# 空気中における噴霧水粒子の挙動解析に関する基礎的研究

正会員〇安井 さおり<sup>\*1</sup> 同 山中 俊夫<sup>\*2</sup> 同 相良 和伸<sup>\*3</sup> 同 甲谷 寿史<sup>\*4</sup> 同 桃井 良尚<sup>\*5</sup>

4. 環境工学-12. 空気流動基礎

ミスト,噴霧脱臭,数値解析, PIV

1. はじめに

ドライミストや霧吹き型の除菌・消臭剤など、日常 生活で液体粒子の噴霧が行われることが多い。これら の効果を評価するためには、空気中における液体粒子 の挙動の把握が不可欠であるが、粒子の寿命や到達距 離などの性状は、周囲の温湿度や粒子径によって様々 であると考えられる。本研究は、用途に応じて効果的 な噴霧を行うための、水粒子挙動の基本性状把握を目 的とする。本報では、霧吹きによる水粒子の挙動を高 速度カメラで撮影し、噴霧流の広がり等の性状につい て把握した上で、静止空気中における水粒子の挙動解 析を行い、水粒子の蒸発・温度変化・噴霧速度等が相 互に及ぼす影響について検討した結果を報告する。

## 2. 高速度カメラ撮影による噴霧粒子の性状把握

#### 2.1 測定概要

連続噴霧が可能な手動蓄圧式スプレー(1流体式ノ ズル)を測定対象とし(図1)、水を噴霧した。測定機 器配置図を図2に示す。実験室には暗幕を設置し、室 外からの光を遮断した。光源にはレーザー(CW:YAG レー ザ/CW532-600M、出力 649mW、KANOMAX 社製)を使用 し、上方から霧吹きの噴霧口に垂直に投射した。そし て、レーザーシートに垂直となる方向から、高速度カ メラ(FASTCAM-OCI R2 1K)により噴霧画像を撮影した。 また、この画像を用いて PIV 解析 (Particle Image Velocimetry)を行い、噴霧粒子速度を測定した。PIV 解析の各種条件を**表1**に示す。

#### 2.2 結果と考察

噴霧可視化画像、瞬時の風速ベクトル、スカラー分 布を図3に示す。噴霧画像(a)については1フレーム に存在する粒子の数が少ないため、50フレーム(0.2 秒間)の画像を重ねて示す。図3(a)より、噴霧の広が り角度は約45度であることがわかる。水粒子が落下 する様子も見られ、粒子による水平到達距離のばらつ きが大きい。これは粒子径の違いによるものと考えら れる。また、図3(b), (c)より、水粒子の運動が落下に

	∖\> レーサー		町间間間のしんの	4000					
$\overline{\mathbf{M}}$	解析範囲	<b>スプレー</b>	測定時間 [s]	2. 176					
		^ □¬¬	解析画像サイズ [pixel]	512×480					
$\square$		ハイスピードカメラ	解析ソフト	DaVis 8.0 (LaVision)					
			アルゴリズム	FFT Cross-Correlation Method					
	レーザーシート		AATA AATA AATA AATA AATA AATA AATA AAT	Pass1 : 32×32					
	~	📋 レーザー		Pass2 : 16×16					
図1 スフ	プレー 図2 測定機器配置図	(立面・平面)		50					
	0.2秒間の結果_		瞬時值_	一·    瞬時值(					
480	I I I I I I I I I I I I I I I I								
3		ר							
_		╽╙ └─┬─┬─┬─╄╡─╟┱┍┇	Ĩ÷Ţ÷┌───Ĩ						
3ml			-1~						
0.3	-i-50mm -ii - +i - + + +								
60		┥╧╧┙		5 2 1.5 1 0.5 0 [m/s]					
1									
	640.36mm (512pixcel)	640. 36mm	(512pixcel) (512pixcel)	640.36mm (512pixcel)					
	(a)噴霧画像	(b)速度ベク	トル分布	(c)速度スカラー分布					
図3 噴霧画像及び速度分布									

表1 PIV 解析条件

544

Fundamental Study on Behavior Analysis of Sprayed Water Droplet in Air

YASUI Saori, YAMANAKA Toshio, SAGARA Kazunobu, KOTANI Hisashi and MOMOI Yoshihisa

転じたときの速度は、水平速度に比べて小さい。

本測定では、霧吹きによる噴霧流の広がりと大まか な速度は把握できたが、噴霧口近傍については粒子速 度が大きく、うまく撮影することができなかった。今 後は噴霧口近傍の挙動を明らかにするとともに、粒子 径別の速度分布を把握することが課題である。

## 3. 水粒子1個の水平噴霧モデル

霧吹きでの噴霧を想定し、静止空気中で1個の水粒 子に水平初速度を与えた場合の、蒸発に伴う粒子半径・ 温度・速度の変化について解析を行う。

## 3.1 熱収支式

水粒子内部の温度分布は一様で、空気温度は変化し ないと仮定すると、粒子1個に対する熱収支式は、

$$\frac{4}{3}\pi c_{pw}\rho_w \frac{d\left(r^3\theta_w\right)}{dt} = 4\pi r^2\alpha \left(\theta_a - \theta_w\right) + 4\pi r^2\rho_w L\frac{dr}{dt} \quad (1)$$

となる。左辺は粒子内部のエネルギー変化、右辺第一 項は粒子表面での熱伝達、第二項は蒸発潜熱を表す。 熱伝達率αはNu数の定義より、次式のように書ける。

$$\alpha = \frac{\lambda_a}{2r} \operatorname{Nu} \tag{2}$$

なお、本解析では放射の影響が十分に小さいため、対 流熱伝達のみを考慮する。

## 3.2 質量保存式

図4に示すように、水粒子表面外側の微小空間において、蒸発により表面から流入する水蒸気量と、表面 近傍から流出する水蒸気量が等しいとすると、

$$-4\pi r^{2} \rho_{w} \frac{dr}{dt} = 4\pi r^{2} \rho_{a} k_{c} \ln\left(1 + \frac{Y^{*} - Y}{1 - Y^{*}}\right)$$
(3)

となり、ここで $B = \ln\left(1 + \frac{Y^* - Y}{1 - Y^*}\right)$ は、Spalding's

mass transfer number と呼ばれる無次元数である<sup>1)</sup>。理想気体を仮定すると、水蒸気の質量分率 Y は、

$$Y = \frac{M_{H_2O}}{M_{H_2O} + M_a \left(\frac{P}{P_w} - 1\right)}$$
(4)

水粒子表面における質量分率 Y\*の算 出には、空気中の水蒸気分圧 P<sub>w</sub>の代 わりに、水粒子表面温度における飽和 水蒸気圧 P<sub>ws</sub>の値を用いればよい。物 質伝達率 k<sub>c</sub>は Sh 数の定義より、次式 のように書ける。

$$k_c = \frac{D}{2r} \mathrm{Sh} \tag{5}$$

### 3.3 運動方程式

粒子が運動する際に受ける空気の抵抗力 F<sub>D</sub>は、

$$F_D = \frac{1}{2} C_D A \rho_a v^2 \tag{6}$$

であり、球形粒子の場合、抵抗係数 Co は

• 
$$\operatorname{Re} < 1.2^{\frac{10}{3}} \mathcal{O} \succeq \stackrel{}{\stackrel{}{\stackrel{}{\stackrel{}{\stackrel{}}{\stackrel{}}{\stackrel{}}{\stackrel{}}}{}} \qquad C_D = \frac{24}{\operatorname{Re}}$$
 (7)

• 
$$1.2^{\frac{10}{3}} < \text{Re} < 32 \text{ O} \succeq \textcircled{Re}^{0.7}$$
 (8)

・ 32 < Re < 500 のとき 
$$C_D = \frac{10}{\sqrt{\text{Re}}}$$
 (9)

と表される<sup>2)</sup>。式(7)はストークスの式、式(9)はア レンの実験式、式(8)は、式(7)と(9)の間の遷移領 域を、文献2)に記載の実験値を近似することにより作 成した。式(7)~(9)より、抵抗力 $F_D$ はそれぞれ、

・Re<1.2<sup>$$\frac{10}{3} のとき$$</sup>

$$F_{D} = \frac{1}{2} \frac{24}{\text{Re}} \pi r^{2} \rho_{a} v^{2} = 6\pi \mu_{a} r v$$
(10)  
$$1.2^{\frac{10}{3}} < \text{Re} < 32 \text{ O} \succeq \grave{\Xi}$$
  
$$F_{D} = \frac{1}{2} \frac{20}{\text{Re}^{0.7}} \pi r^{2} \rho_{a} v^{2} = 10\pi (rv)^{1.3} (0.5\mu_{a})^{0.7} \rho_{a}^{0.3}$$
(11)

・32 < Re < 500 のとき

$$F_{D} = \frac{1}{2} \frac{10}{\sqrt{\text{Re}}} \pi r^{2} \rho_{a} v^{2} = \frac{5}{2} \pi \left( r v \right)^{1.5} \left( 2 \mu_{a} \rho_{a} \right)^{0.5}$$
(12)

と書ける。図5に示すように、x方向、y方向それぞれ についての運動方程式は、次式のように書ける。

$$\frac{4}{3}\pi\rho_{w}\frac{d\left(r^{3}v_{x}\right)}{dt}=-F_{Dx}$$
(13-a)

$$\frac{4}{3}\pi\rho_{w}\frac{d(r^{3}v_{y})}{dt} = \frac{4}{3}\pi r^{3}(\rho_{w} - \rho_{a})g - F_{Dy}$$
(13-b)

$$F_{Dx} = \frac{v_x}{\sqrt{v_x^2 + v_y^2}} F_D , \quad F_{Dx} = \frac{v_y}{\sqrt{v_x^2 + v_y^2}} F_D$$
(14)





#### 3.4 結果と考察

### (1) 初期粒子半径の影響

式(1),(3),(13)より、噴霧の水平初速度を10m/sと し、初期粒子半径ごとに挙動解析を行った結果を図6 に示す。周辺空気温度(20℃)及び相対湿度(50%)に は変化がないものとし、水粒子の初期温度は、周辺空 気温度と同じとする。図6(e)の粒子軌跡については、 0.05 秒毎の位置をプロットした。

図6より、粒子の寿命と移動距離は、水粒子の初期 半径に大きな影響を受けるが、温度変化にはほとんど 影響がないことがわかる。噴霧後すぐに対流による熱 取得と蒸発による熱損失が平衡し、一定の温度となる。 また、この水粒子の平衡温度は、周辺空気の湿球温度 とほぼ一致している。図6(c),(d)ではグラフの傾きが 粒子の速度を表すが、図6(d)より、初期半径が大き いほど落下速度が大きいことがわかる。半径50µm 以 上の大きな粒子の場合、室内噴霧では水粒子が蒸発し て消える前に、床に付着すると考えられる。また、図 6(c),(e)について、粒子の水平速度が噴霧後すぐに低 下しており、その後は自由落下運動であるといえる。

### (2) 周囲の空気温湿度の影響

周囲の空気温湿度ごとの、水粒子の半径、温度変化 及び軌跡を図7に示す。図7(a),(b)より、周辺空気温 湿度により粒子温度が異なり、蒸発による半径の変化 も大きな影響を受けるが、図7(c)より、粒子軌跡への 影響は非常に小さいことがわかる。空気温度が低く、 相対湿度が高いほど、粒子の寿命は長くなる。

#### (3) 水平初速度の影響

水平初速度が異なるときの、水粒子の半径及び移動 軌跡を図8に示す。水平初速度が大きいほど水平到達 距離は長くなるが、瞬時に減速するため、液滴の半径、 すなわち蒸発速度にはほとんど影響がない。

### 4. 巻き込み空気を考慮した水平噴霧モデル

前章で示したモデルでは、周囲の空気が完全に静止 していると仮定したが、実際の噴霧では多数の粒子が 空気を巻き込み、その流れに乗って粒子の移動距離が 長くなると考えられる。本章では、運動する水粒子が 周囲の空気に与える運動量を考慮した解析を行う。



#### 4.1 噴霧流中の空気の運動量保存式

図9に示すように、定常的な流れを考える場合、噴 霧粒子が断面1から断面2に移動する時間を $\Delta t$ とする。  $\Delta t$ 間に噴霧流中の断面2を通過する空気の運動量は、 断面1を通過する運動量に、運動する粒子が与える運 動量を加えたものであるため、単位時間あたりの粒子 の通過個数をnとして、運動量保存式は

$$\rho_{a}S_{1}v_{a1}\bar{v}_{a1}\Delta t + n\bar{F}_{D}\Delta t = \rho_{a}S_{2}v_{a2}\bar{v}_{a2}\Delta t$$
(15)  
と書ける。両辺を  $\Delta t$  で割り、成分ごとに示すと、

$$\rho_a S_1 v_{a1} v_{a1x} + n F_{Dx} = \rho_a S_2 v_{a2} v_{a2x}$$
(16-a)

$$\rho_a S_1 v_{a1y} + nF_{Dy} = \rho_a S_2 v_{a2y} \tag{16-b}$$

$$v_{a2x}^{2} + v_{a2y}^{2} = v_{a2}^{2}$$
(17)

となる。空気同士の粘性抵抗を無視し、断面2の断面 積 $S_2$ を、初期の噴霧広がり角で定義すると、式(16),(17) より断面2 における空気速度 $v_{a2}$ が求まる。なお、空 気抵抗 $F_D$ (式(10)~(12))及びRe数の算出に用いる 粒子速度については、相対速度 $v_r$ を用いることとする。

## $v_r = v - v_a$

#### 4.2 結果と考察

式 (1), (3), (13), (16), (17) を用いて求めた粒子の軌道 を、図10に示す。噴霧量を0.150/min、噴霧広がり 角を45°、水平初速度を10m/sとした。巻き込み空気の



わかる。また、図10 粒子軌跡への巻き込み空気の影響 寿命の短い場合を除くと、初期粒子半径が小さいほど水 平到達距離が長い。これは、粒子が小さいほど粒子数が 多く、周囲の空気へ与える運動量が大きくなるためだとい える。なお、今回は空気同士の粘性抵抗による運動量拡 散を考慮していないため、実際には本結果よりも巻き込 み空気の影響が小さく、移動距離は短くなると考えられる。

#### 5. まとめ

本報では、高速度カメラ撮影による噴霧粒子の性状 把握と、水粒子1個について空気中における挙動解析 を行った。今後は巻き込み空気を考慮する際に、噴流 理論による運動量拡散の組み込みを検討するとともに、 噴霧消・脱臭を想定し、空気中の浮遊物質と液体粒子 の反応について解析を行う予定である。

#### 【参考文献】 1) D. B. Spalding, 藤縄勝彦訳:物質移動論, 産業図書, 1967.7

 日本機械学会,機械工学便覧 基礎編 α4流体工学, p.81, 2006.1

r	: 粒子半径 [m]	P	:大気圧 [Pa] =1.013×10 <sup>5</sup> Pa	g	: 重力加速度 [m/s <sup>2</sup> ] =9.8m/s <sup>2</sup>			
θ	:温度[deg.C]	$P_w$	:空気中の水蒸気分圧 [Pa]	Nu	:ヌッセルト数 [-]			
$C_p$	: 定圧比熱 [J/(kg・K)]	$P_{ws}$	:飽和水蒸気圧 [Pa]	Sh	:シャーウッド数 [-]			
ť	:時間[s]	D	:空気中の水蒸気の拡散係数 [m²/s]	Re	:レイノルズ数 [-]			
ρ	:密度 [kg/m <sup>3</sup> ]	$F_{D}$	:空気抵抗 [N]					
$\alpha$	:熱伝達率 [W/(m <sup>2</sup> ・K)]	$\tilde{C_D}$	:抵抗係数 [-]	[ 添	字]			
L	: 蒸発潜熱 [J/kg] =2.258×10 <sup>6</sup> J/kg	v	:水粒子の速度 [m/s]	а	:周辺空気			
λ	: 熱伝導率 [W/(m・K)]	$V_a$	:空気の速度 [m/s]	w	:水粒子			
$k_c$	:物質移動係数 [m/s]	$v_r$	:水粒子と空気の相対速度 [m/s]	x	:水平成分			
Ý	:空気中の水蒸気質量分率 [-]	n	:単位時間あたりの粒子個数[個/s]	y	: 鉛直成分			
$Y^*$	:粒子表面の水蒸気質量分率 [-]	A	:粒子の投影面積 [m²]	1	: 噴霧流断面 1			
$M_{H2}$	o: 液滴のモル質量 [kg/mol]	S	: 噴霧流の断面積	2	: 噴霧流断面 2			
$M_a$	: 乾き空気のモル質量 [kg/mol]	μ	:粘性係数 [Pa·s]					
k1+框中学生学校工学研究科科研究会工学审查,进生学研究组织、Conducte Student Division of Clobal Architecture Conducte School of Engineering Order University								

(18)

\*1大阪大学大学院工学研究科地球総合工学専攻 博士前 \*2大阪大学大学院工学研究科地球総合工学専攻 教授 \*3大阪大学大学院工学研究科地球総合工学専攻 教授 \*4大阪大学大学院工学研究科地球総合工学専攻 准教授 \*5大阪大学大学院工学研究科地球総合工学専攻 助教

博士前期課程 教授・博士(工学) 教授・工学博士 准教授・博士(工学) 助教・博士(工学) Graduate Student, Division of Global Architecture, Graduate School of Engineering, Osaka University Prof., Division of Global Architecture, Graduate School of Engineering, Osaka University, Dr. Eng. Prof., Division of Global Architecture, Graduate School of Engineering, Osaka University, Dr. Eng. Associate Prof., Division of Global Architecture, Graduate School of Engineering, Osaka University, Dr. Eng. Assistant Prof., Division of Global Architecture, Graduate School of Engineering, Osaka University, Dr. Eng.