

研究報告

カスケードインパクトによる簡易粒度分布測定法*

Simplified Measuring Method of Particle Size Distribution
by Using Cascade Impactor

本郷 昭三** 大畑 勉**
Syozo Hongo Tsutomu Ohata
鈴木 正** 柳 芳朗***
Masashi Suzuki Yoshiro Yanagi

1. 序言

原子力産業などにおける、空気汚染による内部被曝の危険度を評価する場合、粉じんの濃度とともに粒度分布を知ることが重要である。この理由は粒度によって沈着する呼吸器系の部位および沈着率が大きく異なることによる。われわれは空気中の粉じんの粒度分布が空気力学的粒子径において対数正規分布に従うという仮定を導入することにより、簡単にしかも迅速に粒度分布を測定する方法を検討しているが、今回はカスケードインパクトを用いた場合について報告する。

2. 空気力学的粒子径の定義

実際の空気中の粉じん粒子は多種成分からできているので、その密度も形状もまちまちであろう、したがって幾何学的に同一粒子径であっても、密度や形状が異なれば異なった運動経過をとると考えなければならない。そこで空気中における粒子の挙動とよい相関をもった粒子の大きさの表現としては、むしろ空気力学的粒子径として密度や形状を含めた粒子径を用いることが適当である。すなわち粒子の慣性パラメータ¹⁾が同一になるような空気力学的粒子径として、サブミクロン領域を含めて、次のような表現を用いてみる。ある粒子のもつ慣性パラメータが、密度1の基準球形粒子がもつそれと等しいとき、その基準粒子径をもって粒子径を表わす。すなわち密度 ρ_p 、粒子径 D_p の球形粒子については次式が成立する。

慣性パラメータ

$$\Psi = \frac{\rho_p \cdot u \cdot D_p^2 \cdot C}{18 \cdot \mu \cdot D_C} \quad \dots\dots(1)$$

カンニンガムの補正係数

$$C = 1 + \frac{0.16 \times 10^{-4}}{D_p} \quad (\text{近似式として}) \quad \dots\dots(2)$$

一方 $\rho_p=1$ の基準粒子の場合空気力学的粒子径を D_a とおけば、上式と同様にして

$$\Psi = \frac{u \cdot D_a^2 \cdot C'}{18 \cdot \mu \cdot D_C} \quad \dots\dots(3)$$

$$C' = 1 + \frac{0.16 \times 10^{-4}}{D_a} \quad \dots\dots(4)$$

これらの式より C' と Ψ を消去すると D_a と D_p の関係が得られる。

$$D_a = D_p \left\{ \sqrt{C \cdot \rho_p + \left(\frac{C-1}{2} \right)^2} - \frac{C-1}{2} \right\} \quad \dots\dots(5)$$

カスケード、インパクトで求めているものは結局、このような空気力学的粒子径による粒度であるから、同様の空気力学的現象の解析に用いるには適当な粒度といえる。

3. カスケード、インパクトの部分分離効率曲線の近似

カスケード、インパクトの各段の部分分離（衝突）効率は解析的にも¹⁾²⁾、実験的にも³⁾求められているが、

* 昭和45年6月5日受理
** 放射線医学総合研究所 (〒230千葉市次川町4-9-1)
TEL 0472-51-2111
*** 東海大学 (〒151渋谷区富ヶ谷2-28-4) TEL 03-467-2211

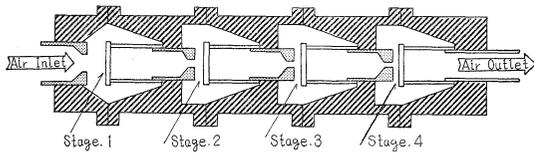


Fig. 1 Sectional diagram of a cascade impactor.

表 1 Diameter of each jet in a cascade impactor.

Stage. No	1	2	3	4
Diameter of jet (mm)	9.0	4.2	2.5	1.0
Sampling flow rate	15 Liter/minute			

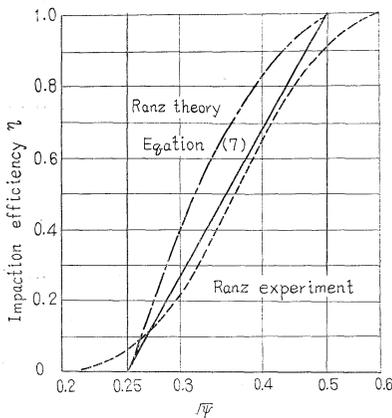


Fig. 2 Relations between impactation efficiency and inertia parameter

表 2 Values of α and β in each stage.

D_a	η	Ψ	Stage.1	Stage.2	Stage.3	Stage.4
α	0.0	0.0625	6.6μ	2.0μ	0.89μ	0.21μ
β	1.0	0.25	13.6μ	4.2μ	1.9μ	0.46μ

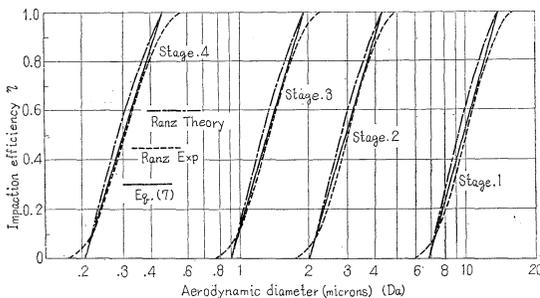


Fig. 3 Impactation efficiency of each stage in a cascade impactor

ここでは簡単のために片対数線図上において直線になると仮定して、次の近似式を用いることにする。またここでは前節の空気力学的粒子径 D_a を用いる。

$$D_a < \alpha \quad \eta = 0 \quad \dots\dots(6)$$

$$\alpha \leq D_a \leq \beta \quad \eta = [\ln(D_a/\alpha)] / [\ln(\beta/\alpha)] \quad \dots\dots(7)$$

$$\beta < D_a \quad \eta = 1 \quad \dots\dots(8)$$

ここで使用したカスケード、インパクトは図1および表1に示したものでこれに対する α, β の値は表2に示す。各ノズルに対する上記の式は図2および3の実線のごとくなる。同図中の点線および破線は Ranz & Wong の実測値および理論値である。なおこれらの値はいずれもノズル径に対するノズル衝突板間の距離の比が3前後の数値となる一般に用いられる範囲の場合に相当する。

4. 対数正規粒度分布を仮定して分布定数を求める方法

一般の粉じんは近似的に対数正規分布に従う場合が多いので、簡単のためにつぎの分布式に従うと仮定して、その分布定数 (D_{a50}, σ) を求める方法をのべる。

$$f(D_a) = \frac{1}{D_a \sqrt{2\pi} \ln \sigma} \exp \left\{ - \left[\frac{\ln(D_a/D_{a50})}{\sqrt{2} (\ln \sigma)} \right]^2 \right\} \quad \dots\dots(9)$$

この粉じんをカスケード、インパクトのある一段で捕集すると前節の部分分離効率の近似式をつかって、つぎのような簡単な正規分布の積分形で総合捕集効率 (E) を求めることができる。

$$\begin{aligned} E \int_0^\infty f(D_a) \times \eta \times dD_a &= \int_0^\alpha f(D_a) \times 0 \times dD_a \\ &+ \int_\alpha^\beta f(D_a) \left\{ \frac{[\ln(D_a/\alpha)]}{[\ln(\beta/\alpha)]} \right\} dD_a \\ &+ \int_\beta^\infty f(D_a) \times 1 \times dD_a \\ &= \frac{\ln \sigma}{\ln(\alpha/\beta)} \left\{ y_\alpha [Y]_{y_\alpha}^{y_\beta} + [X]_{y_\alpha}^{y_\beta} \right\} + [Y]_{y_\beta}^\infty \quad \dots\dots(10) \end{aligned}$$

ここで

$$X = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp(-y^2/2)$$

* 以下の式において ln をすべて log におきかえてもよい。

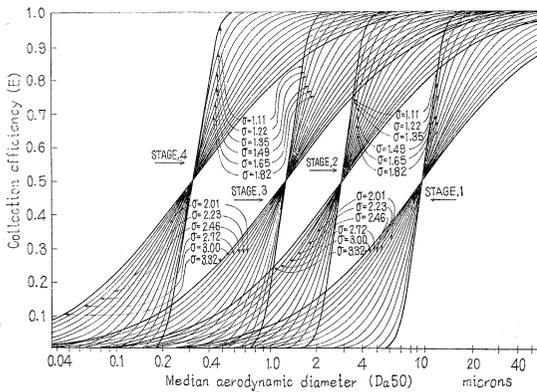


Fig. 4 Collection efficiency for particle size distribution in each stage.

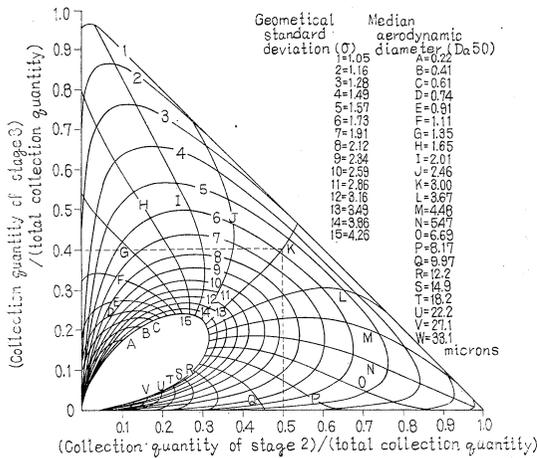


Fig. 5 A readyreckoner for Da_{50} and σ by the proportion stage 3 and stage 4.

$$Y = \int X dy$$

$$y = \frac{\ln(Da/Da_{50})}{\ln \sigma}$$

$$y_{\alpha} = \frac{\ln(\alpha/Da_{50})}{\ln \sigma}$$

$$y_{\beta} = \frac{\ln(\beta/Da_{50})}{\ln \sigma}$$

各段について上式の計算結果を図4に示す。

また、第1段目と第2段目を直列に使用したときの2段目の総合捕集効率は次のようになる。

$$E_{2s} = \int_0^{\infty} (1-\eta_1) \cdot \eta_2 \cdot f(Da) dDa$$

$$= \int_0^{\infty} \eta_2 \cdot f(Da) \cdot dDa - \int_0^{\infty} \eta_1 \cdot \eta_2 \cdot f(Da) dDa$$

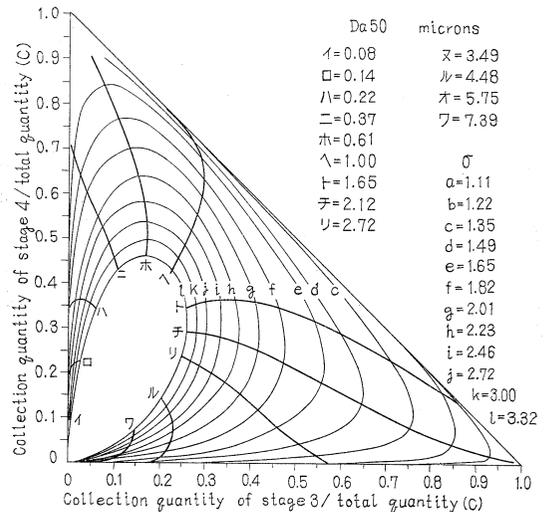
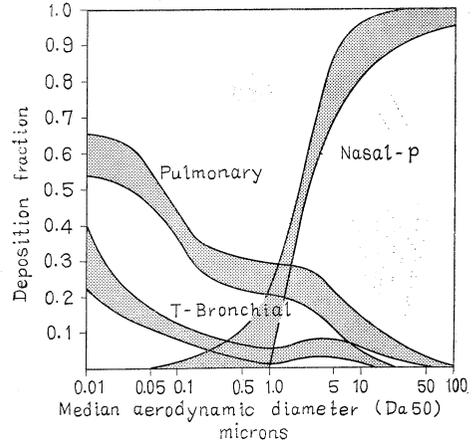


Fig. 6 A readyreckoner for Da_{50} and σ by the proportion stage 3 and stage 4.



The shaded areas indicates the variability of deposition when the distribution parameter σ varies from 1.2 to 4.5 and the tidal volume is 1450 ml.

Fig. 7 Relation between deposition and median diameter

$$= E_2 - \int_0^{\infty} \eta_1 \eta_2 f(Da) dDa \quad \dots (11)$$

しかし本カスケード、インパクターにおいては図3において見られるごとく、 $\eta_1 > 0$ のとき、すでに、 $\eta_2 = 1$ となっているので、上式より、 $E_{2s} = E_2 - E_1$ となる。同様に、 $E_{3s} = E_3 - E_2$ 、 $E_{4s} = E_4 - E_3$ となる。この結果を用いて直列に使用時の各段の総合捕集効率の総和 ($E_1 + E_{2s} + E_{3s} + E_{4s} = E_4$)* に対する、第2段目および第3段

* $E_4 = 1$ でなくともよい。このとき Fig 5 から求めた Da_{50} および σ により Fig 4 を用いて E_4 を推定できる。

目の総合捕集効率 (E_{2s}, E_{3s}) の比で整理した結果を図5に示してある。同図において環状に走る曲線は σ について等しい点を結んだものであり、放射状に走る曲線は D_{a50} について等しい点を結んだものである。この2曲線の交点は一つの粒度分布 (D_{a51}, σ) を示しており。この粒度分布に従う粉じんがカスケード、インパクターで集じんされた場合、全段の集じん量の合計に対する、第2段目、第3段目の集じん量の割合が横軸、および縦軸に示される。したがってこの図表を逆に読むこと*により、近似的に粒度分布 (D_{a51}, σ) が求められる。

同様に、図6は、横軸、縦軸に E_{3s}, E_{4s} をとって示したもので、粒度が1ミクロン以下のときには、図5を用いるよりも精度よく粒度分布を分析できる。

なお、この場合、カスケード、インパクターの後に高性能フィルターなどをつけて、微細粉を完全捕集し全粉じん量を測定する必要がある。

5. 結 言

今回は表1の規格をもつカスケード、インパクターについてのべたが、他のカスケード、インパクターについて

* たとえば四段の合計集じん量に対して第二段に50% 第三段に40% 集じんされた場合、Fig 5の点線の交点から $D_{a50} = 3\mu$ $\sigma = 1.73$ が求められる。

記 号

C : カンニンガム補正係数

D_p : 粒子径

D_c : ノズル直径

D_a : 空気力学的粒子径

D_{a50} : 幾何平均径 (中位径)

E : 総合捕集効率

E_k : k 段目単独の E

E_{ks} : 各段を直列につないだときの k 段目の E

u : ノズル流速

でも同様にあらかじめ計算を行なって図表を作っておけば、各ステージの個数、重量、あるいは放射能を測定することにより、簡単に近似粒度分布をうることができる。この場合その測定法における、空気力学的な中央値と幾何標準偏差が求まる。

I. C. R. P の肺動力学作業班の報告によれば、呼吸器道の各部に対する沈着率は図7によって与えられている。これを用いれば、空気の単位体積中から各呼吸器道に沈着すると考えられる粒子の個数、重量、放射能について評価することもできる。

なお興味あることは放射能と重量のように2つの測定法で粒度分布が求まった場合、これらのお互の偏異から粉じんの性質、たとえば、粉じんそのものが放射性物質であるか、一般の粉じんに放射性物質が付着したものであるか、などの粒度別の情報を得ることができる。カスケード、インパクターを使用した場合、再飛散やサンプリング誤差などにより測定粒度分布が変化するという問題はありますが、現在の測定結果からみても、注意して使用すればかなりの精度をもっていると考えられる。

最後にこの研究報告を作成するにあたって、多大な御指導をいただいた京大工学部、井伊谷鋼一先生に感謝いたします。

α : $\eta=0$ となる D_a の値

β : $\eta=1$ に達する D_a の値

η : 部分分離効率

η_k : k 段目単独の η

μ : 空気の粘性係数

ρ_p : 粒子密度

σ : 幾何標準偏差

ψ : 慣性パラメーター

引 用 文 献

- 1) W. E. Ranz and J. B. Wong, I. E. C. 44, No. 6, p. 1371, (1952)
- 2) 湯晋一, 中野一彦, 牧野和孝, 井伊谷鋼一: 粉体工学研究会誌 3, 2, p. 28 (1966)
- 3) 井伊谷鋼一, 湯晋一, 牧野和孝, 中野一彦: 化学工学 33, 7, p. 93 (1969)

- 4) R. I. Riyad and F. C. Clayton: "Particle Size Measurement Interpretation and Application" p. 39, John Wiley & Sons, Inc. (1963)
- 5) Task Group on Lung Dynamics: Health Physics, 12, p. 173, (1966)

Abstract

Simplified Measuring Method of Particle Size Distribution by Using Cascade Impactor

Syozo Hongo*, Tutomu Oohata*, Yoshiro Yanagi*, and Masashi Suzuki**

In order to establish a practical method of measuring the aerodynamic size distribution of any aerosol sample collected by a 4 stages cascade impactor, the theoretical consideration and calculation of collected

proportion of particles by using a computer were attempted on the basis of the theory of Ranz & Wong and the assumption on the log-normal distribution for aerosol samples, for 345 kinds of particle size

distributions having 23X15 parameters.

In the calculation, the approximation to the partial collection efficiency for each stage of cascade impactor was introduced for simplifying the calculation and for applying the method easily to any type of cascade impactors.

The result from the calculation was arranged by relative quantities of collected particles on each stage and indicated as a ready-reckoner. In practice, we can obtain the geometrical-mean-diameter (Da_{50}) and the geometrical standard deviation(σ) of a given sample of aerosol, by measuring the collected quantities of the aerosol on each stage of cascade impactor (particle number, mass, activity etc, of the collected sample) and by searching the best fitness

of the values to the one among 345 kinds of size distribution which were calculated by the computer in advance. This procedure could be easily accomplished by using the ready-reckoner above-mentioned.

As actual size distribution of many aerosols are said to be subjected to the log-normal distributions, the method above-mentioned is considered to have enough accuracy in practical use and to obtain better approximation for particle size distributions in general.

* National Institute of Radiological Sciences

** Tokai University