物体による霧粒の捕捉*

(昭和29年9月13日受理) 会 員 植松時雄 狩野 武**

滝沢和弘 松浦方美

——→ 摘 要 ←——

研究目的

本研究の目的はキャリヤのエリミネータ板設計の一資料を得ることである。

まず一様な噴霧の流れの中に、流れに対して垂直に置かれた円柱および平板に対する霧粒の捕捉率を理論的に求めた。次に既報の一頭噴霧器の実験装置において、噴口から 40 cm の処に物体を置いて実験を行い理論値と比較した。この場合の物体としては霧粒を吸収しやすいことが必要であるために、円柱として白墨および山吹の芯を、平板としては吸取紙を用いた。

研究結果

霧粒の捕捉率 η は理論的に次式で与えられ、実験値と測定との誤差内ではほぼ一致している。すなわち

$$\text{円柱に対して: } \eta = \frac{4\sqrt{2} \lambda}{5\lambda + 4\sqrt{2}}, \quad \text{平板に対して: } \eta = \left(\frac{-\lambda^2 + \lambda\sqrt{\lambda^2 + 4}}{2} \right)^{\frac{1}{2}}$$

$$\lambda = \frac{g \gamma_l u_{xm} d_{xm}^2}{9 \mu D}$$

ただし、 g は重力の加速度、 γ_l は水の比重量、 u_{xm} は流れの速度、 d_{xm} は霧粒の直径、 μ は空気の粘性係数、 D は円柱の直径または平板の幅である。

1. 記 号

b_x : 噴霧の流れの中心線上で噴口から距離 x の処における噴霧の拡がりの幅 (cm) (以後、添字 x は流れの中心線にそって噴口から距離 x の処の値を示すことにする)

D : 円柱の直径および平板の幅 (cm)

d_{xm} : 霧粒の平均直径 (cm)

d_{xi} : それぞれの霧粒の直径 (cm)

g : 重力の加速度 (cm/s^2)

h : 噴霧器の水の吸込み高さ (cm)

k : 無次元の変数

L : 円柱および平板の長さ (cm)

n_i : 写真にあらわれたそれぞれの大きさの霧粒の個数

p'_e : 噴射空気圧力 (cm Hg)

Q_i, Q_{ao} : 噴射水量および室内の状態に換算した噴射空気量 (cm^3/s)

r : 噴霧の流れに垂直な断面上で流れの中心線からの距離 (cm)

s : 霧粒が流線から離れて円柱または平板に附着するまでの距離の始めの流れの方向の成分 (cm)

t_e : 噴霧の流れに円柱または平板を露出する時間 (s)

u_{xo}, u_{xr}, u_{xm} : 流れの中心線上における速度、中心線から距離 r の処における速度および流れに垂直な断面の平均速度 (cm/s)

W_1, W_2 : 霧粒が捕捉される前後の円柱または平板の重量 (g)

w_{xm} : 平均霧水量 (単位容積の空气中に均一に分布して含まれていると考えた霧粒の重量 (g/cm^3))

x : 流れの中心線にそって測った噴口からの距離 (cm)

(X, Y) : 円柱または平板の中心を原点にとった直角座標

λ : 無次元の変数

γ_l : 水の比重量 (g/cm^3)

μ : 空気の粘性係数 ($\text{g}\cdot\text{s/cm}^2$)

η : 霧粒の捕捉率 (単位時間に円柱または平板に捕捉される霧粒の重量と、同じ時間に流れに対し

* Deposition of Water Droplets on the Solid Surface. 昭和29年5月18日, 第7回年次大会研究発表会で講演

** T. Uematsu, T. Kano, Member. 大阪大学, K. Takizawa, M. Matsuura, 大阪大学学生

て垂直な円柱または平板の投影面を通過する霧粒の重量との比)

θ : 室内の温度 ($^{\circ}\text{C}$)

ϕ : 室内の湿度 (%)

2. 理 論 式

理論をすすめるにあたって次のように仮定する. すなわち

(a) 円柱および平板は無限に長く, 霧粒を含んだ一様な流れの中に流れに対して垂直に置かれたとする.

(b) 霧粒に働く力は気流から受ける Stokes の抵抗力だけで, 重力の作用は霧粒が微小であるので無視できる.

(c) 霧粒は物体から十分離れた処では気流と同一速度で流れるが, 物体の近傍では慣性力のために流線から離れる.

(d) 円柱あるいは平板に霧粒が附着してもその形および周りの流線の形は変わらない.

(1) 円柱による捕捉 第1図のように, 霧粒を含む一様な流れの中に置かれた無限に長い円柱の中心を原点

(第1図) 一様な噴霧の流れの中に置かれた円柱点として直角座標 (X, Y) をとると, 円柱の方程式は

$$X^2 + Y^2 = (D/2)^2 \quad \dots\dots\dots (1)$$

で, 流線の方程式は

$$Y \left\{ 1 - \frac{D^2}{4(X^2 + Y^2)} \right\} = kD \quad \dots\dots\dots (2)$$

で表わされる. 便宜上, 上半面について考えることにすると, X 軸からある限度よりも近い流線に沿って流れてきた霧粒は, 円柱の近傍で慣性のために曲線 EB のように流線から離れて円柱に捕捉される. この限度となる流線に沿って流れてきた霧粒が円柱に附着する点を B として X 軸に平行線 ABC を引き, Y 軸との交点を A , 流線との交点を C として $OA = Y_0$, $BC = \delta$ とすると

$$\delta = AC - AB = \left[\left\{ \left(\frac{D}{2} \right)^2 - Y_0^2 \right\} + \frac{kD^3}{4(Y_0 - kD)} \right]^{\frac{1}{2}} - \left\{ \left(\frac{D}{2} \right)^2 - Y_0^2 \right\}^{\frac{1}{2}} \quad \dots\dots\dots (3)$$

である.

ここで霧粒が流線から離れて円柱に附着すると考えるかわりに, 円柱が流線の方へ δ だけ移動して接触するとも考えても相対的に同じである. 円柱を流線に接するまで移動すべき距離 δ は両者の間の X 方向の最小距離に等しいはずである. 従って $d\delta/dY_0 = 0$ から接触点の Y 座標 Y_0 は

$$4Y_0^5 - 10kDY_0^4 - \left(\frac{1}{2} - 8k^2 \right) D^2 Y_0^3 + (9/8 - 2k^2) kD^3 Y_0^2 - k^2 D^4 Y_0/2 - kD^5/32 = 0$$

を満足する値でなければならない. k は一般に微小な値であるから二次以上の項を無視すると

$$Y_0 = \left(\frac{1}{2\sqrt{2}} + \frac{3}{8}k \right) D \quad \dots\dots\dots (4)$$

を得る. (4) 式を (3) 式に代入して整頓すると

$$\delta = \frac{2\sqrt{2}kD}{(2\sqrt{2} - 5k)} \quad \dots\dots\dots (5)$$

となる.

また一方霧粒が円柱の近傍で流線から離れて, 円柱に附着するまでの距離の X 方向の成分は Stokes の法則から

$$s = \frac{g\gamma_l u_{xm} d_{xm}^2}{18\mu} \quad \dots\dots\dots (6)$$

で与えられる. (5) 式で与えられる δ と (6) 式で与えられる s を等しいと置くと

$$k = \frac{2\sqrt{2}\lambda}{5\lambda + 4\sqrt{2}} \quad \dots\dots\dots (7)$$

を得る. ただし

$$\lambda = \frac{g\gamma_l u_{xm} d_{xm}^2}{9\mu D} = \frac{2s}{D} \quad \dots\dots\dots (8)$$

である.

さて前に定義したような捕捉率は, 霧粒が流れに一様に分布していると仮定すると, 円柱に捕捉される限界となる霧粒が飛行する流線の円柱から無限に遠い処における幅 $2Y_{X=\infty}$ と円柱の直径との比で表わされる. この場合 (2) 式で $X = \infty$ と置くと $Y_{X=\infty} = kD$ である. 従って捕捉率 η は

$$\eta = \frac{2Y_{X=\infty}}{D} = 2k = \frac{4\sqrt{2}\lambda}{5\lambda + 4\sqrt{2}} \quad \dots\dots\dots (9)$$

で与えられる.

(2) 平板による捕捉 第2図のように霧粒を含む一様な流れの中に置かれた無限に長い平板の中心を原点として, 直角座標 (X, Y) をとり上半面について考える流れの関数は

$$\psi = u_{xm} \left\{ \frac{(Y^2 - X^2 - D^2/4)}{2} + \left\{ (Y^2 - X^2 - D^2/4)^2 + 4Y^2 X^2 \right\}^{\frac{1}{2}} \right\}^{\frac{1}{2}} \quad \dots\dots\dots (10)$$

で与えられる。

円柱の場合と同様に考えると、平板に捕捉される霧粒を含む限界となる流線に接するまで、平板を X 軸上右方へ移動すべき量は (6) 式で与えられるはずである。ゆえに (10) 式の X, Y に接点の座標 $(s, D/2)$ を入れ (8) 式を用いると平板に接する流線は

$$\begin{aligned}\psi_{s, D/2} &= u_{xm} \left\{ \frac{-s^2 + s\sqrt{s^2 + D^2}}{2} \right\} \\ &= \frac{u_{xm} D}{2} \left\{ \frac{-\lambda^2 + \lambda\sqrt{\lambda^2 + 4}}{2} \right\} \dots\dots\dots (11)\end{aligned}$$

(第2図) 一様な噴霧の流れの中に置かれた平板

で表わされる。また一方 (10) 式から $X=\infty$ では $\psi_{s, D/2} = u_{xm} Y_{X=\infty}$ となるから捕捉率 η は (11) 式を用いて

$$\eta = \frac{2 Y_{X=\infty}}{D} = \frac{2 \psi_{s, D/2}}{u_{xm} D} = \left[\frac{-\lambda^2 + \lambda\sqrt{\lambda^2 + 4}}{2} \right]^{1/2} \dots\dots\dots (12)$$

で与えられる。

3. 実験方法および計算方法

(1) 霧粒の捕捉 実験にあたって霧粒を捕捉する物体は霧粒を吸収しやすいことが必要であるために、円柱としては直径が 1.17 cm の白墨および 0.40~0.52 cm の山吹の芯を、平板としては幅が 0.6, 1.2, 1.4 cm の吸取紙を用いた。これを既報の一頭噴霧器（噴口の直径 3.2 mm, 平行部分の長さ 2 mm）の噴口から $x=40$ cm の処に立てた直径 5 cm のシャッタ孔を有する衝立の背後で噴霧の流れに短時間露出して、捕捉した霧粒の量を実感量 1 mg の天秤を用いて測定した。なお露出した時間は秒時計で測った。

(2) 捕捉率の実験値 単位時間に円柱あるいは平

(1) $Q_{a0}=995 \text{ cm}^3/\text{s}$

(2) $Q_{a0}=1007 \text{ cm}^3/\text{s}$

(3) $Q_{a0}=1050 \text{ cm}^3/\text{s}$

(4) $Q_{a0}=1091 \text{ cm}^3/\text{s}$

(5) $Q_{a0}=1177 \text{ cm}^3/\text{s}$

(6) $Q_{a0}=1314 \text{ cm}^3/\text{s}$

(7) $Q_{a0}=1435 \text{ cm}^3/\text{s}$

(8) $Q_{a0}=1528 \text{ cm}^3/\text{s}$

(9) $Q_{a0}=1610 \text{ cm}^3/\text{s}$ (10) $Q_{a0}=1620 \text{ cm}^3/\text{s}$

(第3図) 噴射空気圧力を一定にして噴射空気量を変えた場合の霧粒

$$\left\{ \begin{array}{l} h=35 \text{ cm}, \quad p'_e=26 \text{ cm Hg}, \\ x=40 \text{ cm}, \quad \theta=9.5^\circ\text{C}, \\ \phi=85.6\% \end{array} \right\}$$

板に捕捉される霧粒の量は $(W_2 - W_1)/t_e$ である。また流れに対して垂直な円柱あるいは平板の投影面を通過する噴霧の流れの中に含まれている霧水量は $DL u_{xm} w_{xm}$ である。従って捕捉率の実験値は

$$\eta = \frac{W_2 - W_1}{DL u_{xm} w_{xm} t_e} \quad \dots\dots\dots(13)$$

で与えられる。

(3) 噴霧の流れの平均速度 噴口から距離 x のところで噴霧の流れに垂直な面を通過する流れの速度分布は

$$u_{xr} = \frac{1}{2} u_{xo} \left(1 + \cos \frac{\pi r}{b_x} \right) \dots\dots\dots(14)$$

ただし

$$b_x = 0.19 x$$

で表わすことができる。従って、流れの中心線から半径 $L/2$ の円形断面を通過する流れの平均速度は

$$\pi L^2 u_{xm} / 4 = \int_0^{L/2} 2\pi r u_{xr} dr$$

から (14) 式を用いて計算すると

$$u_{xm} = \frac{8 \int_0^{L/2} r u_{xr} dr}{L^2}$$

$$= -\frac{4u_{xo}}{L^2} \left\{ \frac{L^2}{8} + \frac{b_x L}{2\pi} \sin \frac{\pi L}{2b_x} + \frac{b_x^2}{\pi^2} \cos \frac{\pi L}{2b_x} - \frac{b_x^2}{\pi^2} \right\} \dots\dots\dots(15)$$

で与えられる。

(4) 平均霧水量 噴口から距離約 80 cm までは霧粒の蒸発はほとんど認められない。霧粒は噴霧の流れに一樣に分布して、気流と同一速度で流れるとすると平均霧水量は

$$\gamma_i Q_i = \int_0^{b_r} 2\pi r u_{xr} w_{xm} dr, \quad 0 < x < 80 \text{ cm}$$

から (14) 式を代入して計算すると

$$w_{xm} = \frac{\gamma_i Q_i}{2\pi \int_0^{b_x} r u_{xm} dr} = \frac{\gamma_i Q_i}{0.935 u_{xo} b_x^2} \dots\dots\dots(16)$$

で与えられる。

(5) 霧粒の直径 霧粒の直径としては次の方法で計算した平均の値を用いた。すなわち既報の方法で撮った霧粒の顕微鏡写真にあらわれた総ての粒を平均直径が d_{xm} で体積の総和が等しい同じ個数の粒にしたとすると

(11) $p'_c = 14 \text{ cm Hg}$

(12) $p'_c = 17 \text{ cm Hg}$

(13) $p'_c = 20 \text{ cm Hg}$

(14) $p'_c = 23 \text{ cm Hg}$

(15) $p'_c = 26 \text{ cm Hg}$

(16) $p'_c = 29 \text{ cm Hg}$

(17) $p'_c = 32 \text{ cm Hg}$

(18) $p'_c = 35 \text{ cm Hg}$

(19) $p'_c = 38 \text{ cm Hg}$

(第4図) 噴射空気圧力を変えた場合の霧粒

($h = 35 \text{ cm}$, $\alpha = 40 \text{ cm}$, $\theta = 9.5^\circ \text{C}$, $\phi = 85.6\%$)

$$\Sigma \frac{\pi}{6} d_{xi}^3 n_i = \frac{\pi}{6} d_{xm}^3 \Sigma n_i, \quad i=1,2,3, \dots\dots\dots$$

であるから

$$d_{xm} = (\Sigma d_{xi} n_i / \Sigma n_i)^{\frac{1}{3}} \dots\dots\dots (17)$$

となる。

4. 実験結果

噴霧器の水の吸込み高さを 35 cm にして、噴射空気圧力を 26 cm Hg に保ち噴射空気量を変えた場合、および噴射空気圧力と噴射空気量を変えた場合について実験を行った。第 3, 4 図はそれぞれの場合の霧粒である。

これらの噴射空気量、噴射水量、霧粒の平均直径、流れの中心線上における速度の測定値、平均速度、平均霧水量の計算値、実験に用いた円柱の直径と平板の幅および (13) 式から計算した捕捉率の実験値は第 1, 2 表のとおりである。なお λ はそれぞれの場合について (8) 式から計算した値である。

横軸に λ をとり、縦軸に捕捉率をとって第 1, 2 表に示した実験値を描くと第 5, 6 図ようになる。図に記入した実線は (9) 式および (12) 式から計算した理

論値である。

いずれも実験値は測定誤差内で理論値とほぼ一致している。多少の相異は、理論式を導くに当たって k の二次以上の項を無視したこと、円柱および平板は無限に長く噴霧の流れは二次元の様なポテンシャル流れであるとして解析したこと、実験に当たって円柱および平板の端の部分にあたる流れが衝立の影響を受けて乱れたり速度を減少したりすること等による誤差のためと考えられる。

注

- 1), 4) 植松, 狩野, 繊維機械学会誌, 6 巻, 4 号, 31 頁 (昭 28-4)
- 2) 朝日機工株式会社製
- 3) 昭和 29 年 3 月 22 日, 第 2 回学生研究発表大会で講演
- 5) 植松, 狩野, 永井, 繊維機械学会誌, 7 巻, 2 号, 47 頁 (昭 29-2)
- 6) 霧粒の顕微鏡写真の撮り方および大きさの測定方法については植松他 3 名, 繊維機械学会誌, 6 巻 12 号, 29 頁 (昭 28-12) を参照されたい。

(第 1 表) 噴射空気圧力を一定にして噴射空気量を変えた場合
($h=35$ cm, $x=40$ cm, $L=5$ cm, $\theta=9.5^\circ$ C, $\phi=86.6\%$)

番 号		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
p'_c cm Hg		26									
Q_{ao} cm ³ /s		995	1 007	1 050	1 091	1 177	1 314	1 435	1 528	1 610	1 620
Q_l cm ³ /s		0.041	0.058	0.333	0.512	0.754	0.840	0.650	0.439	0.225	0.177
d_{xm} μ		17.9	17.8	17.5	17.2	16.3	16.1	14.0	12.6	10.7	8.8
u_{xo} cm/s		704	715	721	736	763	806	880	883	903	946
u_{xm} cm/s		592	600	606	618	641	677	739	742	758	795
$w_{xm} \times 10^4$ g/cm ³		0.0128	0.0179	0.1018	0.1286	0.1830	0.1930	0.1368	0.0921	0.0462	0.0175
柱	D cm	1.17	1.17	1.17	1.17	1.17	1.17	1.17	1.17	1.17	1.17
	η	0.522	0.531	0.555	0.513	0.540	0.547	0.401	0.463	0.348	0.237
	λ	1.022	1.025	1.000	0.987	0.915	0.948	0.781	0.635	0.471	0.331
	D cm	0.44	0.40	0.48	0.52	0.43	0.51	0.47	0.44	0.48	0.44
	η	0.779	0.826	0.748	0.750	0.772	0.674	0.715	0.635	0.541	0.467
	λ	2.725	3.010	2.445	2.222	2.495	2.180	1.950	1.690	1.150	0.882
板	D cm	2.4	2.4	2.4	2.4	2.4	2.4	2.4	2.4	2.4	2.4
	η	0.632	0.588	0.583	0.663	0.510	0.458	0.481	0.429	0.500	0.350
	λ	0.500	0.499	0.489	0.483	0.448	0.463	0.381	0.311	0.204	0.162
	D cm	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2
	η	0.732	0.775	0.763	0.733	0.639	0.613	0.556	0.517	0.453	0.363
	λ	1.000	0.997	0.978	0.965	0.895	0.926	0.763	0.621	0.408	0.324
平	D cm	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6
	η	0.882	0.871	0.825	0.769	0.710	0.757	0.732	0.660	0.689	0.606
	λ	2.000	1.994	1.955	1.930	1.790	1.852	1.525	1.242	0.815	0.648

(第2表) 噴射空気圧力を変えた場合
 $(h=35\text{ cm}, x=40\text{ cm}, L=5\text{ cm}, \theta=9.5^\circ\text{C}, \phi=85.6\%)$

番 号		11	12	13	14	15	16	17	18	19
p'_c cm Hg		14	17	20	23	26	29	32	35	38
Q_{ao} cm ³ /s		1 173	1 293	1 384	1 483	1 568	1 650	1 683	1 770	1 820
Q_l cm ³ /s		0.099	0.195	0.248	0.290	0.341	0.376	0.425	0.460	0.485
d_{xm} μ		18.4	15.7	14.0	13.7	13.4	12.5	12.4	12.5	11.8
u_{xo} cm/s		673	743	803	860	906	945	980	1 008	1 030
u_{xm} cm/s		566	624	675	722	761	793	823	847	865
$w_{xm} \times 10^4 \text{ g/cm}^3$		0.0272	0.0484	0.0571	0.0625	0.0697	0.0737	0.0803	0.0843	0.0873
円 柱	D cm	1.17	1.17	1.17	1.17	1.17	1.17	1.17	1.17	1.17
	η	0.538	0.530	0.511	0.489	0.420	0.478	0.443	0.416	0.438
	λ	1.034	0.826	0.713	0.730	0.738	0.667	0.683	0.711	0.648
	D cm	0.43	0.43	0.42	0.44	0.41	0.44	0.41	0.47	0.45
	η	0.824	0.686	0.725	0.719	0.675	0.680	0.765	0.683	0.683
	λ	2.820	2.255	2.153	1.900	2.110	1.778	1.954	1.773	1.668
板	D cm	2.4	2.4	2.4	2.4	2.4	2.4	2.4	2.4	2.4
	η	0.550	0.640	0.493	0.520	0.514	0.513	0.473	0.414	0.451
	λ	0.495	0.404	0.349	0.357	0.361	0.326	0.334	0.348	0.317
	D cm	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2
	η	0.806	0.690	0.617	0.738	0.748	0.670	0.504	0.666	0.698
	λ	0.990	0.807	0.697	0.714	0.721	0.652	0.668	0.695	0.633
平	D cm	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6
	η	0.880	0.827	0.719	0.737	0.785	0.777	0.805	0.700	0.662
	λ	1.980	1.614	1.394	1.428	1.442	1.304	1.335	1.390	1.266

(第5図) 円柱に対する霧粒の捕捉率
 $(\theta=9.5^\circ\text{C}, \phi=85.6\%)$

(第6図) 平板に対する霧粒の捕捉率
 $(\theta=9.5^\circ\text{C}, \phi=85.6\%)$