

空気中に噴霧された水粒子の挙動解析に関する基礎的研究
(その2) 周囲の温湿度変化を考慮した代表粒子の挙動解析モデル
Fundamental Study on Behavior Analysis of Droplets Sprayed in Air
Part2. Behavior Analysis of a Representative Droplet Considering
Air Temperature and Humidity Changes

学生会員 ○安井 さおり (大阪大学) 正会員 山中 俊夫 (大阪大学)
 正会員 相良 和伸 (大阪大学) 正会員 甲谷 寿史 (大阪大学)
 正会員 桃井 良尚 (大阪大学)

Saori YASUI*¹ Toshio YAMANAKA*¹ Kazunobu SAGARA*¹
 Hisashi KOTANI*¹ Yoshihisa MOMOI*¹
 *¹ Osaka University

It is necessary to investigate the behavior of droplets for evaluation of the effect of mist cooling, spray deodorizer and the other usage. The purpose of this study is to investigate basic behavior of droplets in air. It is considered that the droplet behavior including the life and the achieving distance vary with air temperature, humidity and the droplet radius. As a first step, behavior analysis of a representative droplet sprayed horizontally was conducted. As a result, it was shown that the evaporation rate and the life are highly affected by air temperature and humidity.

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。古芝ら¹⁾は、次亜塩素酸水噴霧による悪臭物質の気中濃度減衰効果について、実験及び数値計算を行い、初期粒子径が大きいほど消・脱臭効果が大いことを示した。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。前報²⁾では、高速度カメラによる霧吹きから噴霧された水粒子挙動の撮影と、単一水粒子を水平噴霧した場合の挙動解析を行った。単一水粒子の蒸発理論についてはCraigら³⁾も報告しているが、蒸発による粒子周辺の温湿度変化の影響については述べられていない。本報では、噴霧流中空気温湿度変化及び粒子から空気への運動量伝播を考慮した解析モデルを提案するとともに、周囲の温湿度が粒子挙動に与える影響について検討した結果を示す。

1. 単一水粒子の挙動解析モデル

図1のように、空気中の単一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。表1に、単一水粒子に関する熱収支式、質量保存式、運動方程式を示す。

1.1 水粒子の熱収支式

水粒子表面から内部の温度分布が一樣とすると、熱収支式は、式(1)となる。左辺は粒子内部の熱量変化、右

辺は粒子表面での熱伝達及び蒸発潜熱を表す。なお、予備検討の結果、本解析では放射の影響は十分に小さいため、対流熱伝達のみを考慮している。なお、対流熱伝達率は球形粒子のNu数より導びいた(式(2)~(5))。

1.2 水粒子の質量保存式

図2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伝達量が等しいとすると、式(6)が成り立つ。ここで、式(6)中における対数部分(式(7))は、Spalding's mass transfer number と呼ばれる無次元数であるが⁴⁾、本解析では水蒸気の質量分率が非常に小さいため、式(7)の代わりに質量分率の差($Y^* - Y$)としても差し支えない。その誤差の影響は、初期半径100 μ mの粒子の寿命で0.3%程度である。理想気体を仮定すると、水蒸気の質量分率 Y は、式(8)で表される。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} の値を用いる。物質伝達率は球形粒子のSh数より導びいた(式(9)~(11))。

1.3 水粒子の運動方程式

水平、鉛直それぞれの方向の運動方程式は、式(12), (13)となる。粒子が受ける空気の抵抗力 F_D (式

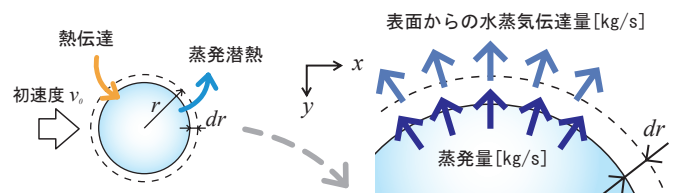


図1 単一水粒子の水平噴霧 図2 粒子表面での質量収支

表 1 単一水粒子の挙動解析モデル

熱収支式		
$\frac{4}{3}\pi c_{pw}\rho_w \frac{d(r^3\theta_w)}{dt} = 4\pi r^2\alpha(\theta_a - \theta_w) + 4\pi r^2\rho_w L \frac{dr}{dt} \quad (1) \quad \alpha = \frac{\lambda_a}{2r} \text{Nu} \quad (2)$		
$\text{Nu} = 2 + 0.6\text{Re}^{\frac{1}{2}}\text{Pr}^{\frac{1}{3}} \quad (3) \quad \text{Re} = \frac{2\rho_a v_r r}{\mu_a} \quad (4) \quad \text{Pr} = \frac{\mu_a c_{pa}}{\lambda_a} \quad (5)$		
質量収支式		
$-4\pi r^2\rho_w \frac{dr}{dt} = 4\pi r^2\rho_a k_c \ln\left(1 + \frac{Y^* - Y}{1 - Y^*}\right) \doteq 4\pi r^2\rho_a k_c (Y^* - Y) \quad (6)$		
$B = \ln\left(1 + \frac{Y^* - Y}{1 - Y^*}\right) \quad (7) \quad Y = \frac{M_{H_2O}}{M_{H_2O} + M_a\left(\frac{P}{P_w} - 1\right)} \quad (8) \quad k_c = \frac{D}{2r} \text{Sh} \quad (9)$		
$\text{Sh} = 2 + 0.6\text{Re}^{\frac{1}{2}}\text{Sc}^{\frac{1}{3}} \quad (10) \quad \text{Sc} = \frac{\mu_a}{\rho_a D} \quad (11)$		
運動方程式		
水平方向	鉛直方向	
$\frac{4}{3}\pi\rho_w \frac{d(r^3 v_x)}{dt} = -F_{Dx}, \quad \frac{4}{3}\pi\rho_w \frac{d(r^3 v_y)}{dt} = \frac{4}{3}\pi r^3(\rho_w - \rho_a)g - F_{Dy} \quad (12)$		
$F_{Dx} = \frac{v_{rx}}{\sqrt{v_{rx}^2 + v_{ry}^2}} F_D, \quad F_{Dy} = \frac{v_{ry}}{\sqrt{v_{rx}^2 + v_{ry}^2}} F_D \quad (13) \quad F_D = \frac{1}{2} C_D A \rho_a v_r^2 \quad (14)$		
$\text{Re} < 1.2^{\frac{10}{3}} \text{ のとき} \quad C_D = \frac{24}{\text{Re}} \quad (15)$	$1.2^{\frac{10}{3}} < \text{Re} < 32 \text{ のとき} \quad C_D = \frac{20}{\text{Re}^{0.7}} \quad (16)$	$32 < \text{Re} < 500 \text{ のとき} \quad C_D = \frac{10}{\sqrt{\text{Re}}} \quad (17)$
記号表		
r : 粒子半径 [m]	F_D : 空気抵抗 [N]	
θ : 温度 [°C]	C_D : 抵抗係数 [-]	
c_p : 定圧比熱 [J/(kg·K)]	A : 粒子の投影面積 [m ²]	
t : 時間 [s]	v : 水粒子の速度 [m/s]	
ρ : 密度 [kg/m ³]	v_r : 水粒子と空気の相対速度 [m/s]	
α : 熱伝達率 [W/(m ² ·K)]	μ : 粘性係数 [Pa·s]	
L : 蒸発潜熱 [J/kg] = 2.258 × 10 ⁶ J/kg	g : 重力加速度 [m/s ²] = 9.8 m/s ²	
λ : 熱伝導率 [W/(m·K)]	Nu : ヌッセルト数 [-]	
k_c : 物質移動係数 [m/s]	Sh : シヤールウッド数 [-]	
Y : 噴霧流中空気の水蒸気質量分率 [-]	Re : レイノルズ数 [-]	
Y^* : 粒子表面の水蒸気質量分率 [-]	Pr : プラントル数 [-]	
B : Spalding's mass transfer number [-]	Sc : シュミット数 [-]	
M_{w0} : 液滴のモル質量 [kg/mol]	[添字]	
M_a : 乾き空気のモル質量 [kg/mol]	a : 噴霧流中空気	
P : 大気圧 [Pa] = 1.013 × 10 ⁵ Pa	w : 水粒子	
P_w : 水蒸気分圧 [Pa]	x : 水平成分	
D : 空気中の水蒸気の拡散係数 [m ² /s]	y : 鉛直成分(下向きを正とする)	

(14) は、球の抵抗係数 C_D (式 (15) ~ (17)) により表される⁵⁾。式 (15) はストークスの式、式 (17) はアレンの実験式、式 (16) は、式 (15) と (17) の間の遷移領域を、文献 5) に記載の実験値を近似することにより作成した。

2. 噴霧流中空気の挙動解析モデル

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。また、多数の粒子の蒸発により、粒子周辺の温湿度は変化する。そこで、運動する水粒子から空気への運動量伝播と、蒸発による周辺の温湿度変化を考慮した解析を行う。

2.1 噴霧流中の運動量保存式

代表粒子の周囲に、代表粒子と等しい径で、同じ方向、速さで運動する粒子が多数存在すると考える。図 3 に示すように、定常的な噴霧において噴霧粒子が断面 1 から断面 2 に移動する時間を Δt とする。運動する粒子は空気に運動量を与え、単位時間あたりの粒子の通過個数を n とすると、運動量保存式は式 (18) と書ける。断面積 S は初期の噴霧広がり角 ϕ で定義する (式 (19))。両辺を Δt で割り、成分ごとに示すと、式 (20) となり、これを変形した式 (21) 及び式 (22) より、断面 2 における空気速度 v_{a2} が求まる。 v_{a2} より式 (4), (13), (14) に用いる、水粒子と空気の相対速度 v_r を算出する (式 (23))。

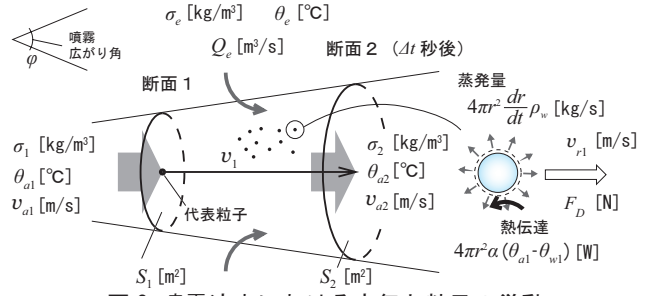


図 3 噴霧流中における空気と粒子の挙動

表 2 噴霧流中空気の挙動解析モデル

噴霧流中空気の運動量保存式	
$\rho_a S_1 v_{a1} \bar{v}_{a1} \Delta t + n \bar{F}_D \Delta t = \rho_a S_2 v_{a2} \bar{v}_{a2} \Delta t \quad (18) \quad S = \pi \left(l \tan \frac{\phi}{2} \right)^2 \quad (19)$	
$x \text{ 方向} \quad \rho_a S_1 v_{a1} v_{a1x} + n F_{Dx} = \rho_a S_2 v_{a2} v_{a2x}, \quad y \text{ 方向} \quad \rho_a S_1 v_{a1} v_{a1y} + n F_{Dy} = \rho_a S_2 v_{a2} v_{a2y} \quad (20)$	
$v_{a2x} = \frac{\rho_a S_1 v_{a1} v_{a1x} + n F_{Dx}}{\rho_a S_2 v_{a2}}, \quad v_{a2y} = \frac{\rho_a S_1 v_{a1} v_{a1y} + n F_{Dy}}{\rho_a S_2 v_{a2}} \quad (21)$	
$v_{a2} = \sqrt{v_{a2x}^2 + v_{a2y}^2} \quad (22) \quad v_r = v - v_a \quad (23)$	
噴霧流中空気の水蒸気収支式	
$\sigma_2 S_2 v_{a2} \Delta t = \sigma_1 S_1 v_{a1} \Delta t + \sigma_e Q_e \Delta t + n \Delta t \cdot 4\pi r^2 \frac{dr}{dt} \rho_w \Delta t \quad (24)$	
$Q_e = S_2 v_{a2} - S_1 v_{a1} \quad (25) \quad \sigma = M_{H_2O} \frac{P_w}{RT} \quad (26)$	
$\sigma_2 = \frac{\sigma_1 S_1 v_{a1} + \sigma_e Q_e + n \Delta t \cdot 4\pi r^2 \frac{dr}{dt} \rho_w}{S_2 v_{a2}} \quad (27)$	
噴霧流中空気熱収支式	
$c_p \rho_a S_2 v_{a2} \Delta t \theta_{a2} = c_p \rho_a S_1 v_{a1} \Delta t \theta_{a1} + c_p \rho_a Q_e \Delta t \theta_e - n \Delta t \cdot 4\pi r^2 \alpha (\theta_{a1} - \theta_{w1}) \Delta t \quad (28)$	
$\theta_{a2} = \frac{c_p \rho_a S_1 v_{a1} \theta_{a1} + c_p \rho_a Q_e \theta_e - n \Delta t \cdot 4\pi r^2 \alpha (\theta_{a1} - \theta_{w1})}{c_p \rho_a S_2 v_{a2}} \quad (29)$	
断面 2 における噴霧流中空気の水蒸気分圧	
$P_{w2} = \frac{\sigma_2}{M_{H_2O}} RT = \frac{\sigma_2}{M_{H_2O}} R (273 + \theta_{a2}) \quad (30)$	
記号表	
v_a : 噴霧流中空気の流れ速度 [m/s]	R : 気体定数 [J·Pa/(K·mol)]
n : 単位時間あたりの粒子個数 [個/s]	= 8.31447 × 10 ³ J·Pa/(K·mol)
S : 噴霧流の断面積 [m ²]	T : 絶対温度 [K]
l : 粒子の噴霧口からの到達距離 [m]	[添字]
ϕ : 噴霧広がり角 [°]	1 : 噴霧流断面 1
σ : 水蒸気濃度 [kg/m ³]	2 : 噴霧流断面 2
Q_e : 誘引空気量 [m ³ /s]	e : 誘引空気

2.2 噴霧流中の水蒸気及び熱収支式

粒子の蒸発により、噴霧流中の空気の温湿度のみが変化し、噴霧流の外に空気温湿度は変化しないと仮定する。図 3 において、断面 1 からの流入空気と誘引空気 Q_e がそれぞれ含む水蒸気量と、粒子からの蒸発量の和が、断面 2 からの流出空気に等しいとすると、式 (24) が成り立つ。誘引空気量は、断面 1, 2 における断面積と速度より、式 (25) となる。理想気体を仮定すると、水蒸気濃度 σ はボイル・シャルルの法則より式 (26) となる。式 (24) の両辺を Δt で割って変形すると、断面 2 における水蒸気濃度は式 (27) で求められる。次に、断面 1 からの流入空気と誘引空気の熱量の和から、噴霧流内で空気から粒子に伝達する熱量を差し引いたものが、断面 2 からの流出空気の熱量に等しいとすると、式 (28) が成り立つ。両辺を Δt で割って変形すると、断面 2 における噴霧流中空気の温度は、式 (29) で求められる。ここで、式 (30) に式 (27), (29) を代入すると、断面 2 における水蒸気分圧 P_{w2} を算出できる。ここで得

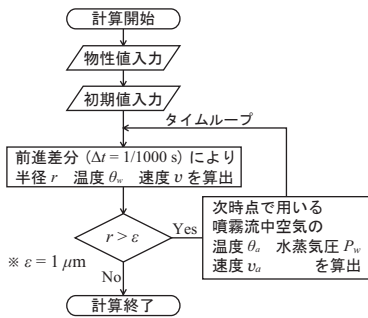


図4 計算フロー

表3 計算条件

各種条件	単位	Case0	Case1	Case2	Case3	Case4	Case5	Case6	Case7
空気温度	°C	20	20	20	20	25	15	25	15
相対湿度	%	50	50	60	40	36.9	68.5	50	50
水蒸気圧	kPa	1.17	1.17	1.40	0.93	1.17	1.17	1.58	0.85
水平初速度	m/s	10	10	10	10	10	10	10	10
落下初速度	m/s	0	0	0	0	0	0	0	0
噴霧量	l/min	-	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15
初期粒子温度	°C	20	20	20	20	25	15	25	15
噴霧広がり角	°	-	45	45	45	45	45	45	45

初期半径: $\cdots\cdots$ 100 μm $\cdots\cdots$ 75 μm $\cdots\cdots$ 50 μm $\cdots\cdots$ 25 μm $\cdots\cdots$ 10 μm
 ※破線・白抜きプロット: Case0 実線・中塗りプロット: Case1

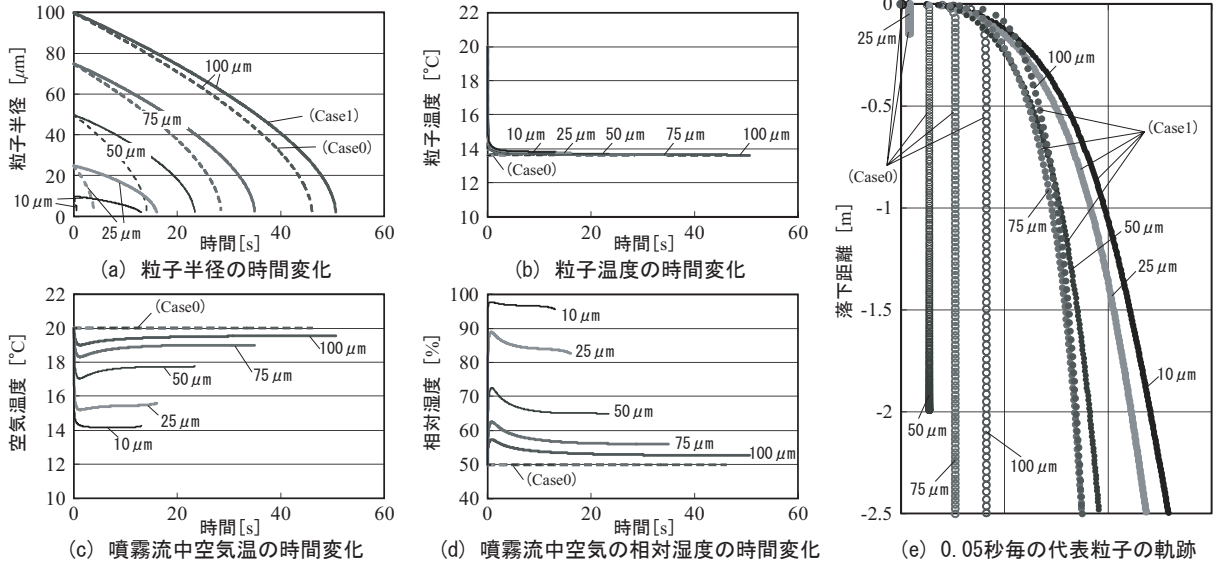


図5 初期半径ごとの挙動解析結果

られた水蒸気分圧が式 (8) に反映され、次時点の粒子の挙動解析に用いられる。

3. 結果と考察

計算フローを図4に示す。粒子の半径・温度・速度は前進差分により算出し、その結果から噴霧流中空气の次時点の断面における、温度・水蒸気圧・速度を算出する。また、計算条件を表3に示す。

3.1 解析結果

噴霧の水平初速度を 10m/s、噴霧広がり角を 45°とした、初期半径ごとの挙動解析結果を図5に示す (Case1)。初期の空気温度を 20°C、相対湿度を 50% とし、水粒子の初期温度も、空気温度と同じとする。また、前報²⁾の結果として、噴霧流中空气の温湿度変化や粒子から空气への運動量伝播を無視した挙動解析結果を、比較のために合わせて示す (Case0、図中破線)。

(1) 粒子半径の変化

蒸発にともなう粒子半径の変化を図5(a)に示す。噴霧流中空气の温湿度変化を考慮すると、粒子の蒸発速度が遅くなり、粒子が消滅するまでの寿命が延びている。図5(b)に示すように、噴霧流中空气の温度変化の有無に関わらず、粒子温度はほぼ瞬時に低下し、一定 (湿球温度にほぼ一致) となる。つまり、粒子表面の

質量分率は Case0 と Case1 で違いが無いと言える。一方、図5(c), (d) より、噴霧流中空气の温度は低下し、相対湿度は上昇していることがわかる。蒸発による噴霧流中における水蒸気量の増加が、粒子の蒸発速度を低下させていると考えられる。なお、本解析では噴霧量を粒子径に関わらず 0.15 l/min としたが、初期粒子半径が小さいほど総表面積が大きくなるため、噴霧流中の湿度が上昇しやすいことがわかる (図5(d))。故に、粒子半径が小さいほど、蒸発速度の低下・寿命の伸びが顕著に見られる。

(2) 代表粒子の軌跡

代表粒子の軌跡を図5(e)に示す。0.05秒ごとの粒子の位置を初期粒子径別にプロットした。空气への運動量伝播の無い Case0 に比べ、Case1 では水平到達距離が大きく伸び、粒子軌跡は粒子半径と誘引空气の相互の影響を受けていることがわかる。Case0 では粒子径が大きいほど水平到達距離が長い、Case1 においては、初期粒子径が大きいほど水平到達距離が短くなる傾向が見られる。落下距離 2.5m の位置では、初期半径 10 μm の粒子の水平到達距離が最も長い。粒子が小さいと空气の抵抗を受けやすく、周囲の噴霧流の流れに乗って、遠くまで到達すると考えられる。ただし、

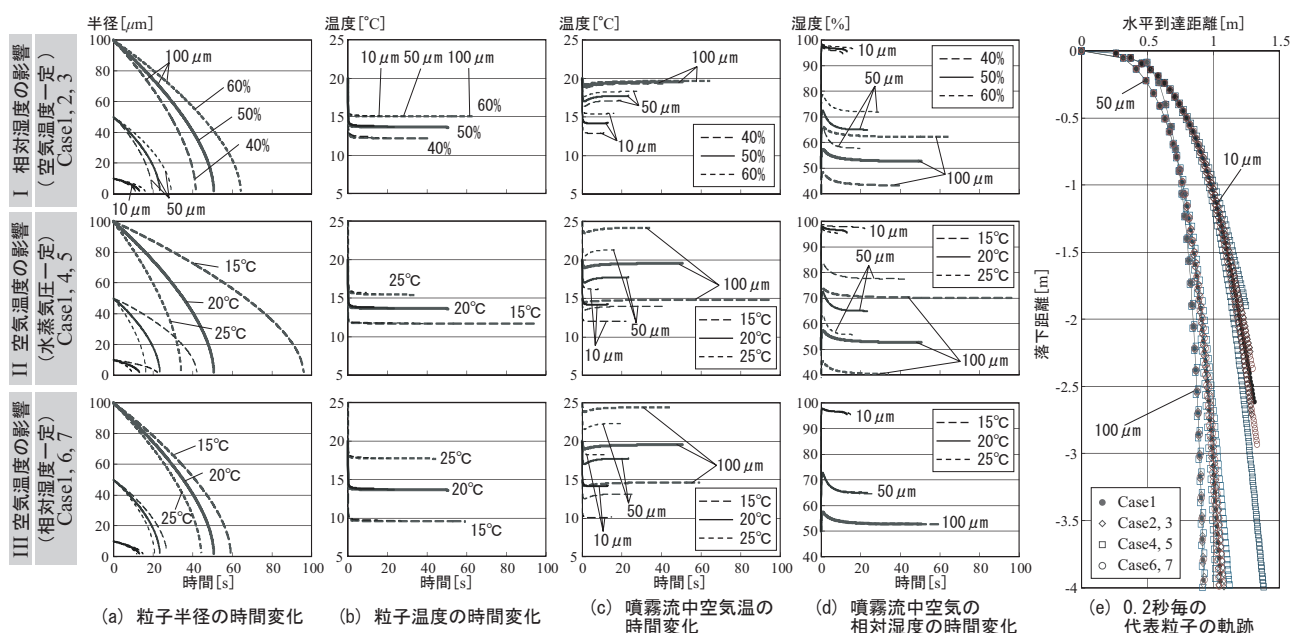


図 6 誘引空气の温湿度ごとの挙動解析結果

今回はモデルの単純化のため空気同士の粘性抵抗による運動量拡散を考慮しておらず、実際には本結果よりも巻き込み空气の影響は小さく、移動距離は短くなると考えられる。

3.2 誘引空气の温度・湿度が粒子挙動に与える影響

誘引空气の温湿度は噴霧流中空气の温湿度及び粒子の挙動に影響を与えると考えられるため、Case1の結果を基準(実線)とし、誘引空气の温湿度をパラメータとして挙動解析を行った結果を図6に示す。図6(e)において、寿命の長さにより落下距離には差異が見られたものの、粒子の描く軌跡には、誘引空气の温湿度による大きな差異は見られなかった。

(1) 相対湿度の影響(空气温度一定): Case1, 2, 3

誘引空气温度を20°C一定とし、相対湿度60%(Case2)、40%(Case3)と比較した結果を図6 I(上段)に示す。相対湿度が高いと粒子の蒸発が抑制され、図6 I(a)のように粒子の寿命が長くなる。また、蒸発量の低下により、蒸発で奪われる熱量が小さくなり、粒子・噴霧流中空气ともに温度が高くなる(図6 I(b), (c))。相対湿度が低い場合は逆の挙動を示し、粒子の寿命は短く、粒子と噴霧流中空气の温度は低下する。

(2) 空气温度の影響(水蒸気圧一定): Case1, 4, 5

誘引空气の水蒸気圧を1.17kPa一定とし、空气温度25°C(Case4)、15°C(Case5)と比較した結果を図6 II(中段)に示す。このときの相対湿度は、36.9%(Case4)、68.5%(Case5)となる。図6 II(a)より、空气温度が高いほど粒子の寿命が短いことがわかる。誘引空气の温度が高いと、図6 II(b)のように粒子温度も高くなることで、表面の飽和水蒸気圧が上昇する。その結果、水蒸気の質量分率の差が大きくなり、蒸発が促進されることで寿命が短くなると考えられる。

(3) 空气温度の影響(相対湿度一定): Case1, 6, 7

誘引空气の相対湿度を50%一定とし、空气温度25°C(Case6)、15°C(Case7)と比較した結果を図6 III(下段)に示す。図6 III(a)より、温度が高いほど粒子の寿命は短くなるが、図6 II(a)の水蒸気圧一定の場合ほど差異は大きくないことがわかる。誘引空气温度が高いと、図6 III(b)のように粒子の温度も高くなり、表面の飽和水蒸気圧が高くなる。一方で噴霧流中空气の水蒸気圧も高くなるが、図6 III(a)によると蒸発速度は大きくなっている。つまり、粒子表面の飽和水蒸気量の増加の方が、空气中の水蒸気量の増加より支配的であると言える。また、図6 III(d)では噴霧流中空气の相対湿度の時間変化が、粒子径ごとにほぼ一致した。

4. おわりに

本報では水平に噴霧される単一水粒子の蒸発理論に、周囲の温湿度の変化及び空气への運動量伝播を考慮した挙動解析を行った。その結果、特に微小な粒子について、蒸発して消滅するまでの寿命及び水平到達距離が長くなった。今後は噴霧流において空气粘性による運動力拡散を考慮するとともに、解析の精度検証のため、PIVによる粒子速度測定を行う予定である。

【参考文献】

- 古芝、相良、山中、甲谷、桃井、九野、三浦、粕谷、田辺、辻：次亜塩素酸水噴霧による悪臭物質の消・脱臭効果に関する研究 その1、空気調和・衛生工学会近畿支部学術研究発表会論文集, pp. 33-36, 2009. 3
- 安井、山中、相良、甲谷、桃井：空气中に噴霧された水粒子の挙動解析に関する基礎的研究、空気調和・衛生工学会近畿支部学術研究発表会論文集, pp. 173-176, 2011. 3
- F. Craig 他：ミストの蒸発冷却特性と制御方式の提案、日本冷凍空調学会論文集, vol. 26, No. 1, 2009. 3
- 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