

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○安井 さおり^{*1} 同 山中 俊夫^{*2} 同 相良 和伸^{*3}
同 甲谷 寿史^{*4} 同 桃井 良尚^{*5}

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、上方から霧吹きのスプレー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

表1 PIV解析条件

フレーム数	544
時間間隔 [μs]	4000
測定時間 [s]	2.176
解析画像サイズ [pixel]	512×480
解析ソフト	DaVis 8.0 (LaVision)
アルゴリズム	FFT Cross-Correlation Method
検査範囲 [pixel]	Pass1 : 32×32 Pass2 : 16×16
オーバーラップ [%]	50

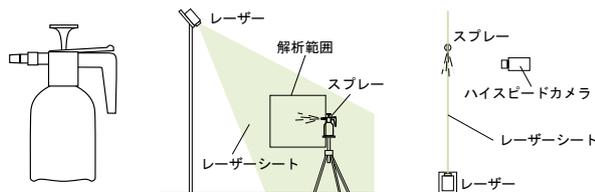


図1 スプレー 図2 測定機器配置図 (立面・平面)

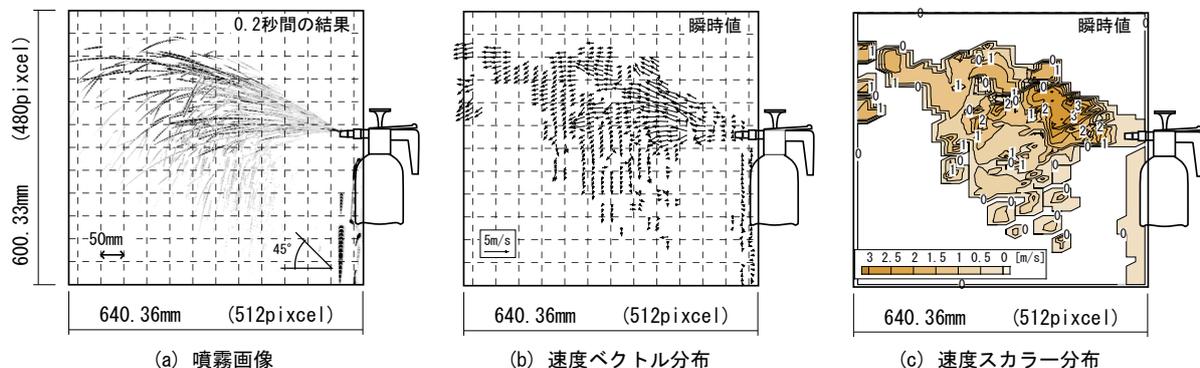


図3 噴霧画像及び速度分布

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は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律で、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、

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

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。

$$\alpha = \frac{\lambda_a}{2r} \text{Nu} \quad (2)$$

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、

$$-4\pi r^2\rho_w \frac{dr}{dt} = 4\pi r^2\rho_a k_c \ln\left(1 + \frac{Y^* - Y}{1 - Y^*}\right) \quad (3)$$

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¹⁾。理想気体を仮定すると、水蒸気の質量分率 Y は、

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

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_w の代わりに、水粒子表面温度における飽和水蒸気圧 P_{ws} の値を用いればよい。物質伝達率 k_c はSh数の定義より、次式のように書ける。

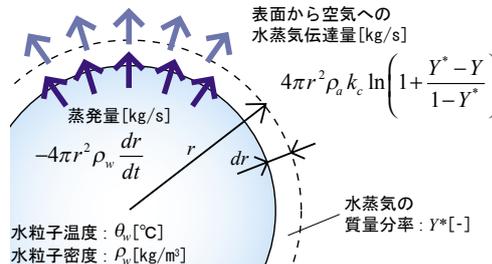


図4 水粒子表面における質量収支

$$k_c = \frac{D}{2r} \text{Sh} \quad (5)$$

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_D は、

$$F_D = \frac{1}{2} C_D A \rho_a v^2 \quad (6)$$

であり、球形粒子の場合、抵抗係数 C_D は

$$\bullet \text{Re} < 1.2^{\frac{10}{3}} \text{ のとき} \quad C_D = \frac{24}{\text{Re}} \quad (7)$$

$$\bullet 1.2^{\frac{10}{3}} < \text{Re} < 32 \text{ のとき} \quad C_D = \frac{20}{\text{Re}^{0.7}} \quad (8)$$

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

と表される²⁾。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、

$$\bullet \text{Re} < 1.2^{\frac{10}{3}} \text{ のとき}$$

$$F_D = \frac{1}{2} \frac{24}{\text{Re}} \pi r^2 \rho_a v^2 = 6\pi \mu_a r v \quad (10)$$

$$\bullet 1.2^{\frac{10}{3}} < \text{Re} < 32 \text{ のとき}$$

$$F_D = \frac{1}{2} \frac{20}{\text{Re}^{0.7}} \pi r^2 \rho_a v^2 = 10\pi (rv)^{1.3} (0.5\mu_a)^{0.7} \rho_a^{0.3} \quad (11)$$

$$\bullet 32 < \text{Re} < 500 \text{ のとき}$$

$$F_D = \frac{1}{2} \frac{10}{\sqrt{\text{Re}}} \pi r^2 \rho_a v^2 = \frac{5}{2} \pi (rv)^{1.5} (2\mu_a \rho_a)^{0.5} \quad (12)$$

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。

$$\frac{4}{3}\pi\rho_w \frac{d(r^3 v_x)}{dt} = -F_{Dx} \quad (13-a)$$

$$\frac{4}{3}\pi\rho_w \frac{d(r^3 v_y)}{dt} = \frac{4}{3}\pi r^3 (\rho_w - \rho_a) g - F_{Dy} \quad (13-b)$$

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

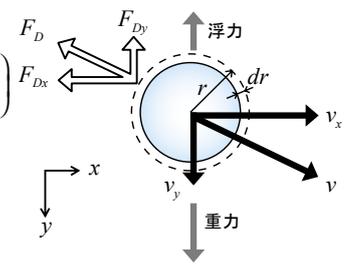


図5 粒子速度及び作用力

\$ 鳩繋相 μ し \wedge	ù 徒詮相 μ 玷 \wedge	二 衫 炭 俵 盗 μ n \wedge	鴉 霸 二 相 μ n0t \wedge
31	61	21-!36-!61-!86-!211	21

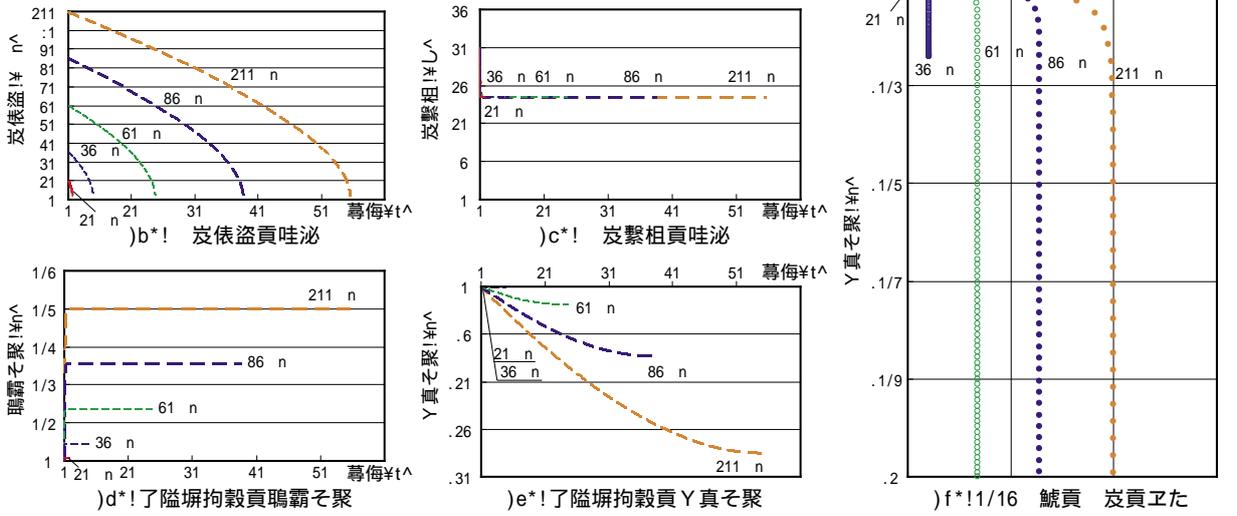


図6 初期粒子半径ごとの水粒子挙動解析結果

\$ 鳩繋相 μ し \wedge	ù 徒詮相 μ 玷 \wedge	二 衫 炭 俵 盗 μ n \wedge	鴉 霸 二 相 μ n0t \wedge
26-!31-!36	41-!61-!81	61-!211	21

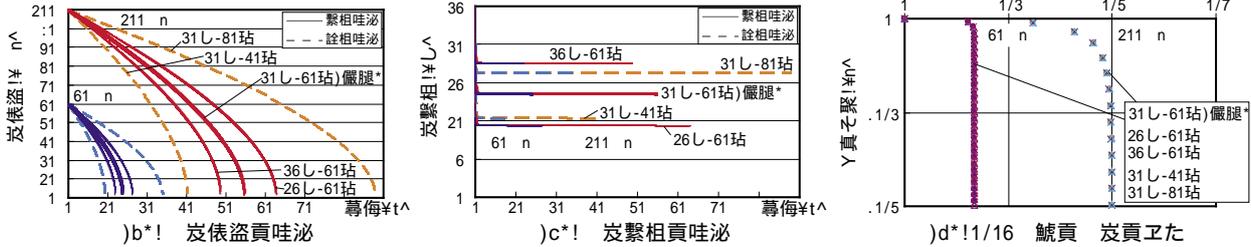


図7 周囲の空気温湿度ごとの水粒子挙動解析結果

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 50 μ m 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。

\$ 鳩撃相\$し^	ù 徒詮相\$玷^	二 珍 炭儀盜\$ n^	鴉霸二 相\$0t^
31	61	211	2-!6-!21-!26

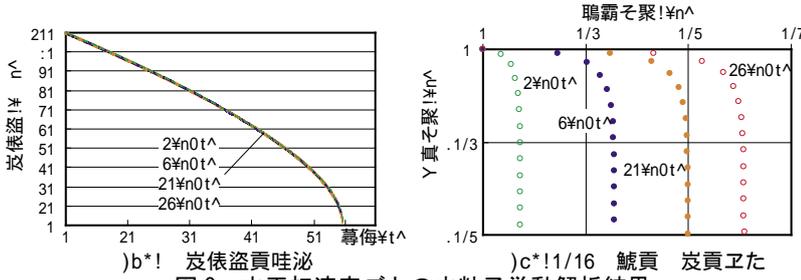


図8 水平初速度ごとの水粒子挙動解析結果

4.1 噴霧流中の空気の運動量保存式

図9に示すように、定常的な流れを考慮する場合、噴霧粒子が断面1から断面2に移動する時間を Δt とする。 Δt 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

$$\rho_a S_1 v_{a1} \bar{X} \Delta t + n \hat{F}_D \Delta t = \rho_a S_2 v_{a2} \bar{X} \Delta t \quad (15)$$

と書ける。両辺を Δt で割り、成分ごとに示すと、

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

$$\rho_a S_1 v_{a1} v_{a1y} + n F_{Dy} = \rho_a S_2 v_{a2} v_{a2y} \quad (16-b)$$

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

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。

$$v_r = v - v_a \quad (18)$$

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0.15 l/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

【記号表】

r : 粒子半径 [m]	P : 大気圧 [Pa] = 1.013×10^5 Pa	f' : 重力加速度 [m/s ²] = 9.8 m/s ²
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 [-]
t : 時間 [s]	D : 空気中の水蒸気の拡散係数 [m ² /s]	Re : レイノルズ数 [-]
ρ : 密度 [kg/m ³]	F_D : 空気抵抗 [N]	
α : 熱伝達率 [W/(m ² ·K)]	C_D : 抵抗係数 [-]	[添字]
L : 蒸発潜熱 [J/kg] = 2.258×10^6 J/kg	v : 水粒子の速度 [m/s]	a : 周辺空気
λ : 熱伝導率 [W/(m·K)]	v_a : 空気速度 [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
Y : 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 [m ²]	1 : 噴霧流断面1
M_{H2O} : 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]	

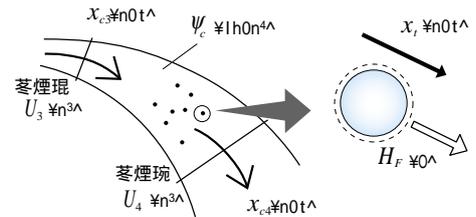


図9 噴霧流中の空気における運動量保存

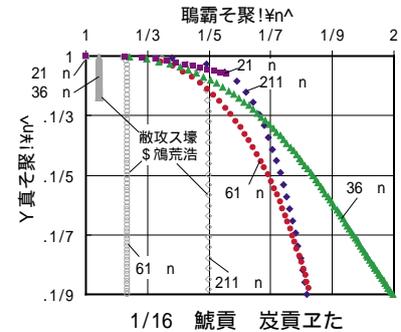


図10 粒子軌跡への巻き込み空気の影響

無い場合に比べ、水平到達距離が大きく伸びることが

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
- 2) 日本機械学会, 機械工学便覧 基礎編 α4 流体工学, p. 81, 2006. 1

*1 大阪大学大学院工学研究科地球総合工学専攻 博士前期課程
 *2 大阪大学大学院工学研究科地球総合工学専攻 教授・博士(工学)
 *3 大阪大学大学院工学研究科地球総合工学専攻 教授・工学博士
 *4 大阪大学大学院工学研究科地球総合工学専攻 准教授・博士(工学)
 *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(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.

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.