

技術評価 WG 成果報告

1. はじめに

技術評価 WG は、日除け、ミスト、その他街区における人への暑熱的負荷軽減に資する技術を対象に性能評価方法をまとめることを目的として、2020 年～2024 年度の 5 年間の活動を行った。本 WG の構成メンバーは表 1 の通りであり、クールスポットのラベリング制度に向けて活動する「都市デザイン WG」と検討する内容が一部重なるため、合同 WG を開催して活動した。本 WG で検討対象とする技術は、街中の暑熱対策として一般的であり、かつ採用されることの多い日除け装置とミスト噴霧装置である。ミスト噴霧については、後述するように、確立された評価方法が現時点で見当たらないが、暑熱緩和効果の定量化が強く望まれている技術であるので、独自に試験方法を考案するとともに、暑熱緩和の定量評価が可能であるかどうかを含めて検討することにした。

大阪 HITEC では「大阪ヒートアイランド対策技術認証評価制度」を実施していた。そこでは、評価項目と基準値、試験方法を定め、試験の実施は指定する評価実施機関に委ねることとしている。本 WG において技術評価方法を検討するに当たり、この技術認証制度を参考とし、「①評価項目を決定」し、「②その試験を行い評価値（試験値）を得て」、「③大阪 HITEC において何らかの認証を行う」ような枠組みを想定し、評価方法を提案することに決めた。なお、技術認証制度で対象とした技術は数 cm 程度の試験片で試験が可能であり、評価実施機関に試験を委ねることが可能であるが、本 WG の対象技術である日除け装置やミスト噴霧装置はサイズが大きいので、評価を必要とするメーカーやユーザー自身が、装置が構築・設置された現地において、試験を行うような評価実施方法を想定することにした。したがって、試験方法は、一般的な技術者が、入手の容易なセンサーや測定装置を用いて試験を実施し、評価できるように設計する。

ところで、日除け装置については、環境省のまちなかの暑さ対策ガイドライン（文献 1、2）において「体感温度による対策効果の把握」の章が設けられ、暑さ指数 WBGT による把握方法やシミュレーションに把握方法が示されるなど、性能評価方法は概ね確立されている。本 WG でも、これらの文献をもとに検討し、暑さ指数を用いた評価方法を採用することにした。他方、ミスト噴霧装置については、河野・成田ら（文献 3）などの研究例があるが、本 WG で目指す評価方法には実施が困難な試験方法であり、本 WG において独自の試験方法を考案することにした。また、日除け装置とミスト噴霧は併用される場合が多いが、日除け装置は人体に向かう放射熱を低減させる効果をもつのに対し、ミスト噴霧装置は水分蒸発による気温低減効果であり、両者は原理が異なるので、性能評価に際しても独立して個別に評価を行うこととする。

表 1 技術評価 WG メンバー

主査	西岡真稔(大阪公立大学)
幹事	木下進一(大阪公立大学)
委員	FARNHAM CRAIG (大阪公立大学, 2023 年度より委員) 鈴木慎一((株)いけうち, 2023 年度より委員)
アドバイザー	北宅 善昭(大阪公立大学)
オブザーバー	山田 宏之(大阪公立大学)

2. 日除けの性能評価方法

2.1 性能評価の方針

2.1.1 測定機器

前述したように、一般に入手可能なセンサー・測定機器として電子式湿球黒球温度 (WBGT) 指数計 (以下では WBGT 計と略す) を用いることにした。WBGT 計は、JIS B 7922 (文献 4) によって規格化されており一定水準の測定精度が保証されている。また、斉藤ら (文献 5) に依れば、以前 (2023 年改定以前の JIS B 7922 の規格品) の電子式 WBGT 測定機は、ISO 7243 (JIS Z 8504) に規定されている本来の WBGT と測定原理が異なるために、日射環境下では 3K 程度低い値をとると報告していたが、JIS B 7922 (2023 改訂) によって、「自然湿球温度および黒球温度は近似計算による推定および補正を行わなければならない」とされ、問題が解消され一層信頼のおける測定機となっている。

2.1.2 測定方法

本 WG で提案する試験手順の概要を表 2 に示す。この手順に則り、図 1 に示すように、日除け装置の有無以外は同一気象条件と考えられる 2 地点において、WBGT 指数計を同時に測定し、2 地点間の WBGT 指数の差 (Δ WBGT) により評価する。日除け装置の構築・設置された現地における観測では、WBGT 指数は観測時点の気象条件に左右されるので WBGT 指数自体を評価値として用いず、日除け装置の有無により生じる WBGT 指数の差 (Δ WBGT) を評価値として用いる^{注 1)}。

2.1.3 暑熱緩和の効果範囲

日除けに期待される暑熱緩和効果を図 2 にまとめた。日除けは、直達日射を遮り人体に日影を作る効果 (図中の (a)) と他に、日影を作ることで地面や床面の反射日射を低減したり、日影により地面や床面の温度を低減し人体への長波放射を減じるなどの間接効果がある。これらの間接効果は、日除け装置が大面積であれば、日向部から離れた日影部が創出されて暑熱緩和効果が大きくなると考えられる。したがって、図 3 のように WBGT を複数点で計測し各点の Δ WBGT が -3K であれば、その計測点で囲まれる範囲は、-3K 以上の Δ WBGT と見なすことができよう。日除け装置が大面積の日影を創出できるような構造であれば、暑熱緩和効果の認められる面積についても評価項目とする。

表2 日除け装置の試験手順など

<ul style="list-style-type: none"> ✓ 使用するセンサー <ul style="list-style-type: none"> ➤ JIS B 7922 に準拠したクラス 1.5 またはクラス 1 の WBGT 指数計 ✓ 試験条件（立位の成人を想定） <ul style="list-style-type: none"> ➤ 気象条件： 夏季晴天日、日中の暑熱環境 ➤ WBGT 計の設置高さ： 地上高さ 1.1m (ISO7726 によれば腹部の位置は立位で 1.1m) ➤ 試験時間： 各評価点において 1 時間以上 (JISZ8094 (文献 6) に従う) ✓ 試験手順 <ul style="list-style-type: none"> ➤ 事前準備（試験実施前に行っておくこと） <ul style="list-style-type: none"> ◇ 2 台の WBGT センサーの器差が小さいことを確認する 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ 試験の実施 <ul style="list-style-type: none"> ◇ 試験対象地点（暑熱緩和装置のある環境）と基準地点（暑熱緩和装置のない環境）で、同時に WBGT を測定する ◇ WBGT 計の指示値の上昇が概ね停止したことを確認してから試験を開始する ◇ 測定間隔は 1 分、測定時間は 1 時間とし、1 時間平均値の WBGT により評価する ➤ 試験状況の記録 <ul style="list-style-type: none"> ◇ 日よけ装置の効果は定常であるが、保水性舗装など効果に非定常性が強く現れるものがある。このようなものについては、散水時刻と WBGT 測定時刻を記録に残す。
---	--

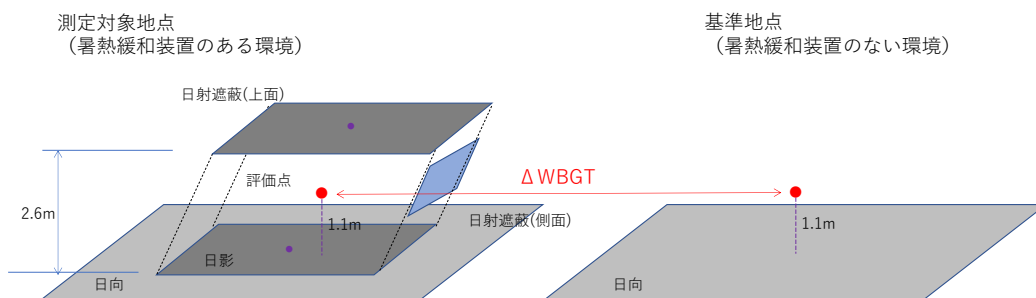


図1 日除け装置の有無に起因する暑さ指数 WBGT の比較評価

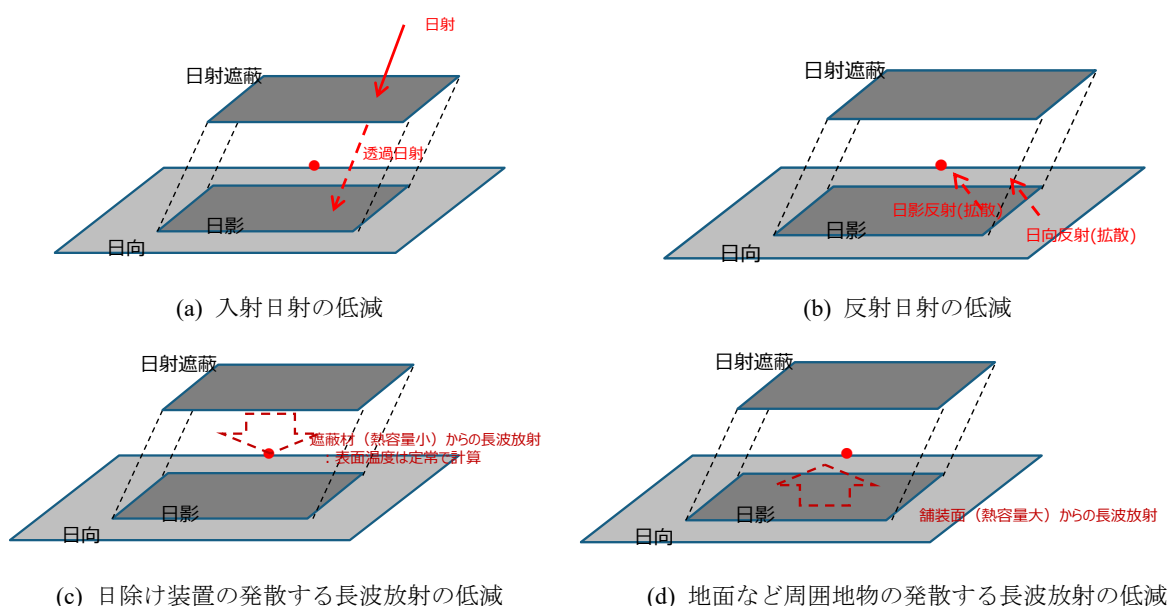


図2 日除け装置に期待される暑熱緩和効果

- 装置の効果範囲が広いことを、実施者がアピールしたい場合は、複数位置(同時測定で無くても良い)でWBGTを測定する。
- 複数位置で測定した最大の Δ WBGT値を、その測定値が囲む領域の Δ WBGT値と評価する。

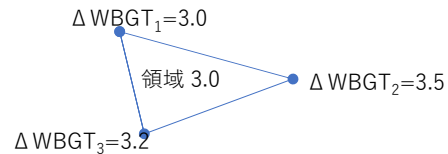


図3 測定された WBGT の囲む範囲についての評価

3. ミスト噴霧冷却の性能評価方法

3.1 先行研究のレビューと本 WG で検討する性能評価法

ミスト噴霧のもたらす暑熱緩和効果は、ミスト（微細水滴）が空気中で蒸発する際の冷却効果により気温を低減する効果と、水滴が人体の皮膚表面に付着した後蒸発し皮膚を直接冷却する効果の二種があることが知られている。気温を低減する効果については、河野・成田の研究（文献3）において、サーミスタや熱電対による測定ではセンサーに水滴が付着し、気温（乾球温度）ではなく湿球温度を計測してしまう問題を指摘し、超音波風速温度計を用いた計測方法を提案しているが、この測定機器の準備やデータ処理の点で一般技術者が測定を実施するには大きな困難がある。また、皮膚に付着した水滴による暑熱緩和効果については、呉・大岡ら（文献7）は、水滴付着による体感温度（SET*）への効果を予測するモデルを開発しているが、現地での測定により効果を定量化するためには、解決すべき問題が多く残されている。このように、現在のところ、効果の定量的な試験方法や評価指標が確立しているとはいえない状況にあるので、本 WG では WG の活動期間内でまとめることのできる性能評価法を独自に探り、その結果を本 WG の成果報告とする方針とした。

3.2 性能評価の方針

ノズルから噴霧されたミストの中で、熱電対など通常の温度センサーで気温を計測すると、図4のようにノズル近傍ではセンサーが濡れ（水滴の付着）、濡れの程度が大きいときは（図中の領域1）湿球温度、濡れの程度が小さければ（領域2）湿球温度と乾球温度の中間の温度を指すであろう。領域1・領域2においては、センサーの濡れによる温度低下と気温（乾球温度）低下が同時に生じるので、気温低下のみを評価することができない。ノズルからある程度離れると、センサーの濡れが生じず気温低下のみが観測可能な領域（領域3）が現れると予想される。さらにノズルから離れると、気温低下が観測できない領域（領域4）へと移行するであろう。

上述の考察より、センサー濡れのない領域（領域3）であれば、通常の温度センサーによってミストによる気温低下が測定可能であり、領域3と領域4に温度差で規定した閾値を設けることによって、領域3の広がり範囲が特定できよう。以上の測定法を念頭に置き、次のような視点で性能を評価することにする。

- ✓ 測定により領域3の外縁を同定し、その外縁の内側をミスト噴霧による気温低減効果の及ぶ範囲と見なす。
- ✓ 地上高1.1mの高さの気温で評価し、測定によって得た対象装置の気温低減効果範囲を評価値（ミスト噴霧装置の効果範囲）とする。

3.2.1 測定機器

気温・湿度の測定は、ミストによるセンサー濡れの発生しない位置で行うこととし、簡易な放射遮蔽を施した熱電対やサーミスタにより温度測定を行う。測定項目は、領域3と領域4の境界を求めるための乾球温度1点、湿球温度1点、およびミスト噴霧の影響の無い位置（基準点）に設けるための乾球温度1点、湿球温度1点である。

3.2.2 測定方法

測定方法を簡易なものに留めるために、測定対象とする噴霧装置は、ノズルが一定間隔で直線上に複数配置されるような設置形態に限定する。このように限定することにより、「領域3の外縁」(前述)の位置は、ノズルの配置された直線からの距離で規定できる。

温度測定により領域3と領域4の境界を定めるために、ノズル配置の直線と直交する方向に側線を設け、地上1.1mで、領域4から領域3方向へ20cm間隔で水平移動して測定を行う。各位置で10分間留まって測定を行い、後半5分の平均値をその位置の温度とする。基準点の乾球温度に対し2K以上の温度低下が認められた位置を領域3の外縁とする。試験手順の概要を表3に示す。なお、領域3と領域4を区切る際の閾値(温度差)は、後述の4章で示す木下らの実験結果をもとに暫定的に定めたものである。

3.2.3 暑熱緩和の効果範囲

本WGでは、成人の歩行者を想定して地上高さ1.1mで測定を行うこととした。ベンチなどに座る人体や、子供達などを対象とする噴霧装置では、測定高さを変更する必要があるだろう。

なお、ここで提案した性能評価法では、ミスト噴霧に伴う濡れのメリット・デメリットについては、無視している。前述のように暑熱緩和において、人体に付着するミストが大きな効果を発揮することが知られているが、その定量評価が難しいため、本WGでは検討対象から外したことに留意されたい。

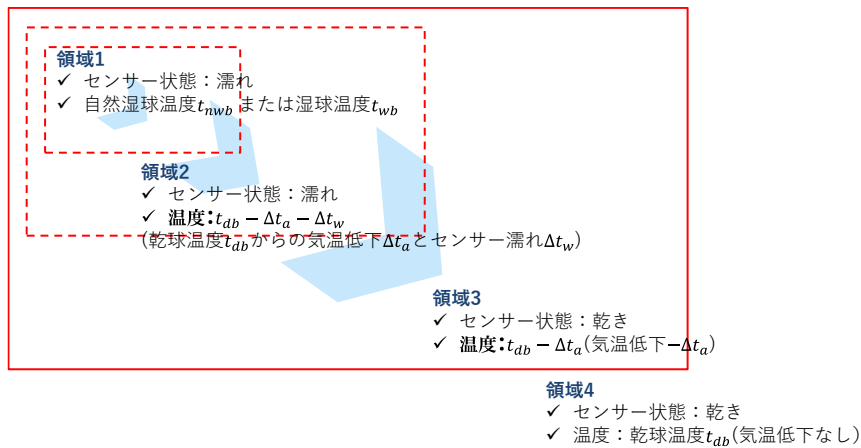


図4 ミスト噴霧に伴う気温低減範囲の評価

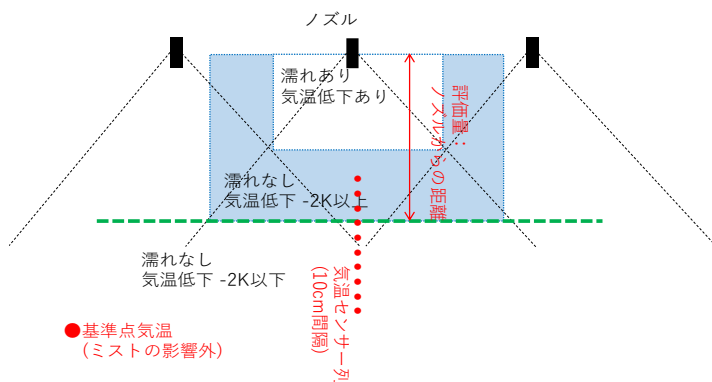


図5 ミスト噴霧装置の測定方法
(ノズル、気温センサー配置の平面図)



図6 センサー(乾球温度計, 湿球温度計, 放射遮蔽シェルター(φ30mm, H75mm))

表3 ミスト噴霧装置の試験手順など

<ul style="list-style-type: none"> ✓ 測定対象のノズル配置条件 <ul style="list-style-type: none"> ◇ ノズルが一定間隔で直線上に複数配置される設置条件とする。 ✓ 使用するセンサー <ul style="list-style-type: none"> ◇ 簡易な放射遮蔽を施した熱電対やサーミスタにより温度測定を行う。領域3と領域4の境界を求めするための乾球温度1点、湿球温度1点。この他、ミスト噴霧の影響の無い位置（基準点）に設けるための乾球温度1点、湿球温度1点。 ◇ 理論的には、乾球温度低下の認められる位置では湿球温度の上昇も認められるはずである。測定制度の検証用として湿球温度を観測項目に含めている。 ✓ 測定条件（立位の成人を想定） <ul style="list-style-type: none"> ◇ 気象条件： 夏季晴天日、日中の暑熱環境 ◇ 温度センサーの設置高さ： 地上高さ1.1m ◇ 試験時間： 後述の測定手順に記載する。 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ 測定手順 <ul style="list-style-type: none"> ➤ 事前準備（本測定実施前に行っておくこと） <ul style="list-style-type: none"> ◇ 使用する温度センサーに器差が無いことを確認する。 ➤ 測定の実施 <ul style="list-style-type: none"> ◇ 温度測定により領域3と領域4の境界を定めるため、ノズル配置の直線と直交する方向に側線を設け、領域4から領域3方向へ20cm間隔で水平移動して測定する。各位置で10分間留まり、後半5分の平均値をその位置の温度とする。基準点の乾球温度に対し2K以上の乾球温度低下が認められた位置を領域3の外縁とする。 ✓ 測定状況の記録 <ul style="list-style-type: none"> ➤ 噴霧されたミストの広がり状況は風向・風速によって大きく左右される。微風向風速計で測定した測定時の風向・風速を記録することが望ましい。
---	--

4. 熱電対を用いたミスト噴霧冷却の測定例

4.1 実験概要

木下らにより実施された、ミスト噴霧時の気温低下測定結果（技術評価WG・都市デザインWG合同WG，2024/10/25資料）を示す。測定は、2024/10/14（晴天日）に、大阪公立大学中百舌鳥キャンパスで行われた。

図7のように、日除け用のテントの一端にミスト噴霧用のノズルを設け、乾球温度・湿球温度計測のために風下方向に6点の温度計測点を設置している。噴霧ノズルと温度測定点の設置位置は図8に示す。温度計測の各点には、乾球温度計（熱電対）と湿球温度計（熱電対にガーゼを巻いたセンサー）を設け、温度計周囲には簡易の放射遮蔽シェルターとしてアルミ箔で覆っている（図6）。

ノズルの噴霧方向として水平向きと斜め下45度向きの2ケース（噴霧量 20.3 kg/h）について、それぞれ60分間の測定を行った。表4に実験の手順を示す。図9、図10に示す乾球温度・湿球温度の計測値が得られている。ノズルから3m離れた測定位置を基準点として、ミスト噴霧中（実験開始後30分以降）に観測された基準点と各位置の乾球温度差を求め、図11にまとめた。目視により熱電対の濡れが認められなかった2m位置において水平吹き・斜め吹き共に2.5Kの温度差があり、これはミスト噴霧による温度低下だと考えられる。2.5m位置の斜め吹きの温度差は0.5K（水平吹きは欠測）に縮小している。この実験結果より、2K程度の気温低下が観測可能であると判断し、領域3と領域4を区分する閾値とした。



図7 実験の全景

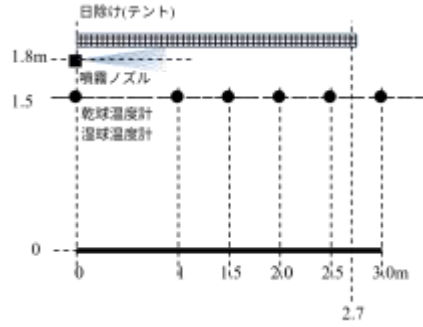


図8 噴霧ノズルとセンサー(乾球温度, 湿球温度)の設置位置
センサー列はテント下の日影の位置に, 主風向に向きに合わせて配置した。

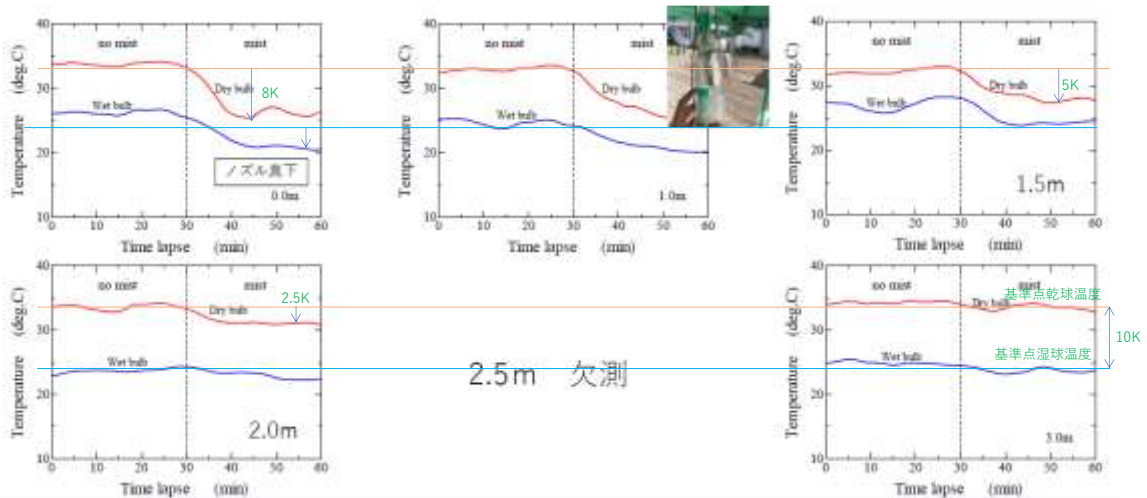


図9 各測定位置の乾球温度・湿球温度(ノズルから水平向き噴霧の場合)

上段左: ノズル直下, 上段中: ノズルより 1m, 上段右: ノズルより 1.5m

下段左: ノズルより 2m, 下段中: ノズルより 2.5m, 下段右: ノズルより 3m(基準点とする)

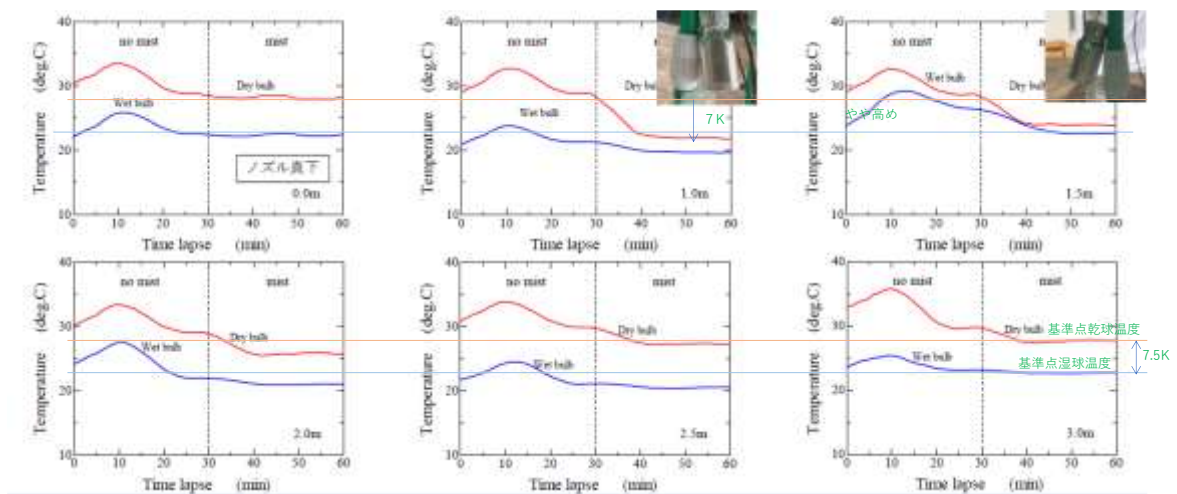


図10 各測定位置の乾球温度・湿球温度(ノズルから斜め下45度向き噴霧の場合)

上段左: ノズル直下, 上段中: ノズルより 1m, 上段右: ノズルより 1.5m

下段左: ノズルより 2m, 下段中: ノズルより 2.5m, 下段右: ノズルより 3m(基準点とする)

表 4 実験手順

12:20 – 12:50	ミスト噴霧無し(30分)
12:50 – 13:20	ミストを水平噴霧(30分)
13:20 – 13:25	実験準備
13:25 – 13:55	ミスト噴霧無し(30分)
13:55 – 14:30	ミストを斜め下向き 45度 噴霧(30分)

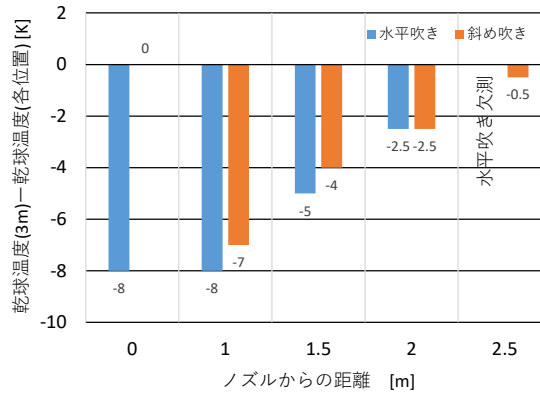


図 11 各位置での乾球温度低下

3m 位置の乾球温度(水平吹き 34℃, 斜め吹き 28℃)を基準としている。

注記

注 1) 李・高柳・鍋島ら (文献 8) は、「完全日影クールスポット基準の Δ WBGT」で評価する方法を提案しており、この方法に依れば、現地測定時の様々な気象条件下で得られた Δ WBGTを、基準気象条件 (例えば WBGT 32℃) における Δ WBGTに換算することが可能となる。

参考文献

1. まちなかの暑さ対策ガイドライン (改訂版). 環境省 . 2018.
2. まちなかの暑さ対策ガイドライン (令和 4 年度部分改訂版). 環境省 . 2023.
3. 河野俊樹, 成田健一. 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. 日本建築学会技術報告集. 2012, vol. 18, no. 40, pp. 973-976.
4. JIS B 7922 「電子式湿球黒球温度 (WBGT) 指数計」
5. 齊藤宏之, 澤田晋一. 電子式 WBGT 測定器における測定誤差の要因とその有効かつ簡便な補正方法の検討. 日本生気象学会雑誌. 2022, vol. 58, no. 3-4, pp. 87-93.
6. JIS Z 8094 「熱環境の人間工学-WBGT (湿球黒球温度) 指数を用いた熱ストレス評価」
7. 呉 元錫, 大岡 龍三, 中野 淳太, 菊本 英紀, 小川 修, 崔 元準. 屋外およびミスト噴霧環境での環境指標の開発 (その 6) 生理反応予測モデルの開発と環境指標への適用. 空気調和・衛生工学会学術講演論文集, 2020, vol. 6, pp. 333-336
8. 李 星宇, 高柳 幸奈, 鍋島 美奈子, 真稔西岡. クールスポットの WBGT 低減効果による比較評価方法の検討 大阪府内の駅前広場の事例. 環境科学論文集, 2024, pp. 185-190