

# 水噴霧による鉛直ガラス面冷却の実験的研究

地域環境計画分野

末永 直之

## Abstract

近年水噴霧による屋外空間の冷却が行われているが、ヒートアイランド(HI)対策以上の効果は薄い。そこで、HI対策だけでなく冷房負荷削減効果も期待できる水噴霧によるガラス面冷却を提案したい。本研究の目的は、水噴霧による鉛直ガラス面冷却に適した制御方法、噴霧方法を考案することである。付着水滴の蒸発によるガラス表面温度応答計測実験によって、蒸発冷却性能を確認できる蒸発冷却モデルを構築し、制御に用いる乾燥時間  $T_d$  を予測する近似式を得、温湿度計測のみで行える鉛直ガラス面冷却に適した制御方法を考案した。噴霧方法に関しては、鉛直面分布量測定装置によって、ノズルの種類、位置関係等の違いによる分布形状の特徴を計測することが可能となった。

## 1. はじめに

水噴霧による屋外空間の冷却は、近年様々な場所で行われるようになった。しかし、設置者は環境への意識の高さのアピールやイベント会場の快適性向上などからの間接的な経済効果は見込めるが、光熱費の削減等の直接的な経済効果を楽しむことはできない。

そこで、本研究はミストを用いた温熱環境対策によって設置者が経済的メリットを受けられるような新たなミストの利用法として、夏期に熱線吸収ガラス等の高温となるガラス面にミストを付着させ蒸発冷却するという方法を提案したい<sup>1)</sup>(図1)。

蒸発冷却によるガラス面の冷却としては、武田らによって、ガラス面上に水膜を形成する方法が提案されており、冷房負荷削減効果があることが報告されている<sup>2)</sup>。

水の使用量に対する蒸発冷却に寄与する水の割合は、水膜形成型の場合、散布した水のほぼ全てを蒸発冷却に寄与させることができるのに対し、噴霧型の場合、噴霧した水滴全てがガラス面に付着することはなく、大気中で蒸発する水が多く存在する。さらに、ノズルの噴霧角度、ガラス面とノズルの位置関係、風などの条件によって、ガラスに付着する水滴の量、均一性が大きく異なる。したがって、ノズルの噴霧方法を検討する必要がある。

一方、制御方法に関して、本研究で提案する方法は、表面の水滴が流れ落ちないで付着し続ける状態を作るように噴霧を行い、噴霧停止後に蒸発が進行し、濡れ面積率が低下すると冷却能力が低下してガラス表面温度が上昇し始めるのを検出して、噴霧を開始するという流れの制御方法である。武田らの研究<sup>3)</sup>では、水膜によるガラス面蒸発冷却において、間欠散水方法の最適な流量と止

水間隔を模索し、連続散水よりも間欠散水のほうがより大きな蒸発冷却効果を得ることができるとしている。また、実験条件下での最適と思われる散水パターンを導いている。しかし、この制御方法には、環境条件や濡れ面積率の変化によって、散水パターンを変化させるという概念は含まれておらず、本研究で提案する水噴霧によるガラス面冷却に用いることは難しいと考える。また、本研究で提案する制御方法を検討するためには、噴霧開始後と停止後の付着水滴による表面温度変動の特徴を明らかにする必要がある。

以上のことから本論文では、水噴霧による鉛直ガラス面冷却に適した制御、噴霧方法を考案することを目的に、付着水滴によるガラス表面温度応答実験から、冷却性能を示す蒸発冷却モデルを作成し、制御条件の検討を行う。また、噴霧方法の検討として、付着水滴の鉛直面分布を把握するための分布量測定装置を作成する。

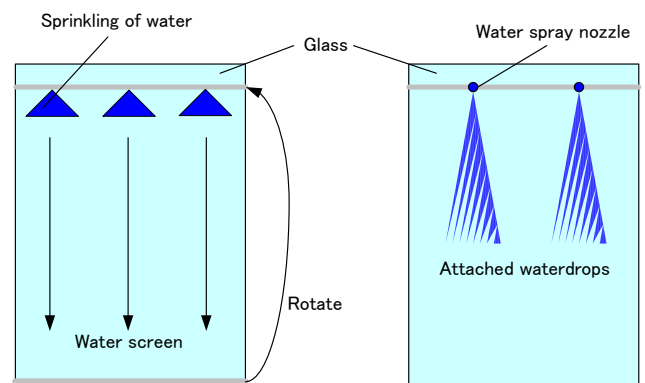


図1 水膜冷却方式とミスト冷却方式

## 2.表面温度応答計測実験

### 2.1実験概要

付着水滴が蒸発するガラスの特性を確認するために、ミストを吹き付けた時のガラス表面温度変化、付着水滴の変化を実験により計測した。実験は、一つの面にガラスが設置された BOX(図 2)を用い、日射の影響を受けない室内で行った。日射の代わりに内部にヒーターを設置し、ガラスに熱量を与えた。

### 2.2実験方法

内部のヒーター(加熱量 150W)によって、十分な時間加熱され、周辺環境と平衡状態となったガラスを初期状態として、表 1 のパターンで水噴霧を行い、ガラス面の温度変化を計測した(表 1)。

### 2.3実験結果

結果の代表として、15 秒噴霧と 30 秒噴霧の時の表面温度変化を図 3 に示す。ともに、最大で約 6K の温度低下が起こった。したがって、水噴霧によるガラス面冷却によって、冷房負荷削減効果は十分に期待できる。

続いて、水滴の付着状況を図 4、表 2 に示す。5 秒、10 秒、15 秒噴霧では、表面に水滴が付着し続け、ガラス面上を伝って落下していく水滴は見られなかった。20、30、40 秒噴霧では、水滴がガラス面上に付着し続けることができずに落下していく現象が確認できた。したがって、本実験で用いたノズル位置(距離 200mm、噴霧角度 30°)における水滴付着限界噴霧時間  $T_{lim}$  は、15 秒とする。

## 3.蒸発冷却モデル作成

実験結果から、ガラスの温度変化に影響を与えるのは付着水滴の変化に伴う有効伝熱面積の変化だと考える。そこで、蒸発冷却モデルを、濡れ面積率  $w$  を用いて作成した(式 1)。水滴が付着したガラスの物質移動係数  $kx^*$  は、噴霧後の初期状態で  $w=1$  になるように設定した。

### 3.1濡れ面積率

式 1 の蒸発冷却モデルの計算には、 $w$  が必要となる。しかし、その変化を計測することは難しい。そこで、式 1 を  $w$  について整理した式 2 から  $w$  を求める。表 1 のパターンで噴霧した場合の  $w$  の変化を図 5 に示す。20 分経過あたりまで  $w$  は、約 1 で一定となっている。その後減少が始まり 0 となる。噴霧時間の増加に伴って、 $w$  の減少過程の時間は長くなっていることがわかる。

$$cpL \left( \frac{\theta_{g,t+\Delta t} - \theta_{g,t-\Delta t}}{2} \right) =$$

$$\alpha_o(\theta_{out,t} - \theta_{g,t})\Delta t - 2.5 \times 10^6 w k_x (x_{w,t} - x_{a,t})\Delta t - \alpha_i(\theta_{g,t} - \theta_{in,t})\Delta t \dots (1)$$

$$w = \frac{cpL \left( \frac{\theta_{g,t+\Delta t} - \theta_{g,t-\Delta t}}{2} \right) - \alpha_o(\theta_{out,t} - \theta_{g,t})\Delta t + \alpha_i(\theta_{g,t} - \theta_{in,t})\Delta t}{2.5 \times 10^6 \times k_x (x_{w,t} - x_{a,t})\Delta t} \dots (2)$$

$\alpha_{o,i}$ : 外側,内側総合熱伝達率(10,11)[W/m<sup>2</sup>K]  $\theta_{g,t}$ : ガラス表面温度[°C]  
 $w$ : 濡れ面積率[%]  $k_x^*$ : 絶対湿度基準物質移動係数(4.39×10<sup>-3</sup>)[kg/m<sup>2</sup>s(kg/kg)]  
 $x_w$ : ガラス表面温度と同じ温度の飽和空気絶対湿度[kg/kg]  
 $L$ : ガラスの厚さ[m]  $x_a$ : 外気の絶対湿度[kg/kg]  
 $\theta_{out,in}$ : 室外,室内温度[°C]  $cp$ : ガラスの容積比熱[J/m<sup>3</sup>K]



図 2 実験 BOX とノズル

表 1 実験パターン

実験番号	1	2	3	4	5	6
噴霧時間 $T_m$ [s]	5	10	15	20	30	40
圧力[MPa]	6.2					

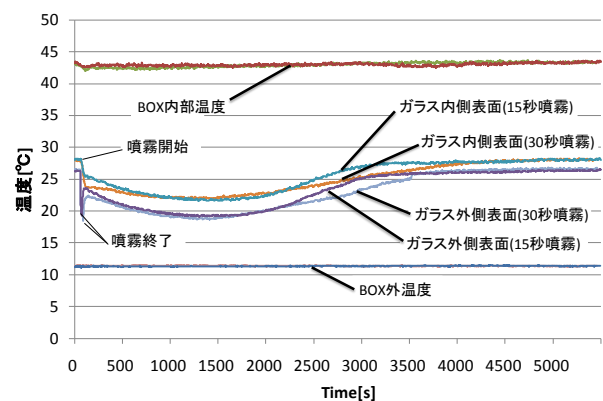


図 3 ガラス表面温度変化

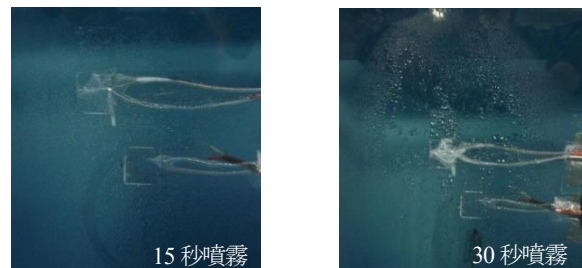


図 4 噴霧直後の水滴付着状況

表 2 ガラス上での水滴状況

噴霧時間 $T_m$ [s]	5	10	15	20	30	40
状態	付着	付着	付着	落下	落下	落下

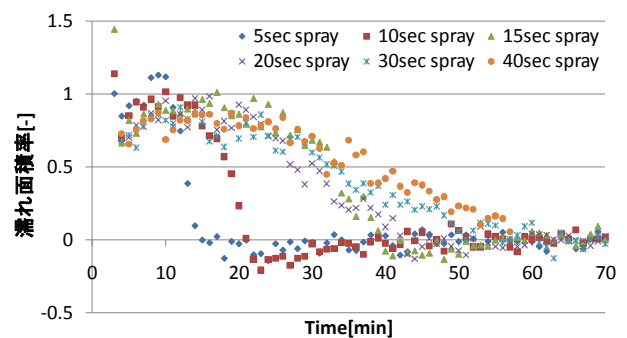


図 5 濡れ面積率変化[-]

図6に  $w=1$ 、 $1 > w > 0$ 、 $w=0$  の段階での目視で確認した付着水滴の変化を示す。噴霧時間 5、10 秒の時は、付着水滴の大きさに差異がなく、ほぼ同時に蒸発する。したがって、濡れ面積率  $w$  の減少過程が短い。15 秒以上噴霧した時は、水滴間で大きさに差異があり、それぞれに乾燥時間が異なることから、減少過程が長くなる。

### 3.2 乾燥時間

図5に示す実験結果を用いて、 $w=1$  から  $0$  になる時間  $T_d$  を求めた。結果を図7に示す。噴霧時間に比例して乾燥時間  $T_d$  は増加していることが分かる。加熱量 150W で行った時の結果を見てみると 20 秒以上噴霧した場合、 $T_d$  の増加率は徐々に減少しているが噴霧時間  $T_m$  の関数として推定できることが分かった。

### 4. 制御方法の提案

3 章の実験結果から考えられる実現可能なガラス面冷却に適した制御方法を、 $w$  の変化の特徴から検討した上で考案する。図8に冷却量が最大となる理想的な  $w$  の変化を示す。この変化を実現するためには、ガラスの表面状態と噴霧による付着量を正確に把握しておく必要がある。これは、制御方法として現実的でない。そこで、図9のように  $w$  が変化するようなミスト噴霧の制御方法を考案する。この制御方法を実現するために必要となる条件は、

- I. 噴霧冷却システム開始条件
  - II. 噴霧時間
  - III. 噴霧再開条件
  - IV. 噴霧冷却システム終了条件
- である。以下、順に検討していく。

#### 4.1 噴霧冷却システム開始、終了条件

開始条件に求められることは、その時の気象条件を考慮しつつ適用時間を長く確保できるような条件が必要となる。また、終了条件には、気象条件変化に対応した冷却可能最低温度付近での蒸発冷却に寄与しない水滴の発生を防ぐ条件が必要となる。

そこで、式3に示す温度低減ポテンシャル  $X$  をパラメータとして用いることを考案する。 $\theta_x$  は、式1に日射吸収熱を加えた式4を用いて  $w=1$  とした時のガラス表面温度である。できるだけ簡易な制御システムを成立させるために、日射量は式5を用いて、設定した時間内の温度上昇分から逆算して求めることとする。

この  $X$  を用いて日射量、気温、湿度の変化に対応することができると考えられるシステム開始条件  $X_{st}$ 、終了条件  $X_{end}$  を式6、7に示す。式6中の  $\alpha$  は、ポンプの耐久性、水道料金、システム利用者の利用度合いなどから決定する必要がある。 $\beta$  は許容範囲として設定する値で、 $\theta_x$  付近でシステムが停滞し続けたり、蒸発冷却に寄与しない水が発生したりすることを防ぐ。 $\alpha$ 、 $\beta$  の適切な設定値に関する検討は、今後の課題とする。

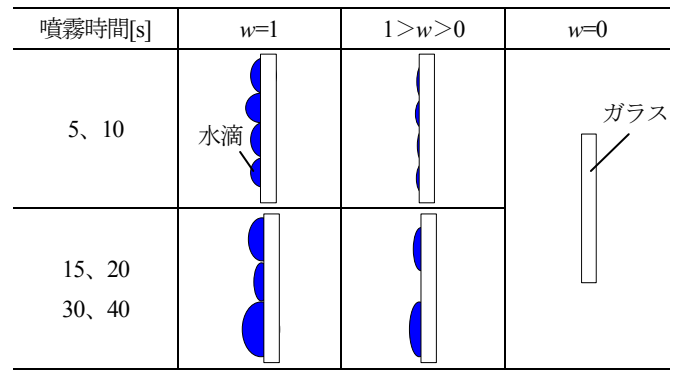


図6 噴霧時間ごとの付着水滴の変化

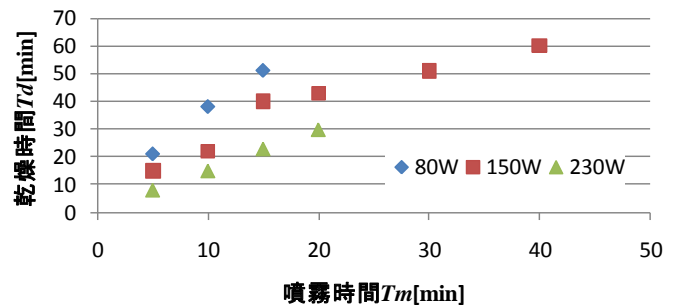


図7 加熱量別の乾燥時間  $T_d$

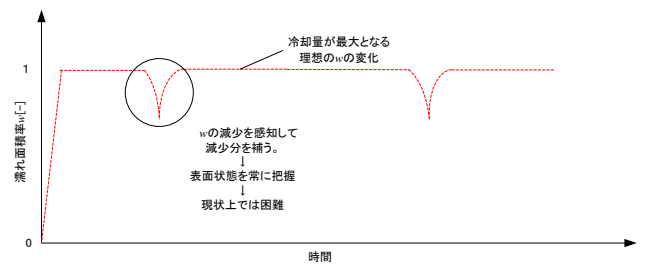


図8 冷却量が最大となる  $w$  の変化

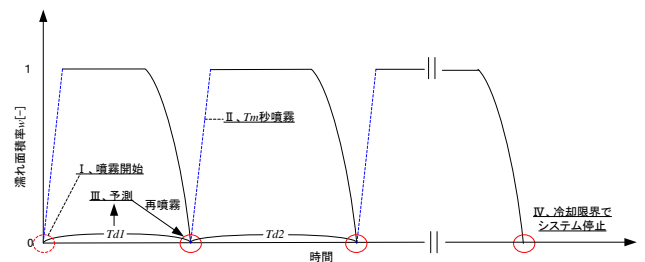


図9 実現可能な  $w$  の変化

$$X = \theta_{g,t} - \theta_x \quad \dots(3)$$

$$c\rho L \left( \frac{\theta_{g,t+\Delta t} - \theta_{g,t-\Delta t}}{2} \right) = \alpha_o (\theta_{out,t} - \theta_{g,t}) \Delta t - 2.5 \times 10^6 w k_x (x_{w,t} - x_{a,t}) \Delta t - \alpha_i (\theta_{g,t} - \theta_{in,t}) \Delta t + aI \quad \dots(4)$$

$$I = \frac{c\rho L \left( \frac{\theta_{g,t+\Delta t} - \theta_{g,t-\Delta t}}{2} \right) - \alpha_o (\theta_{out,t} - \theta_{g,t}) \Delta t - \alpha_i (\theta_{g,t} - \theta_{in,t}) \Delta t}{a} \quad \dots(5)$$

$$X_{st} \geq \alpha \quad \dots(6)$$

$$X_{end} \leq \beta \quad \dots(7)$$

$$T_d = A \Delta X_s^\gamma \left( 1 - e^{-\frac{T_m}{C}} \right) \quad \dots(8)$$

$X$ : 温度低減ポテンシャル [K]  $\theta_x$ : 冷却可能最低温度 [°C]

$\alpha$ 、 $\beta$ : 温度低減ポテンシャル設定値 [K]

$a$ : ガラス日射吸収率 [%]  $I$ : 日射量 [W/m²]  $A$ 、 $\gamma$ 、 $C$ : 定数  $T_m$ : 噴霧時間 [s]

$\Delta X_s$ : ガラス表面の飽和絶対湿度と空気の絶対湿度の差 [kg/m³s(kg/kg)]

#### 4.2 噴霧時間 $T_m$

提案する制御方法は、蒸発が完了した水滴の付いていないガラス面に対して  $w=1$  かつ、落下水滴が生じないように噴霧を行うため、付着限界噴霧時間  $T_{lim}$  の噴霧を行う。最大付着率点における時間当たりの付着量は、ノズル種類やガラスとノズルの位置関係、噴霧角度ごとに異なるため、実用段階では条件に合わせて  $T_{lim}$  設定する必要がある。

#### 4.3 噴霧再開条件

図7に示す実験の結果から噴霧時間  $T_m$  の関数で乾燥時間  $T_d$  を表す近似式の条件として、

- 1) 長時間噴霧した場合に、ガラス面上に付着する水滴は付着限界の時の水滴量以上にはならない。ゆえに、 $T_m \rightarrow \infty$  の時、 $T_d$  は収束する。
- 2) 温度低減ポテンシャル  $X$  が0に近づくにつれて水滴が蒸発しないため乾燥時間  $T_d$  は無限に近づく。この2つが考えられる。この二つの条件から、 $T_m$  と湿度比の関数式8を採用した。そして、図7から定数  $A$ 、 $\gamma$ 、 $C$  を回帰分析により求めた。結果は、 $(A, \gamma, C) = (3.39, -0.84, 35)$  となり、平均二乗平方根誤差 RMSE は  $1.84[\text{min}]$  であった(図10)。

#### 5. ガラス面噴霧冷却制御システムまとめ

4章で考案したガラス面噴霧冷却制御システムを実現するための装置構成を図11に示す。代表ガラス表面温度と外気の温湿度、室内温度を計測するセンサー、日射量や温度低下ポテンシャルを計算し、ポンプの on-off をコントロールする制御装置、噴霧用ノズル、噴霧用高圧ポンプにより成り立つ。また、制御の流れを図12に示し、以下に詳細を記述する。

- ① ガラス表面温度、室外温湿度、室温を計測する。
- ② 計測値から日射量  $I$  と  $\theta_s$  を求め、 $X_{st}$  を算出する。
- ③  $X_{st} \geq \alpha$  を満たす場合は④に満たさない場合①に戻る。
- ④  $T_{lim}$  噴霧する。
- ⑤ ①の実測値と式8から、 $T_d$  を算出する。
- ⑥  $T_d$  待機する。
- ⑦ ガラス表面温度、室外温湿度、室温を再計測する。
- ⑧  $X_{end}$  を算出する。
- ⑨  $X_{end} \leq \beta$  を満たす場合①に戻り、満たさない場合④に戻る。

本研究で提案する水噴霧によるガラス面冷却システムを用いれば、ガラスから落下し蒸発冷却に寄与しない無駄となる水を最小限に抑えることができ、その時の環境条件に合わせて、できる限り最大の冷却量を得られるように表面の濡れ状態をコントロールすることができる。また、計測項目が温度と湿度のみであることから、ノズル以外の計測装置は、簡易に設置することができ、さらに、安価に作成できることも本システムの長所であると考えられるが、検証を行うには至っていない。

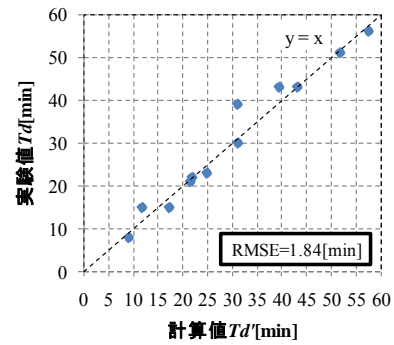


図10 乾燥時間  $T_d$  の実験値と計算値の比較

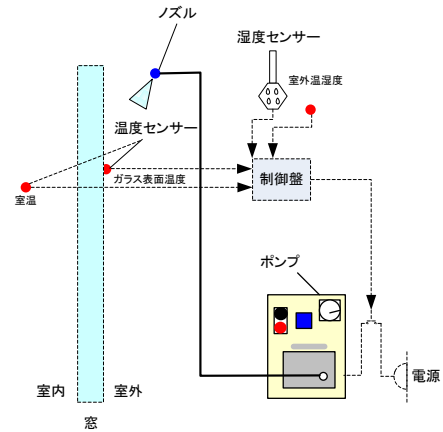


図11 ガラス面噴霧冷却システム装置構成

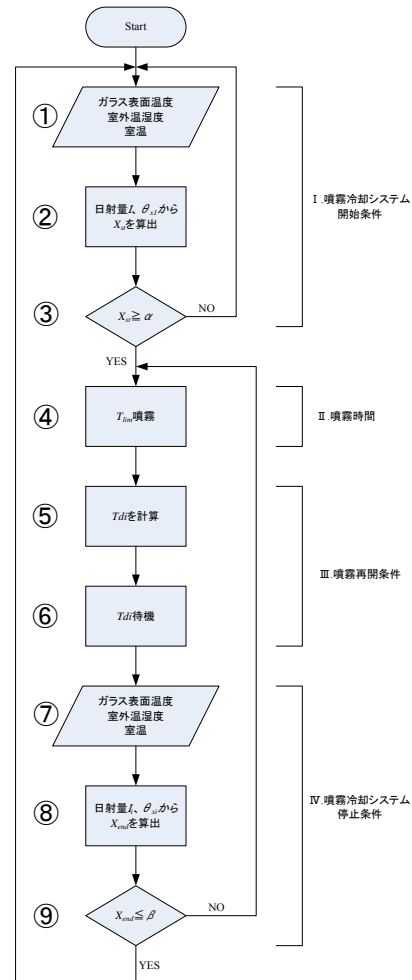


図12 制御フロー図

## 6.設計条件の検討

ガラス面に対してミストを噴霧した場合、均一に水滴が付着しない。したがって、ガラス表面上で蒸発する水滴量は、場所によって一様でない。

また、ノズルの種類、噴霧角度、ノズルとガラス面との位置関係によって、時間当たりが付着する水量が異なってくる。1個のノズルを噴霧した時の冷却領域を最大化するためには、ノズルとガラス面の距離を長くすることがよい。しかし、距離を長くすると、途中で蒸発する水量が増える。逆に近づけると、不均一に水滴が付着する。したがって、水量の鉛直面分布の特徴を把握する必要がある。本章では、鉛直面の水量分布を計測する装置の作成と実験結果について述べる。

### 6.1装置概要

図13に作成した鉛直面水量分布測定装置の立面図、測定マスの拡大図、計測装置の断面拡大図を示す。縦横2000mmの長さで、図13(2)のようなマスが400か所あり、ここに水滴が付着すると下部の穴を通して、(3)に示すプラスチックカップに水が蓄積されていく。プラスチックカップには、蒸発による重量変化を防ぐため、透明フィルムにより上部を塞いでいる。図14に装置の写真、図15に実験風景を示す。

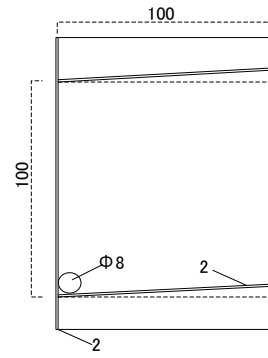
### 6.2実験方法

実験の手順を以下に示す。

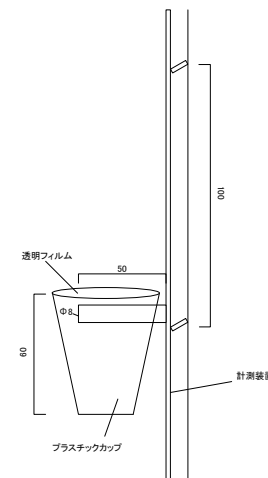
- ① 噴霧角度、実験装置との水平距離を固定する。
- ② 装置に対して噴霧する。
- ③ カップの重量を計測する。

### 6.3実験結果

測定結果をもとに図16のような分布図を作製した。これにより、付着率点周辺に付着水滴が集中する傾向が見える。横方向の広がり、ノズルから鉛直下向き方向に一定距離離れ得ると収まる。この装置により、さまざまな設置条件での分布の特徴を計測することが可能となった。分布の特徴の解析や正確な付着量との誤差に関しては検証していないので、今後の課題とする。



(2)マス拡大図

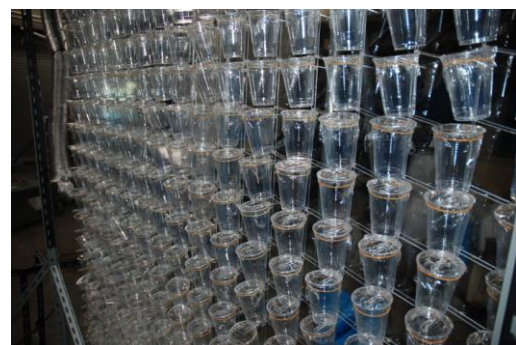


(3)計測装置断面拡大図

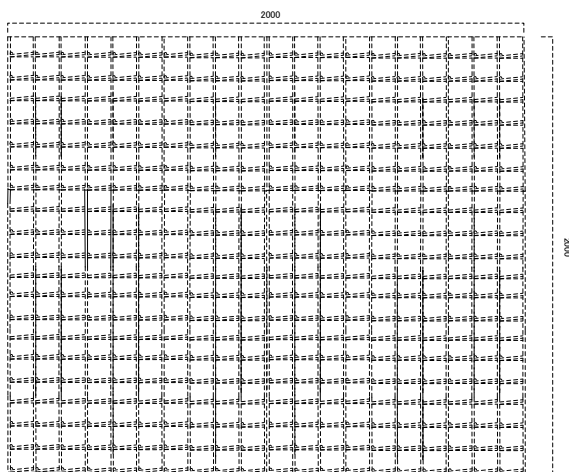
図13 鉛直面水量分布測定装置図面(単位:mm)



(1)装置正面



(2)測定装置裏側



(1)装置立面図



(3)マス拡大  
図 14 実験装置

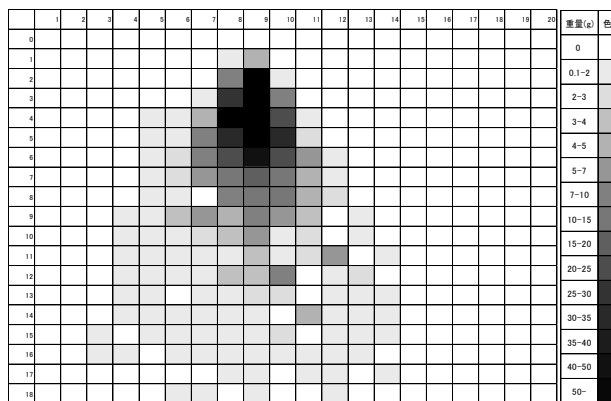


図 16 実験結果(噴霧角度 30°、距離 200mm)



(1)噴霧風景



(2)水滴付着状況



(3)水滴蓄積状況  
図 15 実験風景

## 7.まとめ

水噴霧によるガラス面の冷却に適した制御方法、噴霧方法を考案することを目的として、付着水滴による表面温度応答の計測実験と分布量測定装置の作成を行った。以下に、本研究から得た成果、今後の課題をまとめる。

- 1) 水噴霧によるガラス面冷却の実験によって、ガラス面の温度低下を確認した。
- 2) 濡れ面積率  $w$  を用いて、付着水滴が蒸発冷却するガラス面の表面温度変化を表し、蒸発冷却性能を確認できる蒸発冷却モデルを作成した。
- 3) 蒸発冷却モデル作成過程から得た、濡れ面積率の変化の特徴から、水噴霧によるガラス面冷却に適すると考える噴霧システム開始条件、噴霧時間、再噴霧条件、噴霧システム終了条件から成る、温湿度計測のみで行える制御方法を考案した。
- 4) 提案した制御システムの再噴霧条件として用いることができる、噴霧によって  $w=1$  となったガラス面が  $w=0$  となるまでの乾燥時間  $T_d$  をガラス表面温度、外気温湿度、室温から予測する近似式を作成した。
- 5) 鉛直面水量分布の特徴を計測することができる装置を作成した。

今後の課題

- 1) 噴霧システム開始条件、噴霧時間、噴霧システム終了条件に関しては、検討の余地が十分にある。
- 2) 測定装置を用いて作成した分布の特徴の解析や測定装置の計測結果と正確な付着量との誤差を明らかにすることは、今後の課題とする。

参考文献

- 1) 末永直之,中尾正喜ら:水噴霧によるガラス面の冷却に関する研究(その 1)水平設置ガラスにおける蒸発量測定実験,空気調和・衛生工学会大会学術講演梗概集 2008 年(草津)
- 2) 武田仁,宮道智嗣:光触媒外装材部位実験による物質移動係数の測定とシミュレーション,日本建築学会環境系論文集 第 607 号,29-36,2006 年 9 月
- 3) 岡部優志,武田仁:光触媒外装材の間欠散水蒸発冷却効果に関する研究(その 1)部位実験装置による物質移動係数の測定,日本建築学会大会学術講演梗概集(中国),2008 年 9 月

## 修士論文公聴会 質疑と回答

### 質疑

1. 風の影響についてどのように考えているか。(都市基盤計画 内田准教授)
2. 赤外線センサー等を用いて、直接濡れ面積を計測すれば良いのではないか。(都市基盤計画 内田准教授)
3. 水の温度の影響はどう考えるのか。(近畿大学 4 回生 山田さん)
4. 温度変化から、 $w$  を求められないか。(環境水城工学 M1 馬瀬君)
5. 加熱量 80~230W の設定値はどのようにして決めたのか。(建築環境 梅宮准教授)
6.  $w$  を用いた理由。(環境図形科学 鈴木准教授)

### 回答

1. ガラス面をミストによって冷却するにあたって、風の影響を受けるのは、付着までの蒸発率とミスト付着位置、乾燥時間  $Td$  です。まず、蒸発率は、風が吹くことによって対流熱伝達が促進されることから上昇します。したがって、実験条件よりも付着水滴は減少することが考えられます。ただし、付着しないで蒸発する水滴は大気熱負荷を減少させることができます。

ミストの付着位置に関しては、風によって移動することが考えられ、強い風の場合は全てのミストが付着しない可能性も考えられます。したがって、実条件下ではこれらを考慮した制御方法が必要となります。乾燥時間  $Td$  に関しては、付着量の減少により、短くなることが予想されますが  $\Delta Xs$  を求める時に風を考慮することで対応できると考えます。

2. 直接濡れ面積の変化を計測する方法もあると思います。赤外線センサーを用いる方法であれば、赤外線をガラス面に照射し水滴付着時(赤外線が吸収される)と乾燥時に反射して戻ってくる赤外線の量をあらかじめ実験で計測しておき、ポンプの on-off 制御に用いる方法が考えられます。これ以外にも、雨センサーや漏水センサーによる表面状態の直接計測による制御を考えています。

本研究では、ガラス表面にできる限り少ないセンサーしか設置せずに蒸発冷却に寄与しない無駄となる水を最小限にすることを目的に、温湿度計測のみによる制御方法を考案しました。

3. 水温がガラス面温度変化に与える影響は小さいと考えています。水温の変化に影響を受けるのは、水滴とガラスの間の顕熱移動量です。水温が高く、ガラス表面温度と同じくらいであれば、顕熱の移動量は小さくなりますし、差が大きければ移動量は小さくなります。しかしながら、顕熱と潜熱を比べた場合に、顕熱は非常に小さいため無視して考えることが一般的です(青木伊知郎ら、低環境圧下での水噴霧冷却の蒸発特性解析、日本機械学会論文集、64 巻 620 号 1998-4 など)。したがって、本研究でも顕熱の影響は無視しています。
4. 求めることができると思います。本研究では、最大付着率点での液滴の落下を防止する目的で、最大付着率点を中心に温度計測、考察を行いました。また、梗概では触れていませんが十分に水滴が付着した場合の物質移動係数の算出を行うためにも最大付着率点での計測を行いました。表面温度測定点を増やし、濡れ面積率の変化だけでなく、水滴の付着分布を算出できると思います。
5. 加熱量は、ヒーターの入力可能最大電圧 100V から 20V 刻みで小さくした電圧を与えた時(80V、60V)の値です。今後は、ヒーターの数を増やすなどして、加熱量を増加させてガラス表面の温度を上げて実験を行いたいと考えています。
6. 水滴による濡れ面の蒸発による冷却をモデル化するにあたって、蒸汗熱放散(汗の蒸発による皮膚からの熱放散)を参考にしました。汗は皮膚上に小さな水滴として存在することや、気象条件によって熱放散量が変化することから、ガラス面の蒸発冷却にも用いるのではないかと考えたからです。この蒸汗熱放散のパラメーターの一つに用いられているのが、皮膚濡れ面積率でこれをガラスの濡れ面積率に置き換えて考えたことから濡れ面積率  $w$  を用いた蒸発冷却モデルを作成しました。