

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

VALIDATION OF COOLING EFFECTIVENESS AND CFD SIMULATION

Study on cooling system by using dry mist

尹 奎 英*, 山田英貴**, 奥宮正哉***, 辻本 誠****

Gyuyoung YOON, Hideki YAMADA, Masaya OKUMIYA
and Makoto TSUJIMOTO

The objective of this study is to propose a prediction technique for cooling effect of dry mist, and present useful data for design / control of a dry mist system. In this paper, the cooling effect of dry mist system was verified by two dry mist systems there were actually introduced and operated. One of the verified systems is a dry mist system that was installed into the air corridor on the site Aichi Expo. A cooling effect of this one was evaluated by using the field measurement data during three months. Another one is a dry mist system introduced into N university campus. We found out that the cooling effect by dry mist evaporative is presented about 3 degree Celsius of air temperature reduce and about 15 %RH of relative humidity increase. In addition, the cooling effect of the dry mist system was simulated with a CFD analysis code that is Fluent Ver. 6.3. The reproducibility was confirmed, and the possibility of the performance prediction of the dry mist system was shown.

Keywords : Dry mist, Heat island, Hot day, CFD, DPM

ドライミスト、ヒートアイランド、暑熱環境、CFD、分散相モデル

1. はじめに

水の蒸発潜熱は約 2.3MJ/kg であり、これを上手に利用すれば、少ないエネルギーで効率のよい冷却効果が期待できるといえる。また、地球温暖化や都市部のヒートアイランド現象など、環境問題が深刻化していくなかで、水の気化熱は夏の暑さに対して有効な冷熱源であり、これの有効な利用は持続可能なエネルギー利用手法といえる。

居住空間に水を噴霧しそれを蒸発させて涼感を得る手法は、水の気化熱を利用するシステムのひとつといえ、筆者らは、平均粒径 20 μm 程度の微小な水滴を居住域に噴霧させ、その蒸発冷却効果を利用して人間の体感温度をさげるシステム（以下、ドライミストシステム）を提案してきた。このドライミストシステムと、従来の水噴霧システムの異なる点は微小な水滴を用いることであり、そのため噴霧水は蒸発しやすく、人肌や床面がぬれにくいことが特徴である。

一方、このドライミストシステムは微小な水滴を用いることから、周囲の温度、湿度はもちろんのこと、気流の影響を受けやすくその性能を定量的に予測することは非常に難しい。さらに、ドライミストシステムの設計・運用に関する資料が少ないため経験

値や試行錯誤による設計・運用になるケースがほとんどである。

そのため、ドライミストシステムの導入を実務設計段階で考慮することは困難であり、システム性能の予測手法の提案、設計・運用の資料提供は、本システムの普及を考えた上で、重要な課題であるといえる。

水の気化熱を用いる採涼システムに関する既往研究は、林ら¹⁾、児玉ら²⁾、箸方ら³⁾、金田ら⁴⁾の研究例があり、温熱環境改善効果及び温熱快適性について報告している。しかしながら、これらの研究例は、実験用のミストシステムを対象としているものが殆どであり、実導入のシステムに対する検証例はまだ少ない。また、システムの性能予測や設計・運用に関する検討例はないのが現状である。

そこで、本研究はドライミストシステムの設計・運用に有用なデータの提供とともに、性能予測手法の提案を行うことを目的とする。本報ではまず、実際に導入・運用された2つのドライミストシステムを対象にミスト蒸発による冷却効果の検証を行った。ひとつの検証例は、愛知万博の空中回廊（グローバルループ）に導入されたドライミストシステムを対象とし、3か月間に及ぶ長期計測データからその効果を検証した。もう一つの検証例は、N

* 名古屋大学環境学研究所都市環境学専攻
助教・博士(工学)

** 株式会社

(当時・名古屋大学環境学研究所
博士前期課程・修士(環境学))

*** 名古屋大学環境学研究所都市環境学専攻 教授・工博

**** 東京理科大学工学部第二部建築学科 教授・工博

Assist. Prof., Dept. of Environmental Eng. and Architecture, Graduate School of Environmental Studies, Nagoya Univ., Dr. Eng.

Yamatate Corporation

(Graduate Student, Graduate School of Environmental Studies, Nagoya Univ., M.A. Environ.)

Prof., Dept. of Environmental Eng. and Architecture, Graduate School of Environmental Studies, Nagoya Univ., Dr. Eng.

Prof., Architecture, Division II Dept., Faculty of Eng., Tokyo University of Science, Dr. Eng.

大学構内に導入されたシステムを対象に1週間程度の短期計測を行い、ミストの冷却効果及びその影響範囲について検証した。

さらに、CFD解析の汎用ツールを用いて、ミストシステムの冷却効果をシミュレーションしてその再現性を確認し、CFD解析によるドライミストシステムの性能予測の可能性を示した。

2. ミストシステム冷却効果の実測 (その1)

2.1 調査対象システムと調査概要

2005年に開催された愛知万博の長久手会場内の空中回廊「グローバルループ」において、ドライミストシステムが導入された。

図1に空中回廊平面図とドライミストシステムの設置位置を示す。空中回廊の全長は2.6km、幅は約21mであり、その両端には、歩行者側へ5mほど張り出した日除けテントが設けられた。また、一部のテント(延長約580m)に対して、ドライミストのノズルが設置された。

図2に空中回廊上の日除けテント及びミストノズルの設置概要図を示す。テントのポールは約6.6m間隔で設置され、そのポールにノズルが据え付けられた。(1つのポールに30cm間隔で12個設置)。1ノズルからの噴霧量は50ml/minであり、1ポール当たりの噴霧水量は600ml/minとなる。また、1ポール当たりの冷却対象面積を33m²(=5m×6.6m)とすると、噴霧した水が全て蒸発した場合の単位面積当たりの蒸発冷却量は約700W/m²となる。

ドライミストシステムは毎日の朝9時から18時までスケジュール運転されて、テント内(ポール足元)の歩道端部に設置された温・湿度計、風速計、降雨(降雨に対してはテント外でセンシングした)の計測値を持ってON/OFF制御されるようになっている。表1にミスト噴霧開始・停止条件を示す。空気温・湿度、風速、降雨の計測値が噴霧開始条件のすべてを満足した場合、ミストの噴霧を開始し、噴霧停止条件のいずれかを満たせば停止するようにした。また、これらの制御のための計測値は30秒置きに計測されデータログに収集された。

ミストの冷却効果の検証のために、ミストの影響を受けないテント外の地点(テントから20m程離れた位置)に対しても、空気温・湿度、日射量を計測して収集した。表2に本計測に用いた各計測装置と計測点を示す。

2.2 ドライミストの冷却効果検証

今回の検証には、図1に示す測定場所1-1、1-2のデータを用いて行う。ミストシステムは、博覧会の開催期間のうち、7月1日から9月25日まで運用され、検討対象としたゾーンのミスト噴霧時間は延べ433時間(日平均約5時間)であった。

まず、図3にテント内外の空気温度と日射量の一変動、そして噴霧状態を示す。ミストの噴霧は9時ごろから開始されて、17時30分に停止した。また、17時には気温(測定場所1-1)が30℃を下回ったため10分程度停止時間があった。日平均気温は、テント外(測定場所1-2)とテント内(測定場所1-1)とで、それぞれ27.7℃、26.5℃となり、テント外の空気温度はテント内気温に比べて日中にかけて常に高くなった。また図3に示すようにテント外の空気温度は朝6時ごろから9時の間、ミスト噴霧がなかったにもかかわらず、高くなった。これは、テント外の測定センサーが、日射を受けていたのが原因と考えられる。このために、ミ

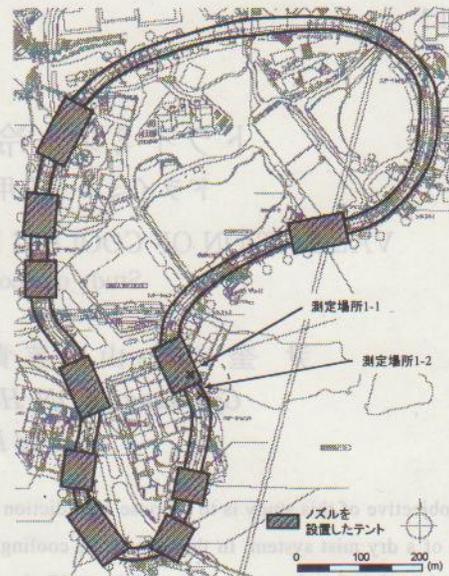


図1 空中回廊配置およびミスト設定位置図

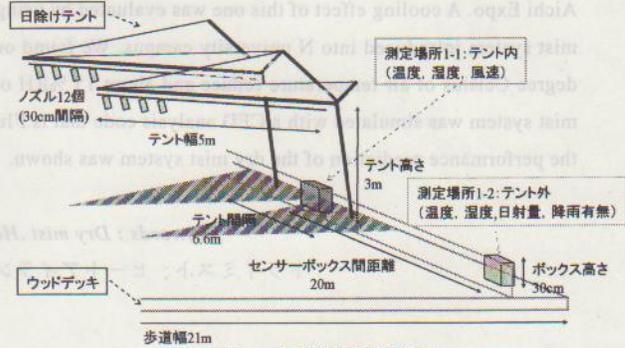


図2 各計測点概要図

表1 噴霧開始・停止条件

	噴霧開始条件 (全ての条件を満たせば噴霧開始)	噴霧停止条件 (いずれかの条件を満たせば噴霧停止)
温度	31℃以上	30℃以下
湿度	60%RH以下	70%RH以上
風速	10分間平均値3.0m/s以下	3.0m/s以上
降雨	降雨なし	降雨あり

表2 計測概要

計測項目	計測装置・センサー	計測点
空気温度	白金測温抵抗体温度計	テント内外
湿度	静電容量型湿度計	各1点
風速	三杯式風速計	テント内1点
日射量	熱電堆式日射計	テント外1点
降雨	くし形電極	テント外1点

ト噴霧による正味の冷却効果を評価するために、以下の方法でテント外の気温から日射の影響を取り除く補正を行った。

図4はミスト噴霧停止時でテント外温度センサーが日射を受けていた時間帯を抽出し、日射量とテント内外温度差の相関をプロットしたものである。そしてこのプロットより図中に示す近似直線を導出した。また、この近似式を用いて、テント外の温度を補正し日射を受けなかったときのテント外の気温と見なした。全計測期間の平均日射量は約400W/m²あったが、その時は、テント外

の温度を 1.5℃程度低く補正することとなる。日射量とテント内外温度差との相関は 0.37 とそれほど強くないが、これによって、全計測期間中におけるミスト噴霧の冷却効果がおおよそ評価できると考えられる。

図 5 に計測期間中のテント内外温度差のデューレーションカーブと風速計測値を合わせて示す。なお、テント内外温度差の算出には補正したテント外温を用いた。

テント内外温度差は、正の値が約 300 時間出現し、約 130 時間においては負の値となった。ここで、テント内外温度差の正の値となった時間帯の温度差は、ミストの気化による冷却効果といえ、その最大値は 4.17℃であった。これに対して、負の値となった時間帯が現れており、ミストの噴霧が行われたにも関わらず、テント内の温度はテント外の温度より高くなった。これは、風によりテント内計測点には暑い外気が触れ、ミストの気化熱はテント外の計測地点まで運ばれたためと推測される。

風速とテント内外温度差との関係を見ると、風速が約 2.0m/s を超える時間帯において、テント内外温度差は約 1℃より小さくなるか、負の値となったことがわかる。これは、風速が比較的大きいと、ミストの気化熱がより拡散されやすくなるためであり、さらに、前述のようにテント外へ流されてしまったためと考えられる。

以上、3か月に及ぶ長期間のミスト噴霧実績から、おおよその冷却効果を検証できた。最大の気温降下は約 4.17℃で、1℃以上の気温降下が得られた噴霧時間数は約 150 時間あった。また、風速が約 2.0m/s 以上となると気温降下は 1℃未満となったことがわかった。

3. ミストシステム冷却効果の実測 (その2)

3. 1 調査対象システムの概要

N大学の経済学部部にドライミストシステムが導入された。図6にシステムの導入されたエリアの敷地平面図を示す。ドライミストは3つの棟の建物(図中のA~C棟)に“コ”字型に囲まれている中庭の南側通路に設置された。この通路は建物間の連絡通路となっており、ひとの往来が比較的多い場所である。しかし、建物の配置形状から通風が少なく、熱がこもりやすい環境にある。そこで、夏の暑熱環境緩和を目的にドライミストが試験的に導入されることとなった。

導入されたドライミストシステムは、88個の一流体ノズル^{註1)}と水圧送ポンプ(750W)からなっており、ON/OFFスイッチの操作により発停する簡単なシステムである。また、ノズルは噴霧粒径 24.5μm^{註2)}のノズルが用いられ、上記連絡通路の地上 2.4mの屋根下に設置された。図7にノズルの設置位置を示す。ノズルの配置間隔は 45cm~60cm、直下向きに設置されており、ノズルの噴霧角(約 50°)と設置高さ、そして、肌や衣服に水滴が多少ついても許容できる環境であることなどを考慮して決定している。ノズル1個当たりの噴霧水量は毎分 40mlであり、連絡通路の延べ面積 93.6m²に対する総噴霧水量は毎分約 3.5ℓとなる。この水量は連絡通路部において全量蒸発されると仮定すると約 1,440W/m³の蒸発冷却熱を与えることとなる。

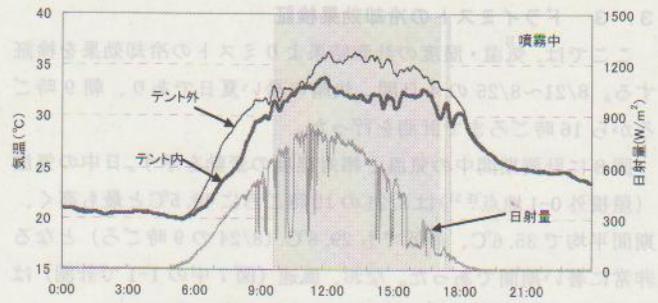


図3 7月8日のテント内外温度の一日変動

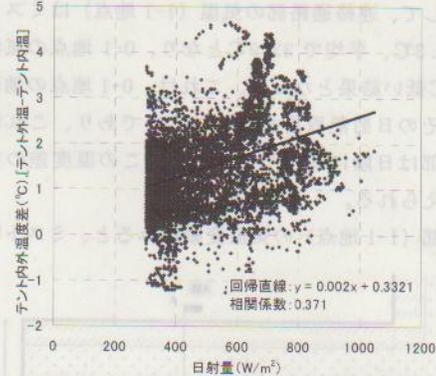


図4 日射量とテント内外温度差相関

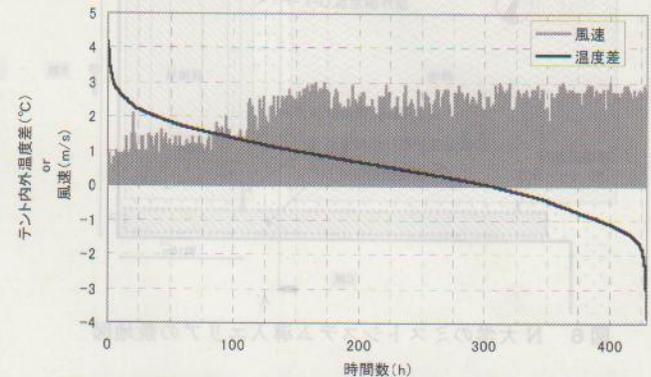


図5 計測期間中のテント内外温度差と風速との関係

3. 2 実測調査概要

ドライミストの冷却効果検証とその影響範囲を検討するために、表3に示す項目の計測を行った。まず、ドライミストの冷却効果を検証するために、8/21~8/25間に連絡通路部内外において空気温・湿度、風速、グローブ温度を計測した。また、これら以外に日射量についても観測を行った。連絡通路部のB棟始端から約 15m地点の通路部、高さ約 1.2m地点(図6、図7中のI-1点)、そしてノズルから約 20m離れた場所(図6、図7中のO-1点)において、空気温・湿度を計測した。また、ミストの冷却効果の検証を容易にするために約 1時間置きにミスト噴霧の実施・停止を繰り返した。

さらにドライミスト冷却効果の影響範囲を調べるために、図7に示すようにノズル近傍(前方 1.5m×下方 2.4m)に対して格子状に熱電対を設置(30cm間隔の 35ポイント)し、温度計測を行った。また、計測点を減らすために、この計測期間のみ、ノズルの噴霧向きを直下から 45°に調整し、ノズル前方の温度計測を行った。計測間隔は 1秒おきとし、1分噴霧、約 3分停止の運用を繰り返しながら測定を行った。

3.3 ドライミストの冷却効果検証

ここでは、気温・湿度の計測結果よりミストの冷却効果を検証する。8/21～8/25の4日間、快晴の暑い夏日であり、朝9時ごろから16時ごろまで計測を行った。

図8に計測期間中の気温と相対湿度の変動を示す。日中の気温（屋根外0-1地点^{注3)}は8/21の13時ごろに40.5℃と最も高く、期間平均で35.6℃、最低でも29.8℃（8/24の9時ごろ）となる非常に暑い期間であった。なお、風速（図7中のI-1で計測）は期間中平均で約0.3m/s（最大0.9m/s）となった。

これに対して、連絡通路部の気温（I-1地点）はミスト停止時に最大で37.3℃、平均で33.9℃となり、0-1地点の気温より平均で約1.7℃低い結果となった。これは、0-1地点の地面に日射があたってその日射熱取得を拾ったためであり、これに対してI-1の通路部は日陰になっていたことがこの温度差の主な原因であると考えられる。

連絡通路部（I-1地点）の気温変動をみると、ミスト噴霧と同

時に気温は降下し、屋根外気温との温度差は大きくなっており、その温度降下の大きさは、2～3℃程度であった。また、ミスト噴霧を停止するとすぐに気温は上昇し、屋根外の気温に近づいた。相対湿度の変動は、ミスト噴霧開始時に上昇し、噴霧停止を停止すると降下しており、その大きさは10～15%程度であった。

表3 N大学のシステムに関する計測概要

計測項目	計測内容	計測期間
空気温・湿度	連絡通路内外 各1点	8/21 ~ 8/25
風速	連絡通路部空気温・湿度計測地点 1点	
グローブ温度	同上	
表面温度	地表面2点、C棟壁面1点、通路部 屋根表面（上・下）各2点	8/9
空気温度	ノズル近傍35点	
風向・風速	ノズル前方約3.5m地点 1点	

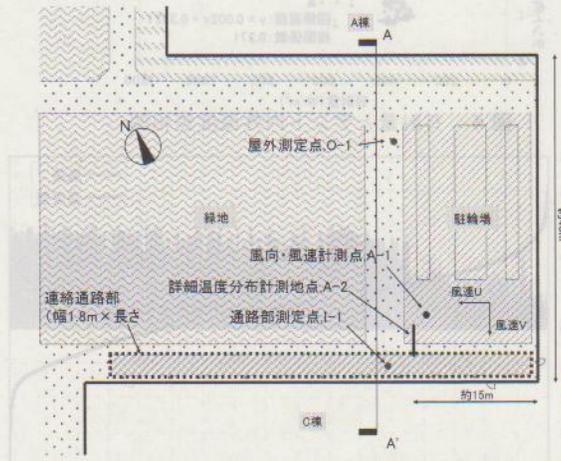


図6 N大学のミストシステム導入エリアの敷地図

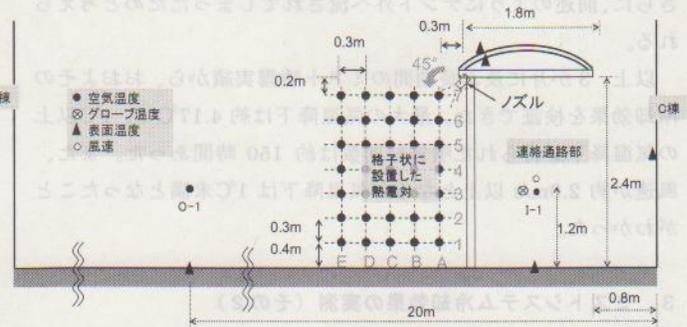


図7 N大学システム導入エリアA-A'断面図

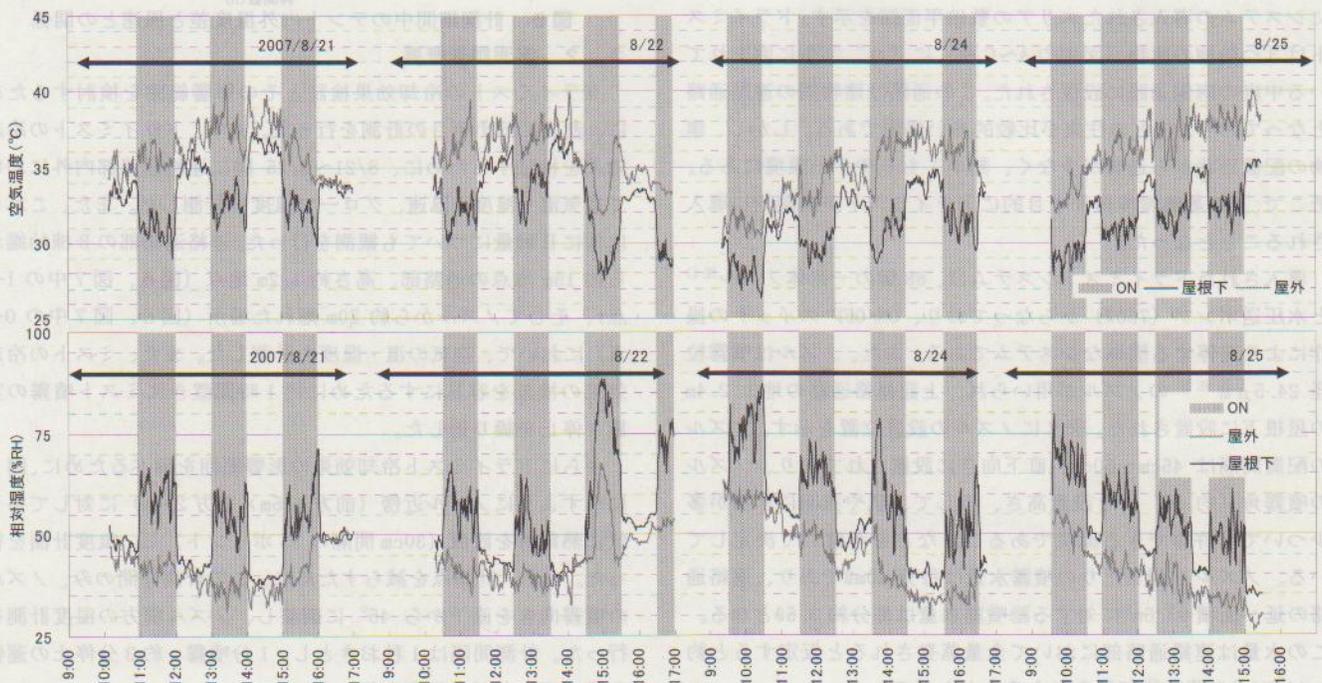
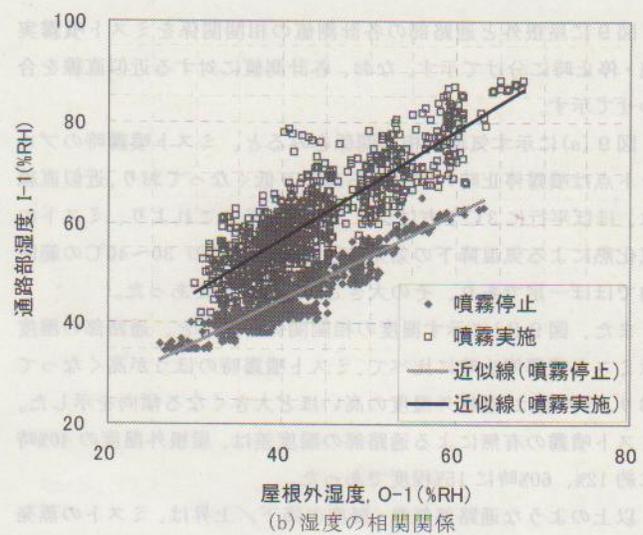
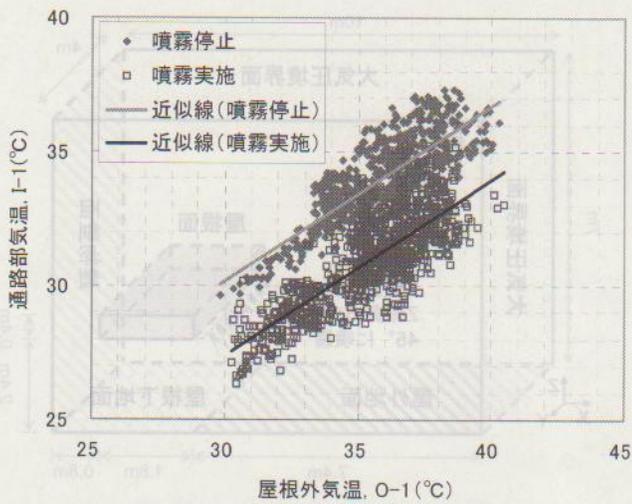


図8 計測期間中の屋根内外気温と相対湿度変動



(a) 気温の相関関係

(b) 湿度の相関関係

図9 屋根内外気温と相対湿度の相関関係

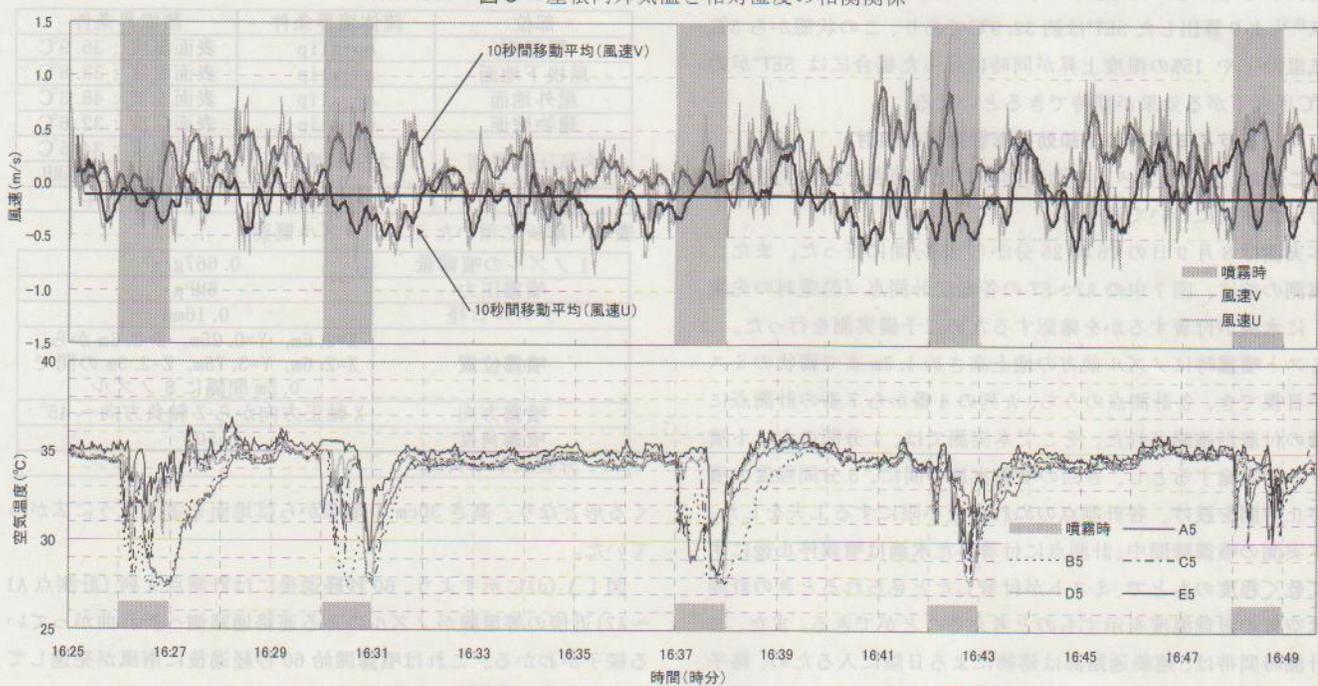
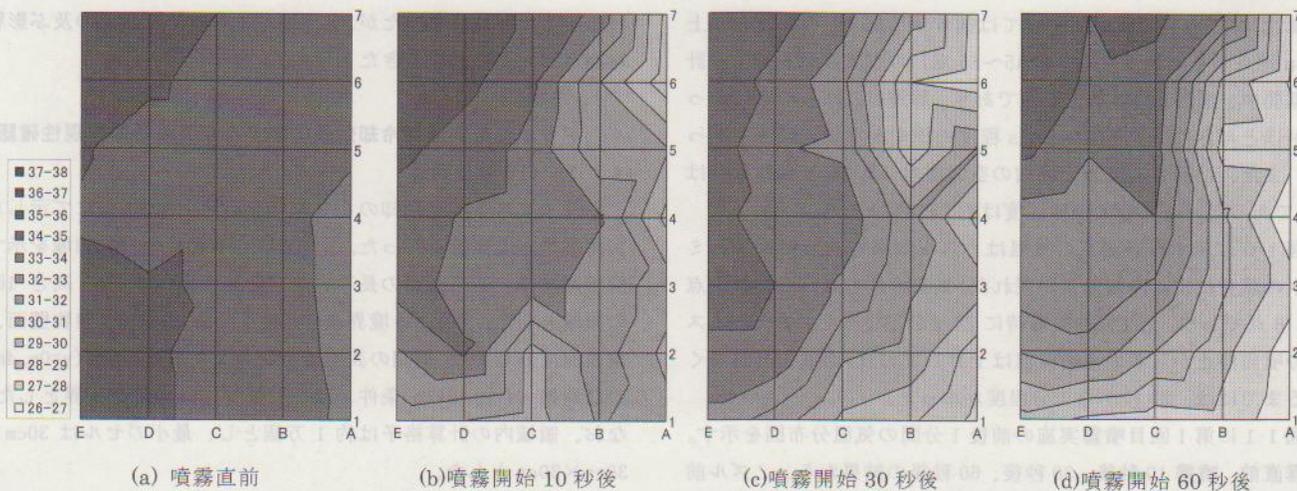


図10 ミスト冷却影響範囲検討の計測期間中における、風速と各気温計測点の温度変動



(a) 噴霧直前

(b) 噴霧開始 10 秒後

(c) 噴霧開始 30 秒後

(d) 噴霧開始 60 秒後

図11 ノズル前方の気温分布詳細 (ミスト噴霧直後から1分後までの温度分布)

図9に屋根外と通路部の各計測値の相関関係をミスト噴霧実施・停止時に分けて示す。なお、各計測値に対する近似直線を合わせて示す。

図9(a)に示す気温の相関関係をみると、ミスト噴霧時のプロット点は噴霧停止時のプロット点より低くなっており、近似直線は、ほぼ平行に3℃下方にシフトしている。これより、ミストの気化熱による気温降下の効果は、屋根外気温の30~40℃の範囲内でほぼ一定であり、その大きさは3℃程度であった。

また、図9(b)に示す湿度の相関関係をみると、通路部の湿度はミスト噴霧停止時に比べて、ミスト噴霧時のほうが高くなっており、その差は、屋根外湿度の高いほど大きくなる傾向を示した。ミスト噴霧の有無による通路部の湿度差は、屋根外湿度の40%時に約12%、60%時に15%程度であった。

以上のような通路部気温・湿度の降下/上昇は、ミストの蒸発冷却によるものといえる。また、ミスト噴霧停止時の平均的な状態点^{註4)}より算出したSET*は約32.9℃であり、この状態から3℃の気温降下や15%の湿度上昇が同時に起った場合にはSET*が約0.5℃程度下がる効果が期待できるといえる。

3.4 ドライミストの冷却効果影響範囲の検討

ここでは、ドライミストの冷却効果の及ぶ範囲を検討するために行った実測について述べる。

本実測は8月9日の16時25分から25分間に行った。また、本実測の前に、図7中のA1~E7の各温度計測点(熱電対の先端部)に水滴が付着するかを確認するために予備実測を行った。

ミスト噴霧時にノズル前方の地上高さ約1.3mまで霧状のミストが目視でき、各計測点のうち、A列の4番から7番の計測点に水滴の付着が確認された。そこで本実測では、1分間のミスト噴霧を5回実施するとし、各回の噴霧実施の間に、3分間程度の噴霧停止時間を設け、各計測点のぬれを最小限にする工夫をした。

本実測の噴霧時間中、計測点に付着した水滴は噴霧停止後にすぐに乾く程度のもので、ミストが付着したと見られるときの計測値は空気の湿球温度を示すものと考えられることができる。また、この計測時間帯は、連絡通路部は建物による日陰に入るため、格子状に設置した熱電対に直達日射は当たらなかった。

図10に上記計測期間の結果を示す。なお、各ベクトル(風速U, 風速V: これらの風向については図6中に記す)の風速と地上1.6m地点の各計測点(図7のA5~E5点)の温度変動を示す。計測期間中、南西・南風が支配的であり、風速は、ばらつきはあったがほとんどの時間帯で0.5m/s程度の穏やかな気流環境であった。また、1回目の噴霧実施前の空気温度34.4℃、相対湿度は49%であった。この時の湿球温度は約25.3℃となる。

図10に示す各計測点の気温はミスト噴霧と同時に低下しミストの蒸発による冷却効果が現れた。気温の最も低かった計測点は、B点であり、1回目の噴霧時に27.2℃となった。また、ミストの噴霧停止から各地点の気温は上昇しており、温度上昇がなくなるまでには、30秒から1分程度かかった。

図11に第1回目噴霧実施の前後1分間の気温分布図を示す。噴霧直前、噴霧10秒後、30秒後、60秒後の結果から、ノズル前方の計測点の気温がもっとも低く、その範囲はノズル前方60cmまで及んだ。また、気温の低い領域はほぼ垂直に地面まで降りて

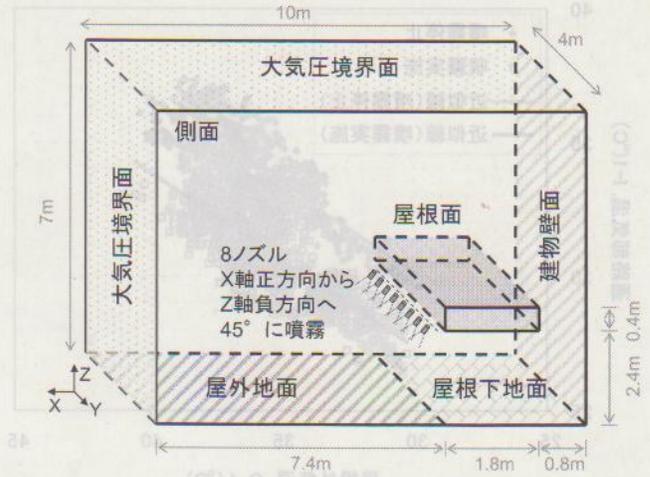


図12 CFD解析領域とモデル概要

表4 解析領域の境界条件

部位	流体境界条件	熱境界条件
屋根面	no-slip	表面温度: 36.9℃
屋根下地面	no-slip	表面温度: 33.8℃
屋外地面	no-slip	表面温度: 48.3℃
建物壁面	no-slip	表面温度: 32.6℃
大気圧境界面	大気圧境界	外気温度: 34.5℃ 外気湿度: 49%RH
側面	free-slip	断熱条件

表5 解析に用いたミストノズル概要

1ノズルの噴霧量	0.667g/s
噴霧圧力	6MPa
ノズル口径	0.16mm
噴霧位置	X=2.6m, Y=0.25m, Z=2.3mから、 X=2.6m, Y=3.75m, Z=2.3mの間で 0.5m間隔に8ノズル
噴霧方向	X軸正方向からZ軸負方向へ45°
噴霧角度	50°
分裂広がり角度	6°

くる形となり、高さ30cmの地点からは地面を這うように広がっていた。

図11(d)に示すよう、60秒経過後には計測点A列(計測点A1~A7)近傍の等温線がノズルのある連絡通路側へ折れ曲がっている様子がわかる。これは噴霧開始60秒経過後に南風が発達していた(図10上図参照)ことが原因として考えられる。

以上のことより、気流による乱れなど非定常な外乱に影響を受ける中での計測であったが、ドライミストの冷却効果の及ぶ影響範囲がおおよそ把握できたといえる。

4. ドライミスト蒸発冷却効果に関するCFD解析の再現性確認

4.1 CFD解析概要

ドライミスト蒸発冷却のCFD解析を行い、3.4節にて示した実測結果との比較を行った。図12にCFD解析の対象領域を示す。解析領域は、連絡通路の長手方向、幅4m、奥行き7m、高さ10mの領域とした。また、各境界条件(表4)は、屋根面、建物壁面、地表面に対しては、実測の表面温度を与えており、側面(y=0m, 4m)には断熱・free-slip条件、ほかの境界には大気圧境界とした。なお、領域内の計算格子は約1万個とし、最小のセルは30cm×30cm×30cmとした。

解析には数値流体解析の汎用ソフトであるFluent6.3を用い、計算領域内ではミスト粒子(分散相)と空気(連続相)の間で運

動量、熱移動、蒸発に伴う質量変化を考慮している。⁵⁾⁶⁾ (付録1参照) また、水の蒸発潜熱は 2.26MJ/kg、湿度拡散係数は $2.88 \times 10^{-6} \text{m}^2/\text{s}$ を与えた。

ノズルは渦巻き噴射弁⁷⁾ (付録2参照) を用いるとし、表5に示す噴霧条件を与えた。これにより解析領域内に放出されるミストの噴霧粒径は表5に示すノズルの各条件とロジック・ラムラー式(付録3参照)より与えており、ザウター平均粒径で 23.7 μm となる。また、乱流モデルは標準 $k-\epsilon$ モデルを採用した。

解析領域内の空気温・湿度の初期条件は、8/9の16時25分の実測瞬時値を与えた。また、ミスト冷却効果の検討を容易にするために、領域内気流の初期状態は無風とした。ミストの噴霧停止状態で120秒間の助走計算を行った後、60秒間ミストを噴霧するとした。

4.2 CFD解析の再現性確認

図13にノズル近傍(図12中の左から4つ目のノズル, $y=4\text{m}$)の温度分布の解析結果を示す。なお、ミスト噴霧開始から10秒、30秒、60秒の温度分布を図11と同様に示す。ミスト噴霧直前には 34.5°Cと均一の温度分布であったが、噴霧開始10秒経過後はノズル前方に気温降下が現れた。30秒経過後には筋状の等温線が地面まで到達しており、冷気が地面に向かって降りてくる様子が再現できている。60秒経過後には地面に到達した冷気が地面を這うように広がっていく様子が見えており、図11に示した計測結果と同様に、右上のノズル位置からきた冷気の挙動がうまく再現できた。

図14にミスト噴霧開始60秒経過後における地上高さ1.6m地点(図7のA5~E5点)の気温の計測値と解析値を示す。また、解析結果の乾球温度と相対湿度を用いて算出した湿球温度を合わせて示す。この計測点は、風による外乱を最も少なく受けたと考えられる計測ポイントである。

解析値と計測値との温度差は1°C程度でやや大きかったが、A点からE点の温度分布は、計測結果と比較的よい一致を示しており、ミストの蒸発による温度降下が再現されていることが確認できる。

また、解析値の湿球温度をみると、各ポイントで 25°C程度となっており、各ポイントの計測値はこれに比べて高いことがわかる。このことは、計測点、A5~E5点にはミスト噴霧時に水滴が付着してないことを示唆するものと考えられる。よって、図11に示したノズル近傍の温度分布は、一部の計測ポイント(A6, A7点)を除いて、空気の乾球温度を表しているものといえる。

以上、CFD解析を用いてミストの冷却効果の再現性を確認し、ミストの気化熱による冷気の拡散挙動がおおよそ再現できることが示された。

5. まとめ

以下にまとめと結果を述べる。

①2005年愛知博覧会の会場内に設置されたドライミストシステムの冷却効果が検証された。ミストの蒸発による冷却効果は最大で約 4.2°Cの気温降下をもたらしており、噴霧時間の443時間のうち、約150時間は1°C以上の気温降下が得られた。

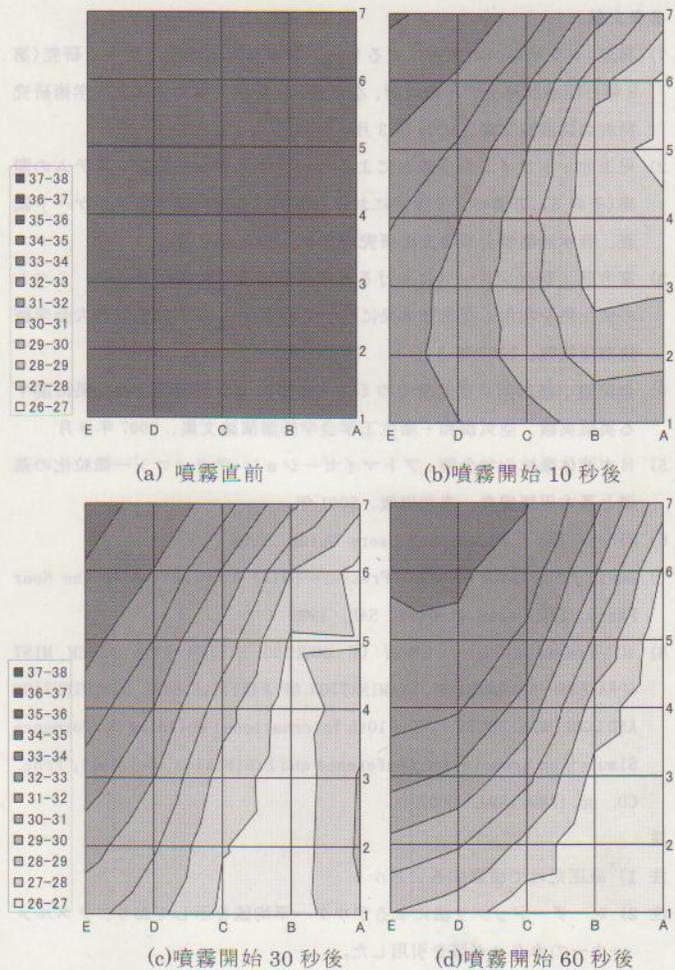


図13 ノズル前方の気温分布詳細
(ミスト噴霧直後から1分後までの温度分布)

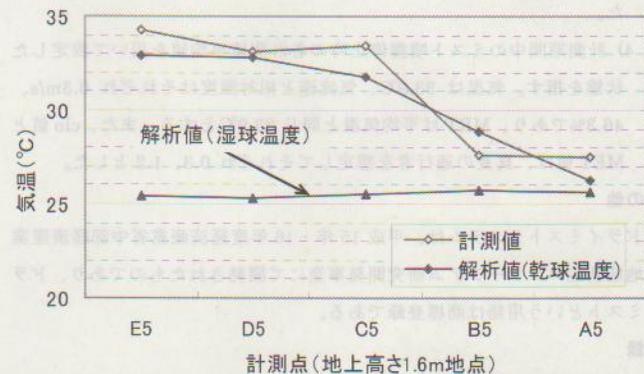


図14 計測値と解析値の温度比較(噴霧開始60秒経過後)

②N大学の校舎内に設置されたドライミストシステムの計測結果をもとに、ミストの冷却効果を評価し、その影響範囲の検討を行った。ミストによる冷却効果は、地上1.3mの計測点において、3°C程度の気温降下が得られる。また、これと同時に15%程度の相対湿度の上昇をもたらした。

③CFD解析手法を用いて、ミストの蒸発により形成される冷気の拡散挙動を再現し、その再現性を検証した。その結果、ミストの形成する冷気がノズル手前で生成され地面に降下する挙動がうまく再現できた。

今後、これらの結果を踏まえて、ミストシステムの設計や制御に関するシミュレーションを行う予定である。

参考文献

- 1) 林他：ドライミスト散布によるヒートアイランド抑制に関する研究(第8報) 簡易計算モデルの検討、空気調和・衛生工学会中部支部学術研究発表会講演論文集、2006年3月
- 2) 児玉他：ドライミスト散布によるヒートアイランド抑制システムの開発(その5) 万博パビリオンにおける温熱快適性に関するアンケート調査、日本建築学会東海支部研究報告集、2006年2月
- 3) 著方他：駅コンコースにおける温熱環境の改善に関する研究- ミストの気化熱を利用した冷却効果についての実験-、日本建築学会大会学術講演梗概集、2005年8月
- 4) 金田他：都市街路空間内でのミスト噴霧による熱環境改善効果に関する実証実験、空気調和・衛生工学会学術講演論文集、2007年9月
- 5) 日本液体微粒化学会編：アトマイゼーション・テクノロジー微粒化の基礎と基本用語辞典、森北出版、2001年
- 6) Fluent Inc.：Fluent 6.3 Users Guide, 2006
- 7) David P. Schmidt et al.：Pressure-Swirl Atomization in the Near Field, SAE Paper 01-0496, SAE, 1999
- 8) H. Yamada et al.：STUDY OF COOLING SYSTEM WITH WATER MIST SPRAYERS—FUNDAMENTAL EXAMINATION OF PARTICLE SIZE DISTRIBUTION AND COOLING EFFECTS—, The 10th International Building Performance Simulation Association Conference and Exhibition (Beijing), Proc. CD, pp.1389-1394, 2007.9

注

- 1) 液圧だけで噴霧するノズル
- 2) レーザードップラ法によるザウター平均値を示しており、ノズルメーカーのカタログ値を引用した。
- 3) 図6中のO-1点：ドライミストの影響の及ばないエリアであり、日よけを設置して太陽の直射光がセンサーに当たらないように配慮した。
- 4) 計測期間中のミスト噴霧停止時の各計測値平均値を用いて設定した状態を指す。気温は33.9℃、気流速と相対湿度はそれぞれ0.3m/s、46.3%であり、MRTは平均気温と同じ33.9℃とする。また、clo値とMET値は、真夏の通行者を想定してそれぞれ0.3、1.2とした。

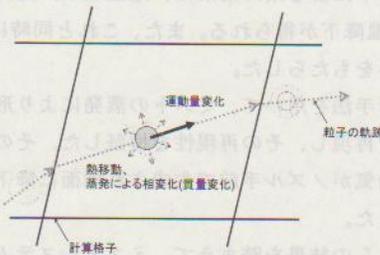
その他

ドライミストシステムは、平成15年・16年度経済産業省中部経済産業局地域新生コンソーシアム研究開発事業にて開発されたものであり、ドライミストという用語は商標登録である。

付録

1) DPM (分散相モデル)

粒子と空気との熱移動は対流伝熱、蒸発に伴う潜熱を考慮し、各セル内の粒子と空気相の運動量から粒子軌跡を算出している。以下に分散相モデルの概念図と支配方程式を示す。



図A1 分散相モデル概念図

・ミスト粒子に対する運動方程式

$$\frac{du_p}{dt} = \frac{18\mu_p}{\rho_p d_p^2} \frac{C_D \text{Re}}{24} (u_g - u_p) + \frac{g(\rho_p - \rho_g)}{\rho_p} + F_x$$

・ミストと空気間の熱伝達、ミスト相変化による熱授受に関する収支式

$$m_p c_p \frac{dT_p}{dt} = k_h A_p (T_g - T_p) + \frac{dm_p}{dt} l$$

記号 μ : 粘性係数 [Pa・s], d : 直径 [m], C_D : 抗力係数 [-]

Re : レイノルズ数 [-], F_x : 粒子の単位質量あたりの仮想質量力 [m/s²]

u : 速度 [m/s], g : 重力加速度 [m/s²], k_h : 熱伝達率 [W/(m²・K)]

l : 蒸発潜熱 [kJ/kg], m : 質量 [kg], t : 時間 [s], T : 温度 [K]

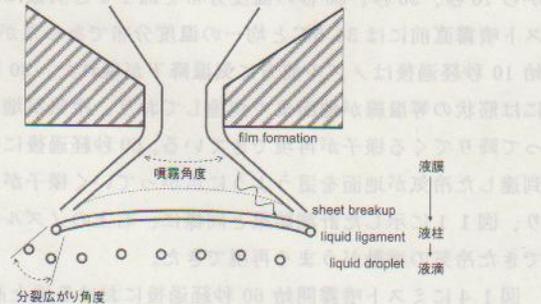
ρ : 密度 [kg/m³], A : 表面積 [m²], c : 比熱 [kJ/(kg・K)]

添え字 g : 周囲空気, p : 粒子

2) 渦巻き噴射弁

一流体ノズルの一種であり、ノズル内で旋回流を発生させ、ミストを噴霧するものである。以下にミストの形成過程を示す。

下図に示すように、水圧送ポンプより圧送された水流はノズル内で旋回流となり、ノズルから噴出すると同時に薄い液膜を形成する。また、液膜上には波動が生じ、これによって液柱、液滴へ分裂していき、ミストとなる。



図A2 渦巻き噴射弁における液滴形成過程概念図

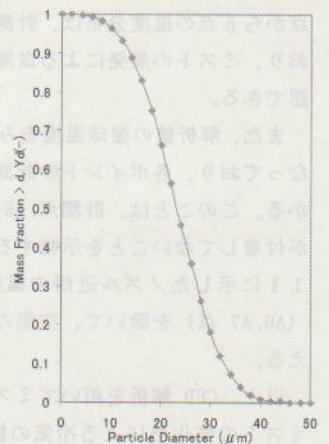
3) ロジン・ラムラーの式

噴霧の粒径分布の評価に多用されるもので、体積基準の累積分布関数に指数法則を適用して粒径分布を与えるものである。

$$Y_d = \exp\left(-\left(\frac{d}{\bar{d}}\right)^n\right)$$

ここで、 d は液滴の粒径であり、 \bar{d} は代表粒径、 n は分散を表す定数である。図A3にロジン・ラムラー式による分布関数例を示す。

本解析ではロジン・ラムラー式の分布に従い、代表粒径は表5の条件より算出される体積平均粒径を与え、分散定数は3.5を用いて粒径分布を与える。これより、解析領域内の生成されるミストはザウター平均粒径で23.7 μ mとなるが、これはカタログ引用値よりやや小さい。しかし、本解析では以下の2点を考慮



図A3 ロジン・ラムラーの式による分布関数

して上記の解析条件を与えた解析を行うこととした。

①カタログ値はレーザードップラ法による計測値であり、実際の粒径より大きい値となる傾向があること。⁵⁾

②既往の研究結果を踏まえて、0.8 μ m程度の違いによる冷却効果への影響は無視できるほど小さいと判断されること。⁶⁾

(2008年4月10日原稿受理、2008年8月4日採用決定)