

ドライミストの加湿利用時における飽差と蒸発率の関係

辻本研究室

4111612

小林弘樹

1. 研究背景・目的

ヒートアイランド緩和対策として開発されたドライミストの用途は、冷却だけでなく、農業用や工業用の加湿システムとして使用するなど多岐に渡っている。本研究では室内の加湿システムとして、日本で唯一ドライミストが利用されている愛・地球博記念公園（モリコロパーク）内の施設で、ドライミストの加湿実験を行い、その結果から飽差と蒸発率に着目し、スパイラルダクトを使用した実験を行うことで、飽差と蒸発率の関係を明らかにすることを目的としている。

2. モリコロパークでの加湿実験概要

モリコロパーク地球市民交流センター内の体験学習室において、室内の温度を変化させて、ドライミストによる加湿を行った。実験を行った体験学習室は、床面積 106.5 m²、室容積が 677.1 m³であり、地熱回収チューブを介した外気供給ピット（以下：給気ピット）や暖房時に温かい空気が天井付近に滞留しないように循環ファンが設置されている。実験は、表 1 に示したように、初期室温、給気ピット、室内循環ファンを変化させて行った。ドライミストの噴霧時間は 20 分間で、噴霧終了 5 分後に湿度抜きのため、窓開放を行った。測定は、温湿度計を図 1 の位置の 17 か所に設置して行った。室内中央部とミスト制御を行う湿度センサー付近の測定箇所は床面から高さ 0, 300, 600, 1200, 1800mm の 5 点で測定した。16 は実験開始前は廊下、実験中は室内頂部に設置、17 は給気ピットの吹き出し口、その他の測定箇所は図 1 の高さ 1200mm に設置した。結果には中央 1200mm と 11, 12, 13, 14 を平均した値を使用する。

3. 実験結果・考察

測定した温度、相対湿度のデータから式(1)～(3)によって絶対湿度を求める。図 3, 4 に、各実験絶対湿度と式(4)で求めた絶対湿度の値を示す。実測結果を見ると、飽差の小さい環境で実験を行った実験①と②の方が、飽差が大きい環境で行った実験③よりも絶対湿度の上昇が多い。しかし、実験①と②の場合はミスト噴霧開始直後から床や机上に濡れが生じており、給気ピット等の条件が等しい実験③より多くのミストが蒸発しているとは考えにくい。この原因として、実験③では温度調節のために行った暖房の熱が室内上部滞留しており、測定点よりも上部での蒸発が実験①②と比較して多かったために絶対湿度上昇量が見かけ上低くなったことが考えられる。実験④は 4 つの実験の中で最も絶対湿度の上昇量が大きかった。この要因としては、日射によって室温

体験学習室概要

面積：106.5 m ² 、体積：677.1 m ³
給気ピットの風量：1000 m ³ /h×2
ドライミストノズル：50ml/min×2

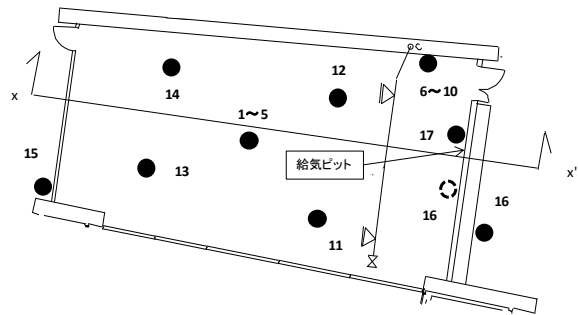


図 1 体験学習室平面図

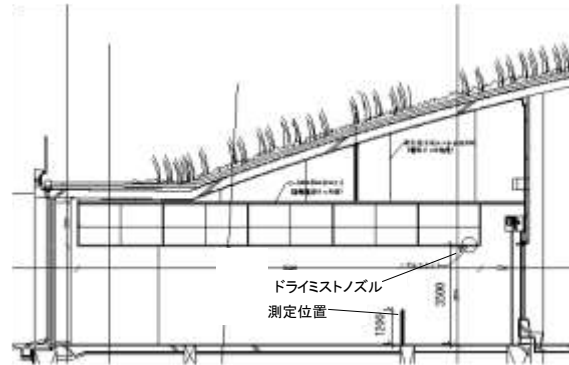


図 2 x-x' 断面図

絶対湿度算出式

$$E = 4.11 \times 10^{\frac{7.5 \times T}{237.3 + T}} \quad (1)$$

$$E_p = E \times RH \div 100 \quad (2)$$

$$x = (M_{\text{water}} \times E_p) / (M_{\text{air}} \times (P - E_p)) \quad (3)$$

E: 飽和水蒸気圧[hPa], E_p: 水蒸気分圧[hPa], T: 乾球温度[°C],
 RH: 相対湿度[%RH], x: 絶対湿度[kg/kg(DA)],
 P: 大気圧=1013.15[hPa]
 M_{water}: 水のモル質量=18.015[g/mol]
 M_{air}: 乾燥空気のモル質量=28.964[g/mol]

表 1 実験条件

	室温[°C]	飽差[hPa]	給気ピット	循環ファン
実験①	13.0	6.1	on	off
実験②	14.0	7.0	on	off
実験③	18.5	11.9	on	off
実験④	18.6	11.5	off	on

が上がっていること、この実験でのみ使用している循環ファンによって室内上部に滞留している暖かい空気が降下し、蒸発しやすい環境であったことが考えられる。

次に、蒸発率が飽差に比例するとして数値計算を行った。噴霧したミストの量に飽差 E_d と定数 a の積を乗じた値を水蒸気発生量としているため、飽差と定数 a の積を蒸発率と定義する。計算は以下の式(4)から15秒後(温度の測定間隔)の絶対湿度を求めた。

$$\partial x = \frac{(a \cdot E_d \cdot M + x_p \cdot Q \cdot \rho - x \cdot Q \cdot \rho)}{V \cdot \rho} \cdot \delta t \quad (4)$$

∂x : 絶対湿度の変化量[kg/kg (DA)], a : 定数, E_d : 飽差[hPa],
 x_p : 給気ピットの絶対湿度[kg/kg (DA)],
 Q : 風量=0.56[m³/s], M : ミスト噴霧量=0.00167[kg/s]
 ρ : 空気密度=1.2[kg/m³], x : 室内絶対湿度[kg/kg (DA)],
 V : 室容積=677.1[m³], t : 時間[s]

ミスト噴霧開始時の飽差は、測定データから求め、ミスト噴霧開始後は、測定した温度と算出した絶対湿度から算出した。図5に各実験での計算結果を示す。計算値は、実験①で計算によって求めた15秒毎の絶対湿度と実測値との相関が高かった蒸発率50%になる時の a の値($a=0.0814$)を使用している。実験④において、噴霧開始後に蒸発率が上昇しているのは、日射による影響で室温が上がると飽差が大きくなったためであると考えられる。結果を見ると、飽差の高い状態で行った実験③と④ではミスト噴霧開始時の蒸発率が90%を超えており、噴霧終了時においても蒸発率は50%を超えている。図3、4で、測定結果と計算値の差を比較すると、実験④以外の実験では、噴霧終了時に測定結果の方が計算結果よりも絶対湿度が高い値を示している。特に、飽差の小さい状態で行った実験①と②ではそれぞれ0.99、0.74g/kg(DA)と大きな差が生じている。差が生じた原因としては、実験①②では室温よりも外気温の方が高かったためその影響が考えられる。

4. スパイラルダクトを使用した蒸発率の検証実験

4.1 実験概要

本節では、図5のようにダクト内にミストを噴霧し、ダクト内の温度と相対湿度を測定することで、飽差の蒸発に与える影響とノズルの特徴について検証した。実験には、X社製のノズル(ノズル(イ)(図9))、Y社製の2種類のノズル(ノズル(ロ)(図10))、ノズル(ハ))を使用した。スパイラルダクトは、図5に示すように鉛直に立て、ノズルはダクト上端から300mmの位置に設置して噴流の持つ慣性と自然対流でミストは落下しながら蒸発する。測定位置はダクト上端(A点)とノズルから下に2500mm(B点)、3000mm(C点)、3500mm(D点)の4か所で、各か所に25点熱電対を用いて温度測定を行った。湿度の測定は各測定点の中央で行ったが、測定機器の時定数が大きく、温度の測定データと併せての検証が困難であったため、結果および考察ではミスト噴霧前の初期条件のみ測定データを使用し、ミスト噴霧開始後は等エンタルピー変化をしているとして温度変化から求めた。また、ダク

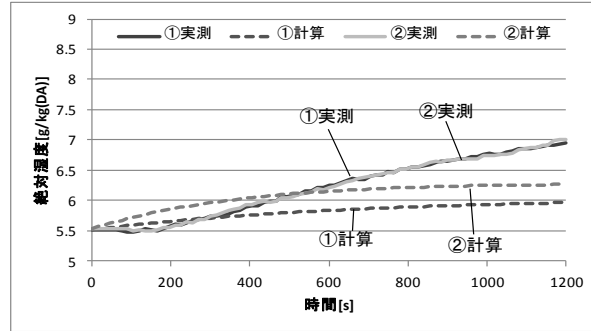


図3 実験①②の絶対湿度実測値と計算値

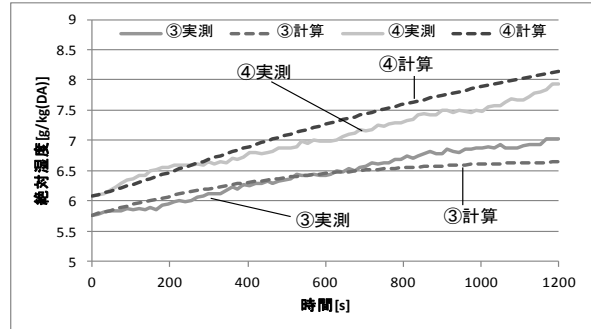


図4 実験③④の絶対湿度実測値と計算値

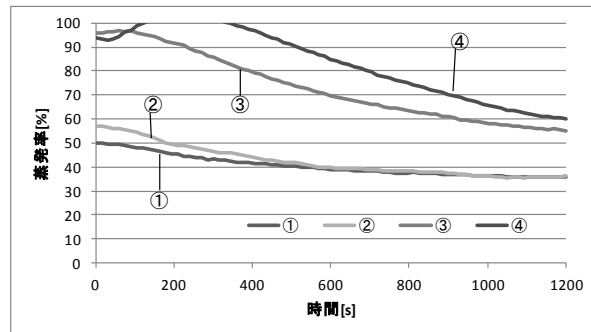


図5 蒸発率計算結果

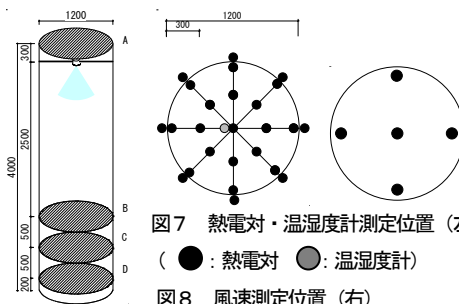


図6 測定機器配置図



図9 X社ノズル噴霧時



図10 Y社ノズル噴霧時

ト内の流量を測定するために、3次元風向風速計をダクトの下300mmの位置に設置し、図8に示す5か所で位置を変えて測定した。実験のミスト噴霧時間は、30、60、90秒の3パターンの測定を行った。本梗概では表2の(i)~(v)を対象に検証を行う。

4.2 各ノズルの特徴

X社(ノズル(i)), Y社(ノズル(ロ), (ハ))は共に渦巻き噴射弁という構造を持ち、ノズルから噴霧された液体は中心部が空洞になった円錐状(ホロコーン状)の噴霧¹⁾を形成するものである。既往の研究²⁾で、X社製ノズルは、半径方向に平均粒径と流量分布の差が少ないが、円周方向には一定の噴霧にならない。Y社製ノズルは円周方向での分布の差は小さいが、噴霧外周部では平均粒径が大きくなり流量も多いことが特徴としてわかっている。Y社製のノズル(ロ)と(ハ)では、噴霧角は同じであるが流量が異なり、ともに実測値で、(ロ)が46.5ml/min, (ハ)が27.0ml/minである。(イ)の流量は46.9ml/minである。また、各ノズルでの風速測定結果を表3に示す。

5. 実験結果・考察

5.1 温度測定結果

図11~図13に表2の実験(iii), (iv), (v)の温度低下のグラフを示す。x軸はミスト噴霧開始時間を0とし60秒まで示した。y軸の低下温度はB(2500mm), C(3000mm), D点(3500mm)の温度とA点(ダクト上端)の温度の差によって求めた。実験(iii), (iv), (v)は飽差におよそ3hPa程度ずつ差がある環境で行った実験である。飽差の違いが温度低下にどのような影響があるかを検証する。結果を見ると、実験(iii)と(iv)では、大きな違いは見られない。ともに、B, C, D点の順に温度の低下が大きくなっていることからBC間, CD間でもミストが蒸発している。一方(v)ではB, C, D点での温度低下がほとんど同じ値となっている。これは、AB間でミストが多く蒸発し、BC間, CD間では蒸発していないことがわかる。飽差が大きいことで、他の実験と比べてノズルに近い位置で飽和(蒸発しない)状態になったと考えられる。

(iii), (iv), (v)のいずれの実験においても、最も温度低下の大きい測定点の値が -3°C 程度であることから、飽差によって蒸発するミストの量(蒸発率)にはほとんど差はないが、飽差が低い場合は同じ量のミストが蒸発するのに、より長い距離を必要とすると考えられる。仮に、定常状態で蒸発可能な(粒径の小さい)ミストが全て蒸発した時の低下温度が 3°C であるとすると、(iii), (iv)ではD点でミストが全て蒸発し、(v)ではB点より上部でミストが全て蒸発していると考えられる。この時の状態をモデル化し、次項で検証を行う。

5.2 蒸発率の算出

ミストがダクト内を落下していく間にどれだけ蒸発していくかということを検証するために、式(5), (6)を使用し、微小距離(0.1m)進んだ時の温度と絶対湿度を算出し、その結果から、式(1), (2)によって、0.1m先の飽差を求めた。

表2 実験開始時の飽差 (hPa)

実験条件	(イ)	(ロ)	(ハ)
60秒 1回目	12.20	9.57(ii)	8.95
2回目	12.59(i)	10.05	9.04(iii)
3回目	12.21	10.29	8.08
4回目	12.64	-	-
30秒 1回目	12.36	10.03	8.08
2回目	12.44	10.14	7.75
3回目	12.28	10.15	9.75
90秒 1回目	12.04	10.59	11.32
2回目	11.75	9.92	12.31(iv)
3回目	11.39	10.14	15.52(v)

表3 各ノズルでの風速

	ノズル(イ)	ノズル(ロ)	ノズル(ハ)
風速[m/s]	0.20	0.17	0.10

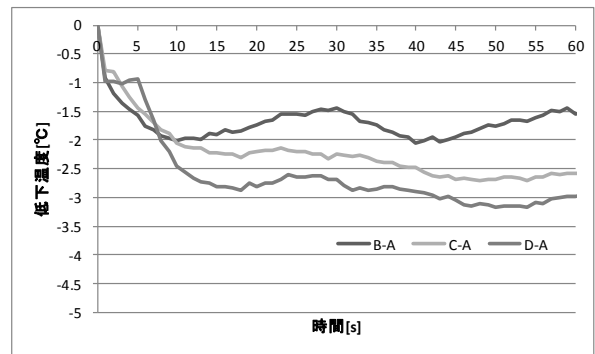


図11 (iii) 温度低下のグラフ

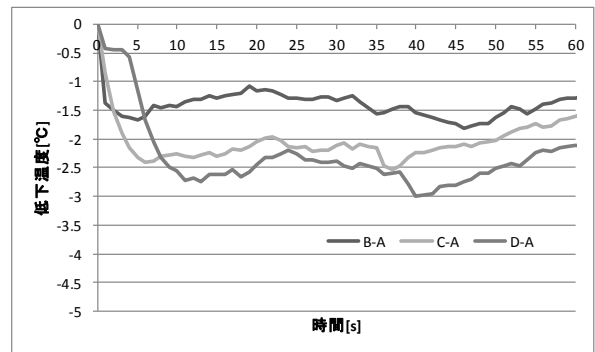


図12 (iv) 温度低下のグラフ

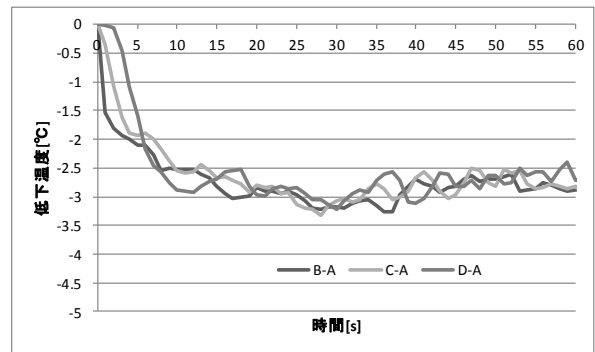


図13 (v) 温度低下のグラフ

この計算を繰り返し行い、ノズルから 3.5m 離れた位置まで 0.1m 毎に温度を算出した。ミスト噴霧量 M は 0.45ml とし、蒸発率の算出に用いる定数 a の値は、3500mm の位置での温度が 0mm の位置の温度よりも 3°C 低くなるように設定した (a=0.002)。また、(iii) の測定では D 点で噴霧した蒸発可能なミストが全て蒸発していると仮定しているため、(iii) での 0~3500mm までの蒸発量の合計の 0.16g を超えた時点で、(iv)、(v) においても、それ以上の蒸発は起こらないとしている。図 1 4 に算出結果を示す。結果を見ると、ノズルからの距離が離れていくにしたがって、直線的に温度が低下し、(iv) では 2000mm、(v) では 1500mm で噴霧したミストが全て蒸発している。実測結果では、(v) は 2500mm よりも上部で蒸発しているため、噴霧したミストが全て蒸発した位置はわからないが、(iv) では、2500mm から 3500mm の間でも蒸発しているため、実際の蒸発率は計算の値よりも低いと考えられる。

次に、ノズル (ハ) よりも流量の多い (イ) と (ロ) でも同様の計算を行い、実測値との比較を行う。図 1 5 には表 4 の (i) と (ii) での計算結果と実測結果を示す。式 (5) (6) で、ノズル (イ) のミスト噴霧量 M は 0.782ml、(ロ) は 0.775ml とした。定数 a は (i) の実験で、3500mm の位置での計算値が測定した D 点の温度が最も低くなった時と同じ値となるように設定した時の値 (a=0.00095) としている。結果を見ると、(i) では、3500mm の温度を合わせて計算を行っているが、2500mm の位置において 1°C 程度の差が生じている。(ii) においては、a は (i) の場合と同じ値を使用しており、2500mm では 1.5°C 程度の差があるが、3000mm と 3500mm の計算値は実測値と近い値となった。この 2 つのノズルでは a の値を (i) に合わせて設定し、ノズル (ハ) の計算をした時の約 1/2 に設定している。つまり、同じ飽差で実験を行ったとしても、流量によって蒸発率は変化することがわかる。表 4 には、各ノズルで 60 秒間ミスト噴霧を行った実験の定数 a の値を示す。表 4 の値は、(i) の場合と同様に 3500mm の計算値と D 点の最低温度を合わせた時の値である。水量の少ないノズル (ハ) では、(イ)、(ロ) と比べて a の値が 2 倍以上高いことがわかる。ノズル (イ) の 1 回目の実験で a の値が他の実験と大きく差があるのは、2 回目以降とノズルの傾きが異なり、4.2 にあるように外周部の粒径が大きいことが影響しているのではないかと考えられる。(イ) と (ロ) を比較すると、1 回目の実験を除いてノズル (イ) の方が (ロ) よりも a の値が高いことがわかる。ノズルの流量はほとんど変わらないので、ノズルの特徴によって粒径や流量の分布が異なり、噴射されるミストの蒸発しやすさが違い、その特徴の違いが、(イ) の方が高くなっている要因であると考えられる。これらの結果から飽差と蒸発率が線形関係であるとして数値計算を行ったが、実測値を再現することはできなかった。しかし表 4 に示すように同一ノズルでの差は小さいことから、飽差と蒸発率は比例に近い関係であり、また、流量やノズルの種類によっても、蒸発率が異なることがわかった。

$$\partial x = \frac{a \cdot E_d \cdot M}{V \cdot \rho} \cdot \delta l \quad \text{式(5)} \quad \partial T = \frac{-a \cdot E_d \cdot M \cdot r}{V \cdot \rho \cdot C_p} \cdot \delta l \quad \text{式(6)}$$

l : 距離[m], r : 蒸発熱=2501[kJ/kg]
C_p : 定圧比熱=1.006[kJ/kg · K]

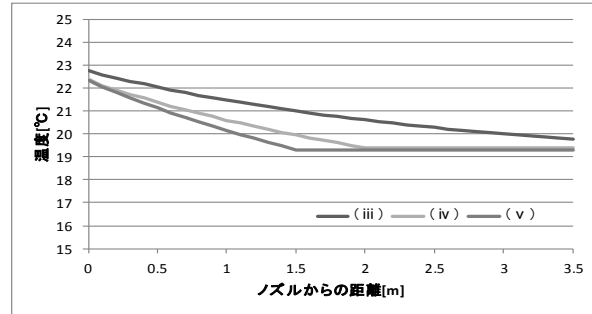


図 1 4 温度計算結果 (iii) (iv) (v)

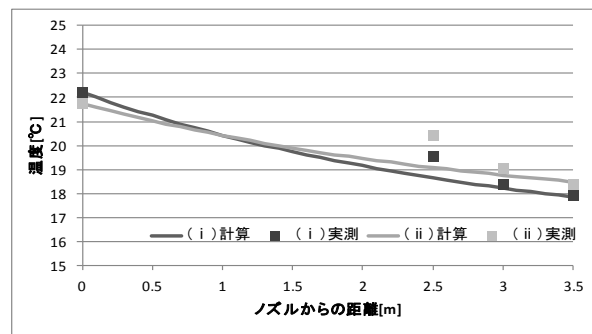


図 1 5 (i) (ii) の温度計算結果と実測結果

表 4 60 秒噴霧の実験での定数 a の値 (× 10⁻³)

	(イ)	(ロ)	(ハ)
1 回目	0.64	0.98	2.20
2 回目	0.95	0.85	2.22
3 回目	1.04	0.86	2.70
4 回目	0.98	-	-

6. 総括

体験学習室での加湿実験とスパイラルダクトを使用したドライミストの実験を通して、蒸発率と飽差の関係を検証した。加湿実験では、飽差と蒸発率が線形関係であるとして計算を行ったが、実測値とは差があった。今後鉛直方向の測定点を増やし、現象をより詳しく把握し、再現性を高める必要がある。ダクトを使用した実験では、飽差の大小による蒸発量の違いは小さいが、飽差が小さい場合は同じ量のミストが蒸発するのに、より長い距離を必要とすることがわかった。また、数値計算によって、流量が少ないほど蒸発率が高くなり、流量がほぼ同じノズルを使用した場合でもノズルの種類によって蒸発率は異なることがわかった。今後の課題として、ミスト噴霧によって周辺空気に影響が出ないような大規模空間での飽差の調節方法を検討することと、さらに長いダクトを使用して、ノズル毎にミストの蒸発特性の違いを検証する必要がある。

参考文献

- 1) 日本液体微粒化学会, アトマイゼーションテクノロジー, 森北出版, 2001
- 2) 加藤史郎「ドライミスト粒子の粒径・速度分布に関する研究」2010 年