参 考 資 料

ミクロンフォトサイザーにより測定された発じん石炭ダストの粒径分布特性*

Characterization of Mass Size Distribution of Respirable Coat Mine Dust
by Micron Photo Sizer

B. N. SAHOO** J. K. SINHA**
L. N. UPADHYAYA*** and N. S. RAWAT****

1. 緒 言

呼吸器疾患とくに肺疾患は浮遊ダストに起因するものであり工業国における重大な職業病の1つと考えられ、その原因を明らかにする研究が活発に行なわれている¹⁾。このうち発じん石炭ダストによって引き起こされる肺疾患が最近問題となっており、いくつかの研究^{1,4,7)}から、一般にダスト中の微粒子の重量濃度の増加に伴って肺疾患が増大するということがわかっている。そして、発じんダストの他の性状、とりわけ粒径分布がこの疾患に影響を与える重要な因子となるものと考えられているが、この粒径分布は掘り出される石炭床の性状によって変化する。したがって肺疾患に対する発じん石炭ダストの粒径の影響を調べるためには重量基準の粒径分布パラメータを決定することが必要となる。本報では、Jharica Coalfield (インド) の採炭場の大气から捕集された発じん石炭ダスト粒径分布と重量とについての解析結果を報告する。

2. 測定装置および方法

2.1 試料のサンプリング法

発じん石炭ダストの試料は Jharica Coalfield (インド) の石炭鉱山Aの第10番、第11番、第12番の石炭床における採炭時の大气中から Casella 社の Hexhlet 装置を用いて採取された。この装置の使用法とサンプリング

法は前報⁸⁾と同様であった。

2.2 測定装置

すべての測定はミクロンフォトサイザー (セイシン企業, SKN 1000型) を用いて行なった。粒径分布に対するミクロンフォトサイザーの測定原理は、粒子の大きさによって沈降速度が異なることに注目して、沈降時の光透過量の変化から粒径分布を測定するものである。そしてこの測定装置は液体中に分散する粒子の重量基準粒径分布を測定する。細い光のビームが粒子サスペンションの中を通過すると光強度は減少する。時間の経過とともに粒子が沈降し、したがって光強度は大きくなる。このような簡単な現象から、ミクロンフォトサイザーを用いて粒径分布を求める。たとえ、微小粒子を含む試料であっても遠心力を用いることによって迅速に粒径分布を測定することができる。そして実験データは電気信号として取り扱われるので、人為的な測定誤差を含まず、非常に良い再現性を示す。

測定前に、比重と粘度とから適度に調整された分散液の測定高さ h を決めておく必要がある。粒子の比重は通常の標準的な方法で求められた。適切な分散液の調整は、未知試料については試行法を、また標準あるいは既知試料については文献を参照して行なった。本報では分散液の測定に際してあらかじめ適切な条件を調べておいた。一方、この測定器の一般的使用法については、すでにセイシン企業により明らかにされている。

3. 測定結果

3つの石炭床 (第10番、第11番、第12番) を比較するために、48の発じん石炭ダストの粒度分布の測定結果を Table 1 に示した。第10番、第11番、第12番の石炭床は地表よりそれぞれ 55.2 m, 33.5 m, 25.0 m の深さにある。ミクロンフォトサイザーによって得られる実験デー

昭和58年3月22日受付

*The International Symposium on Recent Advances in Particulate Science & Technology にて発表
(I.I.T., Madras, 8-10 Dec, 1982)

**Environmental Pollution and Mine Health Discipline
Central Mining Research Station, Dhanbad, India

***Department of Physics and Maths, Indian School of Mines, Dhanbad, India

****Department of Chemistry, Indian School of Mines, Dhanbad, India

Table 1 それぞれの深さにおける粒径分布の測定結果

Seam classification	Height [m]	No. of samples	Average weight % in size range [μm]			
			7—6	6—4	4—2	2—0
X	52.5	16	7.5	22.5	52.4	17.6
XI	33.5	16	5.6	30.9	59.3	4.2
XII	25.0	16	9.5	28.3	51.7	10.5

Table 2 いくつかの粒径パラメータによる粒径分布の比較

Seam classification	Height [m]	No. of samples	Mass med. dia., M [μm]	Geometric standard dev., σ_g	75% size [μm]	25% size [μm]	R	Average wt. % in size $< 2\mu\text{m}$
X	52.5	16	3.2	1.6	4.4	2.3	1.9	17.6
XI	33.5	16	3.6	1.3	4.5	2.9	1.5	4.2
XII	25.0	16	3.5	1.5	4.7	2.6	1.8	10.5

タは粒径とその光強度 ($\log I$) との関係として与えられる。それぞれの石炭床に対して得られた測定結果は、粒径分布を表わすために重量基準の頻度パーセントに換算された。そして積算粒径パーセントは対数正規型分布に対して良好な直線近似を示すことがわかった。それぞれの石炭床で得られた試料の粒径分布の重量基準中位径 M 、積算率25%および75%に対応する粒径の比 R 、幾何標準偏差 σ_g を Table 2 に示した。

4. 考 察

粒径の積算フルイ下パーセントに対する粒径のいくつかの測定結果から、粒径分布はゆがんだ形、すなわち粒径の小さな領域で比較的すどく立ち上がり、粒径の増加とともにゆるやかに減少することがわかった。第10番、第11番、第12番の石炭床における発じん石炭ダストの粒径分布は、単一モードでかつ球相当径で $2.5\mu\text{m}$ から $2.9\mu\text{m}$ の間でモード径が変化する不均質な分布であった。Fig. 1 のように、対数正規型分布図上に示された16個のデータより平均化された値はこの分布に対して良好な直線近似を示した。このことは、Ramanujan-Venkateswarelu の結果⁹⁾ と実質的に一致した。そして、Okuda¹²⁾ は石炭床における採炭時の粉砕や破砕によって生ずる大気中の浮遊粒状物質の重量基準の粒径分布が同様にほぼ対数正規型の分布を示すことを明らかにしている。

Table 2 から明らかなように、3つの石炭床における平均値を考えると、積算率が25%および75%の粒径はそれぞれ $2.6\mu\text{m}$ 、 $4.5\mu\text{m}$ であった。さらに、重量基準の中位径 M は $3.2\mu\text{m}$ を示した。また実験結果は、 $2\mu\text{m}$

Fig. 1 3つの石炭床における対数正規型重量基準粒径分布

以下の発じん石炭ダストの積算百分率が10.5%となることを示した。いいかえれば、実際の石炭床における粒子濃度を考えると健康障害となる $2\mu\text{m}$ 以下の微粒子が採炭時に $1.5\text{mg}/\text{m}^3$ 生成されるものと推定される¹¹⁾。そしてこのダストは visibility を減少させ、また人肺への沈着を引き起こすような鉱山の環境中に分散する。

第10番、第11番、第12番のすべての石炭床において、

Fig. 2 第10番石炭床における放物線による近似曲線と測定値との比較

Table 3 近似式における定数 α, β, γ の値

Seam classification	$[\%/\mu\text{m}]^\alpha$	$[\%/(\mu\text{m})^2]^\beta$	$[\%/(\mu\text{m})^3]^\gamma$
X	3.54	10.48	-1.54
XI	-6.90	17.40	-2.39
XII	-2.55	12.94	-1.72

重量基準の平均粒径と幾何標準偏差が一定であること、さらに $2\mu\text{m}$ 以下の粒子の重量割合がほぼ同じ値を示すという点で、この実験誤差の範囲内でこれらの3つの石炭床の間では粒径分布の差異がないことがわかった。Melbourne 市（オーストラリア）における大気中の高さ方向に測定されたエアロゾル粒子の粒径分布に関する報告^{3,6)}は本報でのこの結果を裏づけている。

しかしながら、重量基準中位径 M と75%粒径と25%粒径の比 R との関係を考えて、Table 2 に示すように、両者の間には逆相関の関係がある。つまり重量基準中位径 M が増加すると粒径比 R が減少することが明らかとなった。発じん石炭ダストの粒径分布特性をさらに考察してみると、Table 1 と Table 2 において、粒径比 R が増加すると作業労働者の肺の中に沈着するとみられる $2\mu\text{m}$ 以下の微粒子の分率もまた増加することが示された。いいかえれば、粒径比 R が大きいほど微粒子の生成率が大きいことがわかる。この結果は South Wales 鉱山（イギリス）における発じん石炭ダストの体積基準の粒径分布において十分な差異を見出した

Ogden らの結果⁹⁾を確認するものである。

粒径分布曲線のもう一つの評価は、実験データに適合した数学的な関数を見出すことにある。Fig. 1 はたしかに多くの目的に対して粒径分布の特徴を推定し、積算百分率に対する粒径分布を簡便に表現できるものであるが、この種のプロットは粒径分布曲線の形の評価という点で適切ではない。したがって、Fig. 2 に示すように、実際の粒径分布曲線が同じような条件のもとで、粒子の重量を特徴づける3つの定数パラメータ α, β, γ を用いた2次放物線で良く近似されることがわかった。この放物線の方程式はつぎのように示される。

$$W = \alpha + \beta S + \gamma S^2 \quad \dots\dots(1)$$

ここで、 W は粒子の重量頻度 $[\%/\mu\text{m}]$ 、 S は粒径 $[\mu\text{m}]$ 、 α, β, γ は実際の石炭床に対して定数となる。

48の平均としての実験結果より、発じん石炭ダストに対する α, β, γ の値は Table 3 に与えられるように最小二乗法を適用することにより第10番、第11番、第12番の石炭床のデータに対して計算された。この結果はインドの鉱山環境条件において、ミクロンフォトサイザーにより測定された発じん石炭ダストの重量基準粒径分布を特徴づけるために特に有用であろうと思われる。

5. 結 言

ミクロンフォトサイザーを用いて、発じん石炭ダストの重量基準粒径分布の研究を行なった。測定結果より、採炭場の大気中からサンプリングされた石炭ダストは球相当径で $2.5 \sim 2.9\mu\text{m}$ の間に単一のモードをもつ不斉形の分布を示すことがわかった。この結果を説明するためには対数正規型分布を仮定することが良いと考えられるが、より詳細な検討から粒径と重量頻度との関係が Eq. (1) の放物線によって近似できることがわかった。この近似式を用いることによって、発じんダストの粒径に対する重量頻度が求められることがわかった。

謝 辞

本研究の遂行と、本論文の公表の許可を与えて下さいました Central Mining Research Centre (Dhanbad) の Director に感謝申し上げます。また本論文は International Symposium on Recent Advanced in Particulate Science & Technology (I. I. T., Madras, 8—10, Dec., 1982) で発表したものである。

編集委員会注：

本報告は英文にて投稿されたものですが、投稿規定により邦訳して掲載しました。なお、訳は高野頌氏（同志大・工）にお願いしました。

引 用 文 献

- 1) Fairman, R. P., R. J. O'Brien, S. Swecker, H. E. Amandus and E. P. Shoub: *Archs. Envir. Helth.*, **32**, 211 (1977)
- 2) Kapur, J. N. and H. C. Sarena: "Mathematical Statistics", pp 10—11, S. Chang & Co., India(1980)
- 3) Mainwaring, S. J. and S. Harsha: *Atmos. Environ.*, **10**, 57 (1976)
- 4) Morgan, W. K. C., D. H. Burgess, G. Jacobson, R. J. O'Brien, E. P. Pendergrass, R. B. Reger and E. P. Shoub: *Archs. Envir. Helth.*, **27**, 221 (1973)
- 5) Ogden, T. L. and A. M. Rickmann: *Ann. Occup. Hyg.*, **20**, 257 (1977)
- 6) Peterson, C. M., H. S. Paulus and G. H. Foley: *J. Air Poll. Control Ass.*, **19**, 795 (1969)
- 7) Rae, S., D. D. Walker and M. D. Attfield: "Inhaled Particles III", Edited by Walton, W. H., Vol. II, Unwin Bros., Old Working, Surrey (1971)
- 8) Ramanujan, T. K. and D. Venkateswarelu: *Proc. of Seminar on Particle Technology*, held at I.I. T., Madras, India (1971)
- 9) Rawat, N. S., B. N. Sahoo and J. K. Sinha: *Chemistry and Industry*, **13**, 470 (1981)
- 10) Rawat, N. S., B. N. Sahoo and J. K. Sinha: *Archs. Envir. Helth.*, **37**, 32 (1982)
- 11) Sahoo, B. N.: Environmental Pollution of Mine Atmosphere with Special Reference to Particulate Pollution, Ph. D. Thesis, Department of Chemistry, Indian School of Mines, Dhanbad, India (1981)
- 12) Okuda, S.: *Proc. of Seminar on Particle Technology*, held at I. I. T., Madras, India (1971)
- 13) Wright, B. M.: *Brit. J. Industr. Med.*, **11**, 284 (1954)

Authors' Abstract

Characterization of Mass Size Distribution of Respirable Coal Mine Dust by Micron Photo Sizer

by

B. N. SAHOO*, J. K. SINHA*, L. N. UPADHYAYA**

and N. S. RAWAT***

*Environmental Pollution and Mine Health Discipline Central Mining Research Station, Dhanbad, India

**Department of Physics and Maths, Indian School of Mines, Dhanbad, India

***Department of Chemistry, Indian School of Mines, Dhanbad, India

The mass size distribution of respirable coal dusts has been studied by using micron photo sizer. The respirable coal dust samples were collected at the mine atmosphere during drilling in coal seams by using Messrs. Casella's 'hexhlet' apparatus specially designed and fitted with horizontal elutriator to collect the respirable coal dust fraction simulating to the lungs retention conditions of the coal miners. The results showed that the distributions are unimodal, asymmetric and positively skew, with modes usually between 2.5 and 2.9 μm equivalent spherical diameter.

Although the assumption of log-normality was useful in interpreting the results, closer observations indicated that the relationship between the size and weight frequency of the particles can be represented by a second degree parabolic equations, $W = \alpha + \beta S + \gamma S^2$, where W and S are weight frequency and size of the particle, and α , β , γ are the constants. The equation characterizes the mass of the respirable particles if the size is known.

List of Figures and Tables

Fig. 1 Composite mass size distribution of respirable particles comprising three seams plotted on a log-probability coordinates

Fig. 2 Typical dust distributions for X seams compared with a second degree parabolic

curve

Table 1 Size distribution data at each level

Table 2 Variation of size parameters with the height of the seam

Table 3 α , β , and γ values for different seams