

微細水ミスト噴霧時における乾球温度変化量の測定法に関する実験的検証

EXPERIMENTAL STUDY ON THE MEASURING METHOD OF DRY-BULB TEMPERATURE IN WATER MIST ATOMIZATION

河野俊樹 —— * 1 成田健一 —— * 2

Toshiki KOHNO —— * 1 Ken-ichi NARITA —— * 2

キーワード：
ミスト, 超音波風速温度計, 音仮温度, 乾球温度, 湿球温度

Keywords:
Mist, Ultrasonic anemometer-thermometer, Sound virtual temperature, Dry-bulb temperature, Wet-bulb temperature

The result of having performed temperature measurement in water mist atomization may be wet-bulb temperature. The air temperature in water mist atomization needs to measure dry-bulb temperature. This report presents the result of having compared with wet-bulb temperature the measured value of an ultrasonic anemometer-thermometer and thermo couple which were water mist atomization and were measured. The result confirmed a possibility that dry-bulb temperature could be measured with an ultrasonic anemometer-thermometer.

1. はじめに

「ドライミスト」といわれる噴霧式の微細水ミスト（以下、ミストという）は、発案者である辻本らにより2005年の「愛・地球博」での設置を皮切りに、屋外でのミスト適用から屋内向け冷却装置（家庭用）としての適用の可能性まで、研究の対象を広げている¹⁾。また、ミストに関する一連の研究では、主にフィールド実験やCFD解析による再現によって冷却効果の検証を試みている事例が多くみられる²⁾。これらの研究では、ミスト噴霧装置を用いた気温低下量の測定に熱電対やサーミスタなどのセンサーを用いるのが一般的である³⁾。このようなセンサーを用いる気温測定法の場合、ミストの水粒子がセンサーを濡らし、結果として測定される値は湿球温度となっている可能性がある。測定結果が湿球温度であった場合は、ミストの冷却効果が過大評価される可能性が高い。今後、CO₂対策をはじめとして、有効な暑熱緩和手法として期待されるミストによる冷却効果を適正に評価するには、ミスト噴霧環境下での乾球温度変化量の把握が重要である。そのためには、ミスト付着の影響を極力排除できる測定方法を検討し、ミスト噴霧下においても乾球温度の測定が可能な測定方法を確立する必要がある。

筆者らは、乾球温度測定方法として、超音波風速温度計によって測定される音仮温度に着目した。超音波風速温度計による測定値（音仮温度）の気温換算には絶対湿度による水蒸気補正が必要となるが、音仮温度の変化量の確認のみでも熱電対等との相対変化量の比較による乾球温度の測定可能性の判断は可能であると考えられる。本報では、ミスト噴霧環境下での超音波風速温度計の音仮温度測定値と熱電対での測定値との比較によって、超音波風速温度計による乾球温度変化量の測定の可能性について検証した結果を報告する。なお、音仮温度の比較対象とした熱電対による測定では、熱電対を直接ミスト噴霧下に曝した場合に加え、ミスト噴霧時における熱電対への簡易なミスト付着対策（ビニール袋を用いた防水）を行った場合を

対象とした。このミスト付着対策そのものは、あくまで音仮温度測定値との比較を目的とした実験上の手法であり、それ自体を乾球温度の測定法として位置付けているものではない。

2. ミスト噴霧下での乾球温度測定検証方法の検討

2.1 検証方法

高温環境下では乾球温度そのものを測定することは困難である。よって本報で述べる検証実験では、湿球温度を比較対象とし、ミスト噴霧範囲外に設置したアスマン通風乾湿計によって測定された湿球温度とミスト噴霧範囲内で測定された超音波風速温度計と熱電対の測定値の比較により、乾球温度測定の可能性を検証した。超音波風速温度計と熱電対の測定結果がミスト噴霧前後でアスマン通風乾湿計による湿球温度と同様の变化傾向を示せば、湿球温度を測定している可能性が高いことになり、逆説的に乾球温度の測定法として適していないことになる。なお、超音波風速温度計と比較する温度センサーは、従来、気温の測定に多用されているT型熱電対（φ0.32mm）とした。

2.2 超音波風速温度計の適用

超音波風速温度計は、大気中の2つの固定点間を伝播する音波信号の伝播時間が静止大気中の音波と固定点間を結ぶ風向風速成分の関数によって表わされる原理を応用し、風向・風速を求める測定器である。さらに、音波の伝達（音速）が温度によって変化することを利用して、温度変動も測定することができる。この測定原理によれば、熱電対等、感知部の起電力や電気抵抗を温度換算する測定器に比べ、音波（波動）の伝播時間を測定して温度換算する超音波風速温度計は、その測定結果にミスト（水）付着の影響を受けにくいと考えられる。ただし本来、絶対湿度（水蒸気量）の急激な変化を伴う環境下では、超音波風速温度計の音仮温度から気温を算定するために水蒸気による補正が必要となる。今回の検証では、ミスト噴霧

¹⁾ ㈱イマギレ経営企画室 課長
(〒331-0045 さいたま市西区内野本郷219-3)

²⁾ 日本工業大学工学部建築学科 教授・工博

¹⁾ Manager, Imagiire Corporation

²⁾ Prof., Dept. of Architecture, Faculty of Engineering, Nippon Institute of Technology, Dr. Eng.

前後の相対変化量の比較を行うことで、ミスト噴霧外で測定した湿球温度の変化量との比較検証は可能であると判断し、水蒸気補正による絶対値としての気温変化量の比較ではなく、音仮温度の測定値そのもので熱電対測定結果との変化量の対比を行っている。なお、水蒸気補正によるミスト噴霧環境下での音仮温度と気温補正量の誤差範囲については、赤外線吸収湿度計（オープンパスアナライザー）を用いた絶対湿度測定によって検証した結果を5章にて述べる。

3. 超音波風速温度計と熱電対との比較実験

3.1 超音波風速温度計－熱電対比較実験概要

本章と4章の実験は、ミストの拡散に影響する気流や日射の影響を排除するため、表1に示す実験条件での室内実験にて行った。実験に使用したミスト噴霧器は、ミストをファンで送風し拡散させる送風機一体型の移動式ミスト噴霧装置（ミスト粒子径：30 μ m、噴霧量：0.24l/min、写真1）とした。なお、ミスト付着による蒸発冷却の影響範囲を確認するため、熱電対設置場所と同位置に簡易なグローブ温度計（小型のアルミボトルに熱電対を張り付け黒のスプレー塗装したもの、図1）を設置し、ミスト噴霧前後の表面温度変化を測定した。

超音波風速温度計と熱電対との比較実験は、ミスト噴霧下における超音波風速温度計（音仮温度）の測定値と熱電対の測定値をアスマン通風乾湿計による周辺空気（ミスト噴霧直達範囲外）の湿球温度の測定結果と比較することで、それぞれの温度測定結果へのミストの影響の有無を確認することを目的として実施した。直接ミスト付着の影響を受けない湿球温度を比較対象とするため、アスマン通風乾湿計はミスト噴霧器より後方の位置に設置した。実験室の測定機器配置を図2に、実験状況を写真2に示す。

3.2 ミスト噴霧器の効果確認

実験に先立ち、使用したミスト噴霧器の冷却効果を確認した結果を図3に示す。図中の熱画像は、ミスト噴霧直近約1.5mの位置で、片腕（右腕）のみミスト噴霧中に曝した腕部の表面温度分布測定結果を示したものである。測定結果より実験に使用したミスト噴霧器では、上腕・下腕の平均温度と最低温度で、5～6 $^{\circ}$ Cの表面温度差異を生じさせる効果を有する噴霧器であることを確認した。このミスト噴霧器による蒸発冷却の影響範囲を検証するため、熱電対設置場所と同位置に設置した簡易グローブ温度計によるミスト噴霧前後の測定結果を図4に示す。ミスト噴霧中は、ミスト噴霧器からの距離に比例して表面温度が変化していることから、測定した距離全てに蒸発冷却の効果が及んでいると判断できる。なお、付着したミストがミスト噴霧器からの送風により直達して付着したものか、室内に拡散して間接的に付着したものを確認するため、簡易グローブ

表1 実験条件

実験室寸法 (mm)	(W)9,530 × (D)3,560 × (H)3,285	
実験室容積 (m ³)	111.45 (m ³)	
開口条件	出入口・窓 全閉鎖	
空調・換気	全停止	
実験期間	2009年8月18日～8月19日	
ミスト噴霧器諸元	寸法 (mm)	(L)710 × (W)530 × (H)1,750
	噴霧量 (l/min)	0.24
	ミスト粒子径 (μ m)	30
	ファン直径 (mm)	450
	風量 (m ³ /min)	85

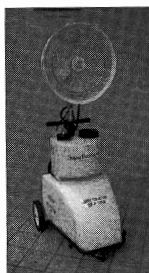


写真1 ミスト噴霧器

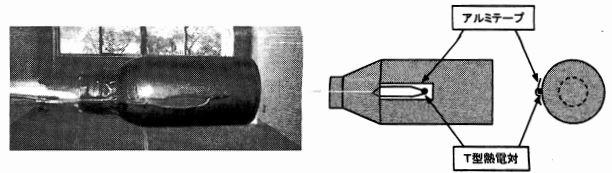


図1 測定機器配置(超音波風速温度計－熱電対比較実験)

温度計は2列設置し、一方はミスト噴霧器に対して正対する側面（風上側：図2中のB列）に、他方はミスト噴霧器方向に対して逆の側面（風下側：図2中のA列）に熱電対を張り付けた。図4はミスト噴霧流に対して図2中B列の風上側グローブ温度計表面温度測定結果であるが、図2中A列の風下側グローブ温度計表面温度測定結果でも風上側同様、距離に比例して表面温度が変化する結果が確認されている。

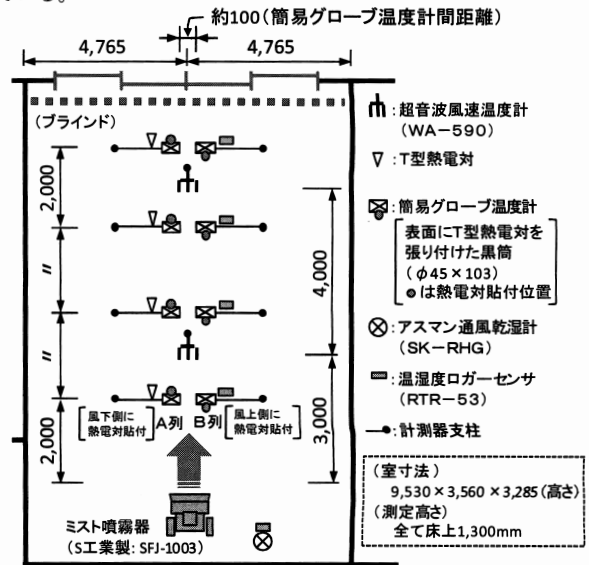


図2 測定機器配置(超音波風速温度計－熱電対比較実験)



写真2 実験状況(超音波風速温度計－熱電対比較実験)

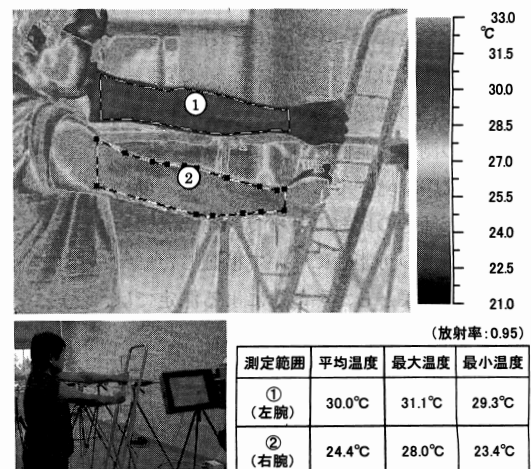


図3 ミスト噴霧前後の体表面温度測定結果（腕部）

3.3 超音波風速温度計—熱電対比較実験結果

2分間のミスト噴霧（約 0.480噴霧）前後のミスト噴霧器から 3 m位置（平均風速：1.6m/s）での超音波風速温度計と熱電対の温度計測結果、およびアスман通風乾湿計の湿球温度測定結果を図5に、同様に 8 m位置（超音波風速温度計は 7 m位置で平均風速：0.7 m/s）での測定結果を図6に示す。図5に示した 3 m位置の測定結果では、熱電対がミスト噴霧開始直後にミスト付着の影響と思われる急激な温度低下を示した後、ミスト噴霧中に温度上昇に転じ、ほぼアスман通風乾湿計の湿球温度と同様な変化量（2分間で約 1℃上昇）を示している（図5中のA）。さらにミスト噴霧停止後は付着していたミストの蒸発が完了したことと起因すると思われる急速な温度上昇を示した後、超音波風速温度計と同様な温度変化に移行する。この結果から、Aの区間の熱電対は湿球温度を測定している可能性が高い。一方、超音波風速温度計による測定温度（音仮温度）は、ミスト噴霧中は温度低下を続け、ミスト噴霧停止直後から温度上昇する変化を示しており、アスман通風乾湿計の湿球温度の変化と際立って類似していると思われる変化は示していない。よってミスト噴霧後を比較すると、超音波風速温度計は熱電対よりもミスト付着の影響を受けにくいと判断できる。図6に示した 8 m位置においても、熱電対の測定値はミスト噴霧停止後の短い区間（図6中のB）ではあるが、湿球温度と同様な温度変化を示している。その後は超音波風速温度計と同様な温度変化に推移しており、ミスト付着の影響はミスト噴霧直下に限らない結果となっている。本実験により、超音波風速温度計は熱電対よりもミスト付着の影響を受けにくい可能性があることを確認した。

4. ミスト付着対策熱電対との比較実験

4.1 ミスト付着対策熱電対測定実験概要

本実験では、超音波風速温度計の測定値が乾球温度に近い値になるかを検討することを目的に、超音波風速温度計測定値と検証のための実験的な手段として簡易なミスト付着対策を施した熱電対の測定値および対策していない熱電対の測定値のミスト噴霧前後における変化をアスман通風乾湿計による周辺空気の湿球温度の測定結果と比較した。具体的な熱電対のミスト付着対策手順は、ミスト噴霧前～噴霧中にジッパー付のビニール袋を被せ、噴霧停止後すぐにビニール袋をはずすという手順である。これは、ミスト噴霧中のみ熱電対周囲にビニール袋を被せることで熱電対へのミスト付着が抑制され、測定値が乾球温度に近似するのではないかとこの発想による。測定機器配置を図7に、実験状況を写真3に示す。

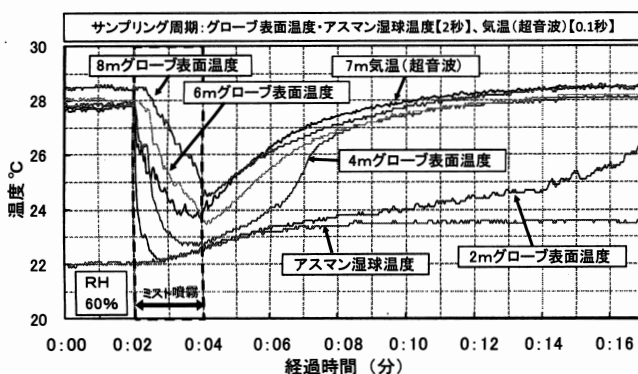


図4 距離別簡易グローブ温度計表面温度測定結果

4.2 ミスト付着対策熱電対測定実験結果

超音波風速温度計—熱電対比較実験同様、2分間のミスト噴霧前後のミスト噴霧器から 1.5m位置での付着対策した熱電対と超音波風速温度計および通常（未対策）の熱電対の温度測定結果を図8に示す。図8より、ミスト噴霧前は各測定値とも同様の温度変化であるが、ミスト噴霧後、未対策の熱電対は急速に温度低下し、ミス

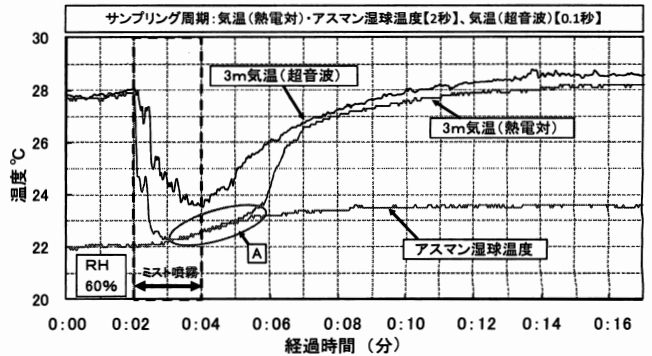


図5 超音波風速温度計と熱電対の測定結果比較（3 m位置）

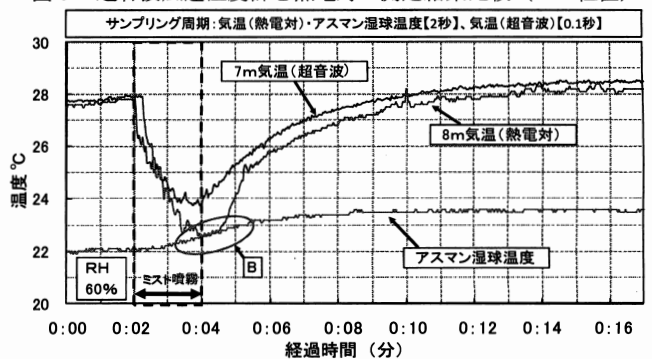


図6 超音波風速温度計と熱電対の測定結果比較（7 m位置）

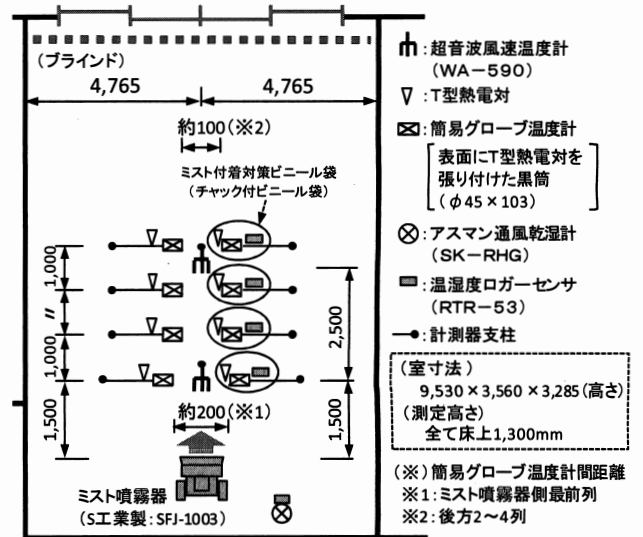


図7 測定機器配置（ミスト付着対策熱電対測定実験）

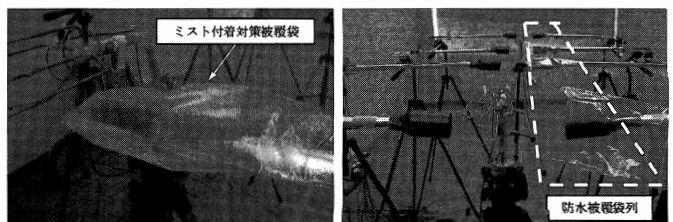


写真3 実験状況（ミスト付着対策熱電対測定実験）

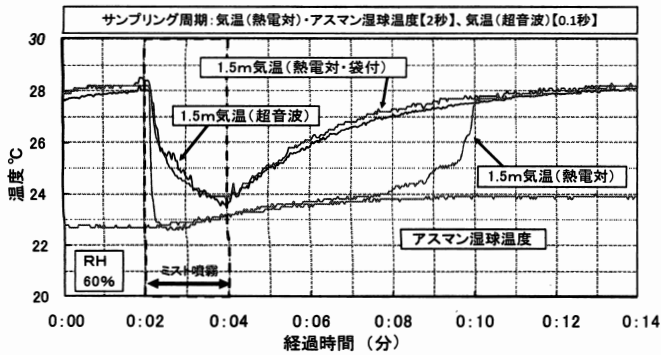


図8 付着対策した熱電対と他計測温度測定結果 (1.5m位置)

ト噴霧停止後もしばらくは湿球温度と同様の温度変化を示し、温度回復に時間を要する結果となっている。対して、ミスト付着対策した熱電対は、ミスト噴霧中に温度低下を続け、噴霧停止後すぐに温度上昇に転じ、緩やかに温度上昇を続ける結果となった。超音波風速温度計についてもミスト付着対策した熱電対とほぼ同様の変化を示している。これらの結果から判断すると、超音波風速温度計の測定値は、ビニール袋を用いて簡易ではあるがミスト付着の影響を排除した熱電対の測定値と同様に湿球温度とは異なる温度変化を示すことが確認できた。よって、本実験から、超音波風速温度計による乾球温度低下量の測定が可能であると判断した。

5. 超音波風速温度計の水蒸気補正

2.2 で述べたように、超音波風速温度計で測定された音仮温度から厳密に気温の絶対値を求める場合は絶対湿度 (水蒸気量) による水蒸気の変動成分の補正が必要となる。実施した実験では、絶対量としての気温ではなく、各測定値の変化量による相対比較とすることで、水蒸気補正を行っていない音仮温度のままで測定結果を比較した。ここでは、水蒸気補正の有無による差異についての影響も確認するため、オープンパス式の赤外線吸収湿度計によって測定した絶対湿度を用いて水蒸気補正前後の絶対値変化量の確認実験を行った結果について述べる。水蒸気補正による音仮温度から気温 T [K] への補正は、水蒸気圧 \ll 大気圧とした場合の近似式 (1) による⁴⁾。

$$T = (1 - 0.51x) T_{vt} \dots \dots \dots (1)$$

ここで、 T_{vt} : 補正前の超音波風速温度計の温度 [K]
 x : 絶対湿度 [kg/kg']

確認実験は、図9に示す気密性を高めたガラス製の実験BOX内へミスト噴霧 (噴霧時間 : 1分30秒、噴霧量 : 97.88g) し、噴霧前後の音仮温度を超音波風速温度計、絶対湿度を赤外線吸収湿度計にて測定した。測定した絶対湿度より水蒸気補正を行ったミスト噴霧前後の超音波風速温度計の測定値と補正前の測定値を図10に示す。なお、使用した赤外線吸収湿度計はオープンパス式であることから、超音波風速温度計とプローブ同士を近接させて測定を行っている。厳密には吸光側の窓面への水滴付着の有無等、ミスト環境下での測定精度について検討すべきであるが、本実験ではその確認まではできていない。図10より、ミスト噴霧前は絶対湿度約 6.5 kg/kg' で約 1°C 、ミスト噴霧後は約 16 kg/kg' で約 2°C の補正量であることを確認した。確認実験は、水蒸気の外部拡散が抑制される密閉したガラスBOX内で行ったものであり、ミスト使用空間としては極端な環境である。実際のミスト使用空間 (多くの場合、屋外または半

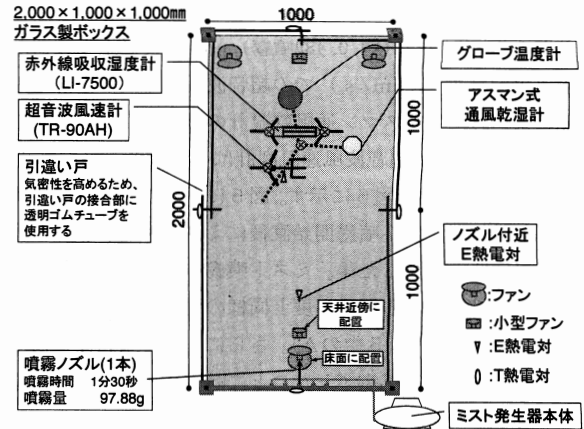


図9 超音波風速温度計水蒸気補正実験装置

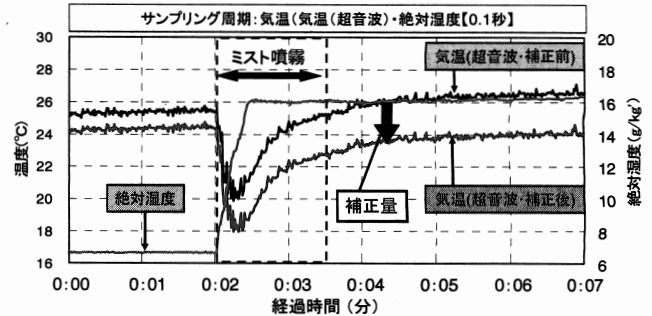


図10 超音波風速温度計水蒸気補正結果

屋外) では、水蒸気拡散により、本実験ほど絶対湿度の上昇は起こり得ないと考えられる。よって確認実験で得られた結果は、極端な使用条件で取り得る補正量と位置付けであり、ミスト使用時の超音波風速温度計の補正によって生じる音仮温度と気温換算値の差異は最大で 2°C 程度であることを確認した。

6. おわりに

湿球温度を基準にした実験結果より、熱電対をミスト噴霧下に暴露したままの測定では、ミスト付着の影響で湿球温度を測定している可能性が高いことを確認した。対して超音波風速温度計では、実験的な検証のための手段としてビニール袋を用いて噴霧中のミスト付着対策 (防水処置) を行った熱電対との比較から、湿球温度と異なる測定結果を得た。本報で行った検証では、気温 (= 乾球温度) の絶対量を確認してはいないが、気温の低下量など相対変化量は測定できており、超音波風速温度計を用いることで、ミストによる気温変化量をかなり正確に測定することが可能であることを確認した。今後は、赤外線吸収湿度計を用いた水蒸気補正の適用を再確認した上で、屋外でのミスト冷却効果の確認等、実際の環境測定における乾球温度測定法としての妥当性についても検証していく予定である。

参考文献

- 千葉, 辻本 : 京町家における家庭用ドライミストの噴霧効果に関する研究, 日本建築学会大会梗概集 D-2, pp. 199~200, 2011
- 辻本ほか : 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, pp. 1313~1320, 2008. 11
- 林啓紀ほか : 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 1), 日本建築学会大会梗概集 D-1, pp. 805~806, 2004
- タワーフラックス観測マニュアル編集委員会 : タワーフラックス観測マニュアル Ver1. 10, 森林総合研究所, pp. 35, 2012
 ※上記 4) は独立行政法人 森林総合研究所 H.P (下記 URL) よりダウンロード可能。
[http://www2. ffpri. affrc. go. jp/labs/flux/manual_j.html](http://www2.ffpri.affrc.go.jp/labs/flux/manual_j.html)

[2012年2月20日原稿受理 2012年4月24日採用決定]