本質安全防爆型粉じん計(LV-5E型) の開発とその特性*

村 田 克¹ 岩 崎 孝²

Development of an Intrinsically Safe Type Explosion-Proof Dust Sampler

by Masaru MURATA¹ and Takashi IWASAKI¹

1. School of Science and Engineering, Waseda University, Shinjuku-ku, Tokyo 169

A new dust sampler (model LV-5E) was developed for measuring the mass concentration of dust in coal mine. This apparatus is smaller and lighter in weight than the usual model (LVS-10B) with explosion-proof construction, and has an inertial impactor to collect the respirable dust.

Dust collection tests with LV-5E impactor of jet hole of 3.65 mm in diameter in the laboratory chamber polluted by Arizona road dust, coal dust and CaCO₃ powder, show that the respirable dust values are equal to the values measured by standard apparatus, i.e., Low-Volume Air Sampler, and LVS-10B.

KEY WORDS: Inertial Impactor, Dust Sampler, Intrinsically Safe Type Explosion-Proof, Respirable Dust

1. 緒 言

炭鉱用質量濃度式粉じん計には、耐圧防爆型粉じん計(LVS-10B型, ダン科学(株)製)¹⁾がある。この粉じん計は耐圧防爆構造であるために重く(約25 kg), かつ大型(幅36.0 cm×奥行き25.0 cm×高さ33.5 cm)で、坑内への搬入や搬出に多大な労力を要し、取扱いも不便であった。そのため、小型軽量の測定器の開発が望まれていた。

新開発の本質安全防爆型粉じん計(LV-5E型, 柴田科学器械工業(株)製)(以下, LV-5Eと記す)は、耐圧防爆型粉じん計(LVS-10B型)(以下, LVS-10Bと記す)に比べて軽量、小型で、防爆構造として本質安全方式を採用し、分粒機構を慣性衝突型としたなどの特徴を備えた質量濃度式粉じん計である。

本報告は、LV-5Eの開発の経緯と、現在一般に広く使われている質量濃度測定器である、多段型分粒装置²⁾(C-30型)付ローボリュームエアサンプラ(柴田科学器械工業(株)製, 以下C-30と記す)との特性比較結果について述べるものである。ただし、本質安全防爆に係る電気回路等の開発などについては本報ではふれない。

2. LV-5Eの概要

2・1 粉じん捕集原理

内蔵の吸気ポンプを駆動して、慣性衝突作用を利用した分粒装置で一般粉じんと吸入性粉じんを分粒し、粒径7.07 μm以上の粗

い粉じんを衝突板上に、7.07 μm以下の粒径粒子を衝突板後方のろ紙にそれぞれ捕集する。

2・2 構造

(a) 操作パネル側

(b) 粉じん捕集ヘッドを外したところ

図1 LV-5Eの外観(ケースなしの状態)

* 1992年8月27日受付 8月28日受理 資源・素材学会平成3年度春季大会にて一部発表

1. 学生会員 早稲田大学大学院 理工学研究科 博士課程

2. 正会員 工博 早稲田大学教授 理工学部資源工学科

キーワード: 慣性衝突, 質量濃度式粉じん計, 本質安全防爆, 吸入性粉じん

図2 LV-5Eの構造

LV-5Eの外観を図1、構造概略を図2にそれぞれ示す。

LV-5Eの構造上の特徴は粉じん捕集ヘッドやポンプ、充電式電池、制御回路などが一体となっていることである。粉じん捕集ヘッドは、本体から取り外しが可能で、その内部に衝突板とろ紙ホルダを装着する。粉じん捕集ヘッド吸入口から5.0 l/minで吸入された含じん空気は、ステンレス製の衝突板に衝突し、吸入性粉じん（7.07 μm以下）より粒径の大きな粉じんは衝突板上に塗布したグリスに、吸入性粉じんは衝突板後方のろ紙ホルダ内のろ紙に、それぞれ捕集される。

吸入性粉じんの質量濃度は、測定前後のろ紙重量変化と吸引空気量とから算出する。衝突板分粒方式の特徴は、衝突板に捕集された粉じんの重量と吸入性粉じんの重量とをあわせて求めることにより、総粉じん濃度と、総粉じん中に吸入性粉じんの占める割合などを求めることができることである。

ろ紙を通過した空気は、ドレインを通して水分を除去した後にポンプへ吸引される。ポンプの排気側のバッファタンクは吸引空気の脈動を防止している。流量計を排気側に入れることにより流量計の排気側が大気開放されたので、粉じん捕集量の増加に伴う圧力損失増加によって、流量計の読みに誤差が生じるのを防いでいる。また、流量計出口はケース外部の排気流量確認用ノズルに接続されており、ポンプで吸引した空気はすべてこの排気ノズルを通して排気される。そのため、流量確認用ノズルに流量校正用の流量計を接続することにより、内蔵流量計の精度確認が容易になっている。

本体ケースは厚さ2 mmのアルミニウム製でスイッチは被覆されている。また、使用時には革ケースに全体を収納し、衝撃緩和を図っている。

その他の仕様は、以下の通りである。

- ① ポンプ : ダイアフラム式
- ② 流量計 : ロータメータ（浮き子式）
- ③ 寸法 : 本体 約D 270×W 95×H 170 mm
粉じん捕集ヘッド φ 55×H 80 mm
ろ紙ホルダ外径= 42 mm
使用ろ紙直径= 35 mm
捕集有効直径= 25 mm
衝突板外径= 35 mm
厚さ= 0.2 mm
グリス塗布面直径= 13.5 mm
- ④ 本体重量: 約5.5 kg
- ⑤ 電源 : Ni-Cd 蓄電池使用、電源電圧= 12 V
- ⑥ 充電時間: 15 時間
- ⑦ 有効連続運転時間: 8 時間

2・3 粉じん捕集ヘッドの設計概要

2・3・1 吸引流量 従来の耐圧防爆型粉じん計（LVS-10

B型）による坑内粉じんの捕集は、吸引流量10 l/minで行ってきた。しかしLV-5Eは、吸引流量を5.0 l/minに設定した。元来吸引流量が小さい場合には、粉じんの低濃度環境では捕集時間を充分にとらないと、秤量誤差を無視できる程度の粉じん量が捕集できない危険がある。しかし、LV-5Eの開発に際し吸引流量をあえて5.0 l/minにした最大の理由は、粉じん計の重量を軽くすることである。つまり、10 l/minで吸引するためには、吸引ポンプの重量もさることながら、ポンプを駆動するために必要な容量の充電式電池が重く、粉じん計の重量は10 kgを下回することは不可能であった。

2・3・2 分粒方式 質量濃度測定器における分粒方式には、慣性衝突型、多段型およびサイクロン型がある。このうち、本器の分粒方式については、慣性衝突型を採用した。慣性衝突型分粒装置は取り込み風速が大きいために、気流の流速や方向が測定値に与える影響が少ないと考えられる。したがって、作業環境における粉じん測定のみにとどまらず、個人曝露の測定や集塵装置の性能評価などにも利用することが可能である。

多段型分粒装置は、測定時に装置本体を水平に保つ必要があり、かつ取り込み速度が小さいために坑内気流速度の大小が測定値に影響を与える可能性がある³⁾。さらに、分粒板上に堆積した粉じんの再飛散も考えられる。また、サイクロン型は、捕集効率曲線が多段型や慣性衝突型と異なり、従来の粉じん測定器で測定した測定結果が直接対比できないなどの問題がある。

2・3・3 設計寸法 捕集ヘッドの概略図を図3に示す。C-30の捕集特性が、わが国で定められている吸入性粉じん濃度測定の際の基準になるので、LV-5E粉じん捕集ヘッドの吸入口寸法もこれと同等の吸入性粉じん捕集特性を有するように決める必要がある。

ここで、一般に、慣性衝突による粒子の捕集効率は、次式で表されるようなパラメータに支配される⁴⁾。

$$\phi = \frac{C \rho d^2 V}{18 \mu D} \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 ϕ : 慣性パラメータ [—]

C : すべり補正係数 (slip correction factor)

ρ : 粒子密度 [g/cm³]

d : 粒径 [cm]

V : 吸引速度 [cm/s]

μ : 空気粘度 [g/cm・s]

D : 吸入口直径 [cm]

慣性パラメータ ϕ は、粒子の停止距離 (stopping distance) と吸入口直径との比で定義される無次元数であり、慣性衝突型分粒装置の捕集効率曲線は通常慣性パラメータ ϕ の平方根 $\sqrt{\phi}$ に対する捕集効率曲線であらわされる。RanzとWongが慣性衝突型分粒装置の捕集効率を数値解析および実験値によって求めた結果⁴⁾を、

図3 LV-5E捕集ヘッド概要図

 図4 慣性衝突型分粒装置の捕集効率⁴⁾

図4に示す。

そこで、図4より、捕集効率100% に対応する $\sqrt{\phi}$ の最小の値0.56を、多段型分粒装置(C-30型)の捕集効率100%に対応する最小の粒子径 $7.07 \mu\text{m}$ にあわせて、

$$C = 1.0$$

$$\rho = 1.0 \text{ g/cm}^3$$

$$\mu = 1.84 \times 10^{-4} \text{ g/cm} \cdot \text{s}$$

という条件をLV-5E 捕集ヘッドに適用すると、(1)式より、吸入口直径は 3.71 mm になる。これらの条件を用い、図4の関係からLV-5E捕集ヘッドの粒径と捕集効率の関係を求めた結果を、多段型分粒装置(C-30型)の捕集効率とともに、図5に示す。

実際にはウォールロスなど本装置固有の特性が考えられるので、LV-5EがC-30と同等の測定値を示すと思われる最適吸入口直径は、 3.71 mm ではなくて、その付近にあると考えられる。そこで、LV-5E捕集ヘッドの吸入口口径は、 3.71 mm を中心として異なる口径の吸入口を作製し、それぞれの吸入口口径についてC-30との並行測定実験を行い、C-30と同等の吸入性粉じん濃度が得られるものを選定することとし、その口径をLV-5Eの最適口径値とした。

吸入口口径以外の捕集ヘッド各寸法については、慣性衝突型分粒装置の吸入口におけるReynolds数 Re が500と3,000の間にあり、さらに $x/D > 1.0$ (x : 吸入口と衝突板間の距離)の条件を満たしていれば、 x/D の値や吸入口の長さ、およびReynolds数は捕集効率に大きく影響を与えないことがわかっている⁵⁾。そこで、吸入口口径以外については、この条件をもとに捕集ヘッドの

図5 LV-5E粉じん捕集ヘッドの捕集効率

寸法概略を図3のように定めた。

3. LV-5Eの特性

3.1 特性実験装置と方法

粉じんをマイクロフィーダ(MF-2型、柴田科学器械工業(株)製)からダストチャンバへ供給して、ダストチャンバ内で並行測定を行う方法をとった。本装置は、マイクロフィーダからの試料供給量を変えることにより、ダストチャンバ内の濃度を調節することができる。また粉じんの均一拡散を助けるため、ダストチャンバ内天井中央にはファンを設けている。寸法はサブチャンバ、ダストチャンバがそれぞれ、 $W 500 \times D 490 \times H 290$, $W 1,700 \times D 1,700 \times H 1,980$ (mm)である。

粉じん試料には、アリゾナロードダスト(Fine)、炭じん、炭酸カルシウム粉末を用いた。アリゾナロードダスト(Fine)は、SAE推奨規格に定められる米国の試験用粉じんで、多くの粉じん計の校正用標準粉じんとして使用されている多分散の粉じん試料である。またこの試料の中位粒径は約 $8 \mu\text{m}$ 、真比重2.6である。

各実験に使用したC-30とLV-5Eのろ紙には、Pallflex Products製のテフロンバインダガラスフィルタ・T60A20(以下、T60A20と記す)を用いた。

3.2 最適吸引口径の選定実験

慣性衝突の理論より導出された口径値 $D=3.71 \text{ mm}$ の周辺の値の吸入口を用意し、C-30との並行測定を行った。

慣性衝突型分粒装置においては、口径を小さくすると吸引速度が増加して粉じん粒子の慣性力が増す。よって、衝突板に捕集される粒子の割合が増え、相対的に衝突板後方のろ紙に捕集される粉じん量が減ると考えられる。そこで、C-30による吸入性粉じん濃度測定値に対しLV-5Eの測定値が高ければ、より小さい口径について、C-30よりLV-5Eの値が低い場合はより大きい口径について、それぞれ並行測定を行い、最適吸引口径を求めた。

アリゾナロードダストを用いた並行測定結果を表1に示す。これより、測定値がC-30による値にもっとも近く、すなわち捕集特性がC-30の特性に近いと考えられる口径値は $\phi 3.65 \text{ mm}$ であることがわかった。

表1 LV-5E吸入口口径の変化に対するC-30との相関の変化

LV-5E 口径mm	吸入口における 吸引速度 m/s	サンプリング 数	回帰計算結果(零点回帰)	
			回帰直線式	相関係数
3.71	7.71	9	$y = 1.02x$	1.000
3.65	7.96	11	$y = 1.00x$	0.999
3.60	8.19	11	$y = 0.986x$	0.998

(試料: アリゾナロードダスト)

図6 LV-5EとC-30の相関

図7 C-30とLVS-10Bの相関性

3.3 C-30との特性比較実験

LV-5E (吸入口径 ϕ 3.65mm)とC-30との測定値の関係を、アリゾナロードダスト、炭じん、炭酸カルシウムの3試料についてまとめた結果を図6に示す。また、C-30とLVS-10Bとの並行測定を砂岩を試料として行った結果を図7にあわせて示す。

図6より、LV-5EとC-30の吸入性粉じん濃度の関係は、回帰直線の傾きは1に近く、相関性もよい。二つの粉じん計による測定値はほぼ同じ値を示している。また、図7のように、LVS-10BとC-30の吸入性粉じん濃度も、ほぼ1:1の関係にあるから、従来の炭鉱用粉じん計であるLVS-10BもLV-5Eとほぼ同じ値を示すと考えられる。

LV-5EとC-30はその分粒方式が異なるから、分粒特性も変わる。また、LV-5EやC-30のように粒子を空気力学的に分粒捕集する機構では、粉じんの粒度分布が濃度の測定値に大きく反映する。したがって粉じんの粒度分布の違いによって、双方の測定値の相関性に影響することが考えられる。

浮遊粉じんの粒度分布状態を示す指標の一つとして、 RT 比がある。これは採取した総粉じん (total dust; T) 中の吸入性粉じん (respirable dust; R) の質量比であって、 RT 比の大小は吸入性粉じん (粒径 $7.07\mu\text{m}$ 以下) 含有比の大小、すなわち微粒

子の多少を表す。

相関性測定に使用した粉じんの RT 比は0.302~0.702の範囲にあって、粒度分布は多様であったが、LV-5EとC-30の測定結果 (質量濃度) はいずれもほぼ等しかった。したがって、両測定器の測定値に対する相関性は極めて高く、分粒特性も問題ないと判定した。

LV-5E捕集ヘッド衝突板表面に塗布するグリスは捕集粒子の再飛散を防いでいるが、粉じん濃度が高濃度の場合または長時間サンプリングを行った場合などでは、粉じん粒子は衝突板上に中心部から円錐状の堆積を作ったり、捕集量が多くなればグリスの捕集力が弱まって粉じん粒子の再飛散が起こりやすくなる。本実験において、衝突板上の捕集量は最高約4mgであったが、実用上においては衝突板後方に粒子が再飛散した徴候はほとんどなかった。

4. 結 言

3種類の粉じんを用いて作られた粉じん雲封入のダストチャンバによる、粉じん捕集試験の結果、LV-5Eに装着すべき捕集ヘッドは、その吸入口径が3.65mmの場合、従来型サンブラC-30およびLVS-10Bの測定値と等しく、いずれともほぼ1:1の相関関係を示すことが確認された。すなわちLV-5Eは炭鉱坑内用質量濃度式粉じん計として、十分に機能し得る可能性が証明されたものと考えられる。

本論文の作成にあたり、柴田科学器械工業(株)小山博巳氏には多大なる御尽力をいただき、心より謝意を表す。

なお、本研究は、平成2年度通産省保安委託事業費の一部によって行っていることを付記する。

引 用 文 献

- 1) (株)ダン科学: ポータブルエアサンプラーLVS-10B取扱説明書
- 2) 労働省安全衛生部環境改善室編: 新訂作業環境測定ガイドブック1-鉱物性粉じん関係-, 60, (1990), (社)日本作業環境測定協会
- 3) 本間克典: 作業環境, Vol. 4, p. 38-43, (1983)
- 4) Ranz, W. E. and Wong, J. B.: Ind. Eng. Chem., Vol. 44, p. 1371-1381, (1952)
- 5) Marple, V. A. and Liu, B. Y. H.: Env. Sci. Tech., Vol. 8, p. 648-654, (1974)