

# ダクト内強制対流下におけるミスト蒸発特性と蒸発効率向上対策に関する研究

地域環境計画分野 山口 浩史

## Abstract

少ないエネルギーで大きな冷却効果を生み出すミストを応用した省エネ・ヒートアイランド対策技術が考えられる。しかし、ミストは対象物を濡らしてしまうことで様々な弊害をもたらしてしまう。ミストによる濡れを未然に防ぐためには蒸発特性を把握する必要があるが、強制対流下における蒸発特性は明らかにされていない。また、濡れを防ぐためには蒸発率向上策も重要である。そこで本研究では、強制対流下におけるミスト蒸発特性モデルと蒸発率向上策の検討を行った。まず、ミスト蒸発量の計測手法を考案し、その手法の計測精度向上策を検討した。そして、その計測手法を用いて強制対流下におけるミスト蒸発特性を明らかにし、蒸発特性モデルを得た。蒸発特性モデルを用いることでミスト蒸発の予測が可能となった。また、蒸発率向上策を検討し、「ミストの拡散」と「滞留時間の増加」が有効であることを確認した。

## 1. 研究の背景・目的

地球温暖化やヒートアイランド現象が深刻化してきている。2007年の気候変動に関する政府間パネルでは、「20世紀半ば以降の世界平均気温上昇のほとんどは、人為起源の温室効果ガス濃度の増加による可能性が非常に高い」ことが明らかにされた。また、ヒートアイランド現象は、地表面被覆の変化、人工排熱の増加、都市部の風の衰え等により引き起こされる。

ところで近年、ミストによる屋外・半屋外空間の冷却が徐々に普及しつつある。水の蒸発潜熱は約2.3 MJ/kgであり、ミストは少ないエネルギーで大きな冷却効果を生み出すことができる。このミストを応用した省エネ・ヒートアイランド対策技術の開発が可能と考えられる。

その一例が空冷室外機のミスト冷却である。空冷空調機は多くの建物に設置されているが、室外機の吸込み空気温度が上昇すると効率が低下し(Figure 1)、室外機からの顕熱排熱はヒートアイランド現象の原因の一つとなる。そこで、ミスト冷却によって室外機の吸込み空気を冷却することで空調機効率を向上させ、さらに室外機からの顕熱排熱も削減することができると考えられる。しかし、蒸発しなかったミストにより熱交換器フィンに濡らしてしまうと、スケール付着や腐食を引き起こしてしまう可能性がある。

このような問題を回避するためには冷却対象を極力濡らさない必要があり、ミスト蒸発特性の把握が重要となる。既往研究では、Farnhamら<sup>1)</sup>によって無風環境における自由落下ミストの蒸発特性は明らかにされたが、強制対流下における蒸発特性は明らかにされて

いない。尹ら<sup>2)</sup>は数値流体力学ソフトを用いてミスト冷却の予測を行ったが、より簡易にミスト蒸発を予測できる方法が必要である。

また、対象物を極力濡らさないようにするためには、限られた流路で蒸発率を向上させることも重要である。

以上のことを踏まえて、本研究では、強制対流下におけるミスト蒸発特性モデルと蒸発率向上策の検討を行う。また、ミスト冷却の応用事例として、空冷室外機のミスト冷却の効果検証にも取り組む。

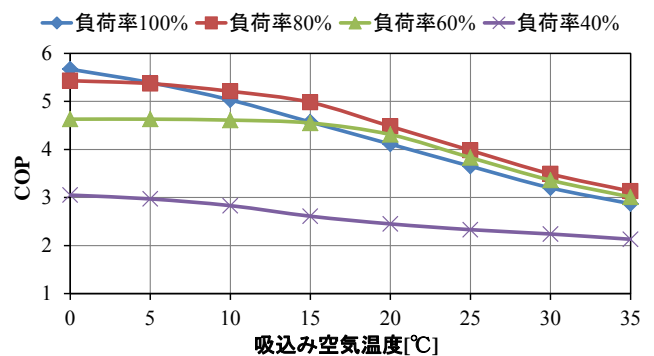


Figure 1 データセンタ用空冷空調機の例

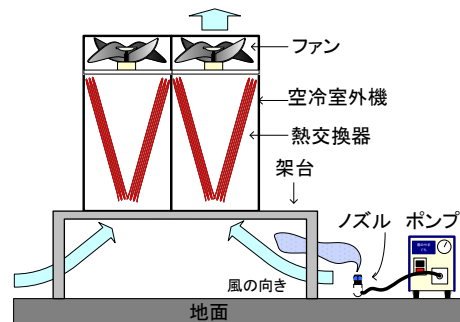


Figure 2 空冷室外機のミスト冷却の概要

## 2. ミスト蒸発量の計測方法

ミストの蒸発特性を明らかにするために、ミスト蒸発量の計測を試みる。本研究では、ミスト蒸発量を計測する実験装置を開発し、蒸発量計測方法を考案した。また、その計測精度の向上策についても検討した。

### 2.1 ミスト蒸発量の計測方法

ミスト蒸発量を計測するために実験装置を開発した (Figure 4)。蒸発量計測方法は以下の手順で行う。実験で使用するフィルタの仕様を Table 1 に示す。

- ① ノズル流量を計測
- ② フィルタ噴霧前重量を計測し、実験装置に設置
- ③ ダンパを調節して任意の風速に設定
- ④ ヒータと加湿ユニットで吸気の温湿度を調節
- ⑤ 任意の噴霧時間で計測を開始
- ⑥ 噴霧終了後、フィルタを取出し、フィルタ噴霧後重量を計測

### 2.2 計測精度向上策の検討

考案した蒸発量計測方法には、いくつかの誤差要因が存在すると考えられる。それらを以下に示す。

- ① フィルタ到達前に実験装置内壁に付着 ( $m_{wall}$ )
- ② フィルタ取り出し時に水滴が落下 ( $m_{remove}$ )
- ③ 未蒸発ミストのフィルタ通過 ( $m_{pass}$ )
- ④ 捕集ミストがフィルタ表面から蒸発 ( $m_{e2}$ )

これらの誤差要因の内、 $m_{wall}$  に関しては計測終了後に拭き取ることで補正が可能である。その他の誤差要因について、それぞれの補正方法を検討する。

Equation 1 に誤差補正を考慮した蒸発率算出式を示す。

### 2.2.1 取出し時落下水滴量 $m_{remove}$

$m_{remove}$  は実験により検証する。

#### (1) 実験方法

実験方法を以下に示す。

- ① 実験装置に設置する前にフィルタにミストを散布して重量を計測
- ② 送風機を稼働させていない実験装置にフィルタを出し入れして重量変化を調べる
- ③ ②の作業を複数回繰り返す

#### (2) 実験結果

実験結果を Figure 5 に示す。1回の取り出しで平均 0.3 g の捕集量の減少があると推定される。 $m_{remove}$  が捕集量に占める割合は 0.3% であった。

$$Y = 1 - \frac{m_{cap} + m_{remove} + m_{pass} + m_{e2}}{m_{mist} - m_{wall}} \quad (1)$$

Table 1 計測フィルタ仕様

型式	ASHRAE 比色法効率 [%]	JIS14種 DOP 効率 [%]	定格風量 [m3/min]
VG-40-56F	40 以上	25 以上	56

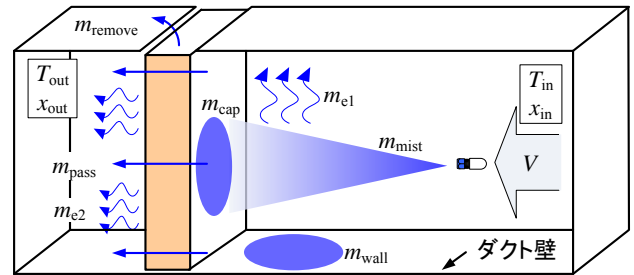


Figure 3 ダクト内水分収支図

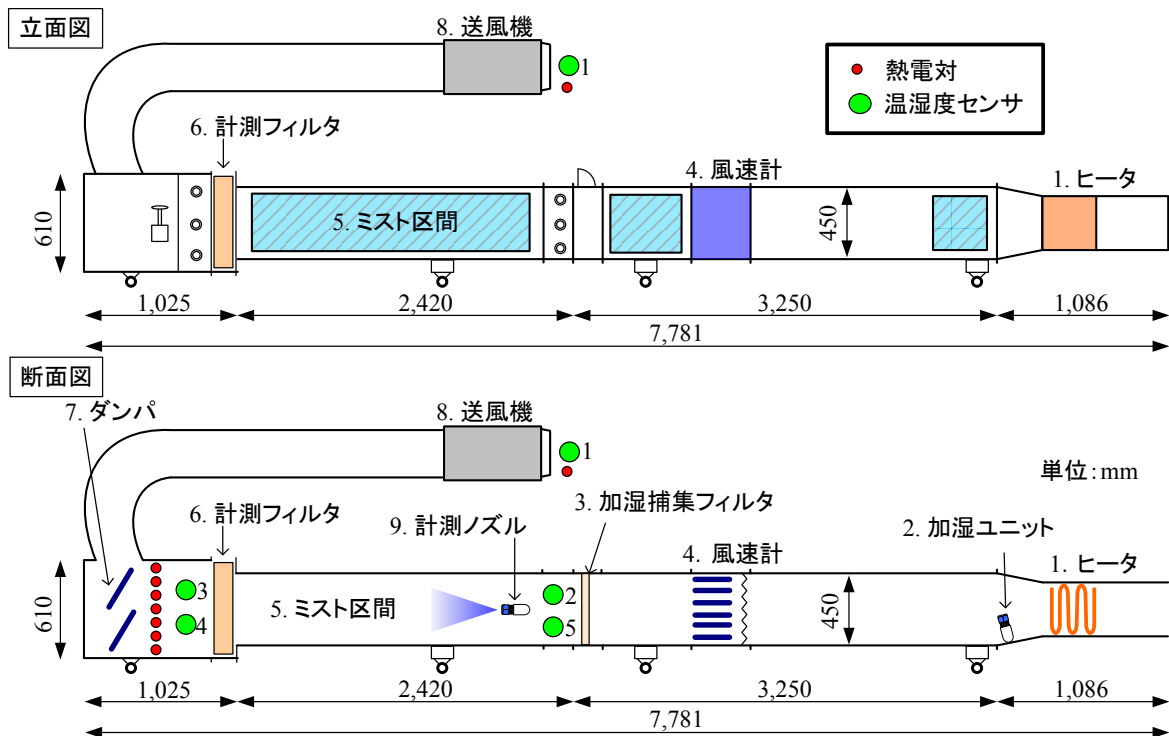


Figure 4 水噴霧実験装置

## 2.2.2 フィルタ通過ミスト量 $m_{\text{pass}}$

ミストの粒径分布とフィルタの粒径別捕集効率から  $m_{\text{pass}}$  を推定する。

### (1) ミストの粒径分布

本研究で使用するノズルは(株)いけうち製一流体ノズルの KBN80031 である。位相ドップラー式レーザー粒子分析計を用いてある高さからの自由落下ミストの粒径別粒子数を調べ、粒径別粒子質量、累積質量分率を求めた(Figure 6)。200 mm を除く 500~3,000 mm の高さからのミストは、累積質量分率にあまり違いが生じないことがわかった。つまり、蒸発率が異なっても、ミストの粒径別質量比は変わらないと推測される。

### (2) $m_{\text{pass}}$ の推定値

フィルタ粒径別捕集効率を Table 2 に示す。粒径 0  $\mu\text{m}$  に対する捕集効率を 0% とし、線形的に捕集効率が増大していくと仮定する。散布するミストは蒸発率に関係なく粒径別質量比は変化しないと仮定すると、累積質量分率とフィルタの捕集効率から、散布したミストの 98.7% を捕集することができると推定された。つまり、1.3% のミストがフィルタを通過してしまい、この値を捕集量に対する割合に換算すると捕集量の 1.3% に相当する。

## 2.2.3 捕集した水滴のフィルタからの蒸発量 $m_{e2}$

$m_{e2}$  は捕集した水滴に湿球温度でない空気が衝突し続けることで発生する誤差である。 $m_{e2}$  は流入する空気の乾球温度と湿球温度の差(乾湿球温度差)と風量に依存すると推測され、それらの関係について検証する。

### (1) 実験方法

- ① 実験装置に設置する前のフィルタにミストを散布し、重量を計測
- ② フィルタを実験装置に設置して 1 分間風に曝し、実験装置から取り出して重量を計測
- ③ ②を 3 回繰り返す

### (2) 実験結果

得られた計測値をフィルタ面積で除した値を単位面積当たりのフィルタからの蒸発量  $m_{e2,\text{unit}}$  とする。そして、実験条件である乾湿球温度差と風量を Equation 2 から単位面積のフィルタに流入する空気の乾球温度と湿球温度のエンタルピー差  $\Delta H_{\text{WB}}$  に換算して、実験で得られた計測値との関係を調べる(Figure 7)。

この図から両者は比例関係にあることがわかり、 $m_{e2}$  を推定できる近似式を得た。

## 2.2.4 誤差要因が蒸発率に与える影響

検証した各誤差要因の補正方法を Table 3 に示す。これらの誤差要因による誤差を検証するため、3 章で述べる蒸発量計測実験のデータを用いて RMSE を算出すると、RMSE は 8.0% となった。誤差を補正することで計測精度を向上させることができる。

$$\Delta H_{\text{WB}} = \frac{c_p \times \rho \times V \times \Delta T_{\text{WB}}}{S_{\text{filter}}} \quad (2)$$

Table 2 フィルタ捕集効率

粒径 [ $\mu\text{m}$ ]	捕集効率 [%]
0	0
10	95
20	98
30	100

Table 3 誤差要因のまとめ

誤差要因	各誤差の補正方法
ダクト内壁付着量 $m_{\text{wall}}$	計測後に拭き取る
取出し時落下水滴量 $m_{\text{remove}}$	捕集量の 0.3 %
フィルタ通過ミスト量 $m_{\text{pass}}$	捕集量の 1.3 %
フィルタからの蒸発量 $m_{e2}$	実験式より算出

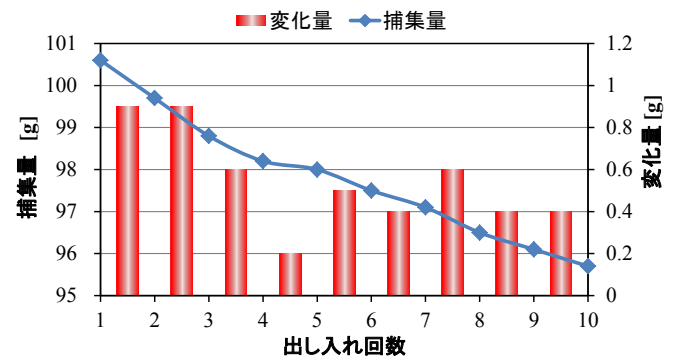


Figure 5  $m_{\text{remove}}$  確認実験結果

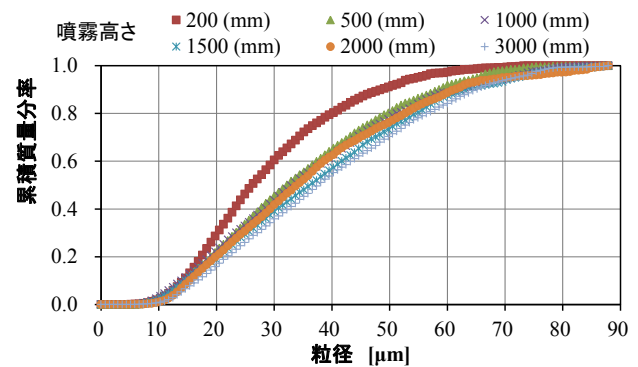


Figure 6 累積質量分率

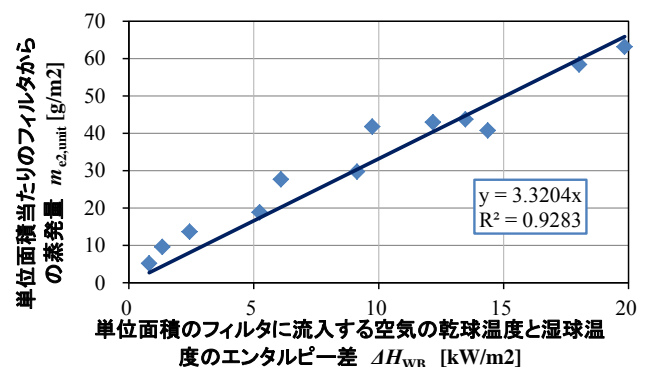


Figure 7  $\Delta H_{\text{WB}}$  と  $m_{e2,\text{unit}}$  の関係

### 2.3 計測方法の精密度

考案した計測方法において、同一条件で計測した際に計測値がどの程度ばらつくかを検証する。

#### (1) 実験方法

蒸発パラメータを変えずに5回の蒸発量計測を行う。Table 4 に実験条件を示す。

#### (2) 実験結果

実験結果を Table 5 に示す。計測値の標準偏差は±2%であった。

### 3. 強制対流下におけるミスト蒸発特性

ミスト蒸発量を計測し、ミストの蒸発特性を明らかにする。また、蒸発率の向上策についても検討を行う。

#### 3.1 蒸発量計測実験

蒸発パラメータとして、①蒸発距離、②粒径、③噴霧量、④風速、⑤空気の温湿度が挙げられるが、本研究ではノズルは1種類しか使用しないため粒径をパラメータから除外する。また、Farnham ら<sup>1)</sup>の知見を活かし空気の温湿度を乾湿球温度差という一つのパラメータに集約する。よって、本研究では①蒸発距離、②噴霧量、③風速、④乾湿球温度差の4条件を変化させて実験を行う。また、ノズルは風の流れと同一方向に向けて設置する。パラメータ条件を Table 6 に示す。

誤差補正済みの結果を Figure 8 に示す。また、蒸発パラメータの決定係数を Table 7 に示す。蒸発距離と乾湿球温度差の決定係数が大きく、噴霧量と風量は決定係数が小さかった。噴霧量の決定係数が小さかったのは、ミストがダクト断面方向に十分に拡散せず、ノズル数が異なっても蒸発率があまり変わらなかったためと考えられる。また、風量(風速)の決定係数が小さかった原因として、例えば風速が低下するとミストの滞留時間は増加するが風量は低下してしまう、というように風速の低下(増大)は蒸発率の向上・低下作用の両方に働き、その結果あまり蒸発率が変化しなかったと考えられる。

#### 3.1.1 蒸発特性モデル

実験結果から蒸発特性モデルを検討した。Equation 3 に示す。RMSEは6.1%である。蒸発特性モデルを検討する上でフィルタに起因する誤差の補正は行っているため、得られた蒸発特性モデルは計測で使用したフィルタに限定されたものではない、ミストの蒸発挙動を示すモデルである。ただし、風量は風速とダクト断面積の積としており、ミストがダクト断面方向に十分に拡散していない場合も同様の方法で算出しているため、ミストが拡散した分の風量を計測し蒸発特性モデルを改める必要がある。

$$Y = 0.13 \cdot d^{0.62} \cdot m_{\text{mist}}^{-0.08} \cdot V^{0.04} \cdot \Delta T_{\text{WB}}^{0.68} \quad (3)$$

Table 4 実験条件

蒸発距離	2.0 m
粒径 (SMD)	28 μm
噴霧量	37.0 g/min
風速	3.0 m/s
吸込み空気の温湿度	27.0 degC 71.0 %RH

Table 5 計測方法の標準偏差

実験回数	$m_{\text{mist}}$ [g]	$m_{\text{cap}}$ [g]	Y [%]	標準偏差 [%]
1	73.0	30.9	58	±2
2	73.0	33.5	54	
3	73.0	34.6	53	
4	73.0	33.8	54	
5	73.0	35.5	51	

Table 6 蒸発パラメータ条件

蒸発距離	[m]	0.5	1.0	2.0		
噴霧量	[g/min]	38.0		76.0		
風速	[m/s]	2.0		3.0		
乾湿球温度差	[K]	2.0	4.0	6.0	8.0	10.0

Table 7 蒸発パラメータの決定係数

蒸発距離	噴霧量	風量	乾湿球温度差	蒸発率
$d$	$m_{\text{mist}}$	$V$	$\Delta T_{\text{WB}}$	$Y$
0.43	0.0004	0.0021	0.43	1

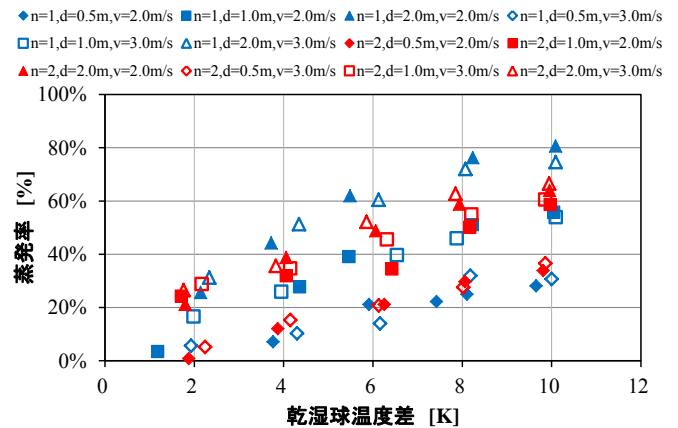


Figure 8 蒸発量計測実験結果

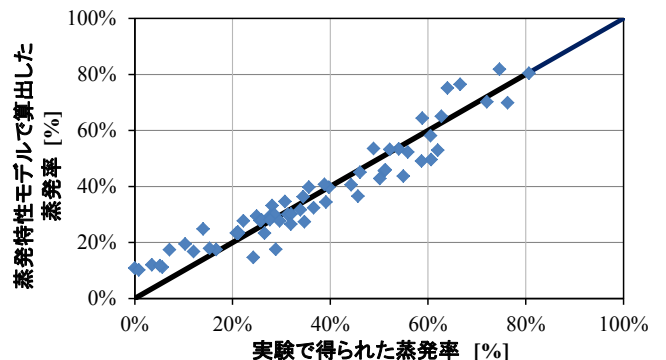


Figure 9 実験値と蒸発特性モデルの比較

### 3.1.2 次元解析と無次元数蒸発モデル

前項で示した蒸発特性モデルを一般化するために、無次元数蒸発モデルを検討する。そこで、バッキンガム  $\Pi$  定理よりミスト蒸発現象の次元解析を行う。

参考文献<sup>1)</sup>より、単粒子の蒸気拡散の基礎式は Equation 4、単粒子の熱拡散の基礎式は Equation 5 で表される。 $\rho_{v,\infty}$ と $\rho_{v,a}$ はそれらだけで無次元数がつくれるので、それらは除外し、その他の変数と実験で変化させたパラメータで強制対流下におけるミスト蒸発現象を表すことができると仮定する(Equation 6)。この関数関係を指数法で表し次元解析を行うと Equation 7 となり、3 個の無次元数(左から順に  $\Pi_1$ ,  $\Pi_2$ ,  $\Pi_3$ )を得た(Equation 8)。これらの無次元数で回帰モデルを作成すると、Equation 9 となる。RMSE は 9.0%である。

### 3.2 蒸発率向上策の検討

ミスト散布による濡れを軽減させるため、蒸発率向上策の検討を行う。

#### (1) 実験方法

蒸発率向上策として、

- (a) ミストをダクト断面方向に拡散させること
- (b) 滞留時間を増加させること

が有効であると考え、3 パターンで実験を行った。実験条件を Table 8 に示す。

#### 【実験パターン】

- ① ノズルを風の流れと同一方向に設置
- ② ノズルを風の流れに対して垂直上向きに設置
- ③ ノズルを風の流れに対して垂直上向きに設置し、ノズル上流側に障害物を設置

#### (2) 実験結果

実験結果を Figure 10 に示す。パターン①と②では、パターン②の方が蒸発率が 7~20%程度大きく、その差は乾湿球温度差が大きくなるにつれて大きくなる傾向が見受けられる。パターン②と③ではパターン③の方が 5%程度大きくなることがわかった。

#### (3) 考察

パターン①と②の違いはノズルの向きであるが、ノズルを風の流れに対して垂直上向きに設置することで、ミストがダクト断面方向に拡散し、その結果、蒸発率が向上したと考えられる(Figure 11)。乾湿球温度差が大きくなるにつれて蒸発率の差が大きくなった要因については、触れる空気の体積が増大し、さらにその空気の乾湿球温度差が大きくなることで、ミストが空気中から得る熱量が増大していくためと考えられる。

パターン②と③の違いは障害物の有無であるが、障害物を設置することで流れに乱れが生じてミストの滞留時間が増加し、その結果蒸発率が向上したと推測される。そこで、ANSYS FLUENT 13.0 を用いて、ダクト内の気流解析とミスト滞留時間の解析を行った。

$$\frac{dm}{dt} = 4\pi a D_v (\rho_{v,a} - \rho_{v,\infty}) \quad (4)$$

$$\frac{dm}{dt} \approx -\Delta T_{WB} \frac{4\pi a k_a}{L_e} \quad (5)$$

$$Y = f(m_{\text{mist}}, d, V, \Delta T_{WB}, k_a, L_e, a, D_v) \quad (6)$$

$$\left[ \frac{m_{\text{mist}} \cdot L_e}{\Delta T_{WB} \cdot k_a \cdot a} \right]^{n_1} \left[ \frac{d}{a} \right]^{n_2} \left[ \frac{V}{a \cdot D_v} \right]^{n_3} = [1]^0 \quad (7)$$

$$\Pi_1 = \frac{\text{ミスト全体の潜熱量}}{\text{空気からミスト粒子への伝熱量}} \quad (8)$$

$$\Pi_2 = \frac{\text{蒸発距離}}{\text{ミスト粒子の半径}}$$

$$\Pi_3 = \frac{\text{風量}}{\text{蒸気拡散量}}$$

$$Y = 2.1 \cdot \left( \frac{a \cdot k_a \cdot \Delta T_{WB}}{m_{\text{mist}} \cdot L_e} \right)^{0.46} \left( \frac{d}{a} \right)^{0.64} \left( \frac{V}{a \cdot D_v} \right)^{0.032} \quad (9)$$

Table 8 実験条件

蒸発距離 $d$	[m]	1.0
噴霧量 $m$	[g/min]	76.0 (ノズル 2 個)
風速 $v$	[m/s]	2.0
乾湿球温度差 $\Delta T_{WB}$	[K]	4.0 ~ 10.0

Table 9 無次元数の決定係数

$\Pi_1$	$\Pi_2$	$\Pi_3$	蒸発率 $Y$
0.27	0.43	0.002	1

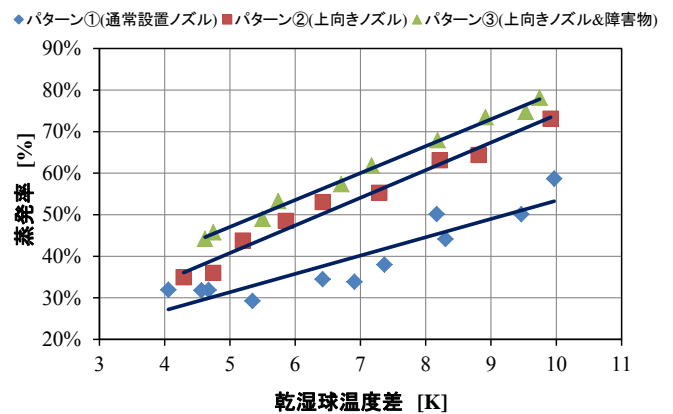


Figure 10 補正後の実験結果

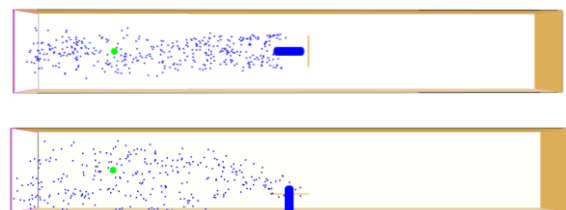


Figure 11 FDS を用いたミスト拡散状況の再現 (上: パターン①, 下: パターン②)

気流解析は非定常計算で行った。結果を Figure 12 に示す。障害物後方に渦が発生し、また障害物後方の風速が低下していることを確認することができた。

滞留時間の解析は定常計算で行った。結果を Figure 13 に示す。障害物を設置することで、ミストの滞留時間が増加する傾向が確認でき、30%程度の滞留時間が増加することがわかった。

流体解析より、ミスト滞留時間の増加が蒸発率向上に寄与すると推測される。ここで、滞留時間増加手法として、風速の低下も考えられるが、風速が低下すると風量も低下してしまい、蒸発率はあまり変化しないと考えられる(Figure 8 参照)。よって、風量を低下させずに滞留時間を増加させることが重要であるといえる。

#### 4. まとめ

本研究で得られた知見を以下にまとめる。

- (1) ミスト蒸発量の計測手法を考案し、誤差要因の検討を行った。 $m_{\text{remove}}$  は捕集量の 0.3 %,  $m_{\text{pass}}$  は捕集量の 1.3 %,  $m_{e2}$  は値を推定できる実験式を得た。
- (2) 強制対流下におけるミスト蒸発特性モデルを得た。一般化するために次元解析を行い、無次元数蒸発モデルを得た。
- (3) 「ミストを空気に拡散させること」と「風量を低下させずに滞留時間を増加させること」がミスト蒸発率向上策となることが示唆された。前者では 7~20%, 後者では 5%程度の向上効果を確認した。

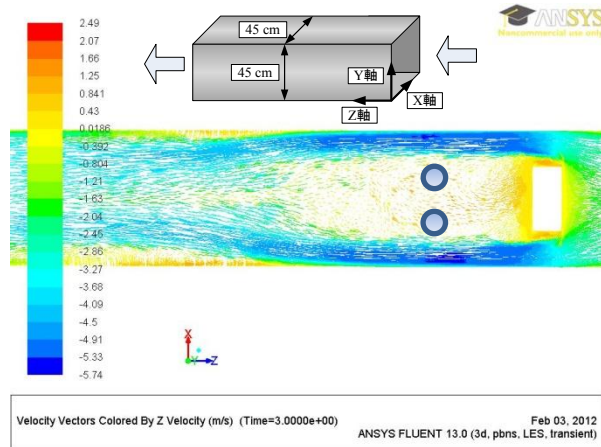


Figure 12 FLUENTによるパターン③のZ軸方向の速度ベクトル解析(Y=30 cm 断面)

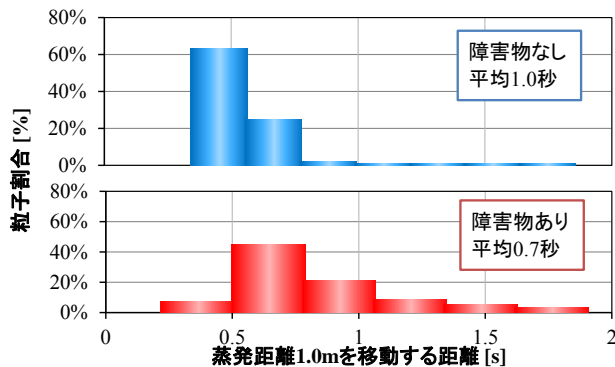


Figure 13 ミスト滞留時間のシミュレーション結果

Table 10 FLUENT 計算条件

		気流解析	滞留時間解析
乱流モデル		LES	標準 $k-\epsilon$ モデル
入口条件	風速	2.0 m/s (分布を考慮しない)	
	乱流強度	5%	
	温湿度	—	290 K 50%RH
出口条件		大気圧	
境界条件		no-slip, 断熱, 放射熱なし	
ミスト条件	噴射速度	—	3.0 m/s
	噴霧量		0.0006 kg/s × 2
	平均粒径		38 $\mu\text{m}$
	粒子衝突		考慮しない

#### 記号

$a$	粒子の半径	[m]
$c_p$	空気比熱	[kJ/(kg·K)]
$d$	蒸発距離	[m]
$D_v$	蒸気-空気拡散率	[m <sup>2</sup> /s]
$\Delta H_{WB}$	単位面積フィルタに流入する空気の乾球温度と湿球温度のエンタルピー差	[kW/m <sup>2</sup> ]
$k_a$	湿り空気の熱伝導率	[J/(s·m·K)]
$L_e$	蒸発潜熱	[J/kg]
$m$	ミスト質量	[kg]
$m_{\text{cap}}$	捕集量	[kg]
$m_{e2}$	フィルタからの蒸発量	[kg]
$m_{\text{mist}}$	噴霧量	[kg]
$m_{\text{pass}}$	フィルタ通過ミスト量	[kg]
$m_{\text{remove}}$	取出し時落下水滴量	[kg]
$m_{\text{wall}}$	ダクト内壁付着量	[kg]
$n$	ノズル数	[-]
$\rho$	空気密度	[kg/m <sup>3</sup> ]
$\rho_{v,\infty}$	周辺空気の水蒸気密度	[kg/m <sup>3</sup> ]
$\rho_{v,a}$	粒子表面の水蒸気密度	[kg/m <sup>3</sup> ]
$S_{\text{filter}}$	フィルタ面積	[m <sup>2</sup> ]
$\Delta T_{WB}$	乾湿球温度差	[K]
$v$	風速	[m/s]
$V$	風量	[m <sup>3</sup> /s]
$Y$	蒸発率	[-]

#### 参考文献

- 1) Craig Farnham, 中尾正喜, 西岡真稔, 鍋島美奈子, 水野毅男: “ミストの蒸発冷却特性測定と制御方式の提案”, 日本冷凍空調学会論文集(2009)Vol.26, No.1, pp.105-112
- 2) 尹奎英, 山田英貴, 奥宮正哉, 辻元誠: “ドライミスト冷却効果の検証とCFD解析 ドライミストを用いる採涼システムに関する研究”, 日本建築学会環境系論文集, 第73巻, 第633号, pp.1313-1320, 2008年11月

## 討 議 等

### ◆討議 [重松教授]

無風環境における自由落下ミストと強制対流下でのミストの蒸発特性の違いは何か。

強制対流下で別途モデルを検討する必要性は何か。

◆回答：自由落下ミストは周辺空気を誘引しながら蒸発していくのに対して、ダクト等の強制対流下では周辺空気の誘引は起こりません。つまり、自由落下と強制対流ではミスト蒸発に寄与する空気の量が異なるため、別途モデルを検討する必要があります。

### ◆討議 [梅宮教授]

蒸発量計測実験で4つのパラメータを設定しているが、空気の温湿度ではなく乾湿球温度差をパラメータとした理由は何か。

◆回答：空気の温湿度をパラメータとすることも可能ですが、温度と湿度の組み合わせで実験回数が多くなってしまいます。既往研究では、理論上ミストの蒸発は乾球温度と湿球温度の差、つまり乾湿球温度差と相関があることが明らかにされています。また、Farnham<sup>1)</sup>は複数の温湿度条件で実験を行った結果を乾湿球温度差で整理したところ、蒸発率と乾湿球温度差が非常に強い相関を示すことを確認しました。乾湿球温度差は乾球温度と湿球温度の差ですので、空気の温度と湿度の両方を加味した値となっていることから、本研究では実験を効率的に進めるために、空気の温湿度を乾湿球温度差に換算して行いました。

### ◆討議 [鍋島講師]

本実験で得られたモデル式はダクトの断面構造に依存しないのか。

◆回答：質問にお答えする前に、「蒸発率」と「蒸発効率」の概念について説明します。「蒸発率」は空冷室外機の冷却等、ミストが壁に付着することが起こりえない場合に適用する概念で、「蒸発効率」はダクト等の囲まれた強制対流場で噴霧する場合等の、ミストが壁に付着する可能性があるときに適用する概念です。「蒸発率」は壁の付着量を補正した(噴霧量から壁の付着量を引く)噴霧量に対する蒸発量の割合を示し、「蒸発効率」は壁の付着量の補正をしない噴霧量に対する蒸発量の割合を示します。本研究では、空冷室外機ミスト冷却

の効果検証も行いましたので、それとの兼ね合いで修士論文内では「蒸発率」のモデルを示しております。以上のことを踏まえて質問の「得られたモデルはダクトの断面構造に依存しないのか」にお答えしますと、「蒸発率」でモデルを捉える場合は、壁の付着量を補正することからモデルはダクトの断面構造に依存しません。しかし、「蒸発効率」でモデルを捉える場合は、ダクトの断面構造が変わりますと壁の付着量が変わりますので、モデルはダクトの断面構造に依存すると考えられます。

### ◆討議 [中尾教授]

この強制対流下でのミスト散布のアプリケーションとしてどういったものが挙げられるか。

◆回答：強制対流下でのミスト散布のアプリケーションとして、研究の背景でも挙げた空冷室外機の冷却や水加湿、間接蒸発冷却システムが考えられます。水加湿はかつて検討されたことがある加湿方式ですが、当時はノズル性能が低く、短い流路でミストを蒸発させることが困難だったため加湿方式として断念された技術です。しかし、近年のノズル性能の向上や省エネの重要性から、省エネな加湿方式である水加湿の再検討を行う価値は十分にあると考えられます。また、間接蒸発冷却システムはダクトに取り入れた外気を二手に分岐させ、一方にミスト冷却をして、ミスト冷却をしていない空気と熱交換させることで、空気を間接的に冷却する技術です。この冷却システムは、動力はミストポンプのみであるため、圧縮機を必要とする空調機よりも格段に消費電力が少なく済むという利点があります。また、空気を間接的にミスト冷却するため、冷却する空気の絶対湿度を上げることなく冷却でき、理論上は露点まで冷却することができます。この冷却システムは、空調機ほどの冷却性能はありませんが、空調機よりも格段に省エネになることから、学校の教室等のあまり冷却性能が求められない場所に対して適用することで、都市の消費電力の削減に寄与することができると考えられます。