

屋内空間を対象としたミスト噴霧とその蒸発冷却効果に関する研究



三浦 寿幸 *1

木下 洋一 *2 岡本 茂 *3
 小杉 城久 *4 板谷 俊郎 *1
 岩田 直樹 *5 細川 幸哉 *6
 神野 兼次 *7 栗木 茂 *1
 宅間 真 *8 鈴木 孝彦 *1

概 要

近年、屋外や半戸外空間において微小粒径のミストを噴霧し、夏の暑さを緩和する技術の適用事例が増えてきた。この技術は水が蒸発する際に周囲から奪う気化熱を利用するものであり、その特徴は小さなエネルギーで大きな冷却効果が得られること、ミストが人にあっても濡れにくいことである。ヒートアイランド現象などの環境問題がますます深刻化していく状況にあって、こうした水の気化熱の有効利用は持続可能なエネルギー利用のひとつとして注目されている。

本報告は、この技術の応用として、屋外・半戸外空間ではなく人が在室する屋内空間に着目し、冷房がなく作業環境改善の余地のある工場などへの適用を想定して行った実験および数値解析について述べたものである。

Study on Cooling System by Using Sprayed Mist to Large Indoor Space

Toshiyuki MIURA*1 Youichi KINOSITA*2
 Sigeru OKAMOTO*3 Shirohisa KOSUGI*4
 Toshirou ITATANI*1 Naoki IWATA*5
 Kouya HOSOKAWA*6 Kenji ZINNO*7
 Shigeru KURIKI*2 Makoto TAKUMA*8
 Takahiko SUZUKI*1

Recently the cooling system by using sprayed very small mist outdoors and semi-outdoors is frequently employed for relieving from the hot of summer. The latent heat of vaporization effectively operates on the system. The characteristics of the system are that a little energy efficiently products cooling effect and that most of us do not get wet by the mist. The effect of environmental impact has been becoming worse like heat island phenomena and the use of the heat of vaporization is catching lots of publicity as sustainable energy.

In this paper the results of experiment and CFD simulation are described which is assuming the employment of the cooling system by using sprayed mist to the large indoor space like the factory that is very hot and don't have air-conditioning system.

*1 技術研究所 *2 設計管理部 *3 東北支店建築設計室 *4 エンジニアリング部 *5 東京支店建築設計室 *6 設備設計部
 *7 建築設備部 *8 建築工事技術部
 *1 Technical Research Institute *2 Design Management Department *3 Tohoku Branch *4 Engineering Department
 *5 Tokyo Branch *6 Mechanical and Electrical Design Department *7 Mechanical and Electrical Engineering Department
 *8 Architectural Engineering Department

屋内空間を対象としたミスト噴霧とその蒸発冷却効果に関する研究

三浦 寿幸*1 木下 洋一*2 岡本 茂*3
 小杉 城久*4 板谷 俊郎*1 岩田 直樹*5
 細川 幸哉*6 神野 兼次*7 栗木 茂*1
 宅間 真*8 鈴木 孝彦*1

1. はじめに

近年、屋外や半戸外空間において微小粒径のミストを噴霧し、夏の暑さを緩和する技術の適用事例が増えてきた。この技術は水が蒸発する際に周囲から奪う気化熱（蒸発冷却熱）を利用するものであり、その特徴は小さなエネルギーで大きな冷却効果が得られること、ミストが人にあたって濡れにくいことである。ヒートアイランド現象などの環境問題がますます深刻化していく状況にあって、こうした水の気化熱の有効利用は持続可能なエネルギー利用のひとつとして注目されている。

これまでのミストの蒸発冷却による温熱環境改善を目的とした研究を調べてみると、そのほとんどが屋外や半戸外空間を対象としたものであり、人が在室する屋内を対象とした研究は少ない。そこで、著者らは作業環境（温熱）の改善余地のある工場などを対象としたミスト噴霧利用を前提に、実大実験施設を用いた蒸発冷却効果に関する実験および数値シミュレーションについての検討を行ったので報告する。

2. 実験概要

実験に使用した施設を写真-1～2、その平・断面図を図-1に示す。床はコンクリート仕上げで、骨組みを仮設材で製作して外皮および床面を防災シートで覆っている。床面積は40.5m²、天井高さ（最大）は6.8mである。

表-1 主な実験パターン

実験ケース	噴霧方法	運転方法	ノズル数	強制換気
CASE-1	噴霧ノズル 単独	連続	2	有り
CASE-2	〃	間欠	2	〃
CASE-3	〃	連続	2	なし
CASE-4	〃	間欠	2	〃
CASE-5	送風ファン 併用	連続	4	有り
CASE-6	〃	連続	4	なし
CASE-7	〃	連続	8	有り

表-2 測定機器、センサー等

測定項目	測定機器・センサー	測定点数	備考
空気温度	T型熱電対 (0.32φ)	73点	噴霧エリア内 (72点)、屋外 (1)
床表面温度	T型熱電対 (0.32φ)	1点	室内中央
空気湿度	静電容量式湿度計	5点	噴霧エリア内 (4点)、屋外 (1)
データロガー			測定間隔：5秒



写真-1 実験施設外観 写真-2 実験施設内部

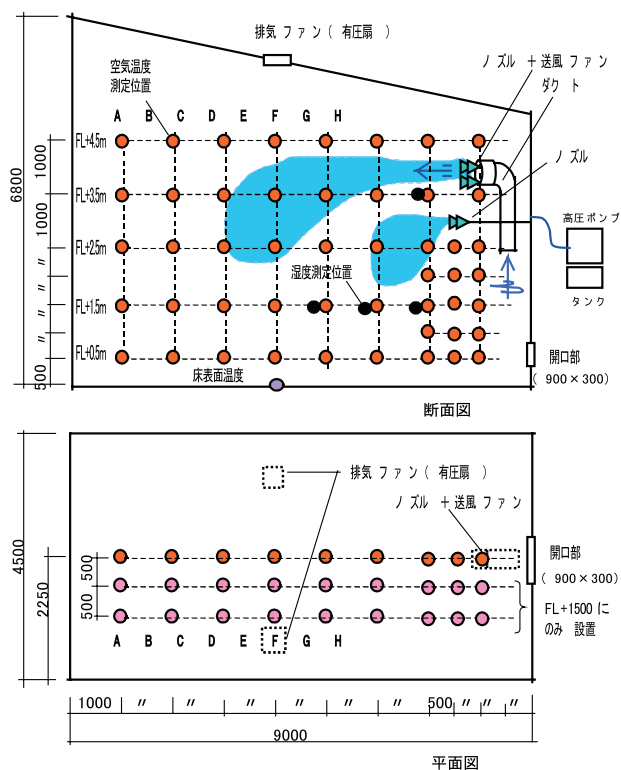


図-1 実験施設の平・断面図と測定点

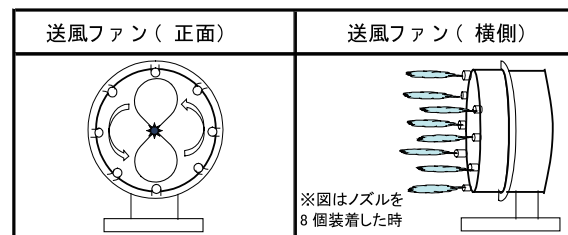


図-2 ノズル付ファン

*1 技術研究所 *2 設計管理部 *3 東北支店建築設計室 *4 エンジニアリング部 *5 東京支店建築設計室 *6 設備設計部
 *7 建築設備部 *8 建築工事技術部

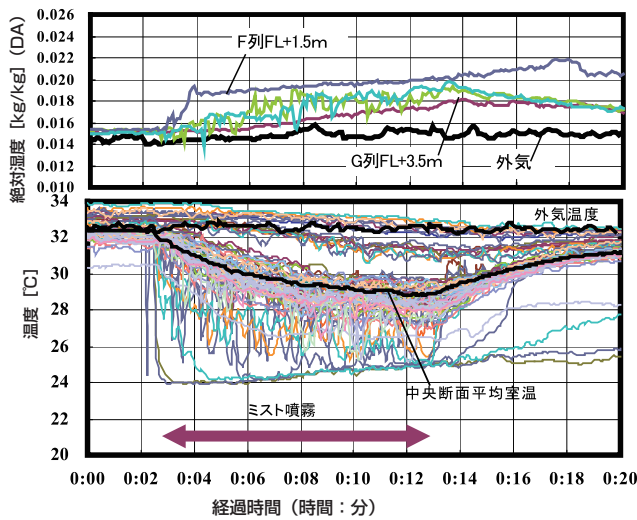


図-3 中央断面の絶対湿度および室温の経時変化 (CASE-1)

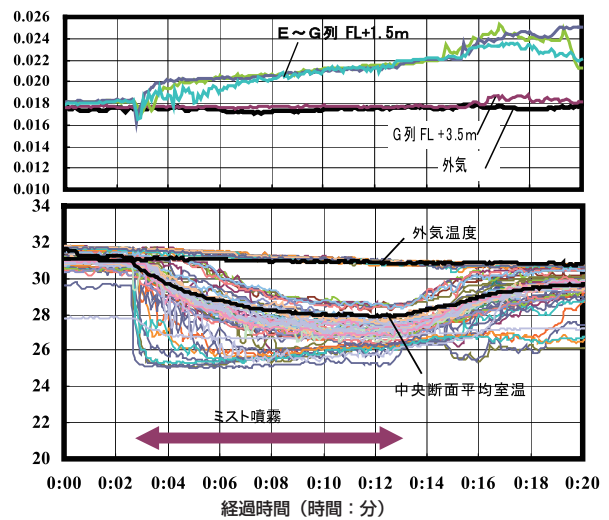


図-4 中央断面の絶対湿度および室温の経時変化 (CASE-3)

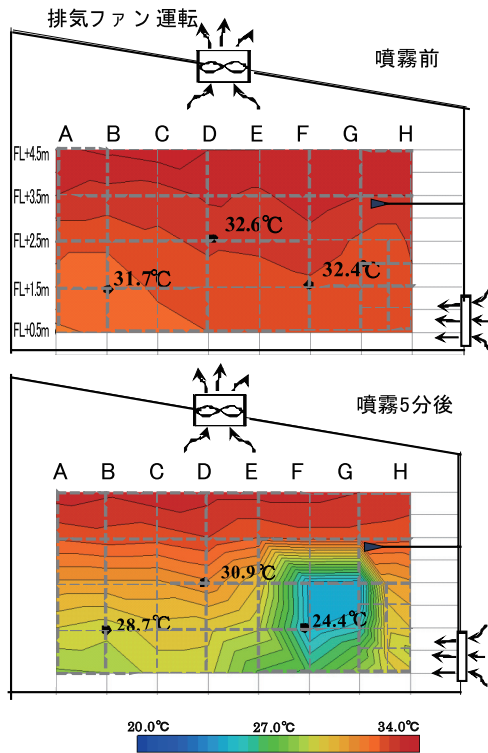


図-5 CASE-1の温度コンター図(噴霧前、噴霧5分後)

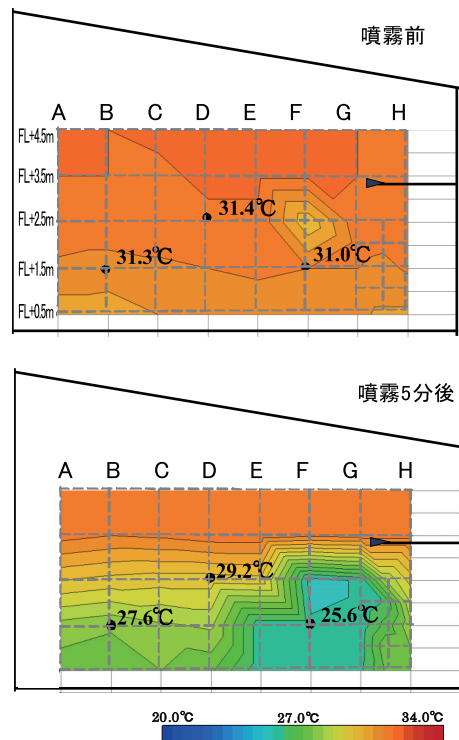


図-6 CASE-3の温度コンター図(噴霧前、噴霧5分後)

主な実験パターンを表-1に示す。ミスト噴霧は次の2つの方法を試みた。①「噴霧ノズル単独」：FL+3.0mの位置2カ所(写真-2)にノズルを設置して噴霧する方法。②「送風ファン併用」：FL+4.0mの位置に図-2示すノズル付ファン及びダクトを設置し、ノズルより噴霧したミストをファンで飛ばす方法。(設置状況は図-1参照)前者はノズル近辺のスポット的冷却、後者は同じスポットではあるがそれよりもやや広いエリアが冷却対象となる。用いたノズル1個の噴霧量は約42ml/分(一流体、ポンプ圧力6MPa、ミスト粒径ザウター平均25 μ m)であり、連続噴霧と間欠噴霧(噴霧30秒、停止60秒の繰返し)を行った。さらに屋根の2カ所に排気ファン(実測風量

400m³/h \times 2)、およびノズル設置側外壁下部に開口部(900 \times 300)を設置して強制換気ができるようにした。空気温度および相対湿度の測定点は図-1に併記した。施設の中央断面を中心に室内空気温度72点、床表面温度1点、室内相対湿度4点、屋外空気温湿度各1点をサンプリング間隔5秒で測定し、別途、水平面全天日射量も測定した。用いた主な計測機器、センサーなどは表-2に示す通りである。実験は2008年8月下旬より9月中旬にかけて行った。

3. 実験結果

3.1 噴霧ノズル単独の場合の実験結果

ノズルからのミスト噴霧方向は、ミストの滞空時間

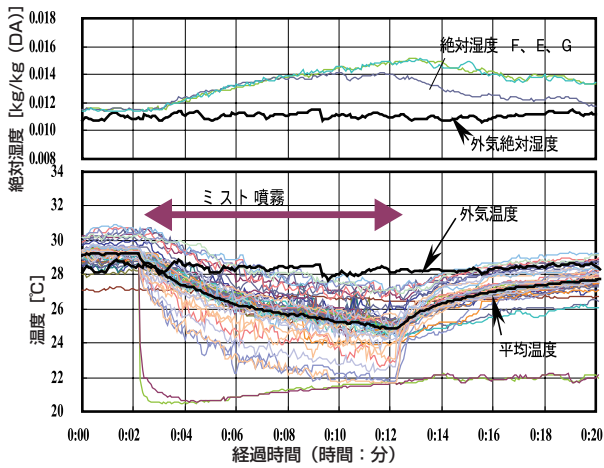


図-7 中央断面の絶対湿度および室温の経時変化

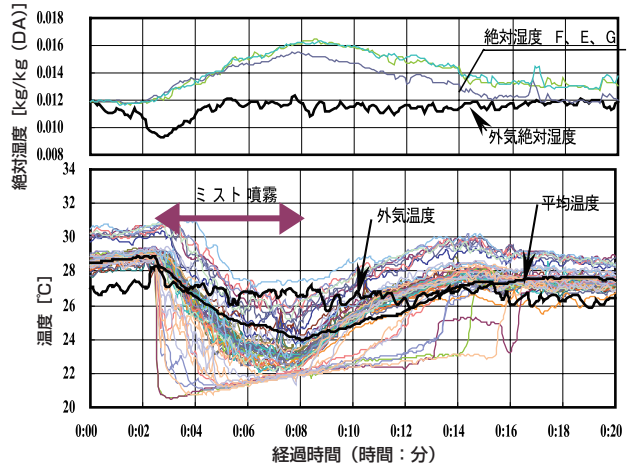


図-8 中央断面の絶対湿度および室温の経時変化

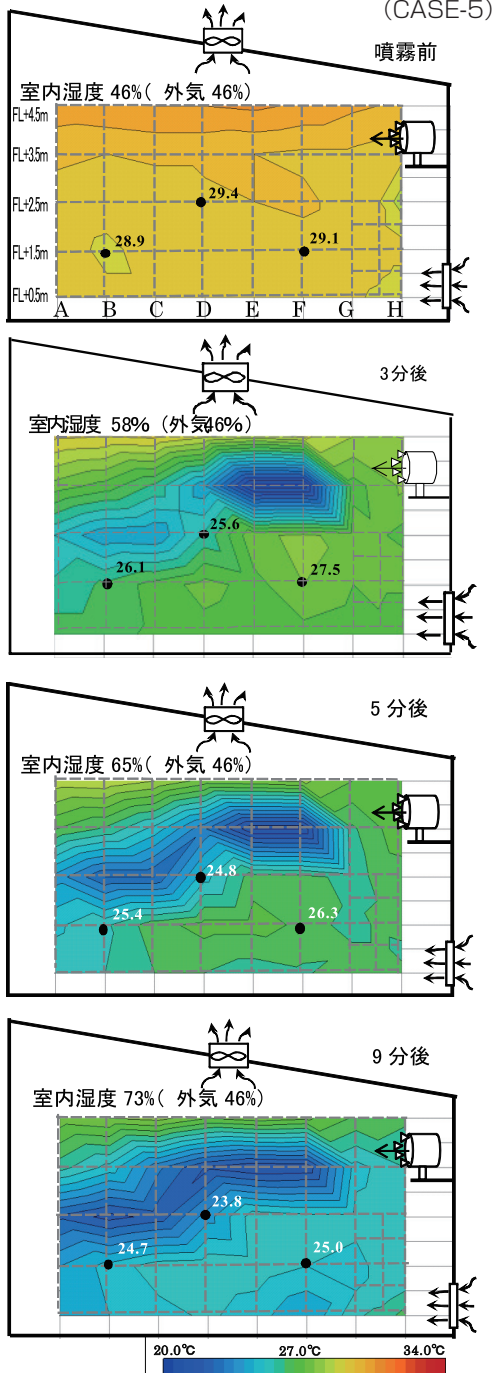


図-9 CASE-5の温度コンター図(噴霧前～噴霧9分後)

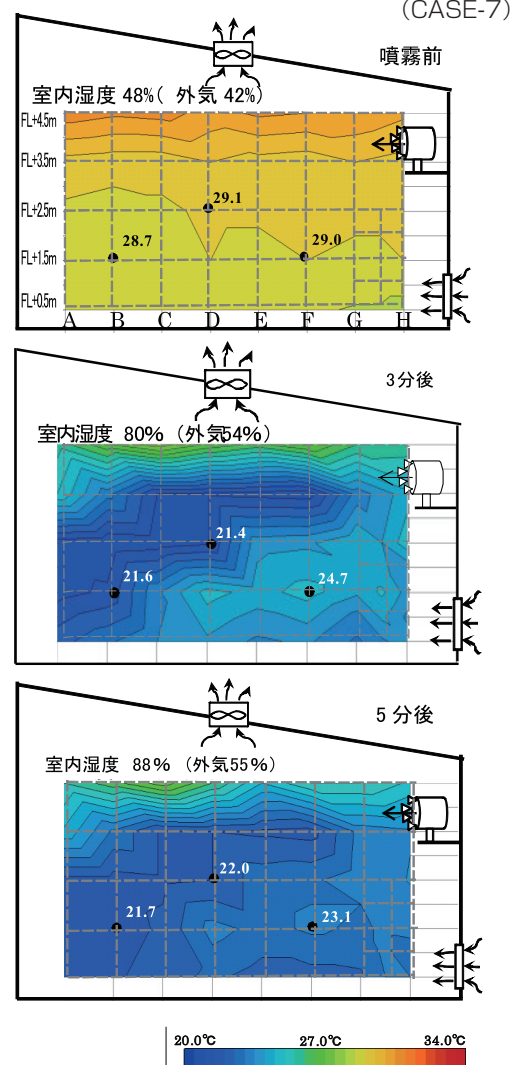


図-10 CASE-7の温度コンター図(噴霧前～噴霧5分後)

表-3 ミスト噴霧前後のSET*の比較 (CASE-5)

	F列 FL+1.5m		
	室内温度 [°C]	相対湿度 [%]	SET* [°C]
噴霧前	29.1	45.5	29.7
噴霧5分後	26.3	64.0	29.2
噴霧9分後	25.0	70.9	28.8

と蒸発効率、床面の濡れを考慮して水平方向とした。CASE-1（連続、強制換気有り）、CASE-3（連続、強制換気なし）の場合の絶対湿度および室温の経時変化を図-3、4に、各中央断面の温度コンター（噴霧前、噴霧5分後）を図-5、6に示す。図-3、4より、室温はミスト噴霧後、ミストの影響を受けにくい測定点（上部）と受け易い測定点（ノズル近辺と下部）の2群を形成していることがわかるが、強制換気のないCASE-3の方が上部温度のばらつきが小さく安定している。絶対湿度に関してはCASE-1でF列FL+1.5mの値が大きい、噴霧後すぐにはほぼ飽和状態（センサーが濡れた）となった。同様にCASE-3ではE～G列FL+1.5mの3点がほぼ飽和状態となるが、強制換気がないために温度成層が保持される傾向となり、ノズルより高いG列のFL+3.5mの位置の絶対湿度はほとんど変化していない。また、両ケースの噴霧前の温湿度状態は異なるが、図-5、6よりミストは水平方向に噴霧された後、いずれも周囲より気化熱を奪いながらダウンフローして冷気が床面に積層する傾向にある。この傾向は強制換気のないCASE-3の方が顕著である。噴霧中に床の濡れを紙タオルで拭いて調べたところ、両ケースともにわずかに濡れが確認されたが、強制換気によりノズル下の床付近に外気が流入するCASE-1の方が濡れるまでの時間は相対的に長かった。また、間欠噴霧としたCASE-2、4は連続噴霧よりも濡れにくく、温度低下も遅いこと、強制換気の有る場合の方がいない場合よりも濡れにくいことを確認した。

3.2 送風ファンを併用した場合の実験結果

ノズル付送風ファンは図-1に示すように、その上端が4mの高さになるように設置し、上下角度は少し下に傾けるようにした。あらかじめ測定したファンの送風量は1620[m³/h]である。以下では、屋根に設置した排気ファンによる強制換気がある場合のCASE-5（ノズル4個）及びCASE-7（ノズル8個）の結果を示す。

実験は、まず送風ファン及び屋根排気ファンを運転し、実験施設内温度がほぼ安定した状態になってからミストを噴霧する手順で行った。

図-7、8にCASE-5とCASE-7の実験施設内中央断面の室温および絶対湿度（E、F、G列、FL+1.5mの高さ3点）の経時変化を示す。これより、ファンなしの場合はミストの影響を受けにくい測定点があったのに対し、ファンを併用した場合には中央断面全体の測定点において温度低下が確認できる。噴霧開始後、徐々に絶対湿度が上昇し始め、中央断面の温度はその平均値で、噴霧5分後にCASE-5は3.3℃、CASE-7は4.5℃低下し、噴霧10分後のCASE-5では4.3℃低下した。ノズルの数（噴霧量）が多いほど絶対湿度の上昇が速く、それに応じた速さで温度低下が期待できることがわかる。また、両ケースともファンの送風によって蒸発効率が高められ、ミストの噴霧開始から停止までの間、床面や壁面での濡れは確認されなかった。

図-9、10に両ケースの中央断面温度コンター図を比較して示す。時間の経過とともに温度が低下してい

く様子が確認できるが、実測した測定点3箇所の相対湿度（E～G列FL+1.5m）の平均値は、CASE-5で5分後に65%、CASE-7では5分後に88%であった。

CASE-5のF列FL+1.5mの温湿度測定データを用いて温熱環境指標であるSET*を算出し、結果を表-3に示す。着衣0.6[clo]、代謝量1.5[met]、気流速度0.3[m/s]と仮定し、気温と相対湿度は実測値、平均輻射温度はすべて噴霧前の気温に等しいとして与えた。これより噴霧5分後に0.5℃、噴霧9分後に0.9℃のSET*の低下が見込まれることがわかるが、噴霧後の実際の平均輻射温度は仮定した値よりも低くなるであろうこと、さらに送風ファンの気流効果加わることなどを考慮する必要がある。

また、今回の湿度の測定点は必ずしも湿度の最も高くなるポイントに設置されているとは言えず、実際の運用においては、適切なポイントで温湿度をモニターし、その状態を判断してミスト噴霧のON、OFFを制御することになる。

4. 数値シミュレーション

ミスト噴霧の効果を予測する方法としてCFD解析がある。実験とCFD解析の結果を比較した既往研究としては、屋外でのミスト噴霧を扱った尹奎英らの研究¹⁾があるが、屋内を対象としたものは見当たらない。ここでは、CFD解析におけるミストの蒸発冷却モデルとして、ミストの移動、蒸発を考慮する圧縮流体のモデル（モデルA）と、非圧縮流体にてミストの蒸発冷却と同等の冷却力を有する冷気を噴出する簡易モデ

表-4 解析条件

共通条件	乱流モデル	標準-ε方程式モデル
	計算間隔	一定時間間隔0.01s（非定常）
	要素数	34×59×60=120,360
	境界条件	床面 25℃
		屋根 相当外気温度 35℃
		壁 高さ0～1.5m 28.5℃
		高さ1.5～4m 30.5℃、
		高さ4～7m 32.5℃
		壁応力境界 対数則条件
		熱伝達係数 9.3w/(m ² K)
モデルA	ファンの高さ	H=4m（上端）
	解析流体	圧縮流体
	圧力基準値	101325Pa
	質量分率	窒素 0.7591、酸素 0.2291
		水蒸気 0.0118
		（温度 30℃、湿度 40%）
	粒子質量	0.0007kg/s（42ml/min）
	粒径分布	抜山-棚沢分布（α=7、β=8）
	反発係数	1.0
	ザウター平均直径	25 μm
	水 温度、密度	40℃、1000kg/m ³
	広がり角度	± 25°
	ミスト噴出速度	2m/s
	蒸発条件	蒸気圧：Antoineの式
		log10(Pvap)=6.2096-2354.7/(T+7.559)
モデルB	ノズル数	4個
	ファン風量	27m ³ /min
	解析流体	非圧縮流体
	吹出し温度	16.7℃
	吹出し面積	707.56cm ²

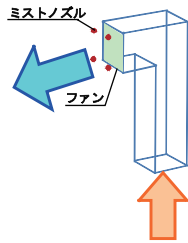


図-11 ノズル付ファンのモデル化

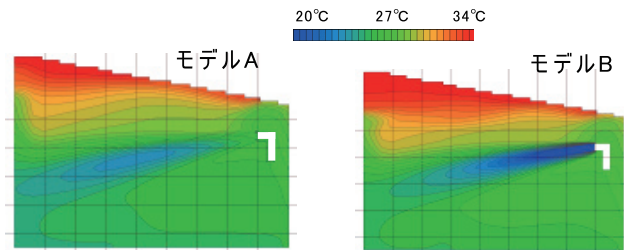


図-12 ミスト噴霧3分後の解析結果

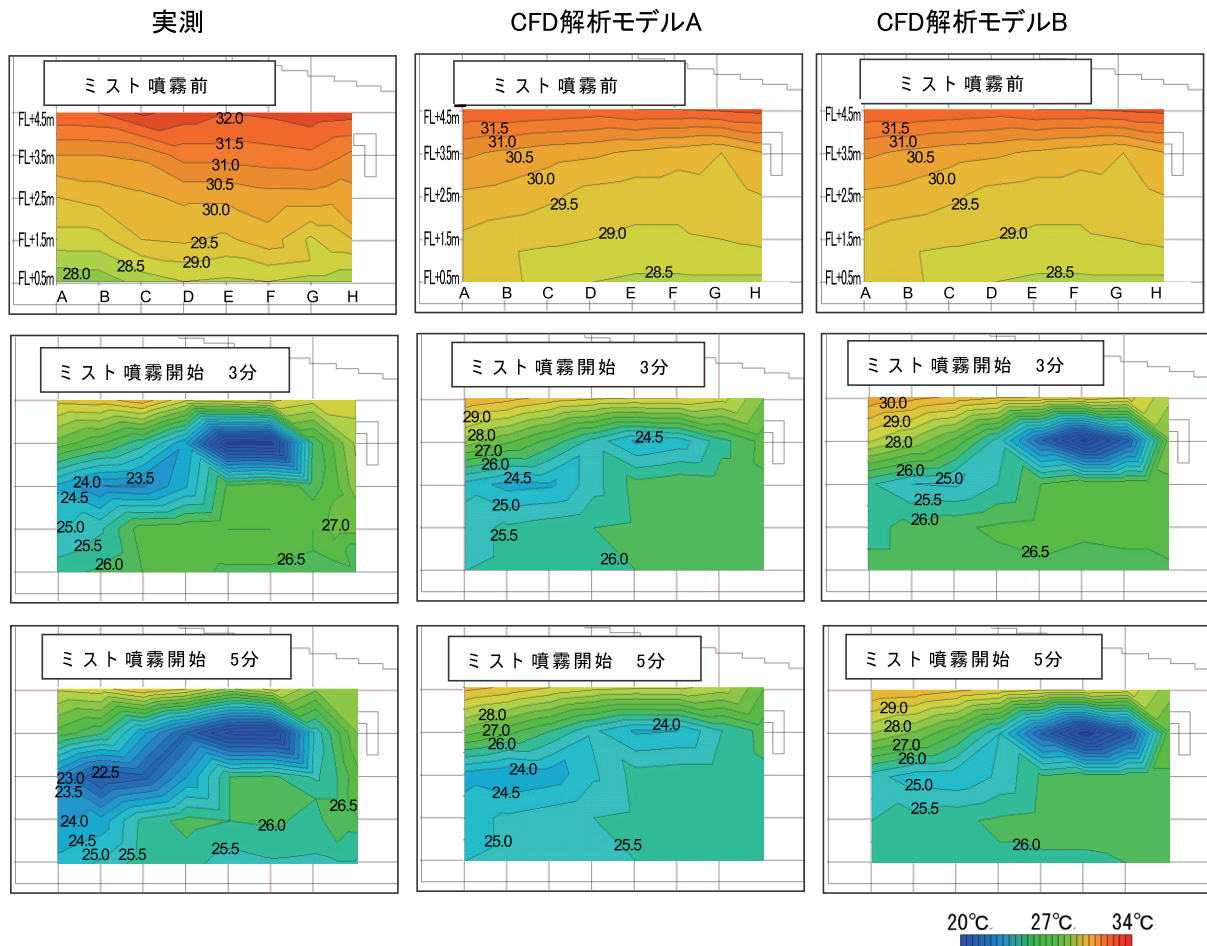


図-13 中央断面温度分布の実測とCFD解析(モデルA、B)との比較

ル(モデルB)の2通りを用い、それらの結果を実測と比較した。

4.1 解析条件

CFD解析と比較する実測値には、強制換気の無い条件のCASE-6(送風ファン併用、連続噴霧)の結果を用いた。実験時の外気温湿度は27.6℃、44%、水平面全天日射量は815W/m²であった。

解析には熱流体の汎用数値解析コードであるStream3.14を用い、三次元解析を行った。解析条件を表-4に示す。境界条件は外界条件等の実測値をもとに設定した。図-12にモデルAのノズル付ファンのモデルを示す。ファンに付設したダクトの後方より室内空気を吸い込むものとし、ファン境界の前方にミスト噴出口を4カ所設置した。測定に使用したファンの

形状は円形だが、解析上は面積近似した四角形にて模擬し、ファンによる送風の旋回は考慮しないものとした。ファンの高さは上端H=4.0mとし、吹出し方向を実験に合わせ水平よりやや下向きとした。初期条件として、ミスト噴霧が無く、送風ファンを運転した状態で定常状態にし、その後ミストを噴霧して非定常解析を行った。圧縮流体のモデルAでは物体の熱の伝導を解析することができないため屋内側の表面温度を与えて境界条件とした。また、解析条件を揃えるためにモデルBも表面温度を与えた。

水の蒸発潜熱は30℃において2.43KJ/gである。モデルBでは、ミストの蒸発冷却をファンの位置から冷風が吹出されるものとして置き換えて考え、吹出し温度を与えた。

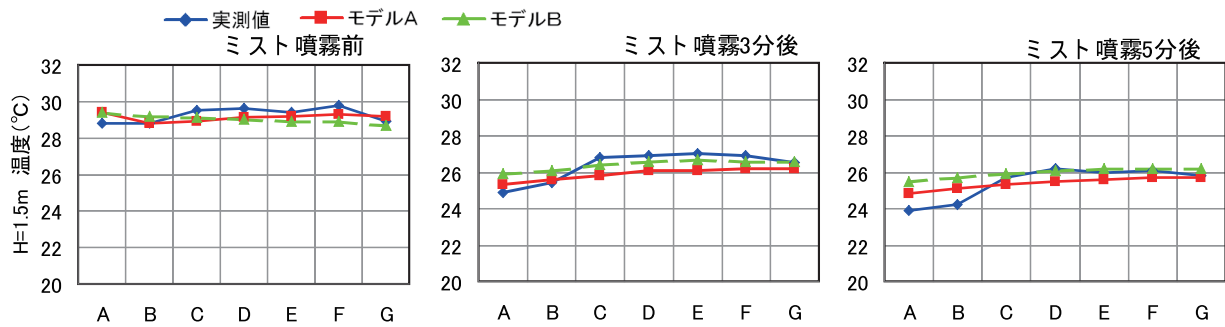


図-14 床上高さ 1.5m の空気温度の実測と CFD 解析 (モデル A、B) との比較

4.2 解析結果と実測値の比較

図 12 にモデル A、B の 3 分後の解析結果を示す。モデル B では、冷却熱量を吹出口に与えているため、吹出口近傍が一番低くなるのに対し、モデル A では、吹出し位置より 2～4 m の位置にてミストの蒸発により一番温度が低くなっており、ミスト蒸発の現象が再現できていることがわかる。最も冷却された位置での温湿度は、温度 22.6℃、絶対湿度 0.0156kg/kg(DA)、相対湿度約 90%であった。

図-13 にミスト噴霧前、噴霧 3 分後、5 分後の実測と CFD 解析の結果の比較を示す。実測値は熱電対を設置した位置に限られるため、CFD 解析も同じ位置の解析値を用いてコンター図を作成し、比較を行った。実験施設の外皮の熱抵抗が小さいため、ミスト噴霧前の室内には上下温度差が生じているが、解析結果は実測値にほぼ近い状態となっている。ミスト噴霧後は、ノズルの近辺などで実測値が極端に低くなっているところがあるが、これはミストが熱電対に付着して濡れた状態と考えられ、ほぼ湿球温度を示していると思われる。解析結果はモデル A、B 共に実測とほぼ同様の温度降下の挙動を再現できたと考えられるが、ミストの移動、蒸発を考慮して解析するモデル A の方が、やや温度低下が早くなる傾向となった。また、風速分布の実測も別途行っており、実測とほぼ対応することを確かめた。

人の体感高さである H=1.5m のポイントについて、実測と解析の結果を比較して図-14 に示す。噴霧 3 分後以降の実測値の A、B 列の測定点が他列よりも相対的に温度低下がやや大きめになっている点が解析結果と異なるが、全体的な傾向として実測値と解析値はおおむね対応していると考えられる。また、モデル B の 5 分後の解析結果を得るまでの演算時間は、モデル A の約 1/4 であった。モデル B の蒸発冷却モデルの妥当性については、他の CASE での比較など、さらに検討が必要である。

5. おわりに

ミストの蒸発冷却を工場などの屋内空間で利用することを前提とし、仮設実験室を用いてミスト噴霧によ

る蒸発冷却効果を把握する実験を行った。次に、実験結果を CFD による数値解析結果と比較し、CFD でどの程度実験結果を再現できるかを検討した。結果は以下に示すとおりである。

- 1) ノズルだけを用いて送風ファンを併用しない場合、スポット的な冷却効果は確認されたが、床面の濡れがわずかに検知された。
- 2) 送風ファンを併用した場合、蒸発効率が向上し、実験の範囲内では床や壁面での濡れは検知されなかった。また、ファンによるミストの移動経路だけでなく、比較的広いエリアにおいて冷却効果が得られることが確認できた。中央断面の平均温度は、ノズル 4 個の場合で噴霧 5 分後に 3.3℃、10 分後に 4.4℃低下し、8 個の場合で噴霧 5 分後に 4.5℃低下した。
- 3) CFD 解析におけるミストの蒸発冷却モデルとして、ミストの移動、蒸発を考慮するモデルと蒸発冷却熱量に見合う冷風に置き換えるモデルの 2 通りを検討した。その結果、いずれのモデルでもおおむね実験と近似する結果を得た。

今後は、実際の使用状態にある工場等でミスト噴霧を行いデータを蓄積するとともに、換気や制御方法等についてさらに検討を重ねる予定である。

謝辞

SET* の計算プログラムをご提供いただいた北海道工業大学、鈴木憲三教授に感謝の意を表します。

文献

- 1) 尹奎英他：ドライミスト冷却効果の検証と CFD 解析、日本建築学会環境系論文集第 73 巻第 633 号、p.1313-1320、2008.11
- 2) 箸方稔他：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－日本建築学会大会梗概集、p.1269～1270、(近畿) 2005.9
- 3) 三浦寿幸、鈴木孝彦、栗木茂他：屋内空間を対象としたミスト噴霧とその蒸発冷却効果に関する研究 その 1～3、日本建築学会学術梗概集、2009.8 (東北)
- 4) 三浦寿幸、板谷俊郎他：噴霧ミストの蒸発冷却に関する実験研究 その 1～2、日本建築学会学術梗概集、p.559-562、2008.9 (広島)

