粉塵抑制のための噴霧散水に関する基礎的研究*

正 会 員 伊 木 正 二**

正 会 員 田 尻 昭 英***

Study on Water Spray for Dust Control

Shôji IKI

Akihide TAJIRI

We have investigated drop-size distributions from centrifugal pressure nozzles, by changing water pressure and height of nozzles.

a) Quantity of water is proportional to the product of orifice diameter and square root of water pressure.

$$Q=348d_0\sqrt{P}$$

b) Spray cone angle is proportional to square root of water pressure below 3~4kg/cm².

c) Average drop-size is inverse proportional to water pressure below 3~4kg/cm².

1. 緒 言

鉱山炭鉱における粉塵を抑制するために、最も広く採用されているのは散水噴霧であるが、如何なる噴霧が粉塵抑制に最も効果があるかは明らかでない。筆者等は噴霧の粉塵抑制効果を研究する目的で、まず噴霧器ならびに噴霧粒子の特性につき研究を行った。

2. 実験装置

実験に使用した主なものは、ノズル、シャッター装置、試料採取装置及び計測装置に区分される。

(1) ノズル——坑内で使用されている散水ノズルには色々な種類のものがあるが、本実験に使用したものは、第1図に示すような構造の簡単な宝鉾器製強制旋回

第1図 試験用ノズル

A: 圧縮空気タンク, B: 密閉水タンク, C: 逆気弁, D: 廢気弁, E: 逆気弁, F: 圧力計, G: ノズル, H: 試料採取台, I: シャッター, J: シャッター用錘

第2図 水滴試料採取装置

圧力ノズルで、ノズルオリフィスは直径3.0, 2.5, 2.0及び0.8mmの4種類とした。なお、噴霧器のグループコアーは同一のものを使用した。

(2) 流路系統——第2図に示す如く、試験時における流水路、すなわち噴霧のための回路は、水タンクに連結された圧縮空気によって、タンク内の水を加圧し、水はノズル内で強制的にエネルギーが与えられ、大気中に噴霧される。使用圧力は、坑内において使用される圧力を考慮し、6~1kg/cm²を0.5kg/cm²毎に11段階に分けて試験した。

(3) シャッター装置——噴霧化された水滴の分布状態を調べるために、レール上を動く台車に取付けたシャッター装置を作り、適当な時間内に試料を捕えた。この露出時間はオシログラフにより計測した結果0.096secである。

(4) 試料捕捉装置——第2図に示す如く直径3cmの孔のある台を作り、その下に表面に油を塗ったデッキグ

* 昭和29年4月17日受理

** 工 博 東京大学助教授 鉱山学教室

*** 資源技術試験所 技官

ラスを挿入したものを、シャッターの下すなわちレール台の上に置いた。水滴捕捉のための油は、各種機械油を混合したものを用いた。棚沢氏によれば、液体粒子捕捉用の油は、粒化された液体よりも表面張力が少なくとも 10dyne/cm 以上小さくしなければならないといわれており、単一油では微粒子が油中に入り込んでも粒子相互間の表面張力により凝集し易くなる。各種機械油の混合物を用いた結果、捕捉粒子は凝集し難くなった。本実験に使用した油の表面張力は Redwood 1 号型試験器で、97 cm ストークス単位であつた。塗布する油の厚さは平均 1 mm 程度に一樣に且つ気泡の出来ないように塗り、計測の終るまで水平に保持した。

(5) 計測——デッキガラス上に塗布した油中に捕捉した噴霧粒子は、長時間経過すると、凝集或いは蒸発作用を起す傾向があるので、試料採取後直ちにデッキガラスを取出し、顕微鏡撮影装置により写真を撮り計測を行った。なお顕微鏡には接眼レンズ側に方眼マイクロメータを挿入し計測に便ならしめた。

3. 水量と水圧との関係

前述の 4 箇のノズルについて、圧力（平方根目盛で示す）と水量との関係を測定した結果を第 3 図に示す。すなわち作動圧力を P kg/cm²、流量を Q cc/min とすれば、

第 3 図 水圧と水量との関係

両者の関係は次式で表わされる。

$$Q = K\sqrt{P}$$

ここに K は各ノズル固有の係数で、各ノズルについて示す次の通りである。

ノズル番号	孔径 d_0 mm	係数 K
No. 1	3.0	1051
No. 2	2.5	861
No. 3	2.0	697
No. 4	0.8	282

係数 K とノズルオリフィス d_0 との関係は第 4 図に示す如く、 K は d_0 に比例する。上の K と d_0 より平均法により数値を計算し、

第 4 図 ノズル係数とオリフィス径との関係

$$Q = 348d_0\sqrt{P}$$

なる実験式が得られた。

Novikov 氏は液体の粘性を無視し得るものとして、旋回ノズル内の液体の流れを理論的に説明しているが、本実験に用いたノズルの如くグループコアーを用いていない。グループコアーを入れた強制旋回圧力ノズルについて考えると、

$$Q_1 = \text{水量 cc/sec}$$

V_0 = グループコアーの溝を出た点における切線速度成分

α = 溝が水平面となす角度

N = 溝の数 (本実験に使用したものは $N=2$)

A = 溝の断面積 cm²

R = ノズル入口の半径 cm

r = ノズル内における軸を中心とする任意の同心円の半径 cm

V = 半径 r の円周上の切線速度成分

U = 半径 r の円周上の垂直速度成分

r_0 = オリフィスの半径 cm

r_{ac} = 空気芯の半径 cm

V_0 = オリフィスを出た点における切線速度成分

P = 圧力水頭

U_0 = オリフィスを出た点における垂直速度成分

H_t = 全水頭

$$\text{とすれば } V_0 = \frac{Q_1 \cos \alpha}{NA} \quad (1)$$

$$V \cdot R = V_r \quad (2)$$

$$P + \frac{V^2}{2g} + \frac{U^2}{2g} = H \quad (3)$$

$$(2) \text{ と } (3) \text{ より } \frac{dP}{dr} = \frac{V^2}{gr} = \frac{Q_1^2 h^2 \cos^2 \alpha}{N^2 A^2 g r^3}$$

$$\text{これを積分して } P = -\frac{Q_1^2 h^2 \cos^2 \alpha}{2g r_0^2 N^2 A^2} + C$$

ここで $r_0 = r_{ac}$ のときは $P=0$ であるから

$$P = \frac{Q_1^2 h^2 \cos^2 \alpha}{2g r_0^2 N^2 A^2} \left(\frac{1}{C^2} - 1 \right) \quad (4)$$

$$\text{ただし } \frac{r_{ac}}{r_0} = C$$

$$\text{また, } V_0^2 = \frac{Q_1^2 R^2 \cos^2 \alpha}{N^2 A^2 r_0^2}, U_0^2 = \frac{Q_1^2}{\pi^2 r^4 (1-C^2)^2} \text{ であるから}$$

$$H_t = \frac{Q_1^2}{2g r_0^2} \left\{ \frac{R^2 \cos^2 \alpha}{N^2 A^2 C^2} + \frac{1}{\pi^2 r_0^2 (1-C^2)^2} \right\}$$

$$\therefore Q_1 = r_0 \sqrt{2gH} \sqrt{\frac{1}{N^2 A^2 O^2 + \pi^2 r_0^2 (1-O^2)^2}} \quad (5)$$

(5)式において O が非常に小さいときは、

$\frac{1}{\pi^2 r_0^2 (1-O^2)^2}$ は $\frac{R^2 \cos^2 \alpha}{N^2 A^2 O^2}$ に対し無視出来る。したがってその場合には、

$$Q_1 = K' r_0 \sqrt{2gH} = K'' d_0 \sqrt{2gH} \quad (6)$$

ただし K' K'' は常数

となり、本実験に使用したノズルでも、水量は $d_0 \sqrt{P}$ に直接比例することが理論的にもいえることになる。

4. 散水角度と圧力との関係

散水角度は、その散水効果を確める上に必要であると同時に散水装置を取付ける指針ともなる。各ノズルから散水した場合の状態をその側面より撮影し、写真により

散水角度を測定した。その結果を第5図に示す。これにより次の如き関係が認められる。

(1) Novikov³⁾及びVörös³⁾両氏は旋回ノズルにおいて散水角は或る圧力以上では変化しなくなること報告しているが、本実験においても3.0~4.0kg/cm²で限界角度を示し、それ以上の圧力に対しては殆ど変化を見られず、逆に散水角度が小さくなる傾向も見られる。

(2) 散水角度はオリフィスの直径の

第5図 水圧と散水角度との関係

増大と共に大きくなり或る函数関係を持つている。

これらの関係を検討するに、散水角度を変化させる要因は、オリフィスの直径とは無関係で、ノズル内部の構造によるものと推察される。Heavey⁴⁾及びHermann⁴⁾両氏の報告によれば、旋回室内の液体は、2つの異つた渦巻層流に分けられ、1つは自由な回転運動をしている自由渦巻で、他は中心近くでは殆ど摩擦力のない程度に切線速度が大になり、かつ定角速度を有する強制渦巻である。散水角度はこの両者間の相対関係によつて左右されている。(1)及び(6)式より、

$$V_G = \frac{K'' d_0 \sqrt{P \cos \alpha}}{NA}$$

今ノズル入口の直径を D とすれば、

$$V_0 d_0 = V_G D$$

であるから、

$$V_0 = \frac{DK'' \sqrt{P \cos \alpha}}{NA} \quad U_0 = \frac{K'' \sqrt{P}}{\pi d_0 (1-O^2)}$$

$$\therefore \frac{V_0}{U_0} = \frac{\pi D (1-O^2) \cos \alpha}{NA} d_0$$

すなわち $\frac{V_0}{U_0}$ は圧力 P には無関係で d_0 に比例することが判る。

次に自由渦巻の切線速度は散水角度 θ を決定する重要な要因となる。いまこれを V とすると

$$V = \frac{K'' d_0 \sqrt{P \cos \alpha}}{NA}$$

となり、 θ が $\frac{V}{U_0}$ 及び V の函数として表わされるものとし

$$\theta = f(V) + G\left(\frac{V_0}{U_0}\right)$$

とすれば $\theta = f(d_0 \sqrt{P}) + G(d_0)$

となる。ここで第5図の値より平均法によつて係数を求めると、直線部分については

$$\theta = 15 d_0 \sqrt{P} + 8 d_0^{1.5}$$

なる実験式が求められる。No.2ノズル ($d_0=2.5\text{mm}$) においては、 $P=1\text{kg/cm}^2$ の値が極めて小さく出たのは、ノズル内に障害物が混入したためと思われる。

5. 噴霧粒度分布

油面に落ちた水滴は、水滴が油面に接し、これが油底に沈むまでは上及び側面から見て円形に見えるので球形と見做すことが出来るものと思われる。これは水と本実験に用いた油の表面張力が、それぞれ73及び30dyne/cmであるためで、表面張力の差の大なるもの程良いように

a) ノズル真下

b) ノズル軸より10cm

c) ノズル軸より20cm

d) ノズル軸より30cm

(ノズルオリフィス $d_0=2.0\text{mm}$, 水圧 $P=3.5\text{kg/cm}^2$)

(ノズルの高さ $H=0.5\text{m}$ の場合、方眼目盛 70μ)

第6図 ノズル軸よりの水平距離の変化に伴う水滴粒子

思われる。

ノズルの高さを0.5, 1, 1.5mにし、試料採取位置をノズル真下からの水平距離0, 10, 20, 30cmにしてその粒度分布を調べた。その一例を第6図にしたが、これはTurner 及び Moulton 両氏の実験結果と良く一致している。今各粒子径の平方根を取り、その頻度曲線を求め、その平均粒度を求めた。その一例を第7図に示す。

(1) 作動圧力と粒度——上述の如くして求めた各ノズルの速度と作動圧力との関係は第8図に示す如く、粒

(ノズルオリフィス $d_0=2.0\text{mm}$, 水圧 $P=4\text{kg/cm}^2$ の場合)

第7図 噴霧水滴粒度頻度曲線

度と圧力とは、その平方根を取れば、或る圧力までは、ほぼ直線的な関係を有し、それ以上の圧力においては不規則な状態を示した。これは散水角度と粒度の平方根とが或る値の作動圧力以上になると余り変化しなくなるためで、しかもその圧力はほぼ等しい。

(ノズル真下高さ0.5mの場合)

第8図 ノズル別粒度分布

(2) オリフィスの直径と粒度——第8図における直線部分の関係を $\sqrt{D}=A\sqrt{P}+B$ (ただし D は粒度) と

ノズル番号	$d_0\text{mm}$	A	B
No.1	3.0	-4.4	14.6
No.2	2.5	-5.2	16.3
No.3	2.0	-6.0	18.2
No.4	0.8	-7.7	22.8

して各ノズルについて平均法により係数 A, B を求めると次の通りである。

これによると d_0 と A, B

との間に直線的関係があつて

$$A=1.52d_0-8.98 \quad B=25.73-3.75d_0$$

であるから

$$\sqrt{D}=(15.2d_0-8.98)\sqrt{P}-3.75d_0+25.73$$

なる実験式が得られる。勿論この式はノズル軸上におけるもので、圧力約 3.5kg/cm^2 までの直線部分についてのみ適用されるものである。

(3) 噴霧器オリフィスからの距離と粒度——ノズルの高さを0.5, 1.0, 1.5mに変化させ、ノズル軸からの水平距離を0, 10, 20, 30cmに変えた場合の粒子を見ると、一般にオリフィスからの距離が増大するにしたがつて、粒度が大きくなっている。その一例は第6図及び第9図に示した通りである。これは噴霧粒子の落下時にお

(ノズルオリフィス $d_0=3.0\text{mm}$, ノズル高さ $H=0.5\text{m}$ の場合)

第9図 ノズル軸からの距離の変化に伴う平均粒度分布

(水圧 $P=3.5\text{kg/cm}^2$ の場合)

第10図 散水角と水滴粒度との関係

ける複雑な運動と、落下中における粒子が落下速度の違うために凝集を起したり、微粒子は落下中に蒸発する等の影響があるものと考えられる。これと同時に考えなければならぬことは、ノズル軸からの距離 l が、散水角度 θ に対する相対距離は、圧力の変化に伴って変化するも

ので、圧力の増加は散布範囲を大きくすると同時に、 $l/H \tan \theta$ は小さくなる結果を招く。第10図は $l/H \tan \theta$ に対する粒度分布の一例を示したもので、この曲線はTate及びMarshall両氏の報告と相似である。第9図に示す如く、すべての直線はほぼ平行し、ノズル軸から遠去かるにしたがつて、直線部分から変化する彎曲点は圧力の

高い方に移動する。このことは Harvey 及び Herman-dorfer 両氏の提説を裏付けるものである。

6. 結 論

以上の実験ならびに理論的研究の結果、本実験に使用した強制圧力旋回ノズルについては次の如き結論が得られた。

(1) 本実験に使用したノズルでは、水量はオリフィス直径と作動圧力の平方根の相乗積に比例する。

(2) 噴霧散水における散水角は、 $3\sim 4\text{kg/cm}^2$ までは作動圧力と共に変化するが、それ以上の圧力に対しては余り変化が見られない。又ノズルオリフィスの直径が大きくなれば、散水角度も大となり、作動圧力、オリフィス直径の3者の間に一定の関係がある。

(3) 一定圧力下におけるノズルにより形成された水滴粒度の平方根は、平均粒度の平方根を中心として、ほぼ正規的分布を示す。しかも圧力の変化に伴う変化は、或る圧力までは直線的に小さくなる傾向を示すが、それ以上の圧力に対しては余り変化を見せず、或は逆に大きくなる傾向を示すこともある。

また、水平方向における水滴粒度分布は中心より外側に行くにしたがい、またノズルの高さ、すなわち到達距離が大きくなるにしたがつて粒度は大きくなる。

ノズル直下の点から一定距離にある地点に落下する水滴粒度の作動圧力に対する変化は、中心点における変化と平行的であつて或る間隔の位相差をもち、圧力に対して変化を見せなくなる彎曲点は、中心を離れるにしたがつて圧力の高い方へ移行していく。

附記 本研究を行うに当つて、使用ノズルを提供して頂い宝鉱器K.K. 当初より実験に協力された採鉱実験室の吉田教官、大場重美君その他の諸氏に対し深甚なる謝意を表する次第である。なお本研究費の一部は文部省科学試験研究費によつた。

参 考 文 献

- 1) 棚沢泰：化学機械協会誌 第7巻，1949
- 2) M. Doumas & R. Laster：Chem. Eng. Prog. Vol. 49, No.10, 1953
- 3) 前掲，2)
- 4) R.W. Tate & Marshall：Chem. Eng. Prog. Vol. 49, No.4 No.5 1953
- 5) G.M. Turner & R.M. Moulton：Chem. Eng. Prog. Vol. 49 No.4 1953 P. 185~90
- 6) 前掲，4)
- 7) 同上，4)

新しい通気管 (Ventiltion tubing)

第2次大戦中米国で発達し Spiratube という名で市販されたもので、英国でも George Maclellan 会社より販売されることになった。耐摩耗性、耐火性に優れた風管である。

これは、螺旋状に編んだ丈夫な布の芯にスプリング・ワイヤを入れたもので作つてある。仕上の型はその目的によつて異なるが、被覆材料としては、ネオプレン、ゴム、ポリビニールクロライド、シリコン重合体等が使われている。利用出来る大きさは、直径3'~30'のもので、設計は容易に変更出来るので、特殊な要求に応ずることが出来る。特殊な取付具や、カップリングを使えば取扱も簡単で、特殊な作業にも使える。スプリングワイヤのために十分な可撓性をもつていて、吹込式、吸出式いづれにも有効に使える。25'の長さのものを3'まで縮めることが出来、かつ非常に軽いので、運搬に便利である。

耐火性であるから消火器具としても使えるが、耐摩耗性であるから、粉塵排除作業——磨耗させる材料を多量に含んだものの運搬——に期待が持たれている。

Spiratube は10秒以内に連結、取外しが出来る。連結は一端を絞つて、他の端に差込むだけで、十分気

密性を保つことが出来る。

通気抵抗は小さく、1例をあげると、外径12'の Spiratube は 2000 ft³/min の風を送つて、100ft 当り、水柱で 1' の損失しかない。また 1000ft³/min の風を送つた場合には、100ft 当り、わずか 0.3' の損失であると称せられている。

(Coll. Eng. Feb. 1954, p. 75 より) (原木)

1934年 Green と Watson が作つた粉塵計で、ガスの熱拡散の原理によつて見るものである。粉塵のある空気を小さな室を通して吸込む。この室の中心に100°Cまで熱せられた管を入れ、その両側に粉塵を沈降させるガラス板を管からわずかの距離に置く。各ガラス板は円筒形の銅ブロックと連絡して、ガラスの熱は銅ブロックにより持去られ、管とガラスとの温度差を、粉塵が沈降す

るのに必要な程度に保持している。20~0.2 μ の大きさの粉塵は100%空気試料から分離される。thermal precipitatorには、持運びの出来るピストン式コンプレッサと蓄電池を備えていて、最大7cm³/minの空気試料を通すことが出来、わずかの粉塵を含む試料から粉塵を取去る時間は約30分である。(Berg. Tech. Juli 1953 p. 311 より) (伊木)

サーマルプレシピテータ (Thermal Precipitator)