光電子増倍管による粒子径の測定*

Particle-Size Measurement by Photomultiplier

大 木 勝 弥**

Katsuya Ōki

明 畠 高 司**

Takashi Akehata

白 井 隆**

Takashi Shirai

緒 言

粒度分布の測定には多数の方法^{1,2)}があり、これまでも 10^{-6} mm 程度から数mm までの粒子に対しそれぞれの大きさに適した市販の測定装置が広く利用されている。これに関する成書も出版されている。たとえば40ミクロン以上の粒子の分別に対しては、通常、篩が用いられているが、篩目の精度や目詰り、篩分け時間の長短など、実際にはかなりの問題が多い。さらに篩分けしたサンプルの重量を逐一測定する手間を要するので能率は悪く、また乾いた固体以外の粒子には使えないという不便がある。

筆者らは、光電子増倍管を用いて、固体や液体粒子にかかわらず、少量のサンプルで、精度良く、手軽に粒径を測定する装置を開発し、良好な結果を得たので、ここに報告する。内容は、測定に利用した光学的な方法の原理、幾何光学に基づく関連した計算、装置の検定法および装置から得られた電気信号の処理についてである。

1. 測定原理

1.1 原 理

Fig. 1 の左方からスリットを通過して来た平行光線束 P と一定の面積を有する受光面との間に粒子が入ると、光の一部は、粒子によって反射や吸収を受けるために、受光面の照度は減少する。減少の度合は、粒子の光学的物性ならびに粒子径によってそれぞれ定まるものである。受光面照度減少を光電子増倍管を用いて電圧変化に変換、記録すれば、Fig. 1 の測定部を1個1個通過する粒子の径を、電圧ピーク値によってもとめることができる。

1.2 粒径と受光面の照度変化との関係

粒子が存在しているときの受光面 (面積 A_R) の照度減少 ΔF は、粒子の半径を R 、単位面積を通る平行光線束を I_0 とし、入射する平行光線束の中で、粒子表面に入射しても受光面には達しないものの割合を k とすると、

$$\Delta F = \pi R^2 I_0 k / A_R \quad \dots\dots(1)$$

で与えられる。 k の値がわかれば、粒子径と受光面の照度減少の関係が求められることになる。この k の値は粒子の光学的物性、粒子と受光面間の距離 S および受光部の面積 A_R に依存するので、これらの間の関係をまず計算によって求めてみる。ここでは光の波長より十分大きな粒子径を考え、簡単のため、形は球形とし、光の吸収がゼロの透明粒子および完全鏡面の粒子の二つの場合について、幾何光学的な方法³⁾で計算を行なった。

1.3 k の計算

Fig. 2 に示すように、右側から Y 軸に平行に、有限な仮想面積要素 $r_j \Delta r d\theta$ を通過して、粒子に入射する均一な光束の進路を1本の光線 P で代表させることにする。粒子の表面上 A 点に入射した光線は、同図に斜線で示し

Fig. 1 測定原理説明図

昭和47年11月17日受理

* 化学工学協会 東北大会にて発表 (1972.8 仙台)

東京工業大学 資源化学研究所 (〒152 目黒区大岡山2-12-1)

TEL 03-726-1111

Fig. 2 粒子に入射した光線の進路説明図

Fig. 3 H平面 (Fig. 2) 上の光線の進路説明図

たH平面上で、一部B方向に反射され、残りは粒子内部を通過してC点に達し、さらにその一部はD方向へ反射され、同様の反射および屈折を繰返す。一方、C点で屈折して粒子外のE方向へ向かった光線は、粒子から距離Sだけ離れた受光面のx軸上距離 l_x の点に達する。そこで光の進路とその角関係について、Fig. 2のH平面を改めて描き直したのがFig. 3である。この図で上方か

らY軸より距離 r_j のA点へ入射する光線Pの入射角 φ_1 および反射角 φ_0 は、屈折率をnとして、それぞれ、

$$\varphi_1 = \tan^{-1}(r_j / \sqrt{R^2 - r_j^2}) \quad \dots\dots(2)$$

$$\varphi_0 = \tan^{-1}(r_j / \sqrt{R^2 n^2 - r_j^2}) \quad \dots\dots(3)$$

であり、また、入射光線が*i*回目に($i \geq 2$)粒子と媒体との境界を通り抜ける時の入射角および屈折角は幾何学的にそれぞれ φ_0 および φ_1 と逆転する。

一方、光線が粒子から出て行く位置座標と方向は、Fig. 3に示した角度 U_i と V_i を用いてつぎのように求めることができる。まず、 U_i 、 V_i はそれぞれ、Eq. (2)および(3)の φ_1 と φ_0 を用いて、

$$U_i = 2i\varphi_0 - \varphi_1 + (\pi/2 - \varphi_1) + (i+1)\pi \quad \dots\dots(4)$$

$$V_i = \varphi_1 + i(\pi - 2\varphi_0) + \pi \quad \dots\dots(5)$$

したがって l_x はEq. (4)および(5)から次のようになる。

$$l_x = -(S - R \cos V_i) \cdot \cot U_i - R \sin V_i \quad \dots\dots(6)$$

また、Y軸から r_j の位置に入射した光線の強度は、面積要素 $r_j \Delta r \Delta \theta$ に入射した光束に比例するので、それを ρ_j とすれば、

$$\rho_j = \rho_1 \times (2j-1) \quad \dots\dots(7)$$

となる。ただし、 ρ_1 は面積要素 $(\Delta r)^2 \cdot \Delta \theta / 2$ を通過する光の強度を表わす。したがって、粒子の反射率を μ とすると、強度 ρ_j で、Y軸より r_j の位置に入射した後、粒子内部で*i*回反射を繰返して、粒子外へ出て行く光線の強度 I_j は反射の度にその μ 倍だけ強度が減衰することを考慮して、

$$I_j = \rho_j \times (1 - \mu)^2 \times \mu^{i-1} \quad \dots\dots(8)$$

となる。ただし、 μ はフレネルの式⁴⁾

$$\mu = \frac{1}{2} \left\{ \frac{\sin^2(\varphi_1 - \varphi_0)}{\sin^2(\varphi_1 + \varphi_0)} + \frac{\tan^2(\varphi_1 - \varphi_0)}{\tan^2(\varphi_1 + \varphi_0)} \right\} \quad \dots\dots(9)$$

で与えられるものである。

さて、入射光線の入射位置 $r_j (= \Delta r / 2 + \Delta r(j-1))$,

Fig. 4-a Eq. (1)の係数 k におよぼす L と S の影響
(透明球粒子の場合, $n=1.5$ として計算)

Fig. 4-b Eq. (1)の係数 k におよぼす L と S の影響
(完全鏡面球粒子の場合)

$\Delta r=R/N$ を変化させて、それぞれの光線が受光面の X 座標に達したときの座標 I_x および強度 I_j をEq. (6)および(8)を用いて、逐一デジタル計算機で計算した後、受光面内に入った光線($|I_x| \leq L$)の強度を積算した値を I で表わせば、粒子の円断面に入射した光束の中で、受光面外へ去ってしまう光束の割合 k は、

$$k = \frac{(\text{入射光束}) - (\text{受光面に入った光束})}{(\text{入射光束})} \\ = 1 - \frac{I}{\sum_j \rho_j} \quad \dots\dots(10)$$

で計算できることになる。

このようにして計算した値 k と、受光面と粒子中心との距離 S との関係を透明粒子と完全鏡面粒子の場合につ

Fig. 5 受光面 x 軸上の光強度分布($n=1.5$ として計算)

いて、それぞれ、Figs. 4-aおよび4-bに示した。 S が大きく、受光面積 A_R が小さい場合の方が k の値は大きく、入射した光束の大部分が受光面の外へ行ってしまふことがわかる。また同一の条件では、完全鏡面粒子は透明粒子よりも当然ながら k の値は大きい。

また、粒子の円断面($|r_j| < R$)内に入射した平行光線束が粒子の存在によって反射および屈折を受けた後、受光面上 X 軸に結ぶ光の局所的な強度分布を示したのが、Fig. 5である。この光強度分布は x 軸を等間隔の微小区間 Δx づつに分割し、それぞれの区間に達した光線の強度を積算して求めた。同図から $S=5R$ のときは、入射光線束は受光面の中心付近に集中するが、 S を大にすると従って、広く分散されることがわかる。

なお、Eq. (10)から k を求める際の計算で、平行入射光線の本数を変えて計算したところ、5,000本以上になると k の値はほとんど変化しなくなり、一定値に収束するので、以降の計算は、入射光線の本数を、5,000本として行なった。また、同様な理由で光線の粒子内における反射回数は $i=10$ 回までとした。

1.4 光電子増倍管の電圧出力と粒子径の関係

粒子が存在しないときの受光面の照度 F_0 に対応する光電子増倍管の出力を V_0 。また粒子の存在によって照度が ΔF だけ減少したときの、出力減少を ΔV とすると、照度 F と光電子増倍管出力 V の間に比例関係 $V \propto F$ が成立するので、Eq. (1)より、次の関係式が求まる。

$$\frac{\Delta F}{F_0} = \frac{\Delta V}{V_0} = \frac{\pi R^2 I_0}{A_R I_0} \cdot k = \frac{\pi R^2}{A_R} \cdot k \quad \dots\dots(11)$$

ここで、受光部の面積 A_R を一定とし、さらに1.2節で述べたように、粒子の物性が同一であり、また Fig. 4

Fig. 6 測定部概略図
(粒子通路を上面より見た場合)

Fig. 7 検出パルスの電磁オシログラムの1例
(1.589mmガラス球粒子, 0.6, 1.0mm鋼球粒子)

で示されるように、粒子と受光面の距離を $k \approx 1$ となるように条件を選べば、Eq. (11)より、粒子径 $d_p (=2R)$ と電圧減少分 ΔV の平方根の間には比例関係

$$d_p = \frac{2\sqrt{A_R}}{\sqrt{\pi k}} \sqrt{\frac{\Delta V}{V_0}} = C \sqrt{\frac{\Delta V}{V_0}} \quad \dots\dots(12)$$

が成立する。したがって、光源の出力を一定にすることにより、 F_0 を、すなわち光電子増倍管の出力 V_0 を一定にして置き、個々の粒子による出力変化 ΔV を測定すれば、Eq. (12)を用いて、粒子径 d_p が求まるわけである。なお、非球形粒子の場合は、その投影面積円相当径が求められる。

2. 測定装置と検出信号の処理法

2.1 測定装置

Fig. 6に粒子径測定部の概略を示した。aの2.5 V タングステンランプから出た光はピンホールbを通り、cのレンズで平行光線となり、粒子通過部dのスリットを経てeのグラスファイバー受光面に入る。グラスファイバーの他端は、光電子増倍管1P21の受光部に連結してある。光電子増倍管は光入力と出力との間に広い範囲に渡って直線関係が成立っている⁹⁾。なお、陽極供給電圧電源としては、池上通信器社製の高圧安定化電源(MODEL, HD 1.0 KM)を使用した。粒子通過部スリットdはガラス板を重ねて作った正方形のもので、面積は、 $2 \times$

Fig. 8-a コンパレータ回路図
 e_i : 入力, V_R : 設定比較電圧, V_{io} : オフセット

Fig. 8-b M 51710 Tの入出力特性曲線
(V_{CC}, V_{EE} : 電源電圧)

2mm²(I), 0.5×0.5mm²(II)の2種類を使用した。また、粒子通過部と受光面の距離Sは $k \approx 1$ となるように、S=30mmとした。

2.2 信号処理法

電磁オシログラフ法 光電子増倍管の出力を増幅して、電磁オシログラフ(三栄測器製ビシグラフ)で記録した一例をFig. 7に示す。これらのパルスの高さは出力電圧に比例するので、物差しで直接この高さを読み取り、 V_0 の高さに対する比を求めて、Eq. (12)から粒径を求めることができる。

データレコーダ・コンパレータ法 前述の信号処理法では、物差しでパルス高さを読み取るのに時間と労力を要する。そこで、信号をアナログ処理して、デジタルカウンターを併用して、信号処理時間を短縮するために、出力信号を一たんデータレコーダ(TEAC, R-200)に記録し、その再生信号をコンパレータ(電圧比較器、三菱電機IC, M51710T)を用いて、比較用の設定電圧以上のパルスを取り出し、デジタルカウンター(東亜電波社製)で、その個数を計数し、パルスの電圧レベ

Fig. 9 粒子の重複確率算定図

ル累積分布を求める。それを Eq. (12) を用いて粒径分布に換算する。なおパルス高さの分別器として、波高分析器が市販されているが、高価で入手しにくい。最近安価で入手できる IC 素子を利用してコンパレータ回路を作製した。その回路図および動作特性⁶⁾を参考のため Figs. 8-a および 8-b に示した。

3. パルスの重なりによる誤差の検討

本測定法は測定部スリット中を粒子が 1 個ずつ通過する際の光束変化を利用するものであるから、スリット中に粒子が同時に 2 個以上存在すると測定の誤差を生じてくる。この粒子の重複の確率を推定する方法は次に説明する通りである。

測定部を通過する各粒子は、それぞれ独立にランダムな間隔をもってスリットを通過する。したがって、そこに生じるパルスは時間軸上にランダムパルスとして得られる。単位時間当りのパルスの数すなわち計数粒子数の平均値を $\bar{m}$ (個/時間) とすると、時間長 t に m 個のパルスが生じる確率 P は次式で表わされるポアソン分布となる。

$$P(m, \bar{m}t) = \frac{\exp(-\bar{m}t)(\bar{m}t)^m}{m!} \quad \dots\dots(13)$$

上式で $m = 0$ 、すなわち時間 t の間にパルスを生じない確率は

$$P(0, \bar{m}t) = \exp(-\bar{m}t) \quad \dots\dots(14)$$

であり、これはまたパルスの間隔 t の分布を示すことになる。粒子のスリット通過時間、つまりパルス幅だけ各

Fig. 10 m の分布とポアソン分布との比較

粒子が間隔を保っていれば、パルスは重なり合う恐れは全くない。粒子のスリット部通過速度を v 、スリット幅を H とすると、スリット部通過時間は $T = H/v$ であるから、パルスの重なるの確率 P_E は、

$$P_E = \int_0^T \bar{m} \exp(-\bar{m}t) dt = 1 - \exp(-\bar{m}T) \quad \dots\dots(15)$$

となる。Eq. (15) から $\bar{m}$ と T を x 軸、 y 軸に目盛り、 P_E をパラメータにしてグラフに表わしたのが、Fig. 9 である。この図で、パルスの重なるの確率を P_E^* 以下に抑えるには粒子のスリット通過時間が T^* のとき、粒子の平均スリット通過個数を $\bar{m}^*$ 以下にとれば良い。ほぼ 1.589 mm の平均径のガラス粒子を用いて、電磁オシログラムから、単位時間内のパルス個数を読み取り、その分布を求め、粒子の単位時間当りの平均通過個数 $\bar{m}$ を用いて、Eq. (13) から求めたポアソン分布との比較をしたのが、Fig. 10 である。両者は略々一致しており、粒子のスリット通過過程がランダム性を有していることがわかる。しかし、付着性を有する粉体や粒子間に干渉があり粒子がたがいに分散しにくいような場合には、このランダム性は成立しないから注意を要する。

4. 検定結果、粒径分布測定結果および考察

4.1 均一径粒子による検定

径 0.6 および 1.0 mm の J I S 規格鋼球、1.589 mm 不透明ガラス粒子および平均径 0.147, 0.209, 0.346 mm の透明ガラス粒子をそれぞれ約 100 個用いて、電磁オシロ法により $\sqrt{\Delta V/V_0}$ の分布を求め、その平均値と粒子径をプロットした結果を Figs. 11 および 12 に示した。いずれも出力変化 $\Delta V/V_0$ の平方根は粒径 d_p に比例して

Fig. 11 d_p と $\sqrt{dV/V_0}$ の関係 ($C=2.18\text{mm}$)

Fig. 12 d_p と $\sqrt{dV/V_0}$ の関係 ($C=0.581\text{mm}$)

いることがわかる。したがって、Eq. (12) の C は粒子径によらず、定数となる。スリット、I、II ではそれぞれ、 $C=2.18$, 0.581mm となった。本装置では受光面を正方形としたので、Eq. (12) の C は、 $2H\sqrt{\pi k}$ となる。(スリット幅と受光面幅は同じとした) この C に実験値を代入して k を算出したところ、スリット I および II で、それぞれ、 $k=1.07$, 0.943 となり、 $k \approx 1$ であることが確かめられた。スリットは手作りのため、その寸法は多少誤差を含んでいたものと考えられる。略々均一径の粒子についてその累積分布を求めた一例を Fig. 13 に示した。

4.2 粒径分布測定結果

マイクロメータでその粒径分布を計測した異なる粒径分布を有する 2 種類の 100 個のガラス粒子試料(I)および(II)について、スリット I を用い、データレコーダ・コンパレータ法および電磁オシログラフ法で、3 項において説明したパルスの重なり誤差が小さくなるように粒子

Fig. 13 平均径 1.589mm のほぼ均一な径のガラス粒子 (精度 13/1000) の累積分布測定結果

Fig. 14 データレコーダ・コンパレータ法による粒径分布測定結果

Fig. 15 電磁オシログラフ法による粒径分布測定結果

供給速度を抑えて求めた粒径分布の測定結果を Figs. 14 および 15 に示した。本法で求めた測定結果はマイクロメータの測定結果と粒径の小さい範囲では若干の相違があるが、略々良好な一致を示しているといえよう。

なお、1つのスリットで測定が可能な粒子径の下限は信号に含まれる雑音で決まってくる。たとえば、データレコーダ・コンパレータ法を使用する場合は、雑音は、データレコーダのSN比で決まり、本報告の場合は、SN比が43デシベルであるから、スリットIの場合、理論的には約230ミクロンまで測定できることになるが、実験では、約300ミクロンが測定下限であった。したがって、300ミクロン以下の粒子の測定には、スリットIIを用いた。

5. 測定時間およびサンプル量について

サンプル誤差およびパルスの重なり誤差を小さくするように粒子個数と測定器への粒子供給速度を決めると、1サンプルの測定時間が決まる。たとえば、1,000個の粒子を1000mm/secの速度でスリットを通過するように供給するとして、スリット幅が2.0mmのとき、 $T=0.002\text{sec}$ となり、重なるの確率を3.0%に抑える場合、平均供給速度 $\bar{m}$ はEq.(15)より、15個/sec以下とすれば良い。したがって、測定時間は1000/15 $\approx$ 66sec以上となる。10個の粒径区間に分けるとすると、データレコーダの巻戻し時間および、コンパレータの比較電圧切換え時間を除けば、約10分で粒径個数分布がデジタルカウンタを直読して求められる。なお、データレコーダに信号を記録した後テープの速度をたとえば4倍に切換え、2チャンネルのデジタルカウンタを併用すれば、信号処理時間は1/8となる。

なお、この場合に必要な粒子試料重量は、平均径0.8mmのガラス粒子として、約0.7gと少量ですむことになる。

結 論

平行光線源と光学繊維束を利用した受光面とを組合せて、1個1個の粒子による光の遮り量を観測して粒径分布を求める光学の粒度分布測定装置を開発した結果、次のような知見を得た。

(1)個々の粒子の直径と光電子増倍管の出力電圧との間には、

$$d_p = C\sqrt{\Delta V/V_0} \quad \cdots(12)$$

が成立することを確かめた。

(2)Eq.(12)を利用して粒径分布を測定する際には、粒子の重なり誤差を抑えるために、

$$P_E = 1 - \exp(-\bar{m}T) \quad \cdots(15)$$

を用いて重なり確率を推定できる。

(3)粒径分布を求めるに要する時間はデータレコーダ・コンパレータ法を用いたアナログ的な信号処理法によって短縮できる。

(4)粒径分布の測定に必要なサンプル量は少量ですむ。

(5)粒度分布の測定結果は実測値と良く一致した。

記

A_R : スリットまたは受光面の面積	[mm ²]
F : 光束	[lm]
F_0 : スリットを通る光束	[lm]
ΔF : 粒子が存在するときの光束の減少	[lm]
H : スリットの幅	[mm]
I : 受光面に入る全光束	[lm]
i : 反射回数	
j : 座標の示標	
k : 粒子の表面に入射した後受光面に達しない光束の割合 (Eq. (1))	[-]
L : 受光面の半径	[mm]
l_x : Fig. 2 に示した距離	[mm]
m : 時間長 t にスリットを通過する粒子の個数	
またはパルスの個数	[-]
$\bar{m}$: 単位時間当りスリットを通過する粒子の平均個数	[1/sec]
N : k を計算するために粒子へ入射させる平行光線の本数	

号

n : 屈折率	
$P(m, \bar{m}t)$: Eq. (12) で表されるポアソン分布	[-]
P_E : スリット中での粒子の重複の確率	[-]
R : 粒子の半径 ($=d_p/2$)	[mm]
r_j : $=\Delta r/2 + \Delta r(j-1)$	[mm]
Δr : $=R/N$	[mm]
S : 粒子の中心と受光面との間の距離	[mm]
T : $=H/v$, スリット通過時間	[sec]
t : 時間	[sec]
U_i : Fig. 3 で定義した角度	[rad]
V_i : Fig. 3 で定義した角度	[rad]
V_0 : $F=F_0$ のときの光電子増倍管の出力	[V]
ΔV : ΔF に対する出力電圧の減少	[V]
v : スリットを通過する粒子の速度	[mm/sec]
$\Delta\theta$: Fig. 2 に示した微小角	[rad]
μ : 反射率 (Eq. (9))	[-]

文 献

- 1) 松本幹治, 森 芳郎: 化学工学, **36**, 1137 (1972)
- 2) 神保元二ら: 化工協会第4回秋季大会前刷集, F-201 (広島) (1970)
- 3) 久保田 広: “光学”, 岩波書店, p. 306 (1971)
- 4) 電気学会: “照明工学”, p. 176 (1960)
- 5) 浜松テレビ株式会社: 光電変換素子資料 (1971)
- 6) 三菱電気株式会社: 半導体集積回路速報 (1970)

Author's Abstract

Particle-Size Measurement by Photomultiplier

by

Katsuya ŌKI, Takashi AKEHATA, Takashi SHIRAI

(Research Laboratory of Resources Utilization, Tokyo Institute of Technology, Tokyo, Japan)

A novel, convenient method of particle-size measurement by using photomultiplier is proposed here. The measuring equipment consisted of a source of parallel light beams and an optical fiber connected to a photomultiplier which was used as a detector for the variation of light intensity. When one particle passed through the detecting section, the output of photomultiplier changed according to the diameter of the particle. The relationship between the output of photomultiplier and the particle diameter was numerically computed by use of the theory of geometrical optics, and was confirmed experimentally.

In this report described were the computed results, the circuit for measurement, the method of calibrating the detectors, the estimation of errors due to the coexistence of particles in the slit, and the measured examples of particle size. By applying this method, particle size distribution could easily be determined with a very small amount of samples in a much shorter time than any other method ever used.

Figures

Fig. 1 Explanation of the principle of measurement	Fig. 9 Graphical representation of the probability of the coexistence of particles in the slit
Fig. 2 The path of an incident light beam	Fig. 10 Comparison of experimental distribution of m and Poisson distribution calculated
Fig. 3 Reflection and refraction of light beam in a particle	Fig. 11 Relation between d_p and $\sqrt{V/V_0}$ ($C=2.18\text{mm}$)
Fig. 4-a Effect of L and S on k (for transparent particle)	Fig. 12 Relation between d_p and $\sqrt{V/V_0}$ ($C=0.581\text{mm}$)
Fig. 4-b Effect of L and S on k (for specular particle)	Fig. 13 Cumulative distribution of glass particle having an almost uniform diameter
Fig. 5 Light intensity distribution on X -axis	Fig. 14 Particle size distribution obtained by use of datarecorder and comparator
Fig. 6 Section of measurement	Fig. 15 Particle size distribution obtained by use of electromagnetic oscillograph
Fig. 7 An example of oscillogram of the signals detected	
Fig. 8-a Circuit of comparator	
Fig. 8-b Input-to-output characteristics of comparator	

Nomenclature

A_R = area of slit	[mm ²]	F_0 = luminous flux through slit	[lm]
F = luminous flux	[lm]	ΔF = decrease of luminous flux	[lm]

H	=vertical width of slit	[mm]			
I	=luminous flux	[lm]			
i	= i -th reflection				
j	=coordinate index				
k	=ratio of luminous flux dissipated to total luminous flux through slit	[-]			
L	=radius of light receiver	[mm]			
l_x	=distance shown in Fig. 2	[mm]			
m	=number of particles passing through slit or number of pulses in time t	[-]			
$\overline{m}$	=average number of particles passing through slit per unit time	[1/sec]			
N	=total number of light beams for computing k				
n	=refractive index				
$P(m, \overline{m}, t)$	=equation (12) (Poisson distri-				
	bution)				[-]
P_E	=probability of coexistence of particles in slit				[-]
R	=radius of particle	[mm]			
r_j	= $\Delta r/2 + \Delta r(j-1)$	[mm]			
Δr	= R/N	[mm]			
S	=distance between the centre of particle and light receiver	[mm]			
T	= H/v (width of pulse)	[sec]			
t	=time	[sec]			
U_i	=angle defined in Fig. 3	[rad.]			
V_i	=angle defined in Fig. 3	[rad.]			
V_0	=output of photomultiplier at $F=F_0$	[V]			
ΔV	=change of output signal corresponding to ΔF	[V]			
v	=particle velocity through slit	[mm/sec]			

Literature cited

- 1) Matsumoto, K. and Y. Mori : *Kagaku Kōgaku* (*Chem. Eng., Japan*), 36, 1137 (1972)
- 2) Jimbo, G. *et al* : Preprint of 4-th Autumn Meeting of The Soc. of Chem. Eng., Japan, F-201, Hiroshima (1970)
- 3) Kubota, H. : "Kōgaku", Iwanami shoten, p. 306 (1971)
- 4) Denkigakkai : "Shōmei Kōgaku", p.176(1960)
- 5) Hamamatsu TV Corporation : Catalogue of photoelectric tubes (1971)
- 6) Mitsubishi Electric Corporation : Catalogue of Mitsubishi Monolithic Integrated Circuits (1971)