

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 5 月 24 日現在

機関番号：32407

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26420588

研究課題名(和文)水ミスト噴霧による快適空間の創出のための設計手法の構築

研究課題名(英文) Developing design methods with water mist spray to create comfortable outdoor space

研究代表者

成田 健一 (NARITA, Ken-ichi)

日本工業大学・工学部・教授

研究者番号：20189210

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：音速の気温依存性を利用している超音波風速温度計を用い、水滴の影響を受けずに乾球温度を測定することで、微細水ミスト噴霧による気温低下領域を実測することが可能であることを示した。また、気温低下の瞬時変動について解析し、これまで計測できなかった気温低下の持続時間と出現率が、ミストの粒径・ノズルの配置、湿度・風などの気象条件でどのように変化するかを具体的に明らかにした。さらに、被験者実験を行い体感評価の時間変化と気温変動の関係を検討した。ミスト噴霧下で感じる「涼しさ」には、気温低下だけではなく、皮膚に付着したミストの蒸発冷却効果も寄与している。

研究成果の概要(英文)：Evaporative cooling techniques by spraying mist water have been attracted attention as a mitigation measure of the warming in urban area. However, the concrete way of mist control is still unknown. We proposed a temperature measuring method using the sound virtual temperature of the sonic anemometer-thermometer as a proper air-temperature measuring method for the investigation of water mist cooling. And in order to evaluate the psychological influence of water mist evaporation, subjective experiments were conducted in the outdoor space. Perceived coolness by mist spraying is affected by not only air temperature drop but direct wetting of skin. Besides, in outdoor environment, the turbulence of natural wind makes air temperature varied frequently around spraying nozzles. So the rapid response method is absolutely required for the evaluation of thermal comfort.

研究分野：建築学、建築環境・設備

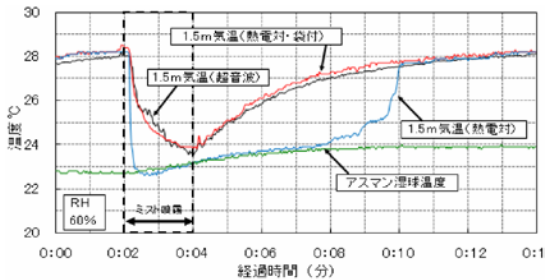
キーワード：ヒートアイランド 蒸発冷却 体感温度 音仮温度 超音波風速温度計

1. 研究開始当初の背景

2005年の「愛・地球博」で一躍有名となった「ドライミスト(登録商標)」は、水を粒径 $16\mu\text{m}$ 程度の微細な霧状にして噴霧し、蒸発する際の気化熱の吸収を利用して局所的に空気を冷却する装置である。しかしながら、冷却効果の大きさや広がり、実際に感じる涼しさのメカニズムについては不明な点が多く、設置されている噴霧装置のオペレーション(どのような条件ならば運転する意味があるか)に関しても、明確な指針がないまま運用されているのが実態である。そのため、昨今の導入例は集客のための「見た目の涼しさ」を狙ったものという捉え方が広まりつつある。具体的な導入計画時においても、ノズルの数や高さなどについて科学的根拠が乏しいことから、経験的な提案という印象が否めず、費用対効果の観点から見送られるケースも多くなっている。

微細水ミスト噴霧の効果を把握しようとする研究は、企業の研究所や大学でこれまでも行われてきたが、その多くは、熱電対をノズルの周囲にグリッド上に配置して温度分布を測るといったものがほとんどであった。しかし、ミストで熱電対が濡れた場合には、正確な気温測定ができていないはずである。

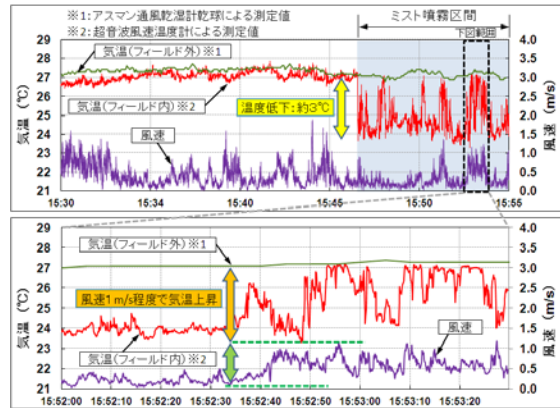
そこで筆者らは、ミストの影響を受けない気温測定値として、超音波風速温度計の音仮温度(音速の温度依存性から算出される温度)を用いた。これは、送受信器間の超音波の到達時間から求めるため、センサー自体が濡れるという影響を原理的に受けることは無い。また比較のため、ミスト噴霧中(2分間)のみビニール袋をかぶせた熱電対でも測定し、通常の裸線の熱電対と比較した。その結果、通常の裸線の熱電対では、ミストの付着により示度は忽ち湿球温度となってしまう、実際の気温(乾球温度)が測れていない。超音波風速温度計による気温と袋で濡れを防いだ熱電対の値はきれいに一致しており、最大 4°C 程度気温が低下しているが、速やかに回復している。それに対し、裸線の測定ではセンサーが乾くまで湿球温度を示し続けていることがわかった(河野俊樹・成田健一、日本建築学会技術報告集 2012)。



ミスト噴霧環境での気温測定(熱電対では測れない!)

次の図は、屋外において高さ 2.5m からミストを噴霧した時の、高さ 1.2m での超音波風速温度計の測定結果である。ミスト噴霧前後では 3°C 程度の温度差が生じているが、ミ

スト噴霧中に風速が 1m/s 程度まで強まると、バックグラウンド気温と同程度まで上昇する結果となっている。このような気温低下の瞬時的な変動、および気流性状との関連性は超音波風速温度計を用いることで初めて明らかとなった。このような気温の瞬時変動は、体感される涼しさのメカニズムを解明する上でも重要なポイントである。



ミストの有無による気温低下量と風速の関係

以上の物理的な検討結果を踏まえ、屋外のミスト噴霧環境下における被験者実験を行った。その結果、夏季の炎天下では、ミストの噴霧によって快適感が向上することはほとんどなかった。しかしながら、様々な日除けとミストを組み合わせた実験を行ったところ、 25% 以上の日射遮蔽率の日除けを併用すると、 25°C 以上の環境でミスト噴霧による大幅な快適感の向上が認められることが明らかとなった。

一連の研究から、屋外におけるミスト噴霧が快適空間の創造という観点から有効となるためには、ある程度の日射遮蔽を行い、尚且つ気流が適度にコントロールされていることが条件となる、という方向性が明らかとなった。

2. 研究の目的

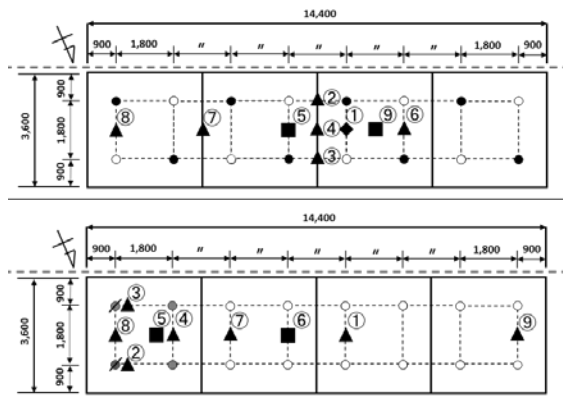
ミスト噴霧の技術において実用的な設計手法を確立するためには、実際に感じる涼しさのメカニズムを明らかにする必要がある。特に屋外環境を想定した場合には、自然風下における変動風を考慮した瞬時的な気温変動特性を把握することが不可欠で、平均値の議論では限界がある。また日射のある環境下では、日射をどの程度コントロールするべきか、という点も重要となる。

以上、日射遮蔽ならびに気流性状の二つを勘案しながらミスト噴霧の効果を定量化し、その上で適切な噴霧ノズルの高さや空間的な密度、ミストの粒径・噴霧量、などを設計要素として系統的な実験を行い、設計手法の構築を目指す。なお、「ドライ」を呼称されているが、実際には皮膚が濡れている効果も無視できないため、この点が体感に及ぼす影響についても検討を加える

3. 研究の方法

初年度、計画通りに超音波風速温度計9台を購入し、微細水ミスト噴霧による気温低下領域と気温変動及び3次元成分風速（1秒毎）を測定した。

(1) 1年目はまず、本学建築棟南側に実験サイトを作成した。実験サイトは幹線道路の歩道空間に見立て、単管を用いて幅3.6m、長さ方向14.0m、高さ2.5mとした。風の影響を考慮するために、長辺片側にプラスチック製の透明な波板を組み合わせて取り付けた。屋根面には、布製の遮蔽材を取り付けた。ミストノズルは2.5m高さに1.8m間隔で2列、計16個取り付けた。



- ミストノズル(2,500mm)
- ミスト噴霧(ノズル8個)
- ミスト噴霧(ノズル4個)
- ◆超音波風速温度計(2,000mm)
- ▲超音波風速温度計(1,500mm)
- 超音波風速温度計(750mm)

ミストノズルとセンサの配置状況

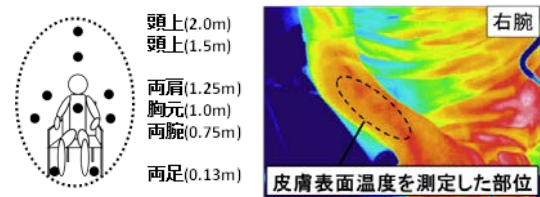
今回の噴霧量はノズル1個当たり約45g/minである。なお噴霧量は、ノズルに乾燥させた500mlペットボトルを被せた状態で噴霧し、電子天秤にて測定した。またノズルにビニールチューブをかぶせることで、圧力と噴霧量を変えずに、ノズルの数を変化させながら実験を行った。ノズル数はfullの16個、半分の8個、以上は面的に噴霧した状態で主に高さ別の影響範囲を検討（上図上段のセンサ配置）。それに加え、風による気温低下領域の拡がり把握を目的で、東端のノズル2個あるいは4個のみとした検討（上図下段のセンサ配置）も行った。

(2) 1年目の計測において、使用している超音波風速温度計の温度出力に関して、予想以上に経時変化が大きく、解析上無視できないことが途中で判明した。そのため、2年目は、ミスト発生装置のレンタル期間を早め、5月から1年目の追加再実験を実施した。2年目からは、2時間毎にミスト噴霧なしでのデータを必ず取得し、バックグラウンド気温とのキャリブレーションを細かく行いながら実験をすすめた。

7月以降は、これまでのミスト粒径 $20\mu\text{m}$ に加え、 $30\cdot 40\cdot 50\cdot 60\mu\text{m}$ のノズルも使用し、ミスト粒径による違いについても考察した。ここでは1秒毎の気温の瞬時変動データを用いて、特に、測定高さ（ノズルからの距

離）や湿度・風速条件、ノズルの数によって、気温低下の持続時間と出現率がどのように変化するかを中心に解析した。

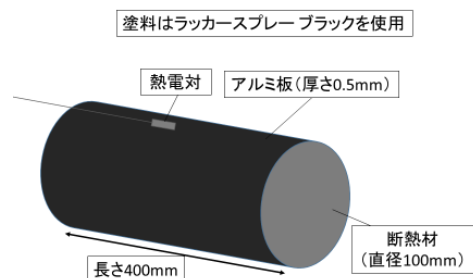
以上の物理的な測定に加え、2年目は体感温度に及ぼす影響を把握するための被験者実験を行った。椅座安静状態の被験者（半袖半ズボン）の周囲、高さ0.13~2.0mに超音波風速温度計9台を配置し、1秒毎の気温変化を測定すると同時に、肘掛けに水平においた右下腕部の皮膚表面温度をサーモカメラで3秒毎に収録した。さらに、右手の4指の位置にボタンスイッチを設けたボックス（ボタンで出力電圧が変わる）を自作し、ミスト噴霧時の体感温度を、押さないを含めた5段階で評価させ、1秒毎に申告値を収録した。評価時間は、噴霧なしの前1分に続く10分間とし、5人の被験者で、ノズルの粒径も変えながら、計92回の測定を行った。



被験者実験時の測器配置(左)と皮膚温測定部位(右)

(3) 2年目の被験者実験において、皮膚温については、温度低下の絶対量も小さく、体感温度申告値との相関も明確ではないという結果となった。しかしながら、熱画像による皮膚温の測定精度にやや疑問が残った。カメラと対象との距離は1.5m程度であったが、その間を通過するミスト自体の影響が熱画像動画から推測された。また、皮膚温は人体の血流の影響で温度保持をして、冷却を妨げている可能性があるため、変化が小さいからといって蒸発によって熱が奪われている量が必ずしも小さいとは断定できない面もあると思われた。そこで、断熱した模擬試験体を作成し、蒸発冷却による表面温度変化の把握を試みた。

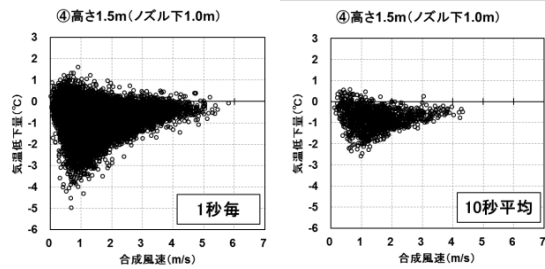
直径100mmの円筒形の断熱材に黒く塗装した厚さ0.5mmのアルミ板を取り付けたものを腕の模擬試験体とし、人の腕と模擬試験体を間近に並べ、赤外放射カメラとオモテ面とウラ面に貼り付けた熱電対を用いて表面温度を連続測定した。また付近に超音波風速温度計を設置し、気温と風速を測定した。



人体の腕を模した模擬試験体の構造

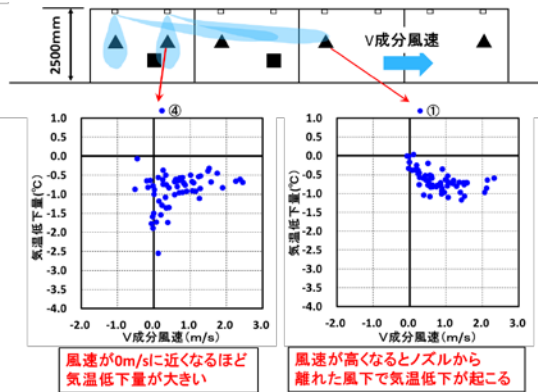
4. 研究成果

(1) 超音波風速温度計による1秒毎の気温と風速の瞬時変動から、両者の関係を解析した。気温低下量（バックグラウンド気温との温度差）を3次元合成風速に対してプロットした一例を下図に示す。バックグラウンドの湿度条件は約50%である。1秒毎のデータでは、弱風時に最大5℃程度の気温低下が起こっている。しかしながら10秒平均では最大低下量は3℃以下になっており、気温低下が非常に瞬時的な現象であることがわかる。



気温低下量と風速の関係(平均時間による変化)

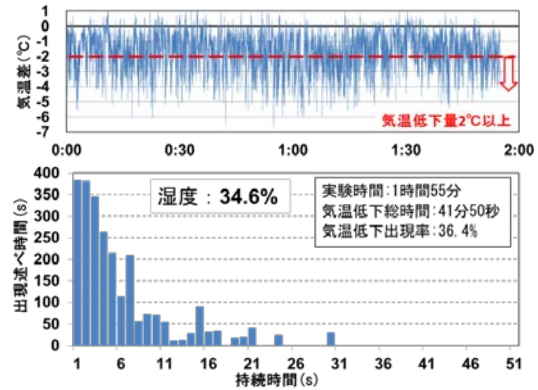
次の図は、ノズル数4個の条件で水平風速による風下方向への気温低下領域の広がりを検討した結果の一例である。横軸はセンサ配置方向の成分風速（V成分）の値である。ミストを噴霧しているノズルの直下付近では、風速が±0m/s付近で気温低下量が大きくなるが、風速が大きくなると気温低下はほとんど見られなくなる。一方、風下側のセンサでは、無風時には気温低下が見られないのに対し、V成分風速が大きくなるにしたがって気温低下が現れている。なお、気温低下量の大きさはノズルからの距離とともに小さくなっていることがわかる。



水平風速による風下方向への気温低下領域の拡がり状況

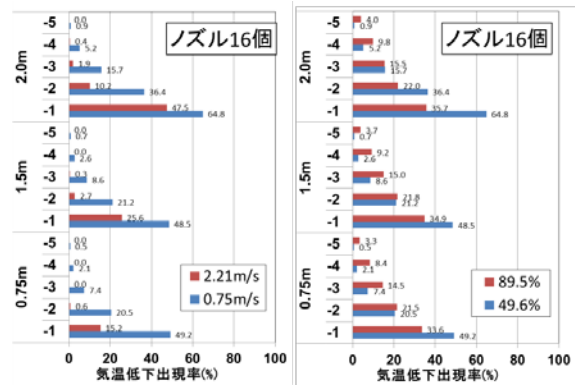
(2) 次図は、約2時間の気温変動の様子と、一定温度（ここでは2℃）以上の気温低下が持続した長さ（秒）の分布の一例である。大半の気温低下は、持続時間が5秒以内となっているが、最長30秒持続した場合もあった。このような持続時間の分布は、測定高さ（ノズルからの距離）や湿度・風速条件、ノズルの数によって変化した。さらに、これらの持続時間分布をもとに一定温度以上の気温低下が起こった総時間を求め、基準温度毎に気

温低下出現率を算出して比較した。



気温低下量の変動(上)と持続時間分布(下)の一例

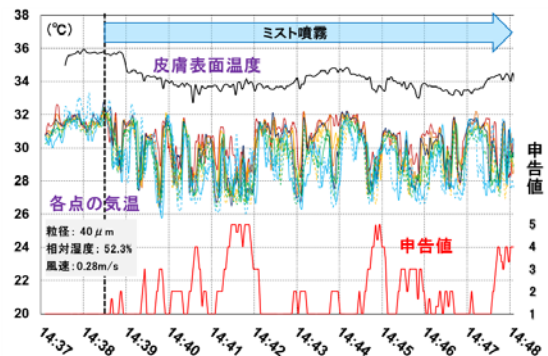
下図は、測定高さ2.0、1.5、0.75mの3高度について、-1～-5℃の気温低下が出現する割合を、湿度条件と風速条件について比較したものである。高湿度そして強風になるほど出現率が小さくなる傾向があり、特に地表近くは強風時に出現率が極端に小さくなる。図は省略するが、ノズルの数が半減すると、条件にかかわらず、出現率は大幅に小さくなった。



測定高さ風速・湿度による気温低下出現率の比較

* 体感温度に及ぼす要因 (被験者実験)

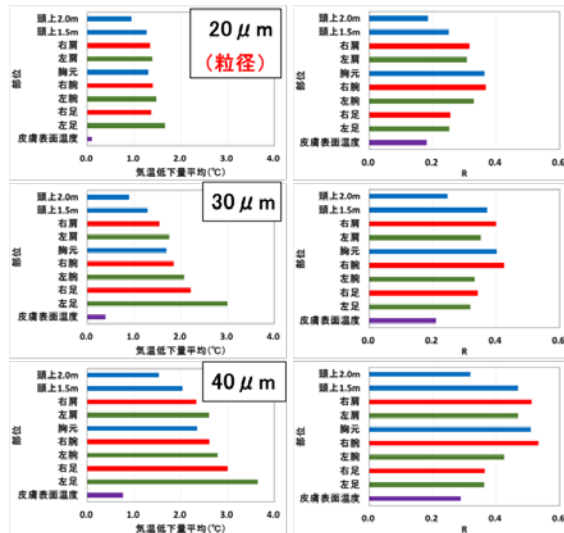
9点の気温と皮膚温、および体感評価申告値の経時変化の一例を下図に示す。



各点の気温変動・皮膚温の変化と申告値の経時変化の一例

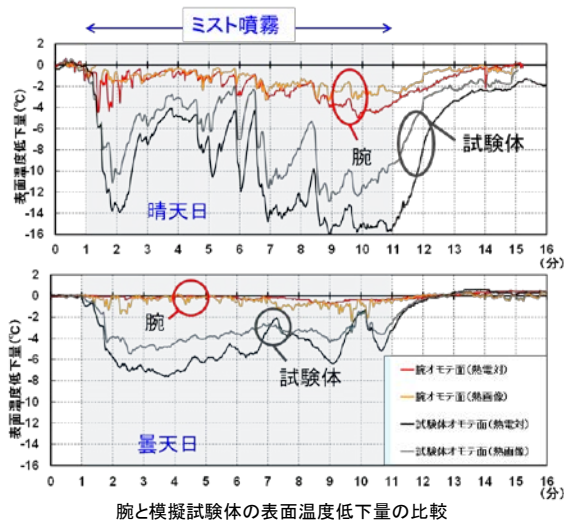
さらに、熱画像と同じ3秒毎のデータについて、噴霧前1分間の値を基準とした各測器位置の気温低下量と皮膚温低下量を求め、体感温度申告値との相関を求めた。次図は、各位置における気温低下量および皮膚温低下

量、並びにそれらと申告値の相関係数をミストの粒径別に比較したものである。特にミストの粒径が大きい場合には、足元での気温低下量が大きくなっている。一方、申告値との相関は、上半身付近の気温に対する反応が大きい傾向がある。皮膚温については、温度低下の絶対量も小さく、体感温度申告値との相関も明確ではないという結果となった。



各点の気温低下量・皮膚温低下量(左)と申告値との相関(右)

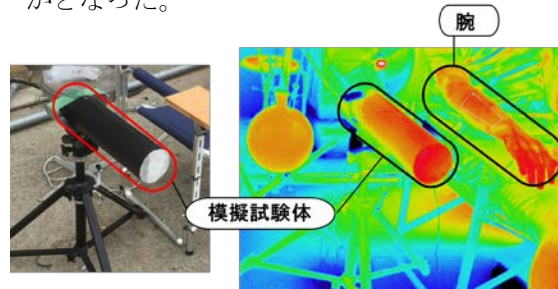
(3) 下図は、腕と模擬試験体の表面温度低下量を比較したもので、各々貼り付け熱電対での値と、3秒毎の熱画像から読み取った値の両方を表示した。熱画像による表面温度は、熱電対による測定値よりもやや高めに推移しているが、腕の表面温度がほとんど低下していない(最大でも2°C程度)のに対し、模擬試験体の表面温度はミスト噴霧中大きく低下しており、最大で16°C近く下がっている。すなわち、人体の皮膚表面温度に大きな変化が表れていなくとも、ミストの付着に伴い大きな蒸発冷却が起こっていることが確認された。



腕と模擬試験体の表面温度低下量の比較

ミスト噴霧下では、皮膚の表面温度に大きな低下は見られないが、実際には大きな蒸発冷却が起こっていることが確認された。従っ

て、ミスト噴霧で感じる「涼しさ」には、気温低下だけではなく、皮膚に付着したミストの蒸発冷却効果も寄与していることが明らかとなった。



腕と模擬試験体の表面温度比較(左:可視画像、右:熱画像)

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[学会発表] (計3件)

- ① 三坂 育正・成田 健一、微細ミストによる暑熱環境緩和に関する研究(第3報) 疑似発汗による冷却効果の評価、空気調和・衛生工学会、2017年09月13日、高知工科大学・香美キャンパス
- ② 成田 健一・三坂 育正・河野 俊樹、微細水ミスト噴霧による暑熱緩和効果の屋外実験～気温の瞬時変動の解析と体感評価の時間変化、日本建築学会、2016年08月26日、福岡大学・七隈キャンパス
- ③ 成田 健一・三坂 育正・河野 俊樹、微細水ミスト噴霧による気温低下領域の実測～超音波風速温度計の多点計測による検討、日本建築学会、2015年09月04日、東海大学・湘南キャンパス

6. 研究組織

(1) 研究代表者

成田 健一 (NARITA, Ken-ichi)
日本工業大学・工学部・教授
研究者番号：20189210

(2) 研究分担者

三坂 育正 (MISAKA, Ikusei)
日本工業大学・工学部・教授
研究者番号：30416622