







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。

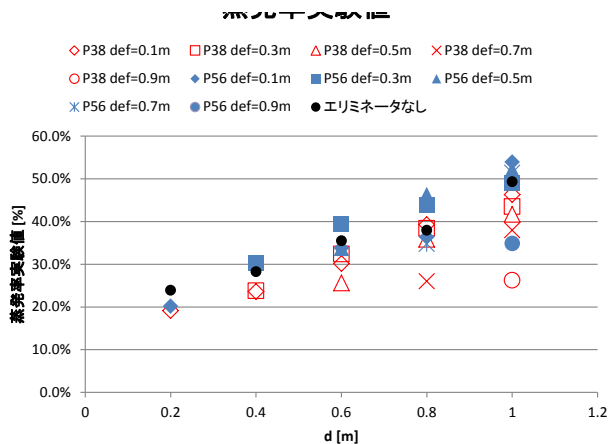


図 2.8 蒸発率実験値

## 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<sup>(5)</sup>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<sup>(6)</sup>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。

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

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

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

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

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

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

### 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

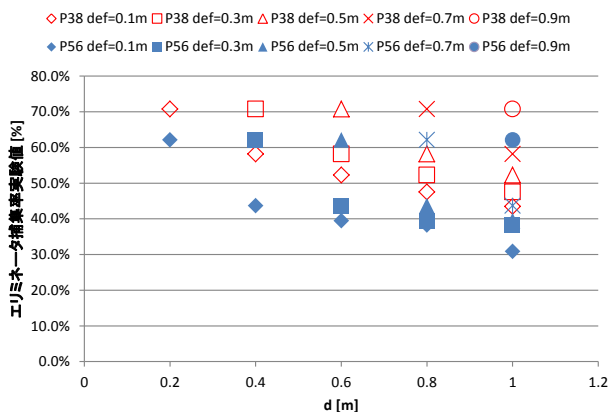


図 2.6 エリミネータ捕集率実験値

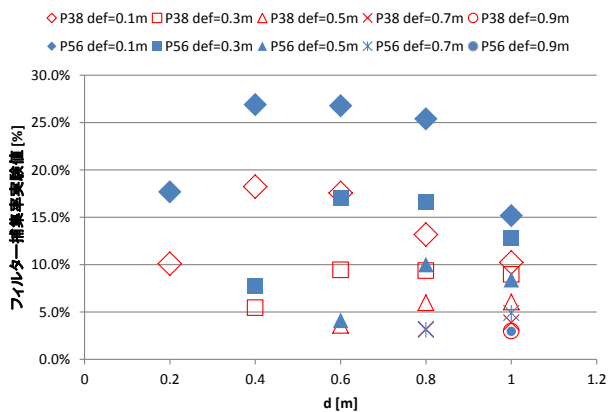


図 2.7 フィルタ捕集率実験値

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。

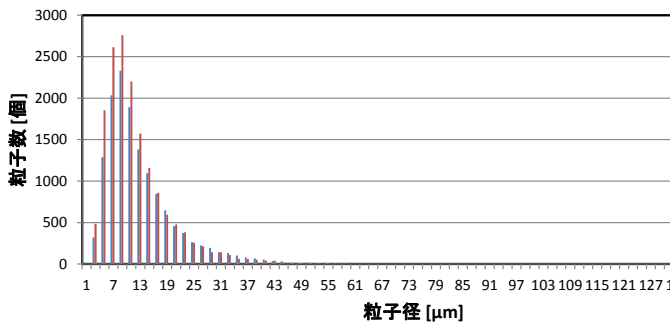


図 3.1 粒子径分布

### 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[ $\mu\text{m}$ ]	>0.1m[ $\mu\text{m}$ ]
45P38L71	80.8%	19.2%	19	23
45P56L71	72.1%	27.9%	22	30

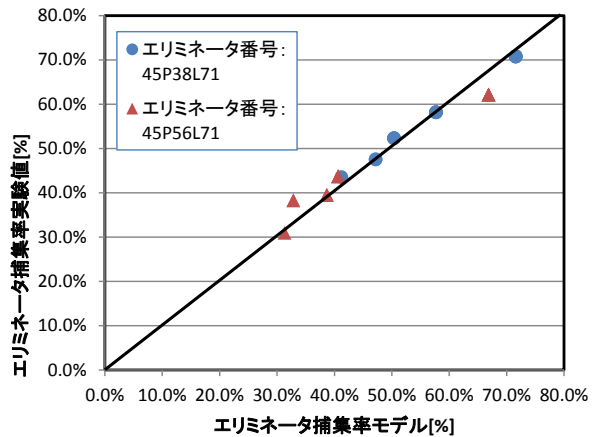


図 3.4 エリミネータ捕集率計算結果

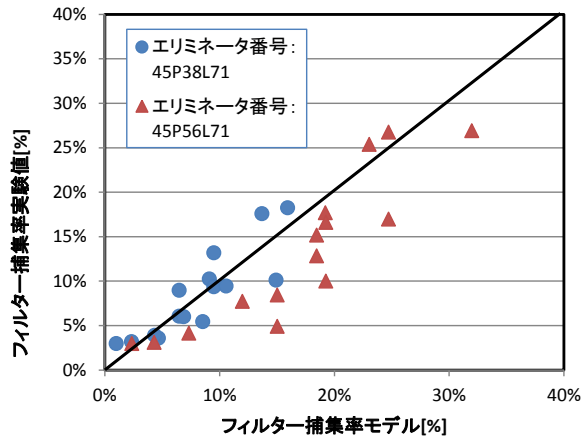


図 3.5 フィルタ捕集率計算結果

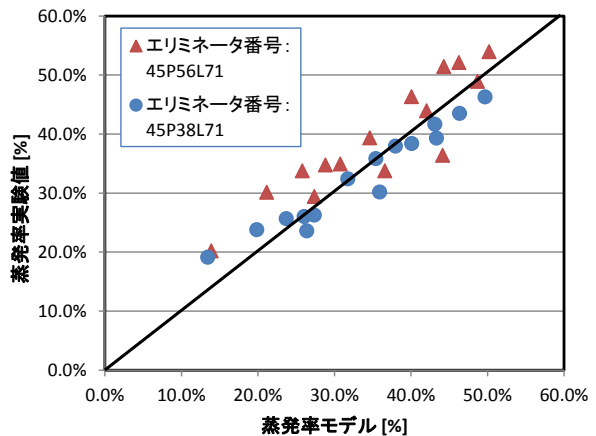


図 3.6 蒸発率計算結果

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 <sup>3</sup> ]
$\rho_{v, a}$	: 粒子表面の水蒸気密度	[kg/m <sup>3</sup> ]
$\rho_w$	: 粒子密度	[kg/m <sup>3</sup> ]
$r$	: 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 <sup>2</sup> /s]
$q$	: 熱量	[J]
$L_e$	: 蒸発潜熱	[J/kg]
$T_\infty$	: 環境乾球温度	[degC]
$T_a$	: 水粒子表面温度	[degC]
$t$	: 噴霧時間	[s]
$\kappa_a$	: 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]
$e_\infty$	: 環境水蒸気圧	[Pa]
$M_w$	: 水分子量	[mol]
$\sigma_s$	: 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。