ミストの気温低下効果の影響範囲と風との関係

Relationship between air temperature reduction of mist and wind.

神戸大学大学院工学研究科
Graduate school of engineering Kobe University

橘高　康介
Kosuke Kittaka

キーワード：暑さ対策(Measures against thermal environment)，ミスト(Mist)，温湿度分布(Temperature and humidity distribution)，測定(Observation)，シミュレーション(Simulation)

1. はじめに

各地で暑さ対策の推進が進められており，効果のわかりやすさや導入のしやすさなどから，ミスト噴霧が多くの事例で採用されている．例えば大阪府クールスポットモデル拠点推進事業では 10 ヶ所の事業の内，9 ヶ所でミストが導入されており，暑さ対策としてのミストの利用が期待されている[1)]．一方で，一般に強風条件下においてミストの気温低下効果はあまり期待できないことが知られている．しかし，導入事例の中には広場等のオープンスペースに設置されている場合や，高所から噴霧されている場合もあり，実際の利用実態を踏まえると想定通りの効果が発揮されていない可能性が危惧される．本稿では市街地公園やバス停での測定をベースに，屋外空間におけるミストの気温低下効果の影響範囲と風との関係を報告する．

2. 市街地公園におけるミストの影響距離

2.1 測定概要

図 1 に示す神戸市内の公園内の広場に南北方向に約 2.5m の間隔で 7 ヶ所にミストノズルが設置された．ミストの設置状況を図 2 に示す．ミストは約 1m の高さから毎日 8 時～18 時に噴霧される．2021 年 8 月 27 日（金）10:30～11:30，13:00～14:00，15:10～16:22（15:50～16:02 は測定機器不調のため一旦中止）に，ミスト噴霧口からの距離 0.9m～6.4m までの範囲で温湿度を測定した（図 3）．図 4，5 に示した測定装置を移動させて測定した．測定場所近傍で温湿度，風向，風速の気象条件を測定した．ミストは約 1m の高さから水平方向に噴霧され，粒径は 5～10μm，噴霧量は 1.5l/h（メーカーHP）である．

図 1　測定場所

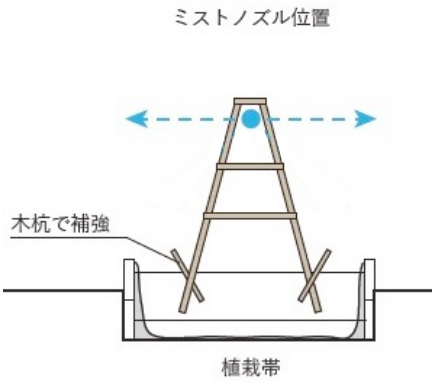


図 2　ミストの設置状況

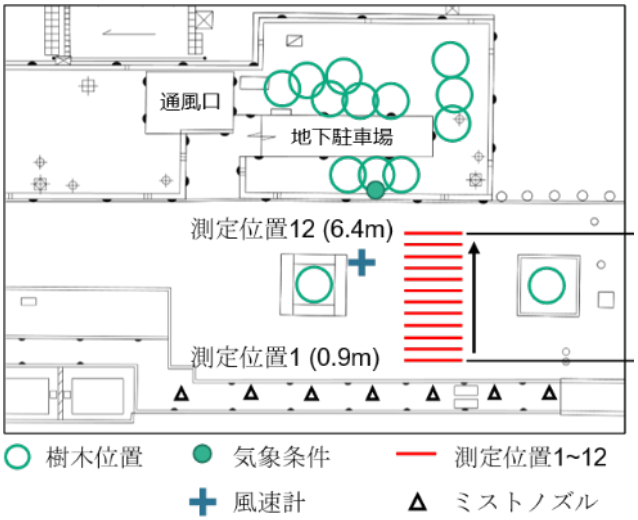


図 3　測定位置

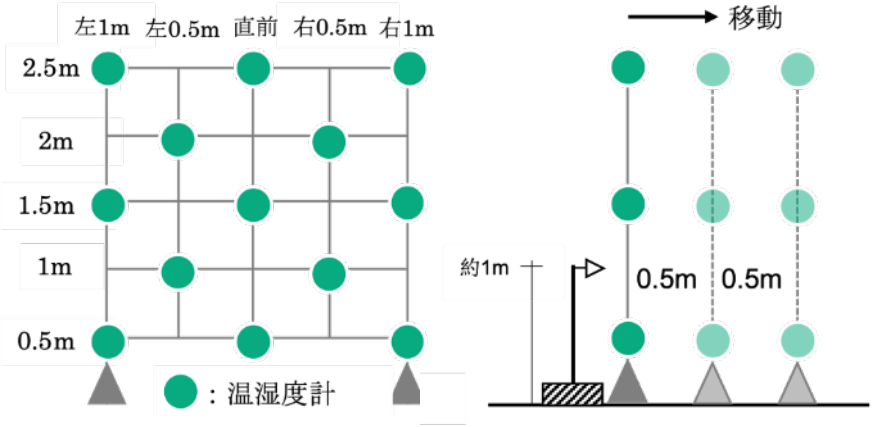


図 4　測定装置

図 5　測定装置（写真）

2.2 測定結果

図 6，7 に 10：30 の測定結果を示す．吹出口からの距離と気温，絶対湿度，比エンタルピー，SET*との関係（各測定高さで平均）である．2～3m 程度まで気温低下効果が確認される．高さ 0.5m の気温が高くなっており，日射を受けて高温な地表面の影響を受けていると考えられる．湿度は，吹出口付近で少し高いが，大きな変化は見られない．吹出口高さの 1.0m 付近でやや高い傾向がある．センサーの精度や器差の影響も考えられる．比エンタルピーは全体的に変化が小さい．SET*は風速 1m/s，MRT45℃，着衣量 0.6clo，代謝量 1.4Met として計算した．吹出口付近で 1℃程度低く，全体的な傾向は気温とほぼ同じである．

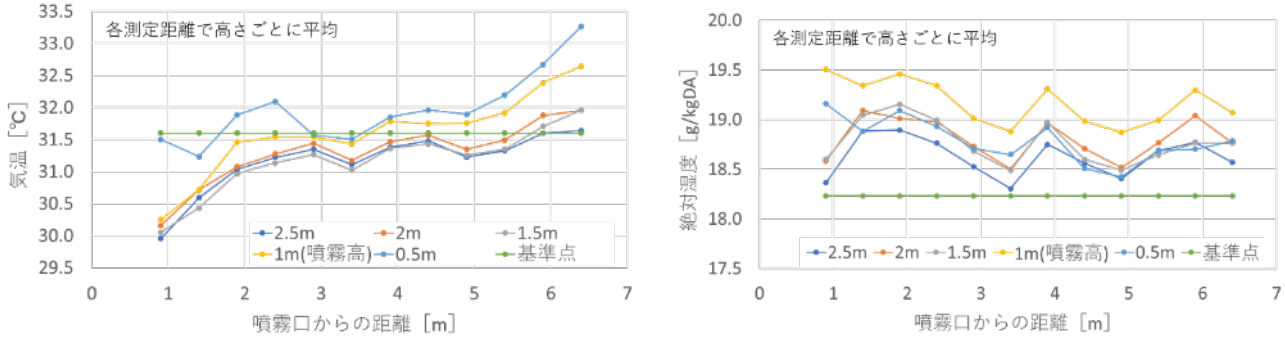


図 6　吹出口からの距離と気温（左），絶対湿度（右）の測定結果（2021 年 8 月 27 日 10:30）

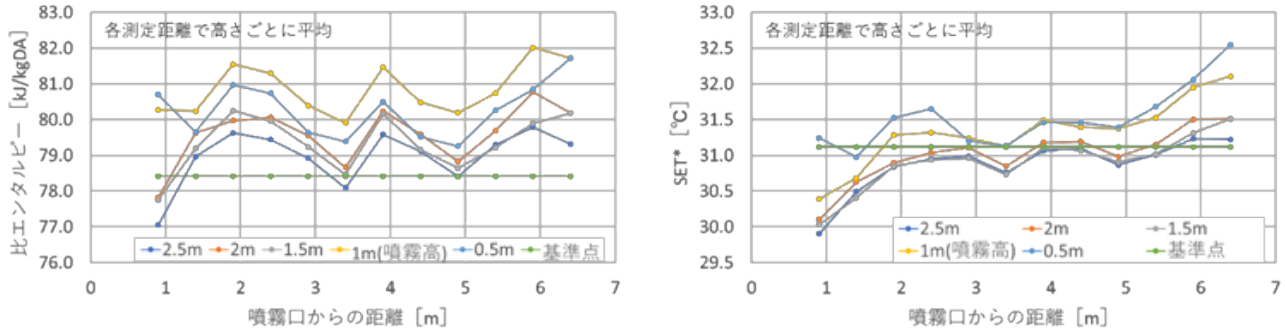


図 7　吹出口からの距離と比エンタルピー（左），SET*（右）の測定結果（2021 年 8 月 27 日 10:30）

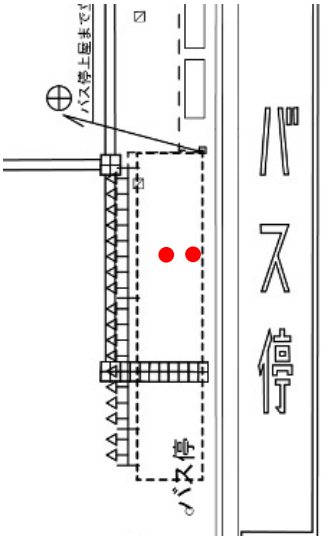
3.　バス停における温湿度分布及び風と気温低下効果との関係

3.1 測定概要

図 8 に示す三宮駅南の南北道路西側のバス停の屋根に 50cm 間隔で 18 箇所にミストノズルが設置された．毎日 9 時～18 時に噴霧される．2021 年 9 月 21 日（火）10:00~17:15 に，毎正時から 15 分，計 8 回測定した．ミストが設置されたバス停と，約 50m 離れたミストが設置されていないバス停で同時に温湿度，グローブ温度，風速を測定した．測定場所近傍で温湿度，風向，風速の気象条件を測定した．ミストは約 3m の高さから鉛直下方向に噴霧され，粒径は 15～20 μm，噴霧量は 1.35 l/h（メーカーHP）である．図 9～12，に測定位置，測定装置，測定状況を示す．

□：ミスト有りバス停　□：ミスト無しバス停

図 8　測定場所　ミスト有りバス停（左）ミスト無しバス停（右）



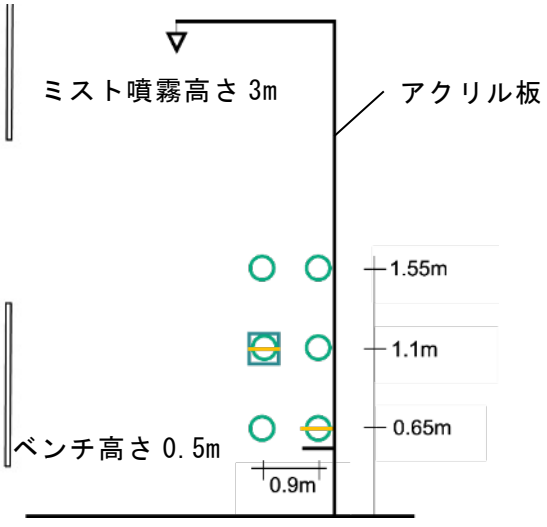
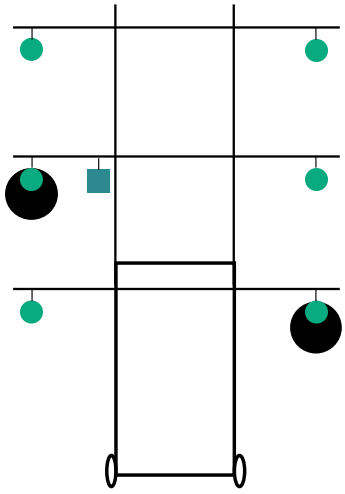


図 9　測定位置



●：温湿度計　●：グローブ球　■：風速計

図 10 測定装置

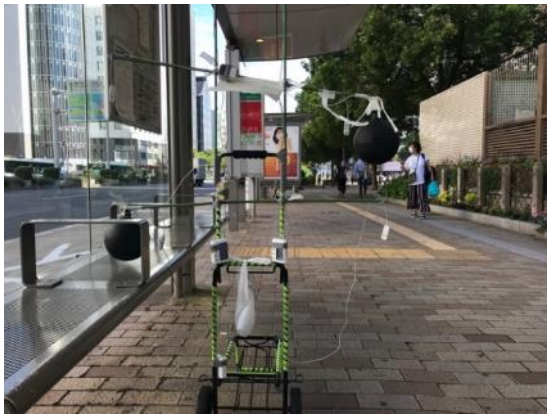


図 11　測定装置

図 12　測定状況

3.2 測定結果

図 13 に 11 時の気温，絶対湿度，比エンタルピー，SET*の測定結果（空間分布）を示す．気温は地面付近まで 1℃程度低下しており，湿度も地面付近で 1g/kgDA 程度上昇しいる．比エンタルピーは上昇し，SET*は低下している．

図 14 に高さ 100cm 及び 50cm での気温と風速の時刻変化を示す．風速が弱い 14 時まではミストの有無によって 0.5～1.5℃程度の差が見られるが，風速が 2m/s 程度となる 15 時以降では気温差が見られなくなる．

図 15 に気温，絶対湿度，比エンタルピー，SET*のミスト有無の関係を示す（風速の小さい 10～14 時の測定結果）．気温低下量は 1～1.5℃程度，湿度増加量は 1g/kgDA 程度，比エンタルピーは増加傾向，SET*低下量は 0.5～1℃程度である．

風による拡散の影響を受けにくいバス停に設置されたミスト噴霧装置の効果は，公園内のミスト噴霧装置の効果より大きく，気温低下量は 1～1.5℃程度，湿度増加量は 1g/kgDA 程度，SET*低下量は 0.5～1℃程度であった．

	なし		ミスト		差	
気温	31.3	31.5	29.8	29.9	-1.5	-1.6
	31.2	31.4	30.4	30.0	-0.8	-1.5
	31.5	31.3	30.2	29.9	-1.3	-1.5
湿度	11.7	11.6	12.4	11.9	0.7	0.3
	11.6	11.6	12.3	12.7	0.7	1.1
	11.4	11.5	12.1	12.8	0.7	1.3
比エンタルピー	61.4	61.3	61.6	60.4	0.3	-0.9
	61.0	61.2	62.1	62.5	1.1	1.3
	60.9	61.0	61.4	62.8	0.5	1.8
SET*	27.5	27.7	26.1	26.1	-1.4	-1.6
	27.4	27.7	26.7	26.3	-0.7	-1.4
	27.7	27.6	26.5	26.2	-1.3	-1.4

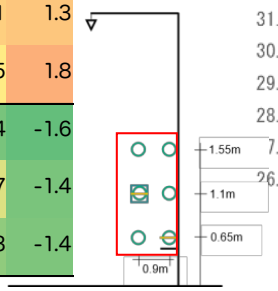
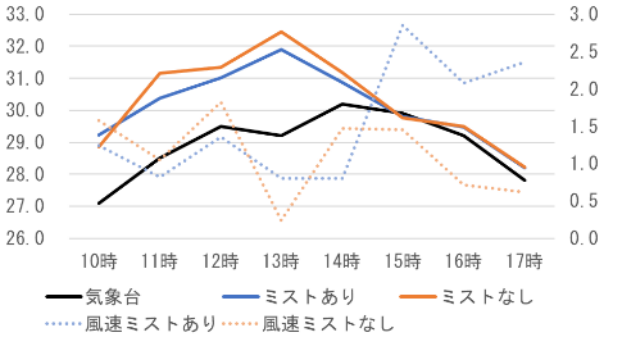


図 13　11 時の気温，絶対湿度，比エンタルピー，SET*の空間分布



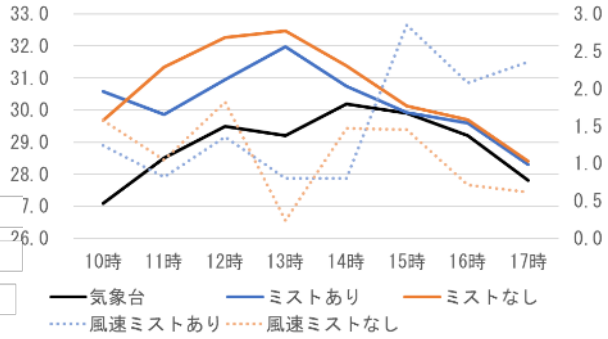


図 14　気温と風速の時刻変化
（上 100cm 地点，下 50cm 地点）

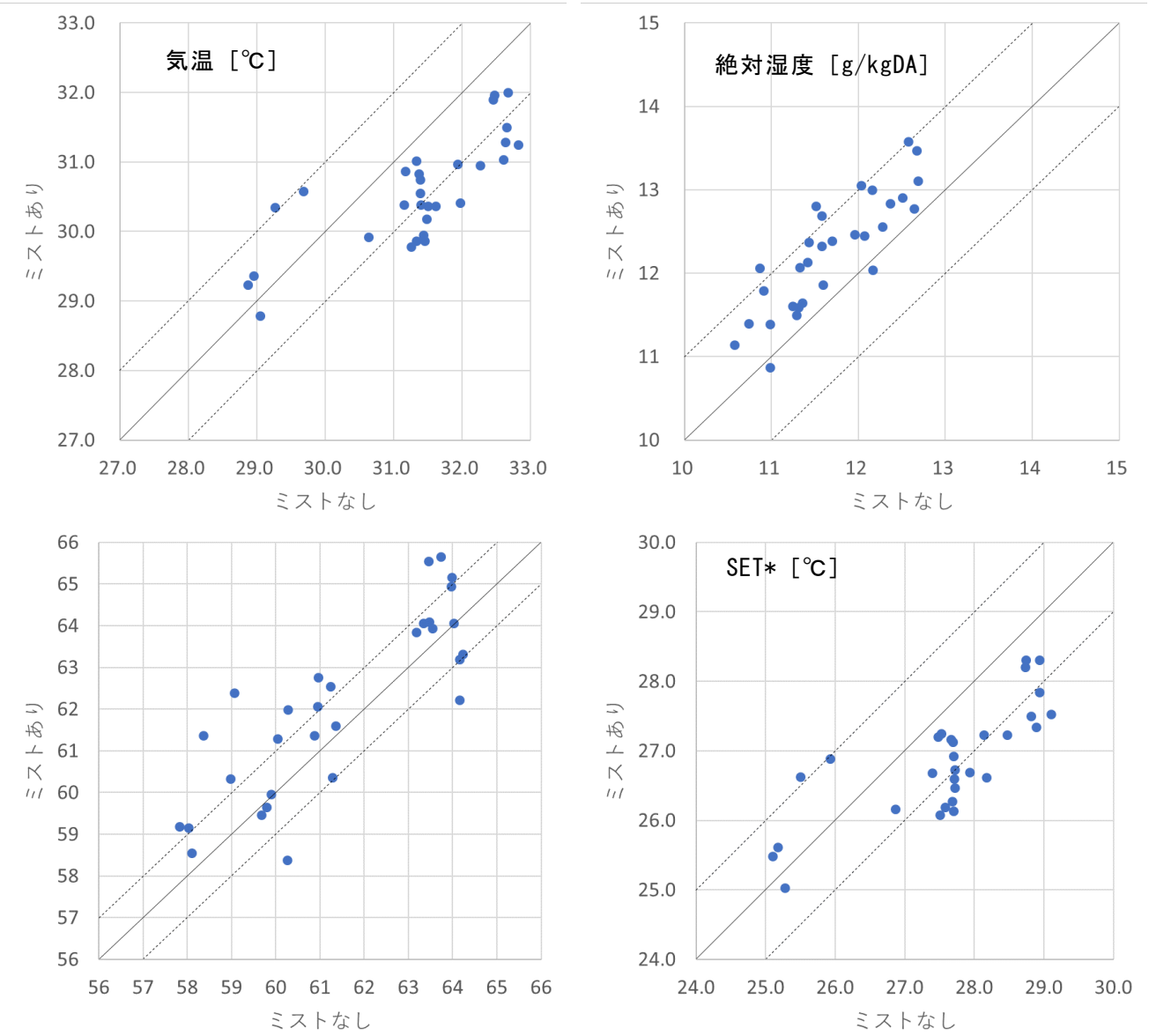


図 15　気温（左上），絶対湿度（右上），比エンタルピー（左下），SET*（右下）の
ミスト有無の関係（10～14 時）

4.　ミスト噴霧口近傍におけるミストの影響距離と風速との関係

これまでの検討から弱風条件下でのミストの影響距離は 2～3m程度であること，また風速が 2m 程度を超えると効果が見られなくなることも確認できた．ここでは噴霧口から 2m までの範囲において影響距離と風速との関係を考察する．ここでは，神戸大学六甲台第一キャンパス内の中庭にミスト噴霧装置を設置し，ノズル下方の温湿度分布と代表風速を測定し，温度低下量，湿度上昇量からミスト噴霧の効果が及ぶ距離を評価し，風速との関係を分析した．また，実測時の風環境を LES モデルによって再現し，気温，湿度，風速などの気象条件，ミストノズルの設置高さ，設置間隔，噴霧量などの設置条件が温熱環境改善効果に及ぼす影響を分析した．

4.1 測定概要

図 16 にミスト測定場所を示す．1 ノズルからの噴霧量は約 39[ml/min]=0.65[g/s]，噴霧角は 80[°]（噴霧後に拡散する角度），平均粒子径は 16[μm]，圧力は 6[MPa]である．図 17 に測定機器の設置状況を示す．高さ 2.5[m]，横幅 2[m]，奥行き 2[m]の鉄の骨組みの上部に 2 個のノズルを設置した．ノズルの位置は 0.5m 間隔である．紐に温湿度計のセンサーを 7 個設置し，一方のノズルから鉛直下向きの距離 0.25，0.5，0.75，1.0，1.25，1.5，2.0[m]の位置に固定した．当該ノズルから奥行き方向に

0.25[m]離れた位置と両ノズルの中間（両ノズルから 0.25[m]）に同様の紐を固定し，同じ鉛直下向きの距離に温湿度計のセンサーを固定した．地面からの高さ 1.5[m]に風速計を骨組みに固定して設置した．2023 年 9 月 29 日 13:00~16:00 に温湿度は 10 秒間隔，風速は 2 秒間隔で測定した．また，測定期間中のミスト噴霧の様子を捉えるために，x-z 平面を正面として測定機器全体が映るようにスマートフォンで動画を撮影した．

図 16　測定場所

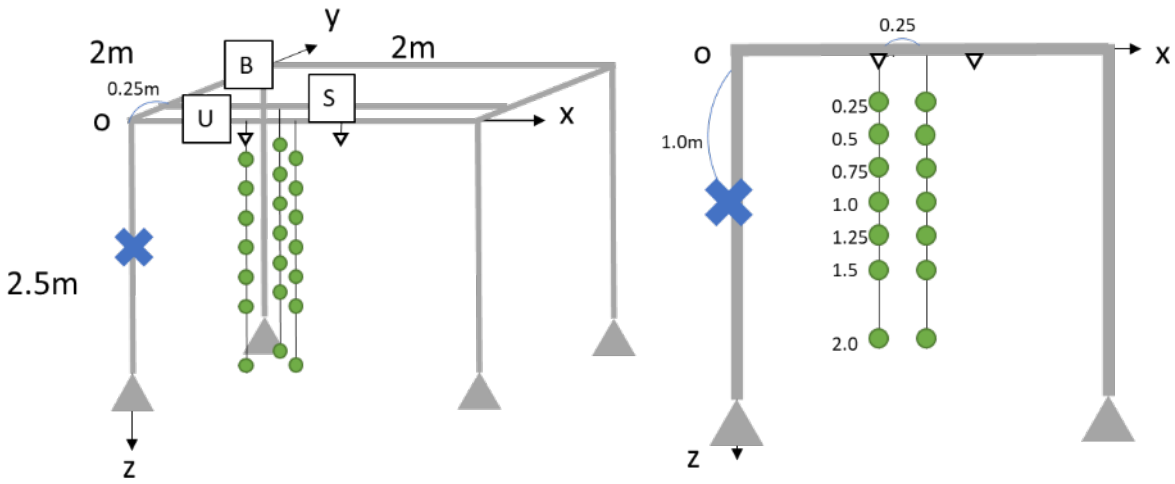


図 17　測定機器の設置状況

4.2 噴霧口からの距離と風速の関係

ミストが影響する範囲（噴霧口からの距離）を明らかにするため，ミスト直下地点(U)の気温，絶対湿度，風速の測定結果と，測定の様子を撮影した動画から判読したミストの影響距離の関係を考察した．測定期間中に最も風速にばらつきが確認された 13:00-14:00 のデータを対象とし，測定値に異常が確認された噴霧口から 1.0m のデータは対象外とした． 図 18 に温度差と風速の測定結果を示す．風速が大きいときに温度差が小さくなる様子が確認された．

4.3 温度差，動画の判読による分析

図 19 左に風速と温度差の関係を示す．風速と影響距離には明確な相関は確認されなかったが，風速 1.5m/s 以上では影響距離は短くなる傾向があった．

測定の様子を正面(x-z 面)から撮影した動画よりミストの到達距離を 10 秒ごとに判読し，平均風速との関係を分析した．風速と影響距離の関係を図 19 右，表 1 に示す．風速と影響距離には明確な相関は確認されないが，風速 1.5m/s 以上では影響距離が短い．影響距離は噴霧口から鉛直下向きに 1m

付近までであると考察される．

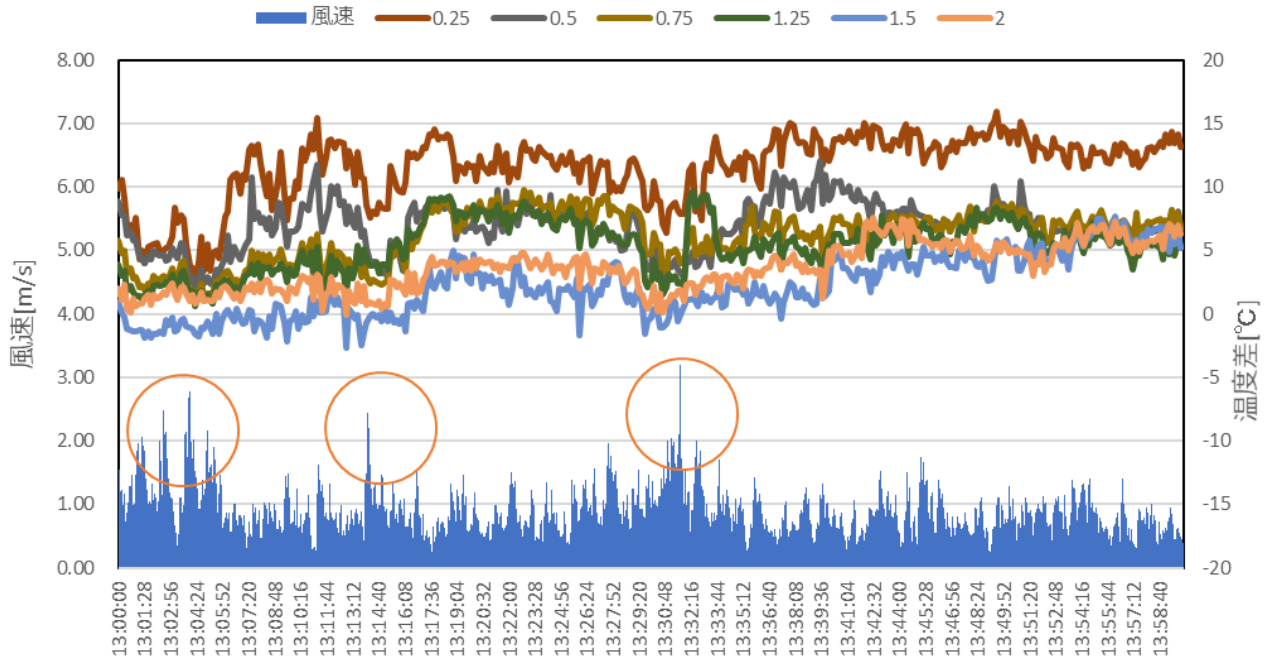


図 18　温度差と風速の測定結果（13:00–14:00）

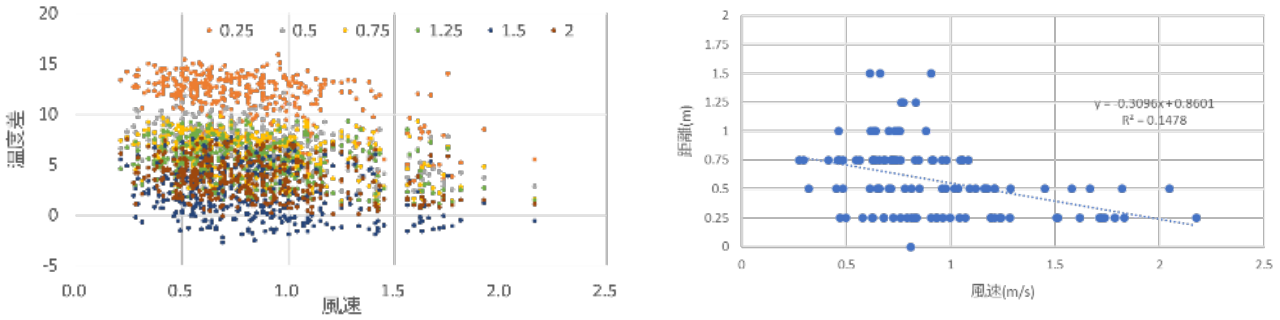


図 19　風速と影響距離の関係　左：測定結果より(13:00–14:00)　右：動画判読より(13:00–13:18)

表 1　風速と影響距離の平均値と標準偏差(13:00–13:18)

	影響距離[m]	風速[m/s]
平均値	0.553	0.96
標準偏差	0.29	0.29

4.4 ノズル近傍でのミスト噴霧効果の計算式

ミスト噴霧が周囲にもたらす効果は，噴霧した微細なミストが大気中で蒸発する際の気化熱による温度低減と水蒸気量の増加による湿度上昇である．

図 20 にミスト噴霧装置の概要を示す．1 ㎡あたりの噴霧量 q'[g/(s・m2)]は，ノズル 1 個の噴霧量 q[g/s]，ノズルの設置間隔 l[m]により式(1)で表される．

$$q' = q/l^2 \tag{1}$$

この時 1 ㎡あたりの顕熱削減量 ΔQ_s[W/m2]は式(2)により求められる．L は水の蒸発潜熱[J/g]．1 ㎡あたりの気温低下量Δθ[K/m2]に関して，式(3),(4)が成立する．

$$\Delta Q_s = q'L \tag{2}$$

$$C_P \gamma v A' \Delta\theta = \Delta Q_s \tag{3}$$

$$\Delta\theta = \Delta Q_s / C_P \gamma v A' \tag{4}$$

ここで，C_P：比熱[J/(gK)]，γ：密度[g/m3]，v：風速[m/s]，A^'：1 ㎡あたりのミスト蒸発範囲を

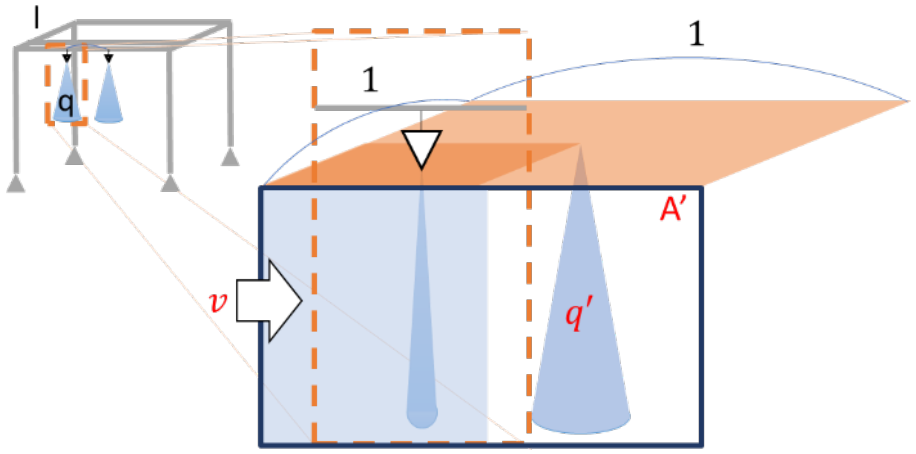
外部風が通過する面積[㎡]，Δθ：1 ㎡あたりの気温低下量[K/㎡]である．

1 ㎡あたりの湿度上昇量 ΔX[g/(kg'㎡)]も式(3)と同様に式(5),(6)が成立する．

$$\gamma v A' \Delta X = q' \tag{5}$$

$$\Delta X = q' / \gamma v A' = Cp \Delta\theta / L \tag{6}$$

図 20　ミスト噴霧装置の概要



4.5 数値計算の概要

LES（Smagorinsky）モデルを用いた．流入・流出境界は自然流入流出条件，上空及び側面境界は free-slip 条件，地面及び壁面境界は一般化対数則条件を設定した．流入境界は高さ 100m の風速を 4.1m/s としたべき乗則で与え，風向は南西とした．ミスト噴霧効果を評価するために，LES モデルの運動方程式と温度，物質輸送方程式を連立して計算した．スマゴリンスキーモデルの温度，物質輸送方程式を以下に示す．

温度，物質輸送方程式（物質輸送の場合は θ [K]を X[kg/kg(DA)]に置き換える）を以下に示す．

$$\partial\theta/\partial t + u_i \partial\theta/\partial xi = (\alpha + v_{SGS}) \partial^2\theta/\partial {x_i}^2 + S_H \tag{7}$$

$$S_H = (\Delta\theta \times A) \partial/\partial t \tag{8}$$

ここで，S_H：ソース項[K/s]，A：LES で使用するメッシュの単位面積[㎡]，i：次元（=1,2,3），t：時間[s]，x_i：空間座標の 3 成分[m]，u_i：風速の瞬間値の 3 成分[m/s]，θ：温度の瞬間値[℃]，α：空気の熱拡散係数（$=\frac{k}{\rho C_p}$）[m2/s]，k：空気の熱伝導率[W/m･K]，ρ：空気の密度[kg/m3]，C_p：空気の比熱[J/(kg･K)]，v_{SGS}：SGS 動粘性係数（$=(C_s\bar{\Delta})^2\sqrt{2\bar{S}_{ij}\bar{S}_{ij}}$），$\bar{S}_{ij} = \frac{1}{2}\left(\frac{\partial\bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial\bar{u}_j}{\partial x_i}\right)$ [m2/s]，C_s：スマゴリンスキー定数（=0.13），$\bar{\Delta}$：フィルタサイズ（$=\sqrt[3]{\bar{\Delta}x \times \bar{\Delta}y \times \bar{\Delta}z}$）[m]である．

4.6 ミスト噴霧のシミュレーション結果

尹ら [2]は CFD 解析においてノズル部分にミストが蒸発した際に奪う熱量を付与することで，ミストの冷却，加湿効果を再現した．本測定，計算に当てはめると噴霧口での気温低下量が 33.85[K/s]となる．本研究ではこれまでの結果を踏まえ，ミストの蒸発距離を 1m と仮定し計算する．図 21 に示す噴霧口からの距離と温度差(ΔT[℃])の関係（13～16 時の平均値）は対数式で近似された．噴霧口から 1m までの蒸発熱量を対数式で近似した．図 22 に強風時と弱風時における LES の温湿度計算結果を示す．強風時には噴霧後すぐにミストが拡散し，弱風時には人の高さ付近まで効果がある様子が確認できる．

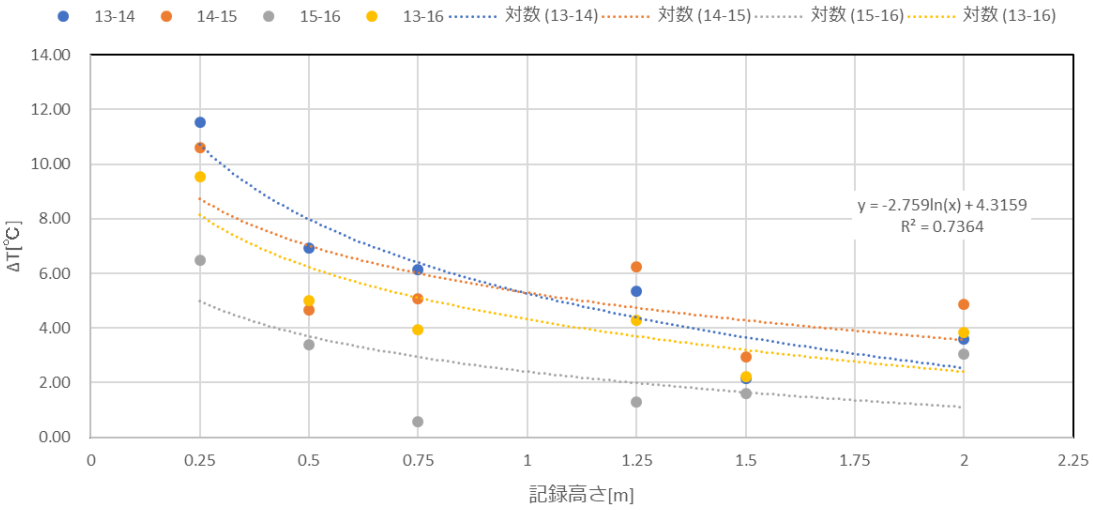


図 21　噴霧口からの距離と温度差（13～16 時の平均値）

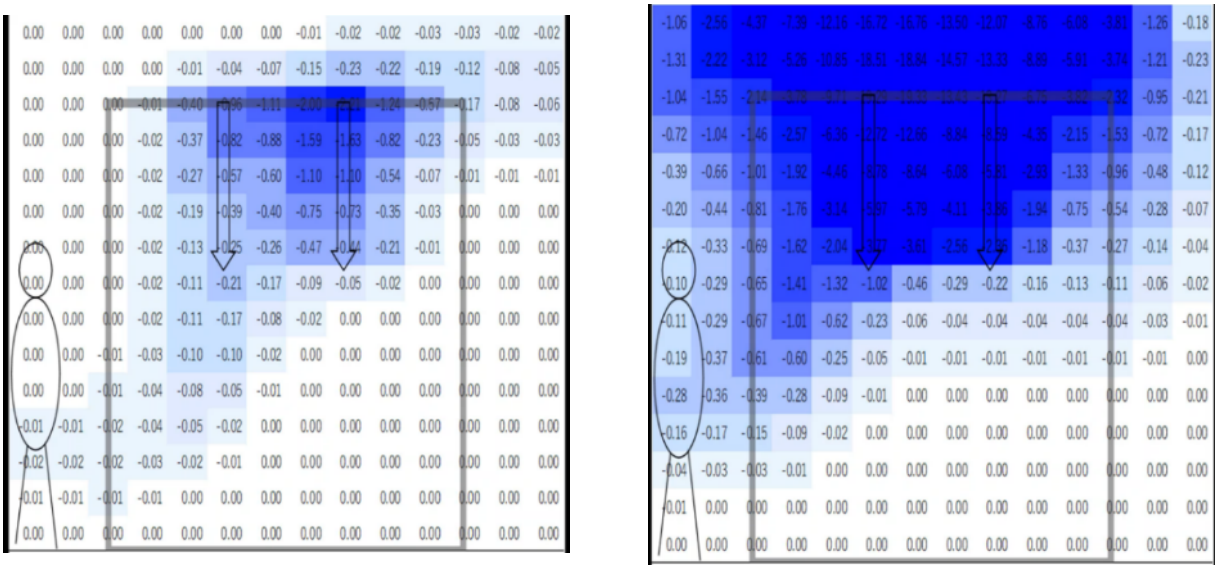


図 22　LES の温度計算結果（左：強風時　右：弱風時）

5. まとめ

測定，動画判読結果からミストの影響距離と風速との関係を考察した．両者には明確な相関は確認されなかったが，風速が 1.5m/s を超えるとミストが風により流されてしまう様子が確認された．噴霧口からの距離と温度差の関係を対数式により近似し，噴霧口から 1m までのソース項に与えて温度輸送方程式を計算すると，ミストの移流，拡散の様子が再現された．ミストの導入にあたり，噴霧量，位置，風速等の環境条件に配慮が必要である．

謝辞　当時神戸大学大学院生の黄璐琛氏，水島大輝氏の修士論文の一環として実施された．神戸市の戸澤潮氏，佐野俊幸氏には様々に協力頂いた，株式会社いけうちの鈴木慎氏には様々に協力頂いた．ここに記し謝意を表します．

参考文献

1）　大阪府クールスポットモデル拠点推進事業（平成 28 年度から令和元年度まで公募）大阪府 HP https://www.pref.osaka.lg.jp/o120020/chikyukankyo/jigyotoppage/coolspot.html

2）　尹奎英，原田雅教．ドライ型ミストにおける導入効果評価の考え方と評価指標，空気調和・衛生工学会論文集，No.243，1-8(2017)