

## Spinning Disc Aerosol Generator の特性実験\*

渡 辺 征 紀\*\* 本 郷 昭 三\*\* 鈴 木 間 左 支\*\*

## Experimental Study on Spinning Disc Aerosol Generator

by

Seiki WATANABE, Shozo HONGO and Masashi SUZUKI

(National Institute of Radiological Science, Chiba)

In order to perform the evaluation of airborne dust in facilities for the atomic energy and to study the inhalation of radioactive aerosols, proper attention must be paid on the particle size distribution of the aerosols. Particularly, the monodispersed aerosols of proper size are required for the evaluation of internal exposure and the calibration of particle counters.

This paper describes the study on the mechanism of generation of aerosols from a spinning disc aerosol generator and the characteristics of the generated particles. Monodispersed aerosols of the size from 2 to 12  $\mu\text{m}$  with the geometric standard deviation of less than 1.2 could be generated from the solution of methylene blue by a 2 cm-diameter glass spinning disc spun by an electric motor at 20 000 to 40 000 rpm. The particle size or mass median diameter of the generated aerosols indicated a linear relationship with cube root of the concentration of feeding solution. Aerosols were collected by thermopositor and their sizes were measured by taking their microscopic photographs.

As to the relation between the surface tension of feeding solution and projecting distance of main droplet, the following results were obtained: The projecting distance of main droplet was in inverse proportion to the angular velocity of disc but was in proportion to the surface tension of feeding solution and to the square of  $K$  value of the equation (2). The experimental values agreed approximately with the calculated values.

(Received Feb. 22, 1973)

## 1 緒 言

原子力施設内における空気汚染の評価, および放射性エアロゾルの吸入評価を適切に行なう場合, エアロゾルの粒度分布に対して充分考慮されなければならない. そのためこれらの評価の基礎となる実験において, それぞれ使用に適した単分散粒子発生装置が必要となる. 1 ミクロン ( $\mu\text{m}$ , 以下 $\mu$ と記す) 以下の粒子の発生についてはすでに筆者らが報告したので, ここでは 1  $\mu$  から 10  $\mu$  程度の比較的大きい粒子を発生するスピニングディスク粒子発生装置 (Spinning disc aerosol generator 以下 S. D. A. G. と記す) を試作し, この装置の特性に関する実験を試みた.

S. D. A. G. は Walton<sup>2)</sup>により紹介され, Whitby<sup>3)</sup>その他による報告がある. この方法は高速回転中の円板 (1 cm $\phi$ ~8 cm $\phi$  程度) 上に液体を供給し, 液滴を飛散, 発生させるもので非常にそろった粒子径 ( $\sigma_g \approx$

1.1) をもつ主粒子と, それより小さい副粒子が発生する. 主粒子と副粒子は円板から飛散する距離 (以下飛程と記す) が異なるので簡単に分離できる. Waltonらは粒子の発生過程について検討し, 主粒子の径は次式で表わされることを導いている.

$$d_s = \frac{K}{\omega} \sqrt{\frac{T}{\rho_s D}} \quad (1)$$

また発生後液滴が乾燥し 1 個の固体粒子を形成するとすれば次式が得られる.

$$d_p = \left(\frac{c}{\rho_p}\right)^{1/3} d_s = \frac{K}{\omega} \left(\frac{T}{\rho_s D}\right)^{1/2} \left(\frac{c}{\rho_p}\right)^{1/3} \quad (2)$$

ここで

$d_s$  主粒子直径 (cm)  $d_p$  固体粒子直径 (cm)  
 $K$  比例定数  $\rho_p$  固体粒子密度 (g/cc)  
 $\rho_s$  溶液密度 (g/cc)  $T$  溶液表面張力 (dyn/cm)  
 $D$  円板直径 (dm)  $c$  溶液濃度 (%)  
 $\omega$  円板角速度 (radian/sec)

(1)式中の  $K$  は恒常的な定数とならず, 実験によると

\* 原稿受理 昭和48年2月22日

\*\* 放射線医学総合研究所環境衛生研究部 千葉市穴川

2.7~6.6 (理論的には3.5~3.8) の値が報告されてい<sup>2,3)</sup>る。

本研究は S. D. A. G. を設計製作する際の基礎資料を得ることを目的として次の件について実験を行ない計算値と比較検討した。

- (1) 円板の回転数, 溶液濃度と発生粒子径について
- (2) 円板の回転数, 溶液の表面張力と発生粒子の飛程について

2 実験方法および計算方法

各種の円板 (1 cmφ, 2 cmφ, 3 cmφ の各直径について, 材質はガラス, アルミニウム, 黄銅, ステンレス, アクリルを使用) を用意し, 円板回転用モーターとしては超遠心分離機用のギアアップ方式のモーター (Max 55 000 RPM) MI, および高速グラインダー用モーター (Max 42 000 RPM) MII を使用した。予備実験の結果, MI は形状の大きさから粒子の集め方, 円板の回りの気流等に困難な問題が多いことがわかった。またディスクの材質は溶液との接触角が小さいものがよい特性を得やすいことがわかった。そこでこの報告は MII とガラス (2 cmφ) のディスクを用いた場合について述べる。試作したサンプリング装置の概要を Fig. 1 に示す。この装置の特徴は, 発生粒子の一部のみをとり出す機構のため, 回転数や表面張力などによって発生粒子の飛程が変化しても簡単に装置を組み替えることができる。

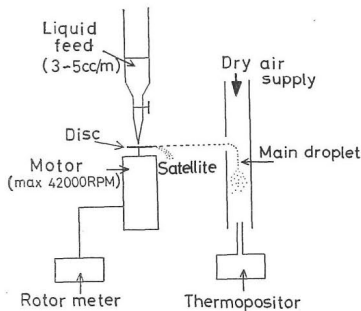


Fig. 1. Block diagram of spinning disc generator and sampling system.

試験溶液としてはアルコール水溶液を用い, 表面張力 (22 dyn/cm~73 dyn/cm) の影響に関する実験は, アルコールの容量パーセントを変えることによって行なった。発生粒子径を求める実験では, アルコール水溶液 (アルコール 75%, 水≒25%,  $\rho_s=0.85$  g/cc,  $T=25$  dyn/cm) にメチレンブルー (0.8%~0.0125%) を溶解して使用した。試料はサーモポジターにより集塵し顕微鏡写真により粒度分布を求めた。飛程の計算は(2)式によって計算された粒子径の粒子が円板の周速度を初期速度として飛散するとして, 電子計算機により粒子の運動方程式を逐次積分して求めた。この

とき粒子は乾燥等による粒子径の変化はないものとした。

3 結 果

3.1 粒子特性

発生した主粒子は 1μ から 12μ 程度で, 幾何標準偏差はほぼ 1.2 以内であった。Fig. 2 に主粒子の代表例を示し, 個々の結果を Table I に示す。溶液濃度および円板の回転数の関係を Fig. 3 に示す。これらの結果は(1)式で表わされる関係のある程度満足しながらも変動がみられた。副粒子の粒度分布については 20 000 rpm で主粒子の約 1/2 の粒子径をもち, 主粒子よりやや大きい幾何標準偏差 ( $\sigma_g$  1.1~1.5) をもって発生し, 溶液濃度と粒子径 (MMD) の関係を Fig. 3 に示した。

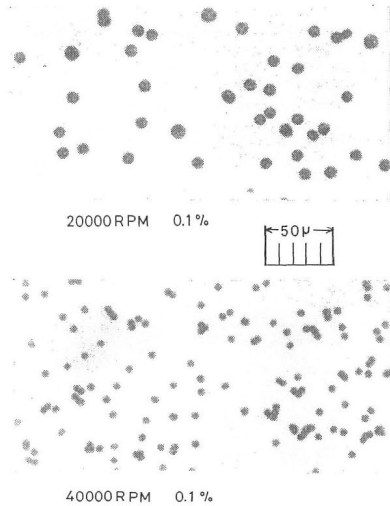


Fig. 2. Shape of generated methylene blue aerosol.

Table I. Some characteristics of the generator.

c (%)	20 000 RPM				40 000 RPM			
	$D_p$ μ	$\sigma_g$	K	P	$D_p$ μ	$\sigma_g$	K	P
0.8	12.8	1.09	3.88	1.08	8.2	1.09	4.98	1.38
0.4	9.4	1.16	3.59	1.00	6.4	1.09	4.89	1.36
0.2	8.9	1.16	4.29	1.19	5.1	1.09	4.89	1.36
0.1	8.3	1.19	5.04	1.40	4.6	1.17	5.58	1.55
0.05	5.0	1.08	3.82	1.06	3.6	1.19	5.51	1.53
0.025	4.7	1.12	4.53	1.25	2.7	1.24	5.20	1.44
0.0125	4.1	1.09	4.98	1.38	2.1	1.28	5.10	1.42
Average	K=4.7				P=1.3			

c : Dispersant concentration (wt % of methylene blue in 75 % methyl alcohol)

$D_p$ : Particle size (count median diameter: μm)

$\sigma_g$ : Geometric standard deviation

K:  $K=3.6 \cdot P$  (calculated value in case  $(\frac{T}{25})^{1/2} \cdot \rho_s^{-1/2} \rho_p^{-1/3} \approx 1$ )

P=Calculated value by equation (7)

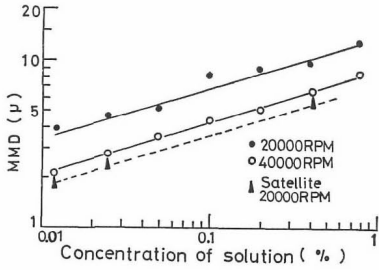


Fig. 3. Mass median diameter vs. solution concentration.

3・2 溶液の表面張力と飛程

供給溶液の表面張力を 22 dyn/cm から 73 dyn/cm の範囲内で変化させた場合、無風状態で円板の先端から発生する粒子が水平方向の速度を失うまでに飛ぶ距離(飛程)を実測した。Fig. 4 に実例(写真)および計算の代表例を示した。回転数および表面張力と飛程の関係を Fig. 5 に示す。計算値および実験値は同じ傾向を示し、飛程は表面張力にほぼ比例し回転数に逆比例する結果が得られた。しかし表面張力が上昇するに従って飛程が一定しくなり 73 dyn/cm 近くでは、

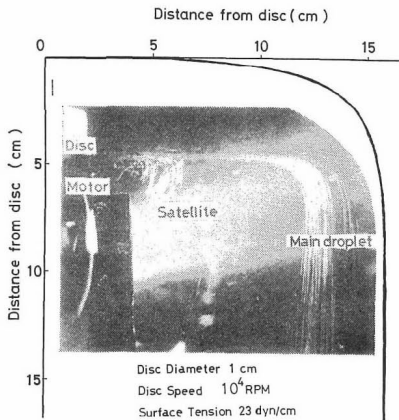


Fig. 4. Photograph of the track of the generated particles and calculated track of main droplet from the edge of disc.

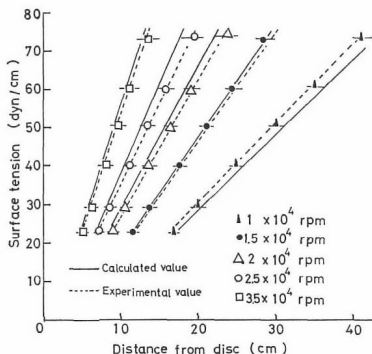


Fig. 5. Relationship between surface tension and distance from disc.

円板の先端から最大飛程まではほぼ連続した飛程を示した。粘性が飛程に与える影響についてはグリセリン溶液<sup>6)</sup>を使用して実験し、影響がないことを確認した。このように飛程が一定しない場合は粒度分布にひろがりをもつことが実験的に確かめられた。円板から発生する主粒子の水平方向(x軸)と垂直方向(y軸)の速度(VX, VY)の計算値の代表例を Fig. 6 に示す。

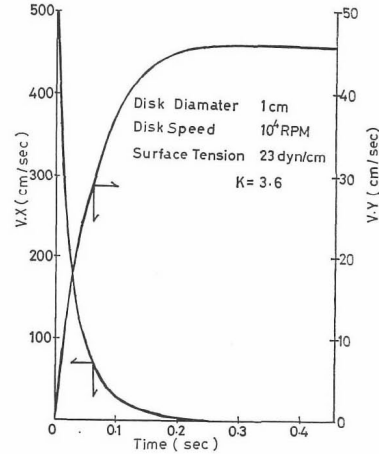


Fig. 6. Calculated horizontal velocity (V, X) and vertical velocity (V, Y) of main droplet vs. time.

4 考 察

主粒子は非常によい単分散粒子として得られるが、発生粒子径は回転数に反比例し、溶液濃度の<sup>1/3</sup>乗に比例するという(2)式の関係は必ずしも充分満足されていない。(2)式を回転数と溶液濃度に注目し、実用的見地から(2)式を変形して次のような実験式で表わすことができる。

$$D_p = \frac{37}{D^{1/2}} \cdot \frac{C^{1/3}}{W} \cdot P \tag{3}$$

ただし

$$P = \frac{K}{3.6 \cdot 1} \left( \frac{T}{25 \cdot 2} \right)^{1/2} \rho_s^{-1/2} \rho_p^{-1/3} \tag{4}$$

- ここで  $D_p$ : 主粒子の粒子径 ( $\mu$ )
- $W$ : 円板の回転数 ( $10^4$  rpm)
- $C$ : 溶液濃度 ( $100 \times$ )

(3)式に示す  $P$  を、上記の実験値から計算した結果および  $\rho_s^{-1/2} \cdot \rho_p^{-1/3} \cong 1$  (実際の  $\rho_s, \rho_p$  はそれぞれほとんど 1 に近い場合が多い) として(2)式の  $K$  について計算した結果を先の Table I に示した。本実験では  $\rho_s, T$  が一定(厳密には  $C$  によって多少変わるが、 $C$  が 1% 以下のためほとんど変化はない) のため、(4)式から  $P$  は一定値をとることが期待されたが、Table I の結

\*1 比例定数  $K$  の理論値<sup>9)</sup>。

\*2 75%アルコール水溶液の表面張力 (25 dyn/cm)。

果はかなり変動している。このような原因として、Whitby らは (a)円板上での溶媒の蒸発、(b)溶媒の不揮発性分が溶質とともに残る、と述べているが、その他見掛け上  $P$  に変動を与える要因として、(3)、(4)式から(c)固体粒子の密度が一定ではない。(d)供給溶液が円板の全面に広がらない等の理由により円板の先端以外から粒子が発生する(e)表面張力が変化するという要因が考えられる。

長時間 S. D. A. G. を運転すると円板上に溶質が析出する。したがって(a)の要因は溶液濃度が高い場合(d)(e)を併発するので注意しなければならない。Table I に示したように、溶液濃度が低い場合、 $\sigma_g$ 、 $P$  は大きくなり(b)の要因が関係しているものと思われる。飛程が一定でないのはほとんど(d)が原因で、この場合必ず  $\sigma_g$  が大きくなる。溶液と円板の接触角が大きい場合、溶液の供給率が適切でない場合、円板の端が不良の場合は(d)が起こる。これらの要因が単独に  $P$  値に過大に影響すると仮定した場合の  $P$  の変動の度を(3)、(4)式から求め、その値を Table II に示した。この表から個々の要因は必ずしも実験値を説明するのに充分大きくはない。いずれの実験値もほとんど  $\sigma_g$  が 1.2 以内であることから、Walton らの発生過程の解析が正しいとすれば、これらの要因の複合効果と考えることが妥当である。ここで(3)式について、 $P=1$ 、 $W=1$  の場合の粒子径  $D_p(\mu)$  と溶液濃度(%)との関係について計算した結果を Fig. 7 に示す。この図は、S. D. A. G. 設計の際の概算の粒子径を得るのに便利である。この図で得られた粒子径を  $P/W$  倍すると任意の条件下で

発生する粒子径が得られる。また、 $C=100\%$ に相当する粒子径は、円板の先端からの発生直後の粒子径を意味する。

## 5 結 論

試作した S. D. A. G. を使用し、メチレンブルーのアルコール溶液から粒子を発生させ実験で確かめられた点は次のとおりである。

- (1) 発生粒子の幾何標準偏差は 1.02~1.2 と小さい。
- (2) 円板の回転数を一定にした場合、供給溶液濃度(1%~0.01%)を変えることにより発生粒子径を 5 倍(濃度の  $\frac{1}{5}$  乗に比例)程度変えることができる。
- (3) 供給溶液濃度が一定の場合は、円板の回転数によって粒子径を変える(回転数に逆比例)ことができる。

また、飛程は表面張力とほぼ比例関係にあり、回転数とは逆比例の関係にあることが確かめられた。飛程は実用上の風量では短くすることは困難であり、S. D. A. G. の設計上重要な因子となる。

円板の回転数が一定である場合、S. D. A. G. で単分散粒子を発生させるための重要条件は、供給溶液を低流量率( $\leq 10$  cc/min)で円板全面を濡すことである。この問題は、供給溶液の表面張力を小さくすることなどによって解決され、比較的単分散粒子を得ることができる。

この S. D. A. G. は  $1\mu$  から  $10\mu$  程度の粒子径の単分散試験粒子を発生させるのに適した発生装置といえる。

(昭和47年10月31日 第10回粉体に関する討論会にて講演)

Table II. Changed ratio of  $P$

Influencing on the value of $P$	Changed ratio of $P$
When the real $\rho_s$ is 0.8 of the assumed value of $\rho_s$	1.1
When the real $\rho_p$ is 0.5 of the assumed value of $\rho_p$	1.26
When the real $T$ is 1.5 of the assumed value of $T$	1.22
When the impurity in solvent remain in same amount as solute.	1.25
When the aerosol is generated at the middle of the radius of disc.	1.4
When evaporation of solution is 30% on the disc.	1.2

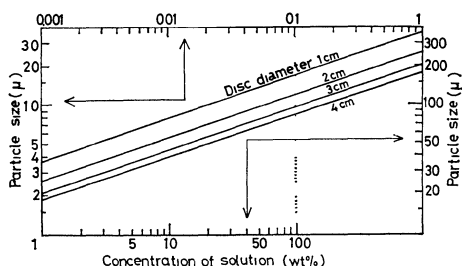


Fig. 7. Calculated value on particle size vs. concentration of solution.

## 参 考 文 献

- 1) 鈴木間左支, 渡辺征紀, 本郷昭三, 大畑 勉, 材料, 17, 564 (1968).
- 2) Walton, W.H., and W.C. Prewett, The Proceeding of the Physical Society, 62, 341 (1949).
- 3) Whitby, K. I., D. A. Lundgren, and C.M. Person, Int. J. Air. Wat. Poll., 9, 263 (1965).
- 4) Schwendiman, L.C., A.K. Postma, and L.F. Coleman, Health Phys., 10, 947 (1964).
- 5) 日本化学会編, “化学便覧”, 基礎編 II, p. 541 (1966) 丸善
- 6) 化学工学協会編, “化学工学便覧”, p. 37, 47 (1968) 丸善