

屋外ミスト噴霧環境の温度・湿度評価手法について

Measurement of Temperature and Humidity in Outdoor Environment with Water Mist Spray

大阪公立大学 大学院工学研究科 機械工学分野

Department of Mechanical Engineering, Osaka Metropolitan University

木下 進一

Shinichi Kinoshita

キーワード：ヒートアイランド(Urban Heat Island)、適応策(Adaptation Measures)、
ウォーターミスト(Water Mist)、温湿度測定(Temperature and Humidity Measurement)、
生理応答予測(Physiological Response Prediction)

1. はじめに

近年，都市域の暑熱化が深刻化し，熱中症など人体への健康影響が懸念されている．その適応策として日除けやファン，ウォーターミストなどの暑熱対策設備の開発と街中への設置が行われているが，これら設備の熱中症等に対する緩和効果を示す明確な評価指標が存在しない．ウォーターミストを有する暑熱対策設備の評価を行う上で，測器の濡れによる測定結果への影響，またウォーターミスト霧囲気での皮膚表面での濡れによる疑似発汗による熱ストレス緩和効果について考慮する必要がある．

本研究では，ウォーターミストを有する暑熱対策設備の熱ストレス緩和効果評価のため，噴霧環境における温湿度測定手法を考案し，検証を行った．さらにウォーターミスト霧囲気における人体の生理応答を人体熱モデルにより予測した．

2. ウォーターミスト噴霧環境における温湿度測定の検討

大阪公立大学中百舌鳥キャンパス B4 棟の中庭にて，1800mm×2700mm，高さ 1700mm のテントを 2 張り，片方の一辺にウォーターミストノズルを設置し，2022 年と 2023 年の 8 月～10 月にかけてテント下ミスト噴霧環境の温湿度測定実験を行った．各実験において環境条件として，日向において長短波放射計 3 台により 6 方位放射，超音波風速計により風向・風速，テント下において放射量を測定した．

2.1 温度センサーを用いた測定

まず図 1 に示す自作の放射除けで感温部を覆った熱電対を用いて，テント下ミスト噴霧環境における乾球温度と湿球温度の多点測定を行った．図 2 にセンサーの設置場所を示す．ミストは水平方向に

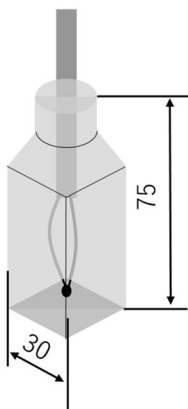


Fig.1 TC sensor with radiation shield.

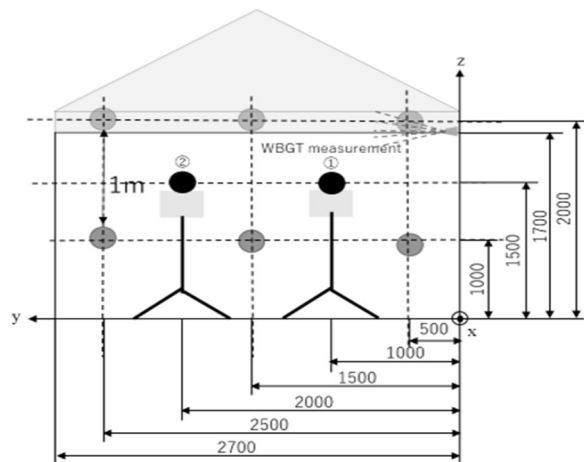


Fig.2 Overview of sensor placement.

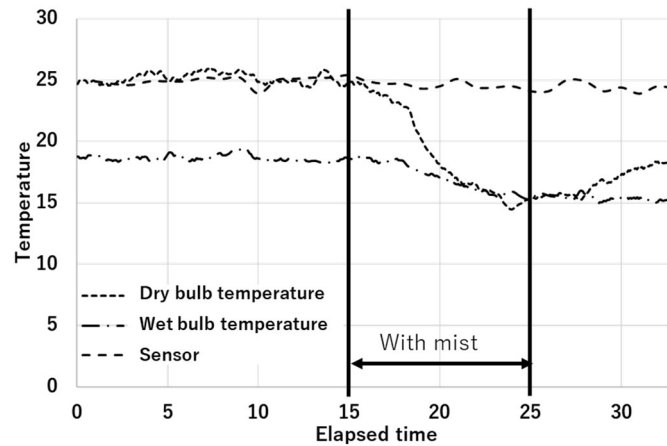


Fig.3 Transition of dry and wet bulb temperatures measured by thermocouple and neighborhood air temperature measured by temperature and humidity sensor.

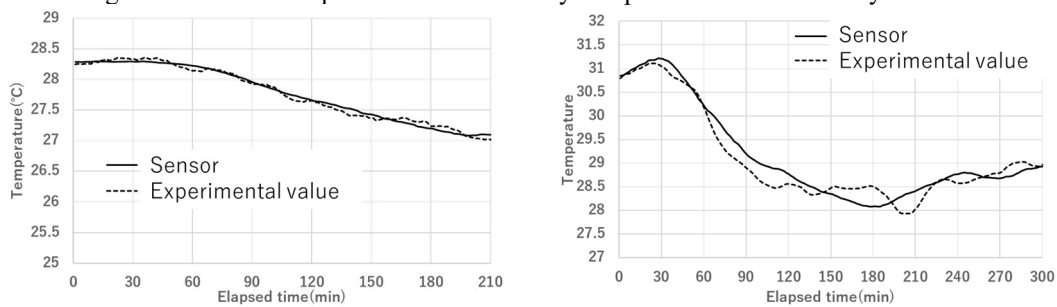


Fig.4 Transition of temperature measured by proposal method compared with that by temperature and humidity sensor in sunshade (left) and sunlight (right) without mist spray.

噴霧するように設置した。ミスト噴霧によって乾球温度の測定値は全体的に下がっていたものの湿球温度に大きな変化は見られなかった。またミストノズルから近い点では、図3のようにミスト噴霧中に乾球温度が湿球温度と等しくなっていた。ミスト噴霧停止後のミスト付着の無い温湿度センサーによる気温の測定値と比較したところ、噴霧停止から10～15分間、熱電対で測定した乾球温度の値が気温よりも低い値を示していた。つまりミスト噴霧下の温湿度測定では、測定値がセンサーへのミスト付着の影響を受けている。またWBGT計を用いたWBGTによる評価についても試みたが、同様の理由に加え、黒球温度が濡れの影響を受けるため測定が難しい。

2.2 ガーゼを用いたミスト噴霧環境の温湿度測定

前節の結果から、布片を用いて、その濡れの状態を含めて温湿度を測定する手法について検討した。黒色に染色した100mm角のガーゼを6枚重ねた試料を2個1対用意し、一方を乾いた状態（乾ガーゼ）、他方を常に十分に湿らせた状態（湿ガーゼ）とする。湿ガーゼはタンクから水が常に吸い上がるように設計し、濡れ率 $\beta=1$ を保てるものとした。それらの表面温度を熱画像カメラによって遠隔で測定し、式(1)のガーゼの熱収支式からミスト雰囲気中の温湿度を推定することを考える。

$$(1-\rho)S - \varepsilon(\sigma T_s^4 - L) = h(T_s - T) + \beta h_e(q_{sat} - q) \quad (1)$$

ここで、 ρ 、 ε ：ガーゼの日射反射率および赤外放射率、 σ ：ステファンボルツマン定数、 S ：日射量、 L ：赤外放射量、 h 、 h_e ：ガーゼ表面の対流熱伝達率および湿気伝達率、 β ：濡れ率、 T_s ：ガーゼ表面温度、 q_{sat} ：ガーゼ表面温度 T_s における飽和比湿、 T ：気温、 q ：比湿であり、ガーゼは十分に薄く厚さ方向の熱伝導は無視できると仮定した。日射量および赤外放射量はガーゼ面の法線方向に向けた長短波放射計により測定する。ガーゼの日射反射率および赤外放射率は別途測定により、それぞれ $\rho = 0.2$ 、 $\varepsilon = 0.8$ とした。

まずミストを噴霧しない環境において別途温湿度センサーによる測定値を使用して対流熱伝達率・湿気伝達率を算出する。次に、ミスト噴霧環境での乾ガーゼ・湿ガーゼの表面温度を用いて、ミスト

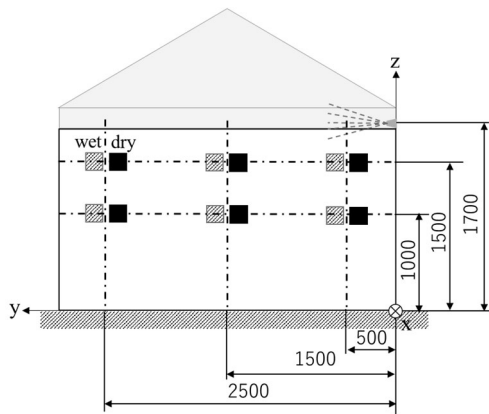


Fig.5 Overview of measuring points.

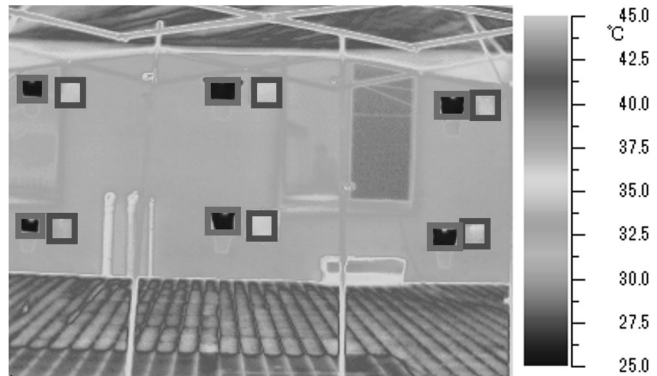


Fig.6 Sample of thermograph image.

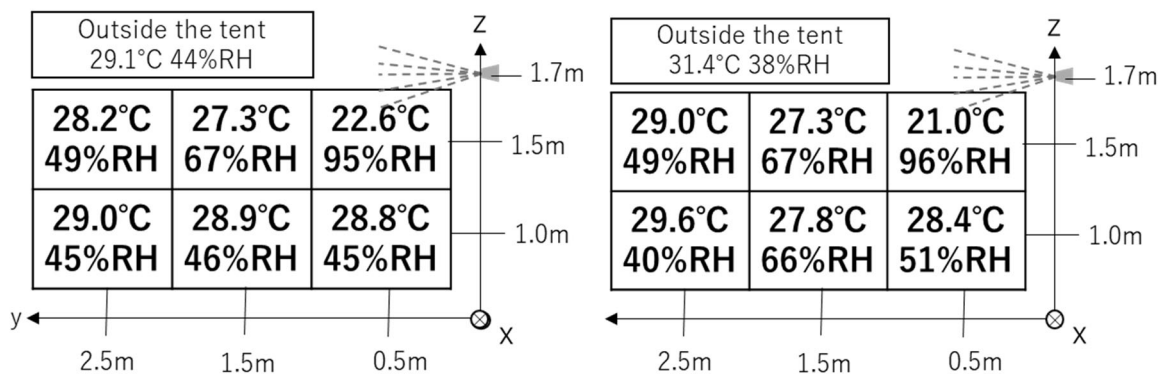


Fig.7 Measured temperature and humidity profiles in spray flow rate 9.4L/h (left) and 20L/h (right).

噴霧環境での気温・湿度を割り出すことを考える．乾ガーゼの濡れ率 β は，ミストがない環境では0と仮定できる一方，ミスト噴霧環境では濡れにより0より大きな値となる．そこでミスト噴霧中の乾ガーゼの濡れ率を測定するために，噴霧停止直後においてその濡れ率の値は変化せず，周囲空気は素早く換気され外気の温湿度と等しくなるものと仮定し，式(1)に基づいて噴霧中の濡れ率が求められる．その値を用いて，ミスト噴霧環境での乾ガーゼ・湿ガーゼそれぞれの熱収支式を連立させ，その温湿度を求める．

2.3 温湿度測定手法としての妥当性確認

前節の手法が温湿度測定法としての妥当性を確認するために，ミストのない環境での測定を行い，同環境で測定した温湿度センサーの値と比較した．ガーゼ面に対する放射量も測定した．結果を図4に示す．気温の変化は十分な精度でとらえており，放射の弱い日陰で平均誤差0.1°C，放射の強い日向でも平均誤差は0.2°Cである．

2.4 ミスト噴霧環境での温湿度測定への適用

ミスト噴霧環境におけるテント下の温湿度分布を評価するために，図5のように乾湿ガーゼをミストノズルからの水平距離で0.5m，1.5m，2.5m，高さ1.0m，1.5mの計6点に設置し測定を行った．ミストの噴霧量は2条件で，9.4L/hと20L/hである．ミストは水平方向に噴霧した．

図6に熱画像のサンプルを示す．ガーゼの位置は左右対の四角の枠で囲んだ箇所である．各噴霧条件における各測定点で算出されたミスト噴霧中の温湿度の値を図7に示す．左上に示しているのは，テント外で測定した温湿度の値である．どちらの噴霧条件においても，外気と比較してミストによる温度低下および湿度上昇の効果が測定できている．今回測定を行った範囲は，テント下だけであり，比較的小さな領域での測定であったが，ミスト噴霧中は図のように分布が形成される様子が確認された．また噴霧量の条件によっても差が見られ，噴霧量が大きいほど全体的にミストの効果が見られた．ミストノズルに近い点では，温度低下が非常に大きく，湿度も100%に近く，ほぼ飽和状態となっていた．濡れ率については，ノズルに最も近いところで0.7~0.8程度の値が測定されたが，下流に行くに

従い、急激に減少し、2.5m の位置では 0.1 およびそれ未満の結果が得られた。実験中、噴霧されたミストが上方に巻きあがる様子が見られ、温度低下効果・湿度上昇効果も上部の測定点の方が大きく表れていた。

3. ウォーターミスト噴霧環境での人体生理応答予測

熱中症対策としての評価を行うためには、環境測定による結果だけでなく、その環境に存在する人間の生理応答についても考慮する必要がある。そこで Oh らりが人体の濡れを考慮できるよう改良した Two node model を用いて解析を行い、深部温度や表面皮膚温度の予測、そして環境値とモデル内の解析値である発汗量などから SET* の計算を行った。

解析の条件として、十分な時間日向で過ごした人が、暑熱対策設備内に入り、その後また日向に戻る状態を想定した。様々な形態の暑熱対策設備が存在するが、ここでは日除け、ならびに日除けとウォーターミストの組み合わせの条件について解析を行った。またミスト噴霧環境では、小さな空間であっても温湿度の分布が形成されるため、前章の屋外実測におけるノズルからの距離 1.5m および 2.5m での測定値を用いる。設備条件として、対策なし、日除けのみ、日除けとウォーターミスト組み合わせについて①ノズルからの距離 2.5m 地点（濡れなし）、②距離 1.5m 地点（濡れなし）、③距離 1.5m 地点（濡れあり）の計 5 種類の条件について解析を行った。各条件の入力値を表 1 に示す。入力値は図 7 の実験データをもとに決定した。人体側に関する条件は、体表面積 1.8m²、体重 60kg、代謝量 60W/m²、

Table 1 Numerical conditions of physiological response and results of SET*.

Situation		Distance from nozzle m	Air temp. °C	RH %	MRT °C	Wetness -	SET* °C
Initial	Sunlight		31	38	50	0.0	
Heat mitigation	1. Nothing (in sunlight)		31	38	50	0.0	30.3
	2. Tent		31	38	45	0.0	28.9
	3. Tent + Mist ①	2.5	29	45	44	0.0	27.7
	4. Tent + Mist ②	1.5	27.5	67	42	0.0	26.9
	5. Tent + Mist ③	1.5	27.5	67	42	0.2	23.8
Final	Sunlight		31	38	50	0.0	

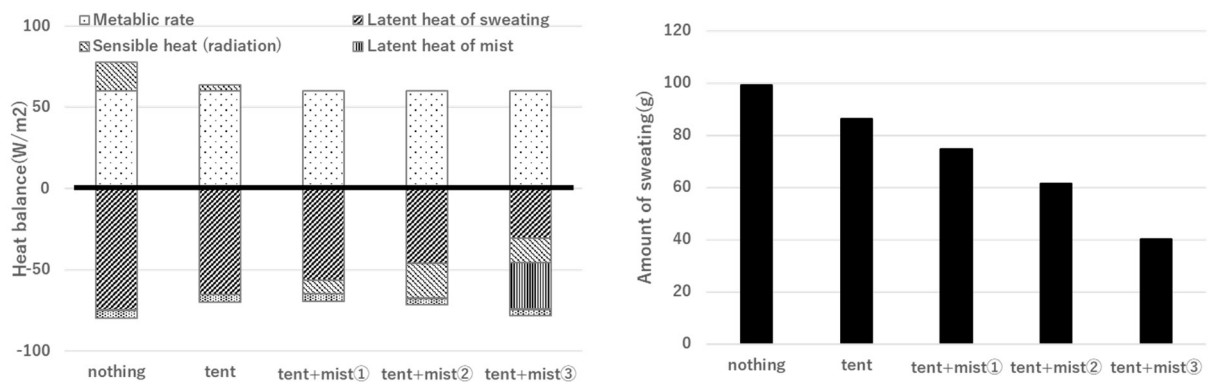


Fig.8 Numerical results of human heat balance (left) and amount of sweating (right).

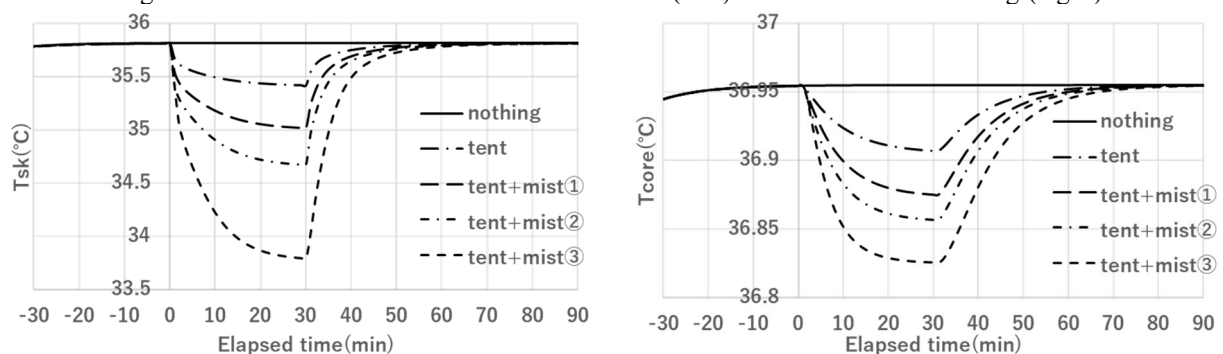


Fig.9 Transition of skin (left) and core (right) temperatures in each condition.

着衣量 0.3clo, 機械仕事なしとした。

暑熱対策条件の各条件の熱収支および発汗量を図 8 に示す。全条件において、熱収支が負となり熱負荷が緩和しており、発汗量が減少する様子が見られた。日除けのみの条件では受熱量の減少によるものであった。日除けとミストの複合条件、つまり温度低下のある条件では、温度低下量による差はあるものの、どちらも受熱量減少に加え、顕熱損失の増加がみられた。さらにミストによる濡れを考慮した条件では、ミストの濡れによる疑似発汗効果の影響で、一部ミストの濡れによる潜熱量に置き換わることで発汗による潜熱が減少し、発汗量も大幅に減少する様子が見られた。図 9 から表面皮膚温度・深部温度についても同様に、熱負荷の低減によって暑熱対策条件下で値が低下する様子が見られ、ミストの濡れによる効果は特に表面皮膚温度に大きく現れる様子が見られた。また表 1 にあるように、SET*も熱負荷の低減が大きい条件ほど低下する様子がみられ、ミストによる濡れを考慮した条件では、日向に比べて 5°C以上の低下がみられた。

4. まとめ

従来の測器を用いた温湿度測定手法では、センサーへのミスト付着の影響で、ミスト噴霧環境での温湿度測定は困難である。本研究で考案されたミスト噴霧環境での温湿度測定手法を用いることで、ミストが完全に蒸発しきっていない環境においても温湿度の測定が可能となった。またミスト噴霧環境では一般的な環境と異なり、小さな空間においても温湿度分布が形成されるため、測定位置の決定が暑熱対策設備の評価の上で重要な要素である。特にミスト噴霧環境での被験者実験を行う際に被験者と温湿度測定位置が離れていた場合、その測定値は被験者を覆う環境と異なる可能性が高く、またその違いが人体の生理応答にも影響すると予測された。また人体モデルの使用において、暑熱対策条件の熱負荷の低減と発汗量の減少による人体熱ストレスの緩和が認められた。またミストによる濡れを考慮するかどうかによって SET*で 3 度以上の差が生まれることとなったことから、人体の濡れによる疑似発汗効果は無視できず、ミスト噴霧環境の人体熱ストレスの評価のためには、人体への外部からの濡れを考慮できる人体モデルが必須と考えられる。

参考文献

- 1) W.Oh, R.Ooka, J.Nakano, H.Kikumoto, O.Ogawa, W.Choi, “Development of physiological human model considering mist wittedness for mist-spraying environments”, Building and Environment 180(2020) 106706.