研究報告

極低速サンプリングにおける粉じん濃度測定誤差*

Dust Concentration Measurement in Extremely Lower Sampling Velocity

吉田 英 人** 飯 井 康 美***
Hideto Yoshida Yasumi Ii

増 田 弘 昭** 井伊谷 鋼 一***
Hiroaki Masuda Koichi Iinoya

1. 緒 言

固・気二相流の濃度測定には通常等速吸引サンプリングが用いられるが、吸引装置などの制限で等速吸引を実施できない場合には、濃度測定誤差を生ずる。これに関し等速からのずれが小さい場合の測定誤差は Davies¹⁾, Watson²⁾, Levin³⁾および筆者ら⁴⁾によってほとんど解明されているが、プローブ吸引速度のきわめておそい場合の濃度誤差はまだ検討されていない。工場などの管路中の主流風速は 10~25m/s 程度であり、測定誤差をさけるために、大口径プローブ⁵⁾を用いると吸引装置系統が大型となるので、できれば低速または極低速吸引を行なった方が便利な場合が多いと考えられる。そのためには、この領域での濃度推定法を確立する必要がある。またパーティクルインパクトの粒子分級部は、低速吸引を利用しており、その分級特性の解明に対しても本報の結果はある程度参考になるであろう。

本報では理論計算を行なうとともにストークス径 24 μm の石松子を用いて実験を行ない、サンプリング効率に及ぼす主流風速とプローブ入口形状の影響を調べた。また実験値を理論計算結果と比較し、等速吸引をしなくてもその誤差を補正して、正しい濃度を推定できる可能性があるかどうかを検討した。

2. 理論計算

流れを粘性流とした場合の無次元化した Navier-Stokes の式、連続の式、渦度 ω および流れ関数 ψ の定義式から、Eqs. (1), (2)が得られる。

$$\begin{aligned} & \bar{r}^2 \left[\frac{\partial}{\partial \bar{z}} \left(\frac{\bar{\omega}}{\bar{r}} \cdot \frac{\partial \bar{\psi}}{\partial \bar{r}} \right) - \frac{\partial}{\partial \bar{r}} \left(\frac{\bar{\omega}}{\bar{r}} \cdot \frac{\partial \bar{\psi}}{\partial \bar{z}} \right) \right] \\ &= \frac{2}{Re} \left[\frac{\partial}{\partial \bar{z}} \left(\bar{r}^3 \frac{\partial \left(\frac{\bar{\omega}}{\bar{r}} \right)}{\partial \bar{z}} \right) + \frac{\partial}{\partial \bar{r}} \left(\bar{r}^3 \frac{\partial \left(\frac{\bar{\omega}}{\bar{r}} \right)}{\partial \bar{r}} \right) \right] \end{aligned} \quad \dots\dots(1)$$

$$\begin{aligned} \bar{\omega} &= -\frac{\partial}{\partial \bar{z}} \left(\frac{1}{\bar{r}} \cdot \frac{\partial \bar{\psi}}{\partial \bar{z}} \right) - \frac{\partial}{\partial \bar{r}} \left(\frac{1}{\bar{r}} \cdot \frac{\partial \bar{\psi}}{\partial \bar{r}} \right) \\ \text{ただし } Re &= \frac{2Ru_0 \rho}{\mu} \end{aligned} \quad \dots\dots(2)$$

また流れの半径方向および軸方向速度は次式で表わされる。

$$\bar{u}_r = -\frac{1}{\bar{r}} \cdot \frac{\partial \bar{\psi}}{\partial \bar{z}}, \quad \bar{u}_z = \frac{1}{\bar{r}} \cdot \frac{\partial \bar{\psi}}{\partial \bar{r}} \quad \dots\dots(3)$$

一方粒子の運動方程式は近似的に次式で表わされる。

$$\left. \begin{aligned} P \frac{d^2 \bar{r}}{d\bar{t}^2} &= -\frac{C_D Re_p}{24} \left(\frac{d\bar{r}}{d\bar{t}} - \bar{u}_r \right) \\ P \frac{d^2 \bar{z}}{d\bar{t}^2} &= -\frac{C_D Re_p}{24} \left(\frac{d\bar{z}}{d\bar{t}} - \bar{u}_z \right) + G \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots(4)$$

昭和54年5月1日受付

*化学工学北陸大会(1976.7 富山)および化学工学秋季大会(12回)(1978.10 岡山)で一部発表

**広島大学工学部化学工学科(〒730 広島市千田町3-8-2)
TEL 0822-41-1161

***京都大学工学部化学工学教室(〒606 京都市左京区吉田本町)
TEL 075-751-2111

ただし G は重力沈降パラメーターを、 P は粒子慣性パラメーターを示し、それぞれ次式で表わされる。

$$G = \frac{\rho_p D_p^2 g}{18 \mu u_0}, \quad P = \frac{\rho_p D_p^2 u_0}{18 \mu R} \quad \cdots \cdots (5)$$

さらに Eq. (4) の Re_p は次式で表わされる粒子レイノルズ数である。

$$Re_p = Re_{p0} \sqrt{\left(\frac{d\bar{r}}{dt} - \bar{u}_r\right)^2 + \left(\frac{d\bar{z}}{dt} - \bar{u}_z\right)^2},$$

$$Re_{p0} = \frac{D_p u_0 \rho}{\mu} \quad \cdots \cdots (6)$$

Eqs. (1), (2) をプローブ口径を考慮した境界条件のもとで数値計算（風上階差法）により解き、求められた流体速度成分を Eq. (4) 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て同様の計算

Fig. 1 Calculated relations between sampling efficiency and velocity ratio based on the conventional theory (lower velocity-ratio region)

Fig. 2 Calculated streamlines near sampling probe inlet

を行ない、プローブ入口先端を粒子捕集の限界点として限界粒子軌跡を求めれば、低速吸引時のサンプリング効率が計算できる。

Fig. 1はその計算結果の一例であり、実線は数値解を、破線は次式に示すDavies¹⁾の実験式から求めた値である。

$$\frac{c}{c_0} = \frac{u_0}{u} \left(\frac{P}{P+0.5} \right) + \frac{0.5}{P+0.5} \quad \cdots \cdots (7)$$

なお上式は次のように変形することができる。

$$\eta = \frac{c u}{c_0 u_0} = \frac{P}{P+0.5} + \frac{u}{u_0} \left(\frac{0.5}{P+0.5} \right) \quad \cdots \cdots (8)$$

この図より粒子慣性パラメーター P が0.5以上で速度比が0.1以下ならばサンプリング効率の理論値はプローブ吸引速度によらずほぼ一定値を示すことがわかる。なお Fig. 1は重力の影響を無視($G=0$)してある。

Fig. 2は速度比が0.05で流れレイノルズ数が3000の条件におけるプローブ入口近傍での流線の計算結果を示したものである。無次元化流れ関数 $\bar{\psi}=0.025$ の流線とプローブ内壁とがほぼ直交しており、この交点位置(図中のA点)はプローブ入口先端より若干内部に入っている。

Fig. 3は速度比0.05で流れレイノルズ数3000の条件において重力沈降パラメーター G の変化により効率がどう変化するかを計算したものであり、実線は下降流の、点線は上昇流の場合である。ただし上昇流ではプローブ十分前方の初期粒子速度は主流速度より粒子沈降速度だけ小さくまた下降流の場合はその逆であると仮定して計算した。当然ながら下降流では重力沈降パラメーターの増大とともに効率は上昇し、一方上昇流ではその逆となる。しかし、 $G=0.025$ 以下では上昇流、下降流の両者の場合とも重力沈降パラメーターの変化は効率にはほとんど影響を与えないことがわかる。

Fig. 4は流れレイノルズ数の変化により効率がどう変わるかを計算したものであり、計算条件として重力沈降パラメーター $G=0$ で、粒子はストークス則に従って運動するとし、また速度比 $u/u_0=0.05$ の場合である。この図よりサンプリング効率は流れレイノルズ数の上昇とともに大きくなるが、その変化量は低レイノルズ数領域で大きく、 $Re=100$ と3000とではほとんど解に差がない。

Fig. 5は主流速度基準の粒子レイノル

Fig. 3 Calculated relations between sampling efficiency and inertia parameter for various gravitational parameters based on the conventional theory

Fig. 5 Calculated relations between sampling efficiency and inertia parameter for various free stream Reynolds numbers based on the conventional theory

Fig. 4 Calculated relations between sampling efficiency and inertia parameter for three fluid Reynolds numbers based on the conventional theory

Fig. 6 Various kinds of Sampling probes

ズ数 $Re_{p0}(D_p u_0 \rho / \mu)$ により効率がどうかわるかを計算したものであり、計算条件として重力沈降パラメーター $G=0$ 、速度比 $u/u_0=0.1$ の場合である。粒子がストークス則に従って運動する場合がもっとも効率が高く、主流速度基準粒子レイノルズ数の増大とともに効率が低下することがわかる。

3. 実験装置および方法

使用した実験装置は前報⁵⁾と同様なのでここでは省略する。試料粉体として、ストークス径 $24\mu\text{m}$ 、粒子密度 1.05g/cm^3 の石松子を使用した。粉体はオートフィーダー（粉研特製）からミキサー型分散器（島津製作所製）を経て測定管内に供給した。また粒子の電荷を除去する

目的で静電気中和器（米国 E. R. C. 社製）を使用した。サンプリングは 3 インチ鉛直下降管下部で行ない、テストセクションでは試験プローブ（非等速吸引用）と基準プローブ（等速吸引用）とを並列に配置し、両者の捕集量の比から実験サンプリング効率を求めた。なお実験に際し、プローブ内壁および導管内壁粒子付着量も秤量して効率を求めた。

Fig. 6 に実験に使用した各種のプローブを示す。材質は透明アクリル製であり、No. 5 以外のプローブはプローブ入口内壁での粒子の再飛散を防止する目的で、断面積を入口直後で縮小してある。No. 1 から No. 3 のプローブは入口先端から内部断面積が減少するまでの距離を

それぞれ 2.5mm, 7.5mm, 5.0mm とし, No. 4 のプローブ内部には紡錘形コアを取付けてある。

4. 実験結果および考察

主流速度 3m/sec の場合の実験結果を Fig.7 に示す。実線は前節で述べたように粒子捕集の限界点をプローブ先端とした理論値 (前出の Figs. 1, 3, 4, 5) であるが, 実験値はこの理論値より小さくなっている。観察によると, プローブ入口付近の内壁には粒子が付着しておらず, ある程度距離をおいて奥の方に付着していることがわかった。これはプローブ内壁に衝突した粒子の一部が反転気流 (Fig. 2 参照) によって主流にもどされたため

Fig. 7 Comparison of calculated and experimental relations between sampling efficiency and velocity ratio ($u_0=3\text{m/s}$)

Fig. 8 Experimental relation between reentrainment length and sampling velocity ratio

と考えられる。(以後この再飛散を便宜的に入口部再飛散と呼ぶ)。内径 2.8cm のプローブを用いて, さらに詳しく検討した結果, Fig. 8 に示すようにプローブ内壁への粒子沈着が生じる位置 (実測, 黒丸) は気流よどみ点 (理論, Fig. 2 の A 点) のプローブ入口からの距離 b とほぼ一致した。この観察実験ではサンプリング時間は約 1 分間としたが, 5 分間程度にすると粒子沈着の生じる位置が明確ではなくなり, よどみ点より奥の捕集粉体がくずれた様子が観察された。これは, よどみ点近傍の捕集粉体量が平衡に達すると, 何らかの原因によってそれ以上は粒子を捕集できないためと考えられる。Fig. 7 の破線は上記 Fig. 8 の結果を考慮し, プローブ内壁での気流よどみ点を粒子分離点とした新しい理論線である。実験値はこの新理論線とほぼ一致している。

Fig. 9 は主流速度が 6m/s の場合について, 形状の異なるプローブを用いて実験した結果である。No. 3 のプローブによる実験値は他と比べて新理論線 (破線) に近いが, 内部の流路をしぼってプローブの入口後の速度を速くするという本実験の範囲ではプローブ形状の差異による効率の変化は余り大きくない。しかし, プローブ内部を拡大し, 流速を逆に遅くする場合について検討する余地はあろう。速度比 $u/u_0=0.2$ 以下の領域での実験値が新理論線よりもさらに低いのは, 前述のようにプローブ内気流よどみ点より奥で捕集されるべき粒子の一部も捕集粉体層のくずれによって再飛散 (以後これを内部再飛散と呼ぶ) したためと考えられる。

Fig. 10 は主流速度 15m/s の場合, Fig. 11 は 24m/s の場合の実験結果である。これらの実験では No. 5 のプローブを用いた。内部再飛散が生じはじめる時の速度比の

Fig. 9 Comparison of calculated and experimental relations between sampling efficiency and velocity ratio ($u_0=6\text{m/s}$)

Fig.10 Comparison of calculated and experimental relations between sampling efficiency and velocity ratio ($u_0=15\text{m/s}$)

Fig.11 Comparison of calculated and experimental relations between sampling efficiency and velocity ratio ($u_0=24\text{m/s}$)

値は主流速度15m/sおよび24m/sに対してそれぞれ0.06および0.04程度になっている。**Fig.12**に主流速度 u_0 と、内部再飛散が生じはじめる限界のサンプリング速度の関係を示す。この図より次の実験式がえられる。

$$u^* = 0.3 \sqrt{u_0} \quad \dots\dots(9)$$

あるいは

$$u^*/u_0 = 0.3 / \sqrt{u_0} (< 1) \quad \dots\dots(10)$$

すなわち速度比を一定に保った場合、主流速度が遅いほど内部再飛散を生じやすい。

以上の実験結果は試料粉体の粒径が比較的大きく再飛散を生じやすい場合であるが、実用的には、少なくともEq.(9)で与えられる速度以上でサンプリングすべきであ

Fig.12 Experimental relation between critical reentrainment velocity and main flow velocity

Fig.13 Calculated relation between sampling efficiency and velocity ratio based on the new theory (lower velocity ratio region)

ろう。なお粒径が小さくなると、粒子物性（付着性）などにも依存するが、粒子は再飛散を生じにくくなると推定され、その場合はEq.(9)の定数が0.3よりも小さくなる。したがってEq.(9)で与えられる限界のサンプリング速度以上で吸引すれば安全側に評価されることになり、再飛散は生じないと考えられる。たとえば、主流速度20m/sの場合のサンプリング流量は等速サンプリングのときの約1/15で済むことになる。速度比 u/u_0 が0.5以上では入口部再飛散はあっても粒子の再飛散による誤差は小さいので Davies の実験式(7)あるいはより正確には**Fig. 1**の実線で示される計算結果を用いて補正すれば真の濃度を推定できる。また速度比が0.5以下で入口部再飛散が生じている場合（観察によって容易に判別できる）には、次に示す**Fig. 13**を用いて補正すればよい。**Fig.13**は気流よどみ点を粒子分離点とした新しい理論計算結果をまとめたもので、破線部は本実験において内部再飛散が起こった部分（限界サンプリング速度 u^* 以下の部分）である。

5. 結 言

理論計算によって極低速サンプリングの粉じん濃度測定誤差を評価するとともに、石松子を用いて実験を行ない次の結論を得た。

- (1) サンプリング速度が主流速度の約1/2（速度比約0.5）以上でのサンプリング効率、粒子捕集限界点をプローブ先端とする理論計算（従来の方法）で推定できる。
- (2) 速度比が0.2～0.5の範囲では、プローブ入口からプローブ内気流よみ点までの壁面に衝突捕集されるはずの粒子が反転気流によって主流にもどることがある。この場合のサンプリング効率は粒子捕集限界点をプローブ

内気流よみ点とする新しい理論計算方法で推定できる。

- (3) 速度比が0.2以下では気流よみ点より奥に捕集された粒子も再飛散することがある。この再飛散が生じる速度比は主流速度が大きいほど小さくなる。
- (4) 理論計算によって、サンプリング効率は下降流の場合、重力沈降パラメーターの増加とともに上昇し、上昇流の場合はその逆となることを確めた。またプローブ径基準の流れレイノルズ数の増加によって効率は向上するが、その値が100以上の普通条件下での影響は無視できる。一方、主流速度基準の粒子レイノルズ数の増大によって効率は低下する。

Nomenclature

b : reentrainment length of probe inside	(cm)	ordinates	(—)
C_D : drag coefficient of particle	(—)	T : sampling time	(min)
D_p : particle diameter	(μm)	$\bar{u}_r (=u_r/u_0)$, $\bar{u}_z (=u_z/u_0)$: dimensionless fluid velocity components	(—)
$G (= \rho_p D_p^2 g / 18 \mu u_0)$: gravitational parameter	(—)	u : sampling velocity	(cm/s)
$P (= \rho_p D_p^2 u_0 / 18 \mu R)$: inertia parameter	(—)	u^* : critical reentrainment velocity	(cm/s)
R : probe radius	(cm)	u_0 : main flow velocity	(cm/s)
$Re (= 2Ru_0\rho/\mu)$: flow Reynolds number based on inlet diameter of sampling probe	(—)	$\bar{\omega} (= \omega R / u_0)$: dimensionless vorticity	(—)
$Re_p (= D_p v \rho / \mu)$: particle Reynolds number	(—)	$\bar{\psi} (= \psi / R^2 u_0)$: dimensionless stream function	(—)
$Re_{p0} (= D_p u_0 \rho / \mu)$: particle Reynolds number based on main flow velocity	(—)	ρ , ρ_p : fluid and particle density	(g/cm ³)
$\bar{r} (= r/R)$, $\bar{z} (= z/R)$: dimensionless cylindrical co-		μ : fluid viscosity	(g/cm ³ ·s)
		$\eta (= cu/c_0 u_0)$: sampling efficiency	(—)

引 用 文 献

- 1) Davies, C.N. : *Brit. J. Appl. Phys.*, Ser. 2, 1, 921 (1968)
- 2) Levin, L.M. and S. P. Belyaev ; *J. Aerosol Sci.*, 5 (1974)
- 3) Watson, H. H. : *Amer. Ind. Hyg. Assoc. Quart.*, 15, 21 (1954)
- 4) 吉田英人, 大杉健, 増田弘昭, 湯晋一, 井伊谷鋼一 : 化学工学論文集, 2, 4 (1976)
- 5) 吉田英人, 増田弘昭, 井伊谷鋼一 : 粉体工学会誌, 17, 117 (1980)

Authors' Abstract

Dust Concentration Measurement in Extremely Lower Sampling Velocity

Hideto YOSHIDA*, Yasumi II**, Hiroaki MASUDA* and Koichi IINOYA**

(*Dept. of Chem. Eng., Hiroshima Univ., Hiroshima, 730)
(**Dept. of Chem. Eng., Kyoto Univ., Kyoto, 606)

The sampling error in the measurement of particle concentration is studied both theoretically and experimentally for the case that the sampling velocity is lower than the main-flow velocity. When the

velocity ratio (ratio of the sampling velocity to the main-flow velocity) is larger than 0.5, the sampling efficiency is well predicted by the theory in which the end point of the critical trajectory is assumed, as usual, to coincide with the probe-inlet edge. On the other hand, the efficiencies for the velocity ratio between 0.2 and 0.5 are predicted by a modified theory in which the end point of the critical trajectory is assumed to coincide with the stagnation point of gas flow in the probe. In this range of the velocity ratio, returning flow entrains the particles which collide with the probe-inside wall between the inlet and the stagnation point.

When the velocity ratio is smaller than 0.2, even the particles deposited in the inmost recesses of the probe are reentrained.

The theoretical calculations show that the sampling efficiencies increase with increasing the gravitational parameter for the downward flow, while the efficiencies decrease with increasing the parameter for the upward flow. It is also found that the efficiency becomes larger when the flow Reynolds number increases and/or the particle-Reynolds number decreases.

List of Figures

- Fig. 1** Calculated relations between sampling efficiency and velocity ratio based on the conventional theory (lower velocity-ratio region)
- Fig. 2** Calculated streamlines near sampling probe inlet
- Fig. 3** Calculated relations between sampling efficiency and inertia parameter for various gravitational parameters based on the conventional theory
- Fig. 4** Calculated relations between sampling efficiency and inertia parameter for three fluid Reynolds numbers based on the conventional theory
- Fig. 5** Calculated relations between sampling efficiency and inertia parameter for various free stream Reynolds numbers based on the conventional theory
- Fig. 6** Various kinds of Sampling probes

- Fig. 7** Comparison of calculated and experimental relations between sampling efficiency and velocity ratio ($u_0=3\text{m/s}$)
- Fig. 8** Experimental relation between reentrainment length and sampling velocity ratio
- Fig. 9** Comparison of calculated and experimental relations between sampling efficiency and velocity ratio ($u_0=6\text{m/s}$)
- Fig.10** Comparison of calculated and experimental relations between sampling efficiency and velocity ratio
- Fig.11** Comparison of calculated and experimental relations between sampling efficiency and velocity ratio ($u_0=24\text{m/s}$)
- Fig.12** Experimental relation between critical reentrainment velocity and main flow velocity
- Fig.13** Calculated relation between sampling efficiency and velocity ratio based on the new theory (lower velocity ratio region)

研究速報

粉体食品の粒度測定について

Particle Size Determination of Powdered Foods

工藤 武雄* 林 弘通*
Takeo kudo Hiromichi Hayashi

1. まえがき

昭和54年3月22日受付

*雪印乳業(株)技術研究所(〒350 川越市南台1-1-2)
TEL 0492-44-0731

食品は主として炭水化物、脂肪、たん白質、無機物からなる。粉体食品は主として乾燥、粉碎などによって製造されたもので、その水分は2~10%のものが多く、一般に水分の多い食品は温度が高く、時間が長くなるにつれ