

空冷式熱交換器のミスト冷却におけるスケール付着の抑制法に関する研究

—エリミネータを用いた吸込み空気中の未蒸発ミスト分離—

RESEARCH ON THE SCALE ADHESION SUPPRESSION IN MIST COOLING OF FORCED-DRAFT HEAT EXCHANGERS

—THE SEPARATION OF UNVAPORIZED MIST IN INLET AIR BY THE ELIMINATOR—

地域環境計画分野 劉 晨

空冷式熱交換器のミスト冷却では、未蒸発ミストがフィン表面に付着することによって、フィン表面でスケール付着・腐食が発生し、空調機の性能が低下する問題がある。本研究では、エリミネータを用いた吸込み空気中の未蒸発ミストを分離する対策を提案した。そこで、ミスト蒸発特性と冷却量向上策の検討を行った。まず、エリミネータを製作し捕集性能を調べた。そして、エリミネータを用いてミスト蒸発特性を明らかにし、単粒子蒸発モデルによりミストの蒸発と付着を予測できることを示した。

Because unvaporized mist adheres to the fin surface, scale adhesion and corrosion may be occur in mist cooling of forced-draft heat exchangers. It is possible that performance of the air conditioner is reduced. In this study, we have proposed a measure to separate unvaporized mist from inlet air with a mist eliminator. So we evaluate the mist evaporation characteristics using an eliminator under forced convection, and consider the evaporation characteristic model.

1. 研究の背景・目的

ヒートアイランド現象の原因は地表面被覆の増加、建築物の熱吸収と放出、都市内通風の衰弱、人口排熱の増加等である。ヒートアイランドの深刻化により、夏場の冷房負荷が上昇し、空調からの排熱はさらに増加してしまう。また、夏場の高温により、不快感と熱中症の危険性も増加してしまう。

近年、ヒートアイランド対策とクールスポット作成のため、屋外または半屋外にミスト冷却技術が導入され、微粒子のミストを蒸発し、低いエネルギー消費量で高い冷却効果が得られることが、注目されている。最近では、ミストの冷却効果を応用し、空冷式室外機の吸気冷却技術が開発されている。

空冷式室外機の問題点として吸い込み空気の温度上昇に伴い、空調機の効率が低下することがある。また、普通の空冷式空調機では建物内すべての冷房負荷が顕熱排熱として大気へ放出されることとなる。これがヒートアイランド現象の原因の一つになっている。

対策として、空冷式室外機にミストを噴霧し、ミストの蒸発潜熱で空冷式室外機吸い込み空気を冷却させ、室外機のコンプレッサの運転効率が向上することで、空調システムの消費電力を削減できる。また、吸込み空気温度が低下するため、熱交換後の排出空気温度も

低下できる。これによって、ヒートアイランド現象を緩和することが実現できる。

しかし、空冷式室外機にミストを噴霧する際に、限られた蒸発距離でミストが完全蒸発できず未蒸発ミストが室外機の熱交換フィン表面に付着してしまい、フィン表面での蒸発により、スケール付着・フィンの腐食が発生し、室外機の性能低下を引き起こし、ミスト噴霧技術を導入する障害になっている。

そこで、従来式のミスト噴霧方式を改良する必要がある。新たな噴霧方式では、従来式の冷却効果を向上させるとともに、熱交換フィン表面のスケール付着と腐食を防止することが望ましい。既往研究として、池内ら⁽¹⁾、佐土谷ら⁽²⁾はミスト応用技術におけるスケール付着特性を調べ、蒸発残りのスケール付着物は熱交換フィンに付着する未蒸発ミスト量に強く関係していることを示した。そのため、熱交換フィンのスケール付着と腐食を有効に防止するためには、熱交換フィンに未蒸発ミスト付着水量を減少することである。

以上のことを踏まえて、本研究では、エリミネータを用いて新たな空冷式熱交換器のミスト応用技術を提案する。

実際に導入するため、エリミネータを用いたミスト蒸発特性を明らかにする必要がある。山口ら⁽³⁾ ミスト

蒸発特性ミスト蒸発特性を明らかにする必要がある。山口ら⁽³⁾は強制対流強制対流下におけるミストの蒸発特性を明らかにした。①蒸発距離②噴霧量③風速④環境条件の四つのパラメータが蒸発への影響を解明した。そこで、本研究ではエリミネータの導入によるミスト蒸発特性の変化を中心にエリミネータを用いた強制対流下におけるミスト蒸発特性を調べ、簡易推定モデルと冷却効果向上策について検討を行った。

2. エリミネータを用いたミスト蒸発計測実験

本研究では、エリミネータを製作し、捕集性能を計測した。また、製作したエリミネータを用いてミストの蒸発特性を把握した。

2.1 エリミネータの製作

本研究では、既往研究を参考し、理論上でのエリミネータの設計を行い、理論上のエリミネータの捕集性能を試算した。

$$\frac{\pi}{6} d^3 (\rho - \rho_o) R \omega^2 = 3 \pi \mu d v \quad \text{式 1}$$

$$\ln \frac{\tan \theta + \frac{P}{l}}{\sec \theta - \frac{P}{l}} = \frac{d^2 (\rho - \rho_o) 8 V_o P \theta'}{9 \mu (2 l P \tan \frac{\theta}{2} - l^2)} \quad \text{式 2}$$

$$d = \sqrt{\frac{9 \mu (2 l P \tan \frac{\theta}{2} - l^2) \ln \frac{\tan \theta + \frac{P}{l}}{\sec \theta - \frac{P}{l}}}{8 (\rho - \rho_o) V_o P \theta'}} = d_c \quad \text{式 3}$$

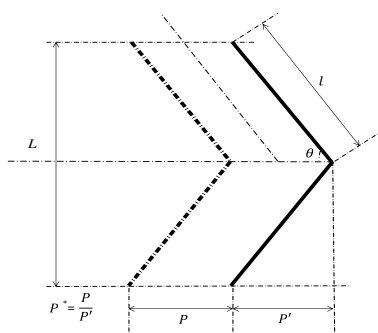


図 2.1 計算記号説明

Stokes 法則によって、回転運動を行う流体中の球形粒子の遠心力による移動速度は式 1 の遠心力と遠心力場における抵抗を等しいと求められる⁽⁴⁾。式 1 を変形すると、式 2 を得ることができる。式 2 により、式 3 でエリミネータにより最小除去できるミスト粒子径 d_c を計算することができる。

本実験では、エリミネータの角度と折れ板長さを固定し、折れ板間のピッチのみを調整することで、異なる捕集性能の二つのエリミネータを製作した。

表 2.1 エリミネータの寸法

エリミネータ角度 θ	ピッチ P	折れ板長さ l	屈折数	全長 L	記号	除去出来る最小水滴径 d_c
[°]	[m]	[m]		[m]		[μ m]
45	0.038	0.071	2	100	45P38L71	39
45	0.056	0.071	2	100	45P56L71	60

2.2 実験概要

ミスト蒸発におけるエリミネータの効果を明らかにするため、空気中のミスト蒸発率を計測する必要がある。しかし、直接空気中のミスト蒸発量を計測することが難しいため、噴霧後のミスト未蒸発量を計測することで、ミスト蒸発量を計算することにした。

2.2.1 未蒸発ミスト計測

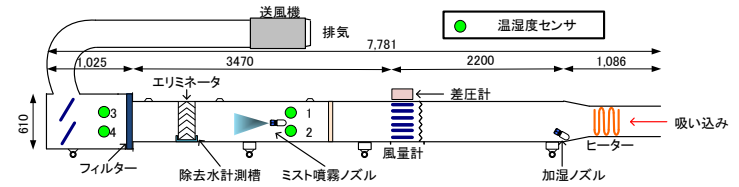


図 2.2 実験装置

図 2.2 のようなダクト実験装置を利用し、エリミネータ設置時のミストの未蒸発量計測実験を行った。噴霧後の未蒸発ミストは以下の 5 種に分類される。

- ミストがエリミネータに衝突し、エリミネータに捕集される場合。
- ミストがフィルタに到達する前に実験装置内壁に付着する場合。
- ミストがフィルタに衝突しフィルタに捕集される場合。
- 微細な未蒸発のミストがフィルタに捕集されずに通過する場合。
- 捕集した水滴が計測中にフィルタ表面から蒸発する場合。

ダクト内壁に付着するミスト量とフィルタから通過するミスト量は噴霧量と比べ僅かであるため、本実験ではこの二つの未蒸発ミスト付着量を無視することにした。

2.2.2 エリミネータに捕集されるミスト量計測

エリミネータに付着するミスト量を計測する代わりに、エリミネータに付着して落下するミスト量を計測することにした。噴霧初期ではエリミネータ表面に付着するミスト量が飽和になっていないため、エリミネータからのミスト落下は非定常である。そのため、エリミネータ表面の付着ミストが飽和になり、定常落下に達した後エリミネータの捕集量を計測する。

2.2.3 フィルタに捕集されるミスト量計測

完全蒸発できない粒子は、最終的にフィルタに捕集される。噴霧前後フィルタの重量変化をフィルタのミスト捕集量とする。

2.2.4 フィルタ表面からのミスト蒸発量計測

フィルタに捕集された水滴は湿球温度でない空気に触れ続けることでフィルタ表面から蒸発する。そこで、蒸発ぶんの影響を補正するため、次の手順で実験を行った。

実験方法

- ① フィルタをダクトに設置し、一定時間ミストを噴霧させてからフィルタを取り出し重量を計測する。
- ② 噴霧を停止し、フィルタを実験装置に設置して一定時間風に曝し、その後実験装置から取り出して重量を計測する。重量差はフィルタからの蒸発量である。
- ③ ②の作業を複数回繰り返す

2.2.5 飽和状態における未蒸発ミスト計測

飽和水蒸気圧状態においてはミストは蒸発しないため、ノズルから噴霧したミスト粒子は全てエリミネータまたフィルタに捕集される。

そして、飽和状態での実験により、未蒸発ミスト計測方法の精度が検証でき、エリミネータの捕集性能も調べられる。実験では完全飽和状態をつくるのが難しいが、相対湿度 100%に近い近似飽和状態で実験を行った。

2.2.6 未蒸発ミスト計測方法の精度

飽和状態では空気中のミスト蒸発とフィルタ表面からのミスト蒸発は発生しないため、フィルタの捕集量とエリミネータの捕集量の合計は流量に等しいと考えられる。図 2.3 に示すようにフィルタ捕集量とエリミネータ捕集量の合計は概ねノズルからの噴霧量と一致した。

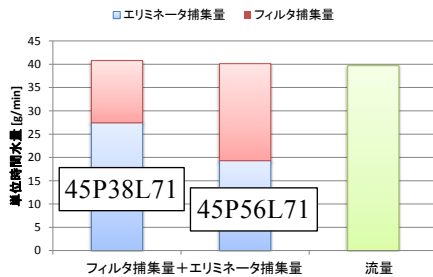


図 2.3 単位時間捕集水量

2.2.7 エリミネータの捕集性能計測

エリミネータの設計段階においてエリミネータの性能を評価する指標として、除去できる最小粒子径を計算した。そして、この計算した指標の精度を検証した。

飽和状態実験におけるエリミネータの捕集量を計測し、噴霧量との比率でエリミネータの捕集効率が計算できる。そして、累積ミスト質量分布 CVF (本実験に用いるノズルの粒子径質量積分布. 位相ドップラー粒径解析装置による計測値) に基づき除去できる最小粒子径を求めた。表 2.2 に示すように、実験値は理論計算値より小さくなった。エリミネータに捕集されたミストは粒子径別の捕集効率とミストの粒子径分布の関係で決まるので、特定の最小粒子径と対応しないことが原因で、最小除去粒子径の理論上計算を検討が必要がある。

表 2.2 捕集効率と除去できる最小粒子径

エリミネータ番号	捕集効率	ミスト通過率	除去できる最小粒子径	
	[%]	[%]	理論値[μm]	実験値[μm]
45P38L71	67.2%	32.8%	39	23
45P56L71	48.1%	51.9%	60	30

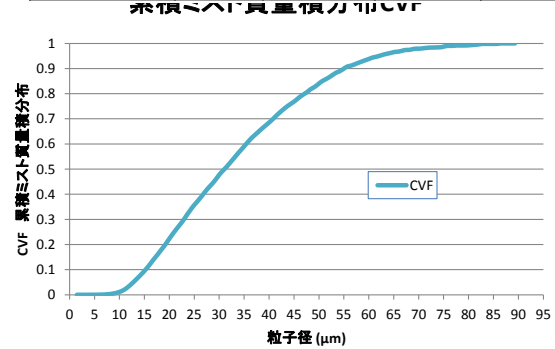


図 2.4 累積質量分布 CVF

2.2.8 実験パラメータ

エリミネータを導入すると、蒸発距離とエリミネータの設置距離とエリミネータの捕集効率は蒸発に影響する重要なパラメータになる(図 2.5)。そのため、本研究はこの三つのパラメータに注目し実験を行った。パラメータの条件を表 2.3 に示す。

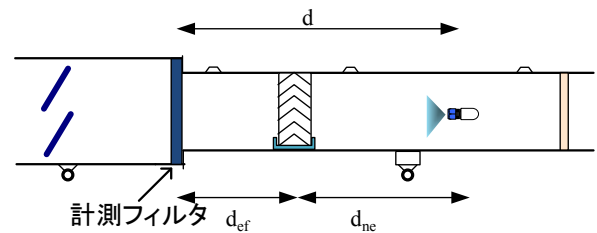


図 2.5 実験イメージ図

表 2.3 パラメータ条件

①エリミネータとフィルタとの距離 d_{ef}	[m]	0.1	0.3	0.5	0.7	0.9
②蒸発距離 d	[m]	0.2	0.4	0.6	0.8	1
③エリミネータ番号		45P38L71		45P56L71		
④噴霧量	[g/min]	39.7				
⑤風速	[m/s]	2				
⑥温度・湿度	[$^{\circ}\text{C}$] [%]	30		55		

2.3 実験結果

実験条件で未蒸発ミスト量を計測し、エリミネータを用いたミスト蒸発特性を明らかにした。

2.3.1 エリミネータのミスト捕集量結果

ここでは、捕集率を次のように定義する。

$$\text{捕集率(\%)} = \frac{\text{捕集量(g/min)}}{\text{ノズルの流量(g/min)}} \times 100\%$$

表 2.2 より製作した二つのエリミネータのミスト捕集率はピッチが小さいほど捕集率が高い。図 2.6 より d が一定で d_{ef} が大きくなると、あるいは d_{ef} が一定で d が小さくなると、捕集率が高くなる。つまり、ノズルとエリミネータの距離 d_{ne} が近いほど、捕集率が高い。原因としてノズルとエリミネータ間のミスト滞留時間

が短くなることにより、エリミネータに到達した未蒸発ミスト量が多くなると考えられる。

2.3.2 フィルタのミスト捕集量結果

図 2.7 より 2 種のエリミネータと比較すると、捕集効率が高いほどフィルタの未蒸発ミスト付着量が少ない。また同じの蒸発距離でエリミネータ捕集率が高いほどフィルタの付着量が少ない。原因として蒸発距離が長くなると、ミスト滞留時間が長くなり、フィルタの付着量が少なくなる。

2.3.3 蒸発率結果

図 2.8 より蒸発率は蒸発距離に強く依存することがわかった。蒸発距離が長くなるほど蒸発率が高い。原因はミストが空気中に滞留する時間が長いからである。また、ノズルはエリミネータに近いほど蒸発率が低下する傾向もわかった。原因としてエリミネータで捕集されたミスト量が多いため、空気中のミスト蒸発可能量が減少するためである。そのため、導入する際に、エリミネータをノズルに近い距離で設置することを避けるべきである。エリミネータなしより蒸発率が高いところがあると見られた。原因としてエリミネータ表面でのミスト蒸発が発生する可能性がある。

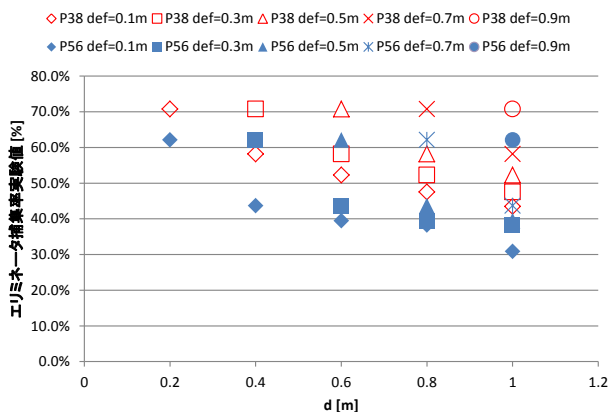


図 2.6 エリミネータ捕集率実験値

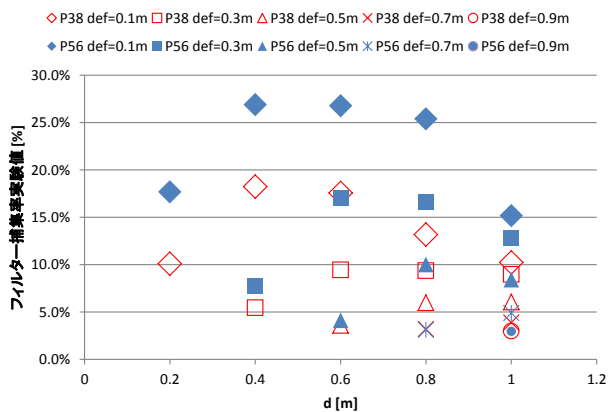


図 2.7 フィルタ捕集率実験値

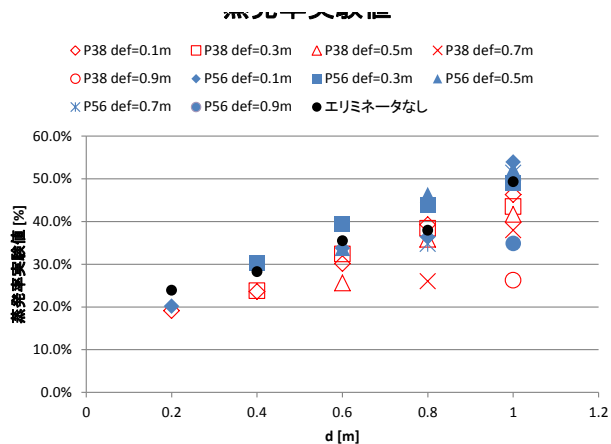


図 2.8 蒸発率実験値

3 エリミネータを用いたミスト蒸発モデル

エリミネータは慣性衝突でミストを捕集するため、ミスト蒸発理論への影響は僅かであると考えられる。Craig ら⁽⁵⁾はミスト蒸発が単粒子蒸発に近似できると示した。そこで、エリミネータを用いる場合のミスト蒸発も単粒子蒸発理論を用いて近似することとする。

3.1 単粒子蒸発理論

Pruppacher ら⁽⁶⁾は粒子の凝縮と蒸発の理論より、蒸発モデル式を推定した。蒸発理論では粒子が蒸発する際に、空気から吸収する熱量と空気へ流出する水分量は式 4 のように蒸発潜熱で関係する。空気からの吸収熱は式 6 を示すように粒子表面と環境との温度差に比例する。流出する水分量は式 5 のように粒子表面周りと環境との水蒸気密度差に比例する。連立方程式で単粒子蒸発モデル式 7 が得られる。

$$\left(\frac{dq}{dt}\right) = -L_e \left(\frac{dm}{dt}\right) \quad \text{式 4}$$

$$\frac{dm}{dt} = 4\pi a D_V (\rho_{V,\infty} - \rho_{V,a}) \quad \text{式 5}$$

$$\frac{dq}{dt} = 4\pi a \kappa_a (T_\infty - T_a) \quad \text{式 6}$$

$$a \frac{da}{dt} \approx \frac{s_{v,w} - y}{\frac{\rho_w R T_\infty}{e_{sat,w}(T_\infty) D_V M_w} + \frac{L_e \rho_w}{\kappa_a T_\infty} \left(\frac{L_e M_w}{T_\infty R} - 1\right)} \quad \text{式 7}$$

$$s_{v,w} = \frac{e_\infty}{e_{sat,w}(T_\infty)} - 1 \quad \text{式 8}$$

$$y = \frac{2\sigma_s M_w}{R T_a \rho_w a} \quad \text{式 9}$$

3.2 蒸発モデル概要

単粒子蒸発モデルを基に、エリミネータを用いたミスト蒸発モデルを検討する。計算では仮想した空間において粒子が蒸発することで、周りの環境条件が変化し、再び粒子の蒸発速度へ影響する。単粒子の蒸発が計算できてから、ノズルから噴霧したすべての粒子の蒸発を計算する必要がある。実験で計測したノズルの

粒子径分布 (図 3.1) により、ノズルから噴霧したすべての粒子の蒸発計算を行った。エリミネータ捕集効率 (表 2.3) により、エリミネータを用いる場合ミスト蒸発をモデルにより計算し、実験を再現した。

3.3 計算方法

仮想したミストが存在する空間がダクトにあると仮定し、強制対流により移動する場合を検討する。エリミネータに到達する時の粒子径分布を計算し、ミスト質量を試算する。そして、エリミネータ捕集効率との関係でエリミネータの捕集量を計算する。エリミネータに到達する時の粒子径分布とミストの通過率との関係で通過する粒子径分布が求められる。フィルタに到達する時の粒子径分布を計算し、ミスト質量を計算する。計算した質量はフィルタの捕集量になる。

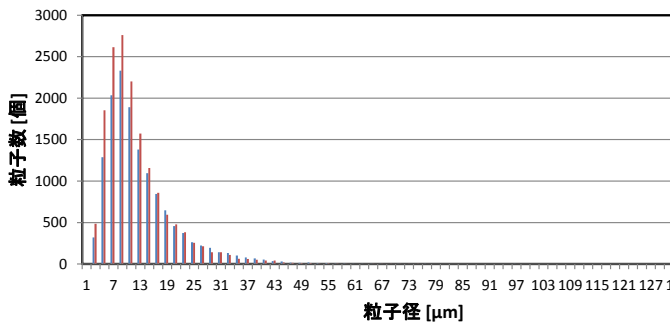


図 3.1 粒子径分布

3.4 計算結果

飽和状態実験によりエリミネータの捕集効率を調べたが、ノズルからの粒子速度計測実験によりノズルとエリミネータとの距離が 0.1m 時にミストの平均速度はダクトの風速より速い。表 2.2 の結果はノズルとエリミネータの距離が 0.1m より長い場合である。そこで、0.1m 時のエリミネータ捕集効率を再び計測した。結果を表 3.1 に示す。通常の捕集効率(表 2.2)と 0.1m の捕集効率を用いて、モデル計算を行った。結果は図 3.4 から図 3.6 までに示すように、モデルの計算値は実験値と強く相関していることが見える。表 3.2 に示すようにモデルと実験値の残差の RMSE は小さく、単粒子ミスト蒸発モデルで実験を再現することができた。エリミネータにより除去されたミスト量、フィン表面のミスト付着量と空気中のミスト蒸発量を蒸発モデル計算で把握することができた。

4 冷却量向上

従来式の空冷式熱交換器のミスト冷却技術では、ミスト噴霧量を増加させ、熱交換器表面の未蒸発ミスト量も増加し、スケール付着・腐食状況がますます進むしたがって、フィン表面の未蒸発ミスト量を抑制するためにはノズルの噴霧量が抑える必要があるが、その結果、ミスト蒸発量が減少してしまう。

本研究の結果よりエリミネータを導入することで、室外機の吸込み空気中の未蒸発ミストを分離し、熱交

換器表面の未蒸発ミスト量を減少させ、スケール付着・腐食が削減できる。熱交換器表面に付着する未蒸発量を同じとする場合は、ノズルからの噴霧量を増加させて、従来式と比較して空気中のミスト蒸発量が増加させることができるため、ミストの冷却効果の向上が期待できる。

表 3.1 ノズルとエリミネータ 0.1m 時の捕集効率

エリミネータ番号	捕集効率	ミスト通過率	除去できる最小粒子径	
			0.1m[μm]	>0.1m[μm]
45P38L71	80.8%	19.2%	19	23
45P56L71	72.1%	27.9%	22	30

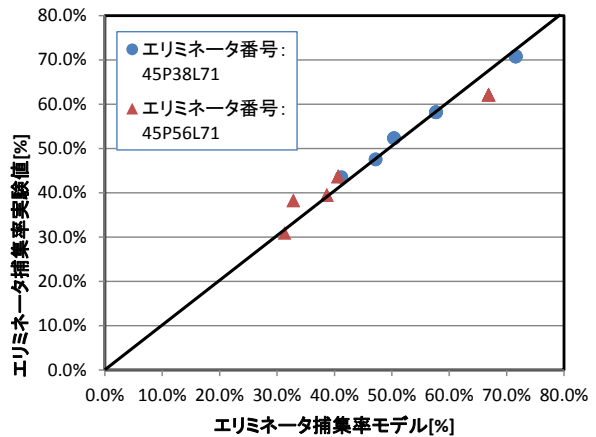


図 3.4 エリミネータ捕集率計算結果

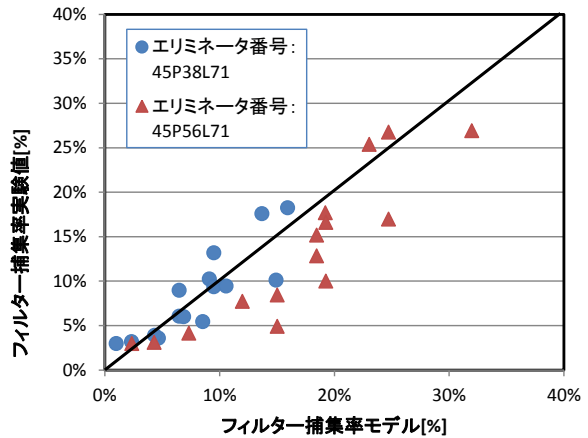


図 3.5 フィルタ捕集率計算結果

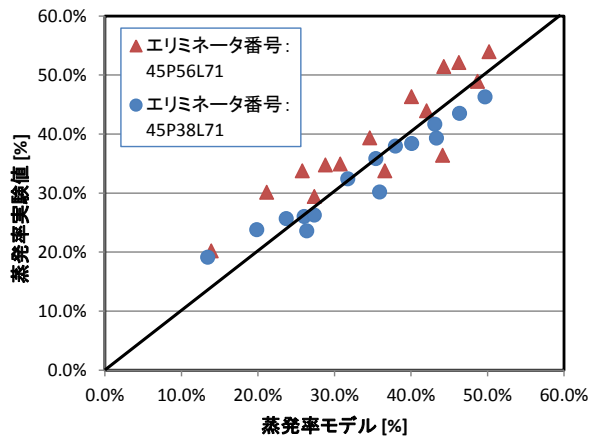


図 3.6 蒸発率計算結果

表 3.2 計算結果 RMSE

エリミネータ番号	RMSE			
	エリミネータ	フィルタ	蒸発率	全体
45P38L71	1.2%	2.3%	3.0%	2.3%
45P56L71	3.7%	5.2%	5.6%	4.9%

5 まとめ

本研究では、エリミネータを用いた新たな空冷式熱交換器へのミスト噴霧応用技術を提案した。この技術に対して、以下の知見を得た。

- (1) エリミネータが介在するミスト蒸発現象に対して、単粒子蒸発モデルを適用し、その蒸発現象を精度よく近似できることを確認した。
- (2) 熱交換器に付着する未蒸発ミスト量を同一とする場合に、エリミネータを設置する場合と設置しない場合を比べると、設置する場合には空気中のミスト蒸発量（冷却量と同意）を増大させることができることを、実験により明らかにした。すなわち、同一の冷却効果を得る場合に、未蒸発ミスト量を減らすことができることを明らかにした。
- (3) エリミネータの設置によって、捕集されるミストが増加し、水を無駄に捨てることになる。今後は、エリミネータ設置により増大する冷却効果と、水の消費増大に伴う浪費を勘案し、コスト評価を行うことが、今後の課題である。

記号表

$\rho_{v, \infty}$: 環境の水蒸気密度	[kg/m ³]
$\rho_{v, a}$: 粒子表面の水蒸気密度	[kg/m ³]
ρ_w	: 粒子密度	[kg/m ³]
r	: 粒子表面からの距離	[m]
m	: 粒子の質量	[m]
a	: 粒子半径	[m]
D_v	: 空気中の分子拡散率	[m ² /s]
q	: 熱量	[J]
L_e	: 蒸発潜熱	[J/kg]
T_∞	: 環境乾球温度	[degC]
T_a	: 水粒子表面温度	[degC]
t	: 噴霧時間	[s]
κ_a	: 乾燥空気中の熱伝導率	[W/(m·K)]
R	: 気体係数	[-]
$e_{sat,w(T_\infty)}$: 環境飽和水蒸気圧	[Pa]
e_∞	: 環境水蒸気圧	[Pa]
M_w	: 水分子量	[mol]
σ_s	: 表面張力	[N/m]

参考文献

- 1) 池内 佑梨ら「空冷式熱交換器のミスト冷却によるスケール付着に伴う伝熱面の性能低下に関する研究」大阪市立大学工学部環境都市工学科 2011 年度卒業論文
- 2) 佐土谷 圭佑ら「空冷式熱交換器表面のミスト噴霧に伴うスケール付着特性に関する研究」大阪市立大学工学部環境都市工学科 2012 年度卒業論文
- 3) 山口 浩史ら「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」大阪市立大学大学院工学研究科都市系専攻 2011 年度修士論文
- 4) 井上ら「エリミネータによる水滴分離効率」日本建築学会研究報告 (44), 89-92, 1958-12
- 5) Craig Farnham ら「ミストの蒸発冷却特性測定と制御方式の提案」冷凍 85(992), 468-469, 2010-06-15
- 6) H. R. Pruppacher, J. D. Klett 「Microphysics of Clouds and precipitation」 P502-P510

討 議

◆討議 [小林先生]

エリミネータピッチをより小さくできないか

◆回答

エリミネータのピッチはより小さくできます。しかし、限界があります。小さすぎるとエリミネータにより圧力損失が大きくなる。つまり、熱交換器に入る風量が減少してしまう。そのため、熱交換器の熱交換性能が低下する可能性がある。既往研究では、エリミネータの捕集性能と圧力損失の関係を明らかにした。(石谷清幹ら「エリミネータにおける同伴液滴の分離性能(第2報 実験的研究)」)本研究では、エリミネータにより圧力損失の問題は考慮していない。

◆討議 [小林先生]

付着量が同じ時、エリミネータなしの場合蒸発距離が伸びても蒸発量が増えないのはなぜですか

◆回答

付着量が同じ時に、図から見るとエリミネータなしの場合蒸発距離が伸びても蒸発量が増えない傾向があるが、実際実験結果から見ると、蒸発量が増える。

◆討議 [小林先生]

一流体ノズル、二流体ノズルとエリミネータの関係性

◆回答

ノズルから噴霧したミスト粒子の平均粒子径の大きさから見ると、二流体ノズルは一流体ノズルより小さいため、蒸発しやすくなる。そのため、もし熱交換器に設置すれば、二流体ノズルの方は未蒸発ミストが少なく、熱交換器フィン表面に付着する未蒸発ミスト量も少ないと考えられる。しかし、二流体ノズルの初期コストとランニングコストは一流体ノズルより高い。また、二流体ノズル噴霧する時に噪音が発生する。そのため、実状では熱交換器に噴霧するノズルはほぼ一流体ノズルである。本研究の目的としてはエリミネータを用いて一流体ノズルから噴霧した蒸発しにくい粒子を除去する。もし二流体ノズルで噴霧すれば、噴霧したミストはほぼ完全蒸発できるため、エリミネータの効果が薄くなる。

◆討議 [梅宮先生]

エリミネータ設置における室外機の効率向上に関する検討は

◆回答

ノズルから噴霧したミストを蒸発することで、空冷式室外機の吸込み空気の温度が低下できる。そのため、空冷式室外機の運転効率を向上することができる。しかし、未蒸発ミストがフィン表面に付着すると、腐食とスケール付着が発生する問題点がある。そして、室外機の効率が向上できず低下する可能性がある。本研究では、エリミネータを設置すると、この問題点が解決できるため、ミスト冷却における室外機の運転効率は確実に向上できるようになった。