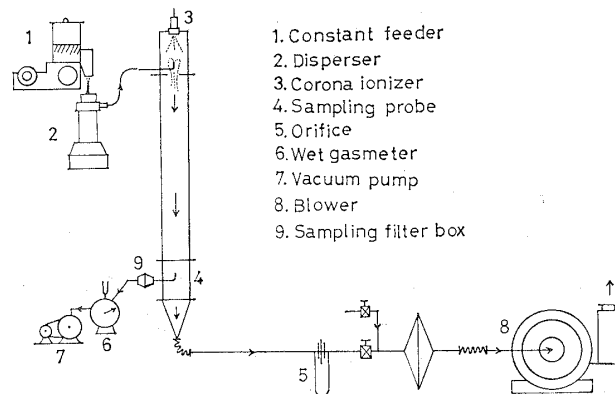


Fig. 5. Schematic diagram of vertical experimental apparatus (lycopodium spores).

濃度を安定させるため, スピニングディスク出口に混合室 (800×800×1000) を取り付け, さらに静電気中和器を用いた. なお静電気中和器を用いない場合, 発生粒子は凝集しており, 濃度変動も大きい. 主流濃度は光散乱式濃度計 (Bausch & Lomb 製) を用いて常時監視し, 一方等速サンプリングによって真の濃度を測定した. また, サンプリングしたメチレンブルー・ウラニン粒子は一定量の溶媒 (エチルアルコールと水の4対1混液) に溶解させ, 比色計によって定量した. Fig.5 は慣性パラメータの大きい領域に対する装置で, 試料粉体として石松子を用いた. この場合, 水平流に

すると数 m/s 程度の流速で管底部に粒子が堆積したため、鉛直下降管で実験を行なった。粉体はオートフィーダ（粉研製）からミキサー形分散器（島津製）を通して測定管内に供給した。また粒子の電荷を除去するため、同図に示すように静電気中和器（E. R. C. 製）を取り付けてある。なお、低風速では管壁に粒子が沈着したため、一定時間ごとにハンマリングを行ない、沈着を防いだ。

いずれの装置も、サンプリング部は透明アクリル製を用いており、プローブの向きおよび管内での粒子沈着の様子を観察できる。なお吸引流量は湿式ガスメータあるいはロータメータを用いて測定し、主流風速は定温型熱線風速計（日本科学工業製）によって測定した。使用プローブの入口寸法は、幅 0.3 cm、長さ 3 cm であり、フィルタ容器の概略と併せて Fig. 6 に示す。主な実験条件を Table I に示す。

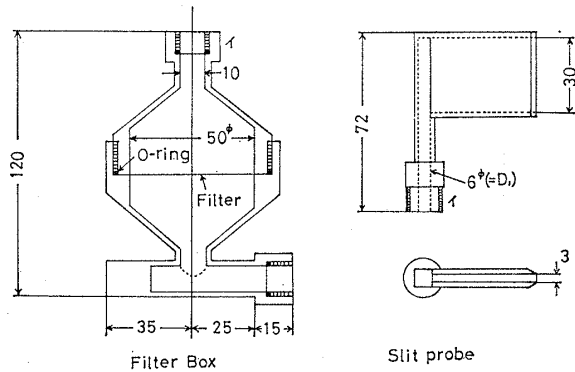


Fig. 6. Sampling probes and filter box.

Table I. Experimental conditions.

Particle	\bar{D}_p (wt mean)	σ_g	ρ_p	
Lycopodium spores	32.9 μm	1.09	1.05 g/cm ³	
Methyleneblue-uranine	3.47 μm	1.07	1.42 g/cm ³	0.21 wt %
Methyleneblue-uranine	4.28 μm	1.07	1.42 g/cm ³	0.5 wt %
Gas velocity in duct	$u_0 = 0.2 - 8.0 \text{ m/s}$			
Inertia parameter	$P = 0.035 - 11.7 (-)$			
Flow Reynolds number	$Re_{ef} = (1.07 - 42.6) \times 10^3 (-)$			

3 実験結果および考察

フィルタ捕集量およびプローブ内沈着量から求めた粉じん濃度を c_f 、 c_p とし、等速吸引時のそれらを c_{0f} 、 c_{0p} とすると、濃度比 c/c_0 は次式で計算される。

$$\frac{c}{c_0} = \frac{c_f + c_p}{c_{0f} + c_{0p}} \quad (5)$$

実験結果を上式によって整理し、プローブ内沈着率の全捕集量に対する影響を調べた。Fig. 7 はプローブ内沈着率とプローブ内レイノルズ数の関係を示したも

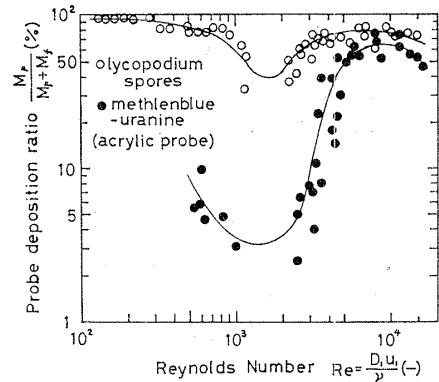


Fig. 7. Relationship between deposition-ratio and Reynolds number in a slit probe.

のである。エアロゾルは主にスリットプローブ内部および下流の円形管路部分に沈着したのでレイノルズ数はこの部分における値を採用した。メチレンブルー・ウラニン粒子のときも、石松子のときもレイノルズ数 2000 程度に沈着率の極小値が存在するのがわかる。なお石松子の沈着率がメチレンブルー・ウラニン粒子より大きいのは、主として粒子慣性の差異によるものと考えられる。さらにレイノルズ数 10000 以上で少しプローブ内沈着率が低下しているのは、吸引速度が大きいためプローブ内壁に沈着した粒子が再飛散するためと考えられる。

Fig. 8 は全捕集量から求めた濃度比と速度比の関係を、メチレンブルー・ウラニン粒子を使用した場合について示したものである。実験値はほぼ流れをポテンシャル流とした数値解と一致している。この場合粒子に働く重力、および抵抗係数の Stokes 域からの偏倚を考慮しても、その影響はほとんどなかった。

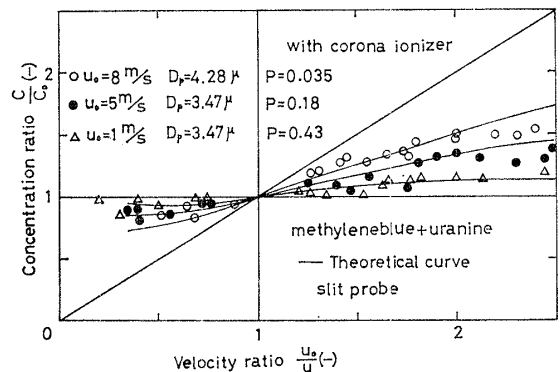


Fig. 8. Anisokinetic sampling errors for small particles (methylene-blue uranine particles).

Fig. 9 は石松子を使用した場合の濃度比と速度比の関係である。理論値は重力および抵抗係数の Stokes 域からの偏倚を考慮した場合であるが、実験値より濃度誤差を大きく評価している。

この理由として粒子物性に問題があること、スリッ

*2 ここでは顕微鏡法による平均粒径を使用したか、この値は沈降速度より計算した相当径より大きい値となっており、後者を代表径として使用すれば、実験値はより理論値に近づく。

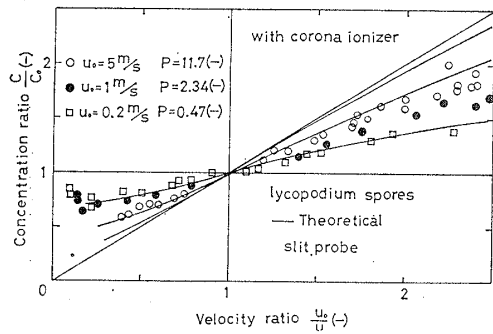


Fig. 9. Anisokinetic sampling errors for large particles (lycopodium spores).

トプローブ入口での長さ方向 (z 方向) に気流速の分布が若干あること, 管内濃度分布の影響があること, およびエッジをつけてあるが, プローブ先端の壁厚, さらにプローブ壁厚による前方気流の乱れが生じ, これらが濃度誤差に影響を与えていると考えられる。

粒子慣性の小さい領域における実験値は, 速度比 u_0/u が 1 以下のところで u_0/u の低下とともに, 一度低下した後再び上昇する傾向がある。このことから, 主流濃度 c_0 を得るためには従来から行なわれている等速吸引法の外に, 吸引速度を極度に速くする方法が考えられる。

結 言

スリットプローブを用いて粒子慣性の広い範囲にわたる非等速吸引誤差の理論的および実験的検討を行ない次のような結果が得られた。

(1) 実験による濃度誤差はポテンシャル流を仮定した計算値とほぼ一致する。しかし粒子慣性の大きい領域の濃度誤差は理論値よりやや小さい。

(2) 吸引速度を極端に大きくすると, 測定誤差はかえって小さくなることを, 理論的および実験的に認めた。

(3) プローブ内レイノルズ数 2000 以上に大きくすると, プローブ内壁への粒子沈着量が多くなり, この量も実用上無視できない。

Nomenclature

c : measured concentration	(g/l)
c_0 : main flow concentration	(g/l)
c_f : concentration calculated from particle mass collected on filter	(g/l)
c_{of} : concentration calculated from particle mass collected on filter under isokinetic condi-	

tion (g/l)

c_p : concentration calculated from particle mass deposited on inside wall of probe and filter box (g/l)

c_{op} : concentration calculated from particle mass deposited on inside wall of probe and filter box under isokinetic condition (g/l)

C_D : drag coefficient of particulate (—)

D_1 : inner diameter of probe (=0.6 cm) (cm)

N : particle number concentration (1/cm³)

P : ($=\rho_p D_p^2 u_0 / 18 \mu R$) inertia parameter (—)

R_e : $\frac{D_1 u_1 \rho}{\mu}$ Reynolds number in sampling probe (—)

R_{ef} : Reynolds number in duct (—)

R : half of slit width (=0.15 cm) (cm)

\bar{t} : ($=t u_0 / R$) dimensionless time (—)

\bar{x} ($=x/R$), \bar{y} ($=y/R$) : dimensionless co-ordinates (—)

u_1 : velocity in probe (cm/s)

u_0 : main flow velocity (cm/s)

u : sampling velocity (cm/s)

\bar{u}_x ($=u_x/u_0$), \bar{u}_y ($=u_y/u_0$) : dimensionless fluid velocity (—)

$\bar{\psi}$: dimensionless stream function (—)

ψ : stream function (cm³/s)

ρ_p : particle density (g/cm³)

ρ : gas density (g/cm³)

μ : gas viscosity (g/cm · s)

(昭和50年11月19日 第13回粉体に関する討論会にて講演)

参 考 文 献

- 1) Badzioch, S., Brit. J. Appl. Phys., **10**, 26 (1959).
- 2) Bartak, J., Staub, **34**, 8 (1974).
- 3) Belyaev, S.P., and L.M. Levin, Aerosol Science, **3**, 127 (1973).
- 4) Davies, C. N., Brit. J. Appl. Phys., Ser. 2, **1**, 921 (1968).
- 5) 吉田英人, 大杉 健, 増田弘昭, 湯 晋一, 井伊谷綱一, 化学工学論文集, **2**, 4, 336 (1976).