噴霧器の特性と霧粒の蒸発*

(昭和27年12月27日受理)

会 員 植 松 時 雄**

狩 野

武***

→ 摘 要 ←

研 究 目 的

一頭噴霧器¹⁾を用いて噴射空気圧力、噴射空気量および水の吸込み高さが噴霧状態におよぼす影響を測定した。また霧粒の蒸発の理論から噴霧の到達する範囲を与える公式を求め実験値と比較した。これから最も良好な噴射条件と噴霧器の取付け位置を決定した。

研 究 結 果

一頭噴霧器の良好な噴射条件はおよそ次の通りである。すなわち噴射空気圧力 26cmHg, 水の吸込み高さ 35cm, 噴射空気量 1325~1435 cm³/s, 噴射水量 0.12~0.45 cm³/s, 噴射速度 147~158 m/s, 噴射される霧粒の半径 4.1~11.5 μ である。

最大半径 r'_0 の霧粒が蒸発しつくすまでの噴口からの距離 $x_{\max}$ は

$$x_{\max} = r'_0 \left\{ \frac{\rho_l u_s x_s}{D(c_s - c_{\infty})} \right\}^{\frac{1}{2}}$$

で与えられる。ここに D は水蒸気の拡散係数、 c_s , c_{∞} は霧粒の表面およびそれから充分はなれたところの水蒸気密度、 ρ_l は水の密度、 u_s は噴霧の流れの中心線上で噴口から距離 x_s のところにおける流速である。

霧粒が重力の作用下で空気の抵抗力を受けつゝ落下するとき、蒸発しつくすまでの鉛直距離 H_x は流れの中心線を基準にとると

$$H_x = 0.190x + \frac{(\rho_l - \rho_a) g \rho_l}{18\eta D(c'_s - c'_{\infty})} \left\{ r_0^2 - \frac{D(c_s - c_{\infty})}{\rho_a} \cdot \frac{x^2}{u_s x_s} \right\}^2$$

で与えられる。ここに、 g は重力の加速度、 η は空気の粘性係数、 c'_s , c'_{∞} は噴霧の流れの下側において霧粒の表面およびそれから充分はなれたところの水蒸気密度である。

従つて最良の噴射状態で噴霧の流れが完全に蒸発しつくして、床面または作業機械に附着しないためには流れ方向に $x_{\max}$, 鉛直方向に H_x の空間、すなわち通常の工場では約 4×1.5 m の広さが必要である。

1. 記 号

A_a , A'_a : 噴口における空気通路および噴口出口の横断面積 (cm²)

A_l : 噴口における水通路の横断面積 (cm²)

b_x : 噴霧の流れの中心線上で噴口から距離 x のところにおける噴霧の拡がり巾 (cm)

c_s , c_{∞} : 噴霧の流れの中で霧粒の表面およびそれから充分はなれたところの水蒸気密度 (g/cm³)

c'_s , c'_{∞} : 噴霧の流れの下側で霧粒の表面およびそれから充分はなれたところの水蒸気密度 (g/cm³)

c_x : 霧粒の空気抵抗係数 (≈ 1)

D : 水蒸気の拡散係数 (cm²/s)

d_a : 噴口における空気通路の内径 (cm)

d_{li} , d_{lo} : 噴口における水通路の内径および外径 (cm)

g : 重力の加速度 (=980 cm/s)

h : 水の吸込み高さ (cm)

H_x : 噴霧の流れから落下する霧粒が蒸発しつくすところの流れの中心線からの鉛直距離 (cm)

p'_c : 噴射空気圧力 (cm Hg)

Q_a , Q_l : 噴射空気量および噴射水量 (cm³/s)

r_0 , r'_0 : 噴射される霧粒の最小および最大の半径 (cm)

r_x : 噴口から距離 x のところにおける霧粒の半径 (cm)

t : 時間 (s)

u_a , u'_a : 噴口の空気通路の間隙および出口における噴射空気速度 (cm/s)

u_l : 噴射水速度 (cm/s)

* The Characteristics of an Atomizer and its Position to be Placed Considering the Evaporation of the Mist. 昭和27年9月20日、大阪大学工学部繊維機械講座開設記念研究発表講演会および、昭和27年10月19日関西工学連合講演会において講演

** T. Uematu Member 大阪大学

*** T. Kano

u_s, u_x : 流れの中心線上で噴口から距離 x_s および x のところにおける流速 (cm/s)

v_x : 噴口から距離 x のところで霧粒の落下速度 (cm/s)

x, x_s : 流れの中心線にそつて測つた噴口からの距離 (cm)

α : 水の表面張力 (dyne/cm)

θ, θ_∞ : 室内の空気温度および噴霧の流れの中で霧粒から充分はなれたところの温度 ($^{\circ}\text{C}$)

ρ_a, ρ_l : 空気および水の密度 (g/cm^3)

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

ϕ_∞ : 噴霧の流れの中で霧粒から充分はなれたところの湿度 (%)

2. 噴射される霧粒の大きさ

噴霧器は第1図のように外側を流れる圧縮空気が噴口を出るとき負圧を生じて内側の水を吸出し、出口で霧化

第1図 噴口

するものであるが、水は表面張力のために球形になると考えると内部に $2\alpha/r_0$ の圧力を生じ、噴射空気のために半球面に平均 $\frac{1}{2} \cdot c_x \rho_a (u_a - u_l)^2$ の圧力をうける。この内外の圧力が釣合つたとき水滴の分裂が止むと考えると

第2図 噴霧速度と霧粒の大きさの関係
($\theta_\infty = 28^{\circ}\text{C}$, $c_x = 1$ の場合)

$$r_0 = \frac{4\alpha}{c_x \rho_a (u_a - u_l)^2}, r'_0 = \frac{4\alpha}{c_x \rho_a (u'_a - u_l)^2} \dots (1)$$

となる。こゝに r_0 は空気の通路と水の通路との間隙で、 r'_0 は噴口の出口で霧化した霧粒の半径で計算した結果は第2図に示すとおりである。

3. 霧粒の蒸発

噴射された霧粒はきわめて微小で慣性力は無視出来るので空気と同一速度で流れると見なしてよい。

こゝで Tollmien が与えた拡がり流れの速度変化式 $u_x = u_s x_s / x$ を用いると $dx/dt = u_x = u_s x_s / x$ とおくことが出来る。

ゆえに霧粒が噴口から距離 x のところまで到達するに要する時間は

$$t = \int_0^x \frac{x}{u_s x_s} dt = \frac{x^2}{2u_s x_s} \dots (2)$$

となる。また一方、微小な水滴の蒸発の理論から

$$\frac{dr}{dt} = -\frac{D(c_s - c_\infty)}{r \rho_l}$$

で与えられるから、噴口において半径 r'_0 の大きさを持った霧粒が流れの間に蒸発して半径 r_x の大きさになるまでの時間は

$$t = - \int_{r'_0}^{r_x} \frac{\rho_l}{D(c_s - c_\infty)} r dr = -\frac{\rho_l (r'^2_0 - r_x^2)}{2D(c_s - c_\infty)} \dots (3)$$

である。と近似的に流れの中で $\rho_l / \{D(c_s - c_\infty)\} =$ 一定と考える。

(2) と (3) とを等置すると噴口から距離 x で霧粒の最大の半径は

$$r_x = \left\{ r'^2_0 - \frac{D(c_s - c_\infty)}{\rho_l} \cdot \frac{x^2}{u_s x_s} \right\}^{\frac{1}{2}} \dots (4)$$

となる。霧粒が蒸発しつくすところの距離 $x_{\max}$ は(4)を零とおき

$$x_{\max} = r'_0 \left\{ \frac{\rho_l u_s x_s}{D(c_s - c_\infty)} \right\}^{\frac{1}{2}} \dots (5)$$

で与えられる。

4. 噴霧器の取付け高さ

噴霧の流れの下側の霧粒が重力の作用下で空気の抵抗力をうけつゝ落下するとき、蒸発しつくすまでの鉛直距離は流れの中心線を基準にとると噴口から距離 x のところまで $H_x = b_x + \int_0^t v_x dt$ である。これに実験式 $b_x = 0.190 x$ と

$$v_x = \frac{2(\rho_l - \rho_a) g r_x^2}{9\eta}, dt = -\frac{r_x \rho_l}{D(c'_s - c'_\infty)} dr_x$$

を代入して、(4)を用いると

$$H_x = 0.190x - \int_{r_x}^0 \frac{2(\rho_l - \rho_a)g\rho_l}{9\eta D(c'_s - c'_\infty)} r_x^3 dr_x$$

$$= 0.190x + \frac{(\rho_l - \rho_a)g\rho_l}{18\eta D(c'_s - c'_\infty)} \left\{ r_0^4 - \frac{D(c_s - c_\infty)}{\rho_a} \frac{x^2}{u_s x_s} \right\}^2 \dots \dots \dots (6)$$

となる。ゆえに噴霧が充分蒸発しつくすためには噴霧器を(6)で与えられる高さ以上に取付けるべきである。

5. 実 験

1. 実験装置

第3図のようにモータ *a* で運転されるルーツ空気圧縮機 *b* によって圧縮された空気を一旦タンク *c* に入れ、導管で一頭噴霧器 *d* に送る。

第3図 実験装置

圧縮空気圧力は逃し弁 *e* を開閉することによって12~40cm Hg に変化させ、静圧は水銀柱 *f* で測定した。噴射空気量は、導管の途中に設けたオリフィス *g* によって測定した。

噴射水は 500cc メスシリンダ *h* からゴム管で 100cc メスシリンダ *i* に入れ滑車装置 *j* を用いてその水面の高さを噴口から下 0~70cm に調節して保った。*k* は給水量を調節するコックで余分の水はサイフォンによって 500cc メスシリンダ *l* に溢れさせ、*i* の水面が一定の高さを保つようにした。従つて噴射水量は *h* 内の水の減量と *l* 内の水の増加量の差で与えられる。

噴霧の流速はピトー管 *m* を用いて測定した。またピトー管を噴霧の流れと直角の方向に移動させ感度がなくなる限界点を求めて噴霧の拡がり巾を決定した。

使用した噴霧器(第1図)の主要寸法は次のとおりである。 $d_a = 0.34\text{cm}$, $d_{i0} = 0.203\text{cm}$, $A_a = 0.058126\text{cm}^2$, $A'_{i0} = 0.090792\text{cm}^2$, $d_{ii} = 0.098\text{cm}$, $A_i = 0.007543\text{cm}^2$

2. 噴霧の流速と拡がり

流れの中心線上の流速の変化、拡がりおよび噴口から

距離 20cm, 40cm のところにおける横断面上の流速の分布の測定結果は第4図に示すとおりである。

第4図 噴霧の流速の変化と拡がり
($\theta = 28^\circ\text{C}$, $h = 35\text{cm}$, 実用噴霧状態)

なお参考のために Tollmien が乾燥空気の噴射について与えた理論式 $u_x = u_s x_s / x$ を $p'_0 = 26\text{cm Hg}$ の場合について計算した値を点線で示し実験値と比較した。たゞしこの計算では $x_s = 10\text{cm}$, $u_s = 45\text{m/s}$ ととつた。また流れは噴口から直線的に拡がり $b_x = 0.190x$ の関係がある。

3. 噴射空気量と噴射水量の関係

噴射空気量を横軸に、噴射水量を縦軸にとつて、噴射空気圧力を種々に変えた場合の測定結果を示すと第5図のようになる。

同一の噴射空気量に対しては噴射空気圧力が高い程噴射水量が多いが、いずれも水量が最大になる空気量があつて空気量がそれより多くても少くても水量は著しく減少する。

なお給水管を水銀柱に連結して噴口に生ずる負圧を測定した結果、負圧すなわち水を吸上げる力と噴射水量はほぼ正比例することが判つた。

短時間に増湿するためには水量を最大にすることが考えられるが、この状態では霧粒が大きすぎて蒸発しきらずに落下して不適當である。従つてこれを避けるために最大量の約1/3程度に水量を減らし、空気量を多くして霧

粒の小さくなる状態で噴射しなければならない。点線は霧粒が流れの間に蒸発しつくす限界を、鎖線は水量が少

第5図 噴射空気量と噴射水量の関係
($\theta = 26^\circ\text{C}$, $h = 35\text{cm}$ の場合)

くて実際に役立つなくなる限界を示し、この二つの線の間の部分が実用になる範囲である。以下この状態を実用噴霧状態と呼ぶことにしよう。

4. 水の吸込み高さと噴射水量の関係

実用噴霧状態において水の吸込み高さを種々に変えた場合の噴射水量の変化を測定した結果は第6図に示してある。噴射水量は水の吸込み高さが大である程減少する。これは吸込み高さに相当する水柱の圧力だけ水を吸上げる力が減少するためと考えられる。

吸込み高さが小さいときは噴射される霧粒の数が多く

第6図 水の吸込み高さと噴射水量の関係
($\theta = 28^\circ\text{C}$ の場合)

互に衝突して大きな粒になる傾向があり、吸込み高さが大きいときは霧粒の数が少く非能率的なので吸込み高さは約 35cm が最もよい。

5. 最良の噴射条件

実用噴霧状態において横軸に噴射空気圧力を取り、縦軸に噴射空気量と噴射水量の測定値、およびそれらの状態に対応した霧粒の半径を(1)によつて計算した値をとつて示すと第7図のようになる。

第7図 噴射空気圧力と実用噴霧範囲の関係
($\theta = \theta_\infty = 28^\circ\text{C}$, $\phi_\infty = 90\%$, $h = 35\text{cm}$ の場合)

ガラス板に潤滑油を塗つて霧粒を受け顕微鏡で半径を測定してみると計算で得た r_0 , r'_0 をほぼ最小、最大値として、いろいろの大きさの粒が混つている。

噴射空気圧力が大である程水量が多く、霧粒の大きさも小さくなって好都合であるが、26cm Hg 以上に高めても水量の増加度および霧粒の大きさの減少度も小さい。また経済的には圧力の低い程好ましいので、結局最良の噴射条件は

$$\begin{aligned} p'_e &= 26\text{cm Hg}, & h &= 35\text{cm} \\ Q_a &= 1325 \sim 1435\text{cm}^3/\text{s}, & Q_t &= 0.12 \sim 0.45\text{cm}^3/\text{s} \\ u_a &= 227 \sim 245\text{m/s}, & u'_a &= 147 \sim 158\text{m/s} \\ r_o &= 4.1 \sim 4.8\mu, & r'_o &= 9.8 \sim 11.5\mu \end{aligned}$$

である。

室内の温度が高く乾燥していて霧粒が蒸発しやすいときは空気量を少くして水量多く霧粒の大きい状態で噴射するのが効果的で、温度が低く湿度が高くて蒸発しにくいときは空気量を多くして霧粒の小さい状態で噴射すべきである。

6. 噴霧の蒸発

実用噴霧状態において噴口からの距離を横軸に、霧粒の半径を縦軸にとり圧力を種々に変えて(4)を計算した結果を示すと第8図のようになる。

第8図 噴口からの距離と霧粒の蒸発による半径の減少の関係

($\theta_{\infty}=28^{\circ}\text{C}$, $\phi_{\infty}=90\%$, $h=35\text{cm}$ の場合)

また、流れの中心線上で鏡を移動させて行つて霧粒の附着が認められなくなったところまでの距離を、その時の噴射速度 $u_a - u_t$ を横軸にとつて示すと第9図のようになる。なお図には比較のためにそれらの噴射状態に対応して(5)を計算して求めた $x_{\max}$ の値も実線で記入してある。

第9図 噴霧速度と霧粒が蒸発しきる距離の関係
($\theta_{\infty}=28^{\circ}\text{C}$, $\phi_{\infty}=90\%$, $h=35\text{cm}$ の場合)

最良の噴射状態では(6)の右边第2項は第1項にくらべて著しく小さい。従つて噴霧の流れが完全に蒸発して床面または作業機械に附着しないためには流れの方向に(5)、鉛直方向に(6)で与えられる空間、すなわち通常の工場では約 $4 \times 1.5\text{m}$ の広さが必要である。

註

- (1) 朝日機工株式会社製
- (2) Tollmien, Z. f. Angew Math. u. Mech. vol IV 468 (1926)
- (3) 例えば、押田勇雄、蒸発・乾燥、頁35(昭25)河出書房
- (4) 水量がこの限界よりも少くなると噴霧の濃度がきわめて薄くなって噴口から約1m流れる間に蒸発しつくして実用的でない。

近 刊 無 窓 工 場 の 諸 問 題 予 約 募 集

5月中旬刊行 A5判 160頁 定価 350円

建築上より見た無窓工場の諸問題

東京大学建築学教室教授 工博 平 山 嵩

1. 無窓工場
2. 無窓建築の特徴
3. 無窓建築の欠点
4. 無窓工場設計方針

無窓建物とその火災対策

建設省建築研究所長 工博 藤 田 金 一 郎

1. 無窓建物の流行の情勢
2. 無窓式の検討すべき点
3. 無窓建物の災害防止
4. 無窓建物の火災の性情
5. 無窓建物の火災対策設備

呉羽紡績における無窓実験工場について

呉羽紡績取締役 工務部長 磯 貝 昌 平

1. 緒 言
2. 温湿度調整の実際
3. 人工照明に関する諸問題
4. 除塵、換気、騒音等に関する問題
5. 健康管理の問題
6. 結 語

無窓実験工場の建築関係について

呉羽紡績 営繕課長 安 田 信 一

1. 緒 言
2. 庄川工場の概要
3. 無窓工場に改造への経路
4. 建築構造
5. 建物の伸縮継手
6. 断熱保温(防露)施設
7. 騒音防止施設
8. 温湿度調整並びに除塵

送料40円 上製クロス装幀、図面写真豊富

9. 防火施設、避難施設
10. 色彩調節
11. 無窓工場と鋸型工場との比較

無窓工場の照明について(附温湿度調整)

呉羽紡績原動課 鳥 田 正

1. 緒 言
2. 紡績作業上より見た長所と短所
3. 照明設計
4. 測 定
5. 有窓、無窓工場の照度比較
6. 工事並びに配線ダクトについて
7. 改善事項
8. 蛍光灯と白熱灯との経済的比較
9. 衛生的影響
10. 結 び

無窓針布工場について

金井重要工業 常務取締役 荻 田 英 二

1. 緒 言
2. 伊丹針布製造所の概要
3. 無窓工場への経緯
4. 建築構造
5. 換気、温湿度調整
6. 照明関係
7. 騒音防止及び断熱保温施設
8. 色彩調節
9. 防火施設
10. 結 論

無窓亜鉛精練工場について

同和鋳業 企 画 室

海外における無窓工場に関する資料

東京大学 建築学教室