

極微細化ミスト技術を用いた屋外用ミスト式冷却機の開発

Development of Mist Type Cooling Equipment for Outdoor Space using Ultra-miniaturization Mist Technology

小川 修
Osamu Ogawa

尾形 雄司
Takeshi Ogata

黒田 遼
Ryo Kuroda

田端 大助
Daisuke Tabata

磯見 晃
Akira Isomi

植田 雄輝
Yuki Ueda

要 旨

屋外環境における従来型のミスト噴霧機器では、ミストが人に届く前に自然風で流され拡散し、十分な冷却効果が得られなかった。このような従来の課題に対して、筆者らは、送風技術と新規開発したドライ型ミストノズル技術を組み合わせた。技術の特徴として、ミスト空間をトルネード型エアカーテン気流で包み込む空気冷却と、ミストを人肌に届けることで擬似的な発汗効果による人体冷却を同時に実現することが可能となる。この開発により、標準新有効温度（SET*）で7℃低下の冷却効果が得られる新たな屋外用ミスト式冷却機「グリーンエアコン」を開発した。

Abstract

In an outdoor environment a sufficient cooling effect was not obtained by using a conventional mist spraying equipment, because the mist was flowed and diffused by natural wind before reaching a person. To solve this problem, we combined air blowing technology and newly developed dry mist nozzle technology. As a feature of technology, wrapping the mist space with tornado type air blowing can realize air cooling and simultaneously delivering the mist to the human skin can achieve the human body cooling called the pseudo perspiration effect. Through this development, we have developed a new outdoor mist type cooling equipment "Green Air-Conditioner" which can obtain a cooling effect lowered by 7° C at Standard New Effective Temperature (SET*).

1. はじめに

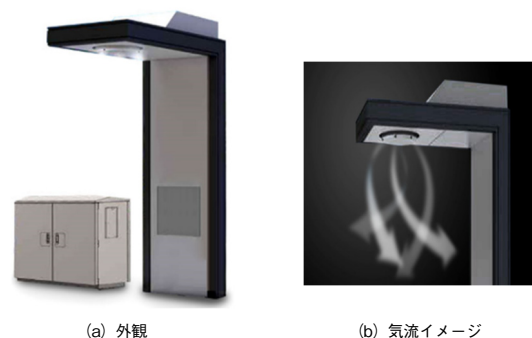
地球温暖化や都市のヒートアイランド現象により、日中平均気温が年々上昇傾向にあり、東京2020オリンピック・パラリンピックが実施される2020年の夏も酷暑が予想されている[1]。

冷媒を用いたヒートポンプ式のスポットクーラーを屋外に設置する場合は、屋外空間に冷熱を吹き出すと同時に、放出される排熱量がその冷却量よりも大きくなるため、ヒートアイランド現象を助長していることになる。また、40℃に迫る外気温となるような状況では、ヒートポンプ式のスポットクーラーで仮に外気より10℃程度低い30℃程度の弱冷風を生成したとしても、人体表面温度との温度差は乏しく、強制対流による効果的な冷却は期待できない。

一方、水の蒸発潜熱の原理を活用したミストによる気化冷却式は、空間を冷却するとともに、一部のミストを直接体表面に届けられれば、その気化冷却効果によって人の体温を直接奪うことができ、いわゆる「疑似発汗効果」によって効果的に人を冷やし得る。ヒートポンプ式と比較して、排熱量よりも冷却能力が上回るため、その観点で屋外における冷却機器として優れた方式と言える。

しかしながら、従来の機器では、噴霧されたミストは、自然風の気流の影響を受けるため、利用者に冷却効果を確実に届けることが困難な場合があった。

このような現状に鑑み、第1図に示す屋外オープンスペースにクールスポットを形成することを目的とした屋外用ミスト式冷却機「グリーンエアコン^(注1)」を開発した。



第1図 グリーンエアコン
Fig. 1 Green Air-conditioner

2. ミスト機器の課題

これまでのミスト機器は、ミストが自然風によって流されやすく、空間が冷えにくい、冷涼感を感じにくいといった課題があった。また、ミストの粒子径が大きくなると、濡（ぬ）れ感が増加し、不快となる課題があった。

これらの課題に対し、まず、空気冷却を促進するトル

(注1) 当社の日本国内における登録商標。

ネード型エアカーテン気流を送風する技術を開発した。

これにより、噴霧したミストをドーム状の空間内に閉じ込めるようにすることで、自然風によってミストを流されにくくし、さらには、ミスト蒸発で冷却された冷気流をその空間内に確実に届けることで対流伝熱による冷却効果が促進される。

また、人肌にミストを付着させ、そのミストの蒸発で、皮膚温を直接的に低下させる疑似発汗効果を狙い、かつミストが人肌に付着しても、濡れを感じにくい極微細なミストを生成することを目的に、従来よりも比較的低圧なエアと水を混合して噴霧する2流体ミストノズル技術を開発した。

このミストノズルは、全粒子の全表面積に対する全粒子の全体積と同じ表面積対体積率を有する粒子径を表すザウター平均粒子径が $10\ \mu\text{m}$ 程度のミストでありながら、従来に比較して高圧な圧縮空気を必要としないため、エアコンプレッサの低動力化、また、噴霧音の低騒音化を実現した[2]。

一方、これまでに屋外環境下におけるミスト機器の研究、開発が多く行われてきたが、その冷却効果について、疑似発汗効果を加味した評価が可能な指標の検討は十分になされていない。

既存の評価指標には、熱中症リスクの指数として広く世の中で使われている「湿球黒球温度 (WBGT: Wet Bulb Globe Temperature)」や、屋内で使われる快適性の評価指標である標準新有効温度 (SET*: Standard New Effective Temperature) などがある[3]。

WBGTに占める湿球温度の影響度が70%と大きく、ミストを噴霧した空間内が高湿度となるため、ミスト機器の評価指標として適しているとは言い難い[4]。

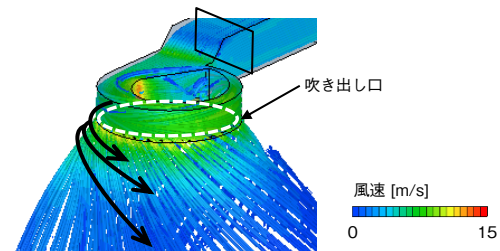
SET*は、WBGTの影響因子に含まれる気温、湿度に加えて、風速、平均放射温度、着衣量、代謝量をとらえており、これらを屋内用の人体熱収支モデルに組み込み、生理量の皮膚表面温度と皮膚濡れ面積率を算出して、有効温度を示す指標である。そこで、既存の屋内用SET*をベースに、人体熱収支モデルを検証し、屋外環境下でミスト機器の利用を想定した新たな屋外用SET*を、東京大学および東海大学と共同研究中有る[5]-[7]。本稿では既存のSET*に用いる人体熱収支モデルである2ノードモデルを活用し、屋外で使用するミスト機器を適切に評価し得る新評価指標の構築に向けた検討についても報告する。

3. トルネード型エアカーテン送風の開発

グリーンエアコンの利用として、同時に4~5人が滞在することを想定した。吹き出し中心から水平方向に対し

て半径1 m以内の空間において、標準男性の首元から上腕部をカバーする範囲として地上からの高さ1.1 m~1.7 mの空間を冷却空間と位置付けた。この空間における気温を 4°C 低下させることを目標として、自然風が吹いても、冷却空間が50%以上維持できる設計とした。

まず、冷却空間を維持する手段として、トルネード型エアカーテン気流を生み出すことに着眼した。本方式により、気流を真下に吹き出すよりも、気流に同伴されるミストの蒸発時間を稼ぎ、ドーム状にミストを包み込むことが可能となる。これを実現するために、ファンの送風口より吹き出し口に至る形状を第2図に示す構成とした。



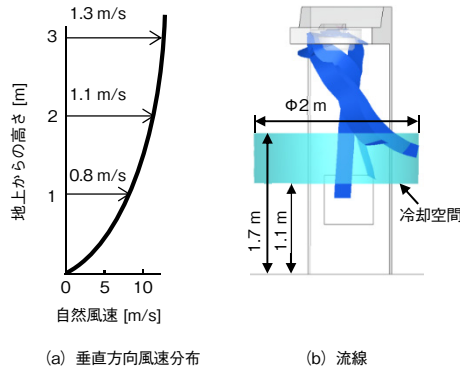
第2図 吹き出し気流のCFD解析結果 (流線)
Fig. 2 Result of CFD analysis for air blowing (stream line)

ファンより吹き出された送風は、円筒形状の内壁に沿うように流入し、円筒形状内で旋回気流となり、リング状の開口部である吹き出し口から吹き出される。第2図は吹き出し気流のCFD (Computational Fluid Dynamics) 解析による計算結果 (流線図) である。気流解析のツールとしては、非構造格子系汎用3次元熱流体解析システムを活用した。吹き出し口にはフラップを設けなくても、吹き出した気流が下方へ向かうに従って、広がるように、旋回成分を有していることがわかる。

次に、吹き出し風量を決定するために、第3図に示すように、2016年東京都の8月における自然風のうち80%を占める風速に基づき、自然風の垂直方向の風速分布を仮定し、その影響を推定した。この自然風を境界条件として、CFD解析を実施したところ、送風量 $20\ \text{m}^3/\text{min}$ 、吹き出し風速 $10\ \text{m/s}$ の場合、冷却空間が56%維持できることがわかった。第3図は吹き出し風速の流線を示しており、冷却空間において各計算セル上の代表風速が自然風の風向と一致しないセルを吹き出し口からの気流が残存する領域として、ミストによって冷却された気流が維持されていると仮定した。そのセル体積を合算して冷却空間との比率を求め、50%以上であることから冷却空間が維持されていると判断した。

乾球温度 35°C 、湿球温度 24°C の環境試験室内で、ミス

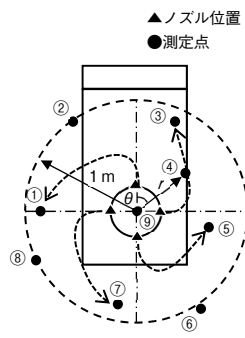
ト噴霧量 $387\text{ cm}^3/\text{min}$ を噴霧した場合における気温の低下量を第1表に示す。測定点の垂直高さはすべて 1.1 m である。



第3図 自然風の影響を受ける吹き出し流れ
Fig. 3 Air blowing affected by natural wind

第1表 測定位置と低下気温
Table 1 Measurement position and reduced temperature

位置	半径 r [m]	角度 θ [deg]	低下気温 [°C]
①	0.9	270	$\Delta 6.1$
②	1.0	326	$\Delta 5.7$
③	0.9	23	$\Delta 7.0$
④	0.55	56	$\Delta 4.8$
⑤	0.65	101	$\Delta 6.7$
⑥	1.05	146	$\Delta 4.5$
⑦	0.85	191	$\Delta 5.2$
⑧	1.0	248	$\Delta 5.0$
⑨	0.0	-	$\Delta 6.5$
平均値			$\Delta 5.4$



第1表に示すように、ノズルから噴霧されたミストは、上面から見て、反時計回りにおよそ 90° 回転して、冷却空間の最下部である垂直高さ 1.1 m の位置に到達している。測定点①、③、⑤、⑦は、ノズルから噴霧されたミストが到達した位置であり、測定点②、④、⑥、⑧は、各ノズル間から送風された気流が到達した位置であり、測定点⑨は、吹き出し中心の直下を表している。冷却空間において、乾球温度 4°C 以上の気温の低下を確認し、目標性能を達成した。さらに、SET*では約 7°C の低下を計測した。

4. 極微細化ミストノズルの開発

本開発では触れても濡れにくいミストによる気化冷却を実現するために、従来は工場の生産工程などで使用されていた2流体ノズルの特性に着目し、これを暑熱対策に適応するために行った開発の内容について報告する。

4.1 2流体ノズルの課題とこれまでの取り組み

2流体ノズルは高压エアによる高速気流を用いて水を微細化するノズルである。水に圧力をかけ微細化する1流体ノズルと比較して、より粒径が細かく、気化の早いミストを生成することができるのが特徴である。そのため、2流体ノズルはミストを浴びた利用者が濡れを感じにくく、近くでミストを噴霧するのに適していると言える。

しかしながら、2流体ノズルはミストの微粒化に大量の高压エアを使用し大型のエアコンプレッサが必要となるため、消費電力や装置サイズの観点から設置可能な場所が制限される。さらに高压エアを使用するため、ミスト噴霧時にノズルから騒音が発生し、ミストを浴びる際に濡れは感じにくいものの、音の快適性が低いという問題があった。

これまで、ミストを高効率で微細化するノズルの開発に取り組み、ミストの微粒化に必要な空気圧力・流量を大幅に減少させ、必要なエネルギーを $1/4$ 以下に抑えることに成功した[2]。

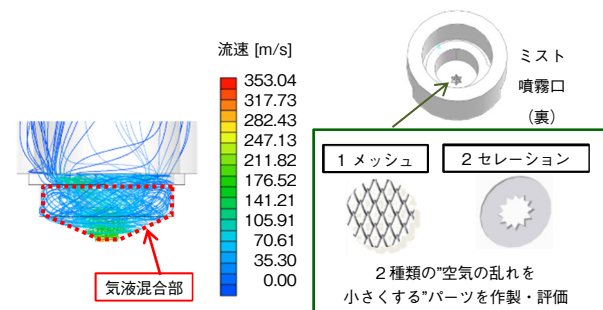
次節では第2の取り組みとしてミスト噴霧音を低減するノズルの開発について報告する。

4.2 ミスト噴霧音の低減

フクロウは鳥類のなかで最も静かに飛行が可能と言われている。これはフクロウの風切り羽にある小さな鋸(のこ)刃状の突起が、空気の大乱れを小さな乱れに変えることで飛行時の騒音を低減しているためである。

この原理を活用し、新幹線の最大の騒音源であるパンタグラフにフクロウの羽根を模した仕掛けを設け、走行時の騒音を低減することに成功している[8]。

この開発内容にヒントを得て、行った検討結果の概要を第4図に示す。



第4図 ノズルから発生する騒音の調査
Fig.4 Study of the noise generated from the nozzle

空気の大乱れがなくなる箇所をCFDにより解析したところ、水と空気を混合させる気液混合部にて水を微細化した際に、空気の大乱れが大きくなっていることがわかつ

た。そこで、ノズル内部の乱れを抑制するために、気液混合部とミストの噴霧口の上に第4図に示す各部品を挿入した。1つは、メッシュを加工した部品であり、もう1つはフクロウの羽根を模した部品（セレーション）である。開発したノズルの評価結果を第2表に示す。

メッシュを設けた場合も静音効果が確認されたが、一度微細化されたミストがメッシュにて再結合し、結果的に微細化に必要なエネルギーは大きくなった。一方、セレーションを設けた場合は、ミストの再結合が生じず、静音効果とミスト微細化の両立が可能であった。

以上の結果から、2流体ノズル内部にセレーションの機構を設けることでミストの微細化を阻害することなく、噴霧音を8 dB低減した。

第2表 従来品と開発品の比較

Table 2 Comparison of conventional nozzle and developed one

	当社従来品	開発品1 (+メッシュ)	開発品2 (+セレーション)
ミスト粒径10 μm生成時のエア供給圧 [MPa]	0.12	0.18	0.12
ミスト粒径10 μm生成時の騒音値 [dB]	77	73	69

5. 屋外実証実験によるアンケート評価

藤沢市の住宅街において、バス停留所を模擬した仮設のシェルタ内にグリーンエアコンを設置し、アンケート評価による実証実験を行った。実証実験の外観を第5図に示す。



第5図 藤沢市での実証実験
Fig.5 Field test in Fujisawa city

屋外環境下においては、体感温度は、気温だけでなく、湿度、風速、日射量、地表や壁面など高温となった場所からの赤外放射量によって影響を受ける。そのため、シェルタによって日射を遮り、床面には保水ブロックを採用することで、日射量と赤外放射量の低減を図った。

アンケート調査は、2017年8月2日～9月6日の期間に行い、測定時間は9:30～15:30とした。ミストの噴霧条件を

第3表に示す。気温の上昇に応じて噴霧強度を弱から強モードへと切り換えた。

第3表 ミスト噴霧条件

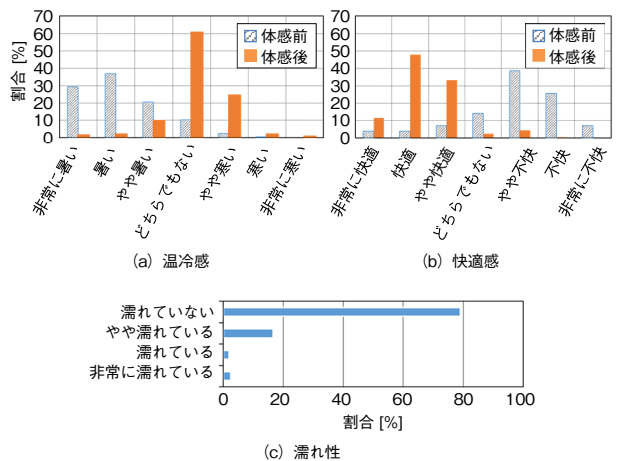
Table 3 Mist spraying condition

噴霧強度	ミスト粒径 [μm]	ミスト量 [cm ³ /min]	期間	回答者数 [人]
弱モード	10	180	8/2, 3, 4, 6, 9/6	30
中モード	10	240	8/5, 6, 7, 8/24, 26, 9/5	87
強モード	18	240	8/23, 25	40

一般の利用者157人（男性58 %、女性42 %、30歳代～40歳代55 %）に対し、ミストの体感前後でアンケートを行い、温冷感および快適感は7段階、濡れ性は4段階評価にて調査した。アンケート結果を第6図に示す。

温冷感では、体感前は暑い側の申告が合計約87%であったが、体感後は13%に減少した。体感後にどちらでもないと回答した人は60%以上となった。また、快適感では、体感前は不快側の申告が約71%であったが、体感後は5%に減少した。さらに、濡れ性では、体感後ににおいて、約79%が濡れていないと回答があり、受け入れられると回答した割合は約92%であった。

利用者が感じた気温変化を自己申告する体感温度は、ミストの体感前後で平均4.6℃低下していると回答があり、ミストの濡れを感じにくく、ミスト噴霧による冷却効果があるものと考えられる。



第6図 アンケート結果
Fig. 6 Questionnaire results

6. 新評価指標の構築に向けた課題

人の温熱感覚は人体の熱的な状態に影響されるため、温熱感覚を予測するには皮膚温と深部体温の予測が非常に重要である。従来の研究では、屋外やミストが噴霧さ

れる環境条件下で、人体の熱的な状態に関する検討は十分になされていなかった。そこで、ミストが噴霧される環境での人の温熱感覚予測に活用するため、2ノードモデルを用いて、人体熱収支状態を予測し、被験者実験および環境因子計測を通じて予測モデルの妥当性を検討した。

前述の実証実験において、被験者9名（20歳代～50歳代の女性6名、男性3名）の皮膚温および口腔（こうくう）温を計測した。皮膚温は、人体の各皮膚温を用いて、各身体部位の面積を考慮して全身平均皮膚温 T_{sk} を表現するHardy[9]らによって提案された（1）式を用いた。

$$T_{sk} = 0.07T_{head} + 0.35T_{trunk} + 0.14T_{forearm} + 0.05T_{hand} + 0.19T_{thigh} + \dots + 0.13T_{calf} + 0.07T_{foot} \quad (1)$$

深部体温は口腔温を参考値とした。被験者は、日陰の屋外で待機し、ミスト噴霧環境に入る直前の10分間日なたを歩行した後、ミスト噴霧環境内で10分間滞在した。

次に、2ノードモデルを用い、生理データを測定した被験者9名の平均皮膚温と深部体温を予測した。2ノードモデルの計算条件を第4表に示す。予測対象時間は20分間（ミスト噴霧環境に入る前後10分）とした。環境条件は、ミスト噴霧環境内外での測定値に基づいて計算した。初

期の生理値は個人差があるため、実測値を初期値とした。体温調節反応作用に影響する熱的中立状態の温度としては、皮膚温 (T_{skin}) は33.7℃、深部温 (T_{core}) は36.49℃と設定した[10]。体温 (T_{body}) はStolwijkらが提案した式を用いた[11]。

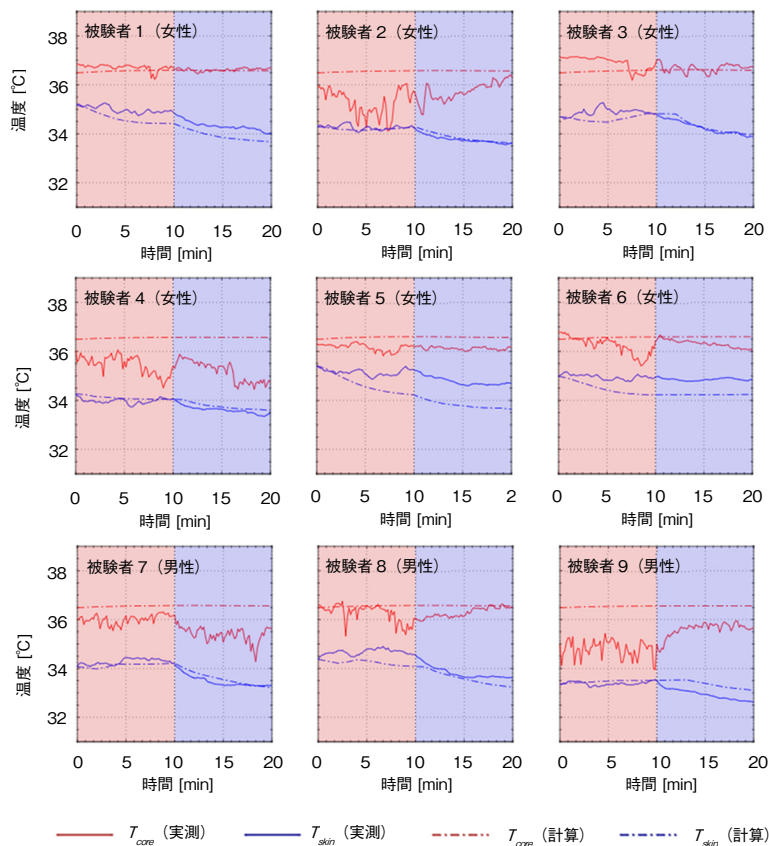
第4表 2ノードモデルの計算条件

Table 4 Calculation conditions of 2-node model

人体	表面積：1.825 m ² 、代謝量：1.2 met、着衣量：0.3 clo、 初期生理値(T_{skin}/T_{core})：実測値 熱的な平衡生理値(T_{skin}/T_{core})：33.7/36.49℃ $T_{body}=0.1 \times T_{skin} + 0.9 \times T_{core}$
環境	1分間隔平均実測値（屋外10分＋ミスト内10分）変化

実測した生理値から得られた平均皮膚温と深部体温に対して、ミスト噴霧環境内外で測定した環境因子を活用し、2ノードモデルから予測した結果の比較を第7図に示す。

ミスト体感前の体温は、おおむね上昇しており、ミスト体感中は体温が低下する傾向が見られた。口腔温はセンサーが完全に舌下に接触されていない状態で測定されたと推定され被験者全員の平均皮膚温の低下量は、実測が0.7℃、予測モデルが1.0℃の結果となった。被験者1およ



第7図 実験値および予測結果の比較

Fig. 7 Comparison of experimental and predicted results

び被験者3の計算結果は比較的実測値と傾向が一致しており、環境因子の実測値を2ノードモデルに適用することで、屋外およびミスト噴霧環境でも、人体の熱的状態の予測可能性を示した。

これまではミストが衣服と皮膚の表面にそれぞれ付着して蒸発する影響は考慮していなかった。着衣面と皮膚面において、ミストの濡れ率および濡れ面積は差異があるため、それぞれの面において付着したミストの蒸発の影響を加味した熱収支モデルを構築し、連成解析を行う必要がある。今後は、ミスト噴霧環境下での人の熱的な状態を正確に把握し得るように2ノードモデルを改良し、着衣面と皮膚面の熱収支を同時に考慮した3ノードモデルの構築を行っていく。

7. まとめ

本方式により、測定点において平均5.7℃の冷却効果を実現し、ミストノズルは8 dBの低騒音化を達成した。実証実験においても、快適側の回答として約95%あり、約79%の利用者が濡れていないと回答が得られたため、暑熱対策機器として大きな効果があると言える。

また、ミスト機器の冷却効果を適切に評価できる新評価指標を構築し、普及させることにより、効果を定量化することで、ミスト機器の市場拡大に貢献する。さらに、基礎工事が不要な、移設可能なグリーンエアコンを開発した。今後、市場投入を進めていく。

最後に、新評価指標の構築にあたり、共同研究先として多大なるご協力をいただいた東京大学 大岡龍三教授、菊本英紀講師、呉元錫氏（博士課程）、ならびに東海大学 中野淳太准教授に深く感謝いたします。

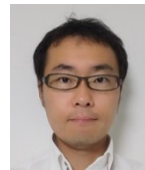
参考文献

- [1] 内閣官房, “東京2020に向けたアスリート、観客等の暑さ対策に係る中間とりまとめ,” https://www.kantei.go.jp/jp/singi/tokyo2020_suishin_honbu/kankeikaigi/renrakukaigi/pdf/torimatome.pdf, 参照 Oct. 24, 2019.
- [2] 田端大助, “省エネ型微細ミストノズルと暑熱対策への応用,” パナソニック技報, vol.62, no.2, pp.135-137, 2016.
- [3] 平成24年度ヒートアイランド現象に対する適応策及び震災後におけるヒートアイランド対策検討調査業務報告書, (社)環境情報科学センター, 東京, 平成25年3月, pp.19-32.
- [4] 呉元錫 他, “ミスト噴霧条件下の快適性・寒暑感と温熱環境評価指標の検討,” 空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集, vol. 6, pp.109-112, 2017.
- [5] 呉元錫 他, “屋外およびミスト噴霧環境での環境指標の開発 (その1) 2ノードモデルの評価及び解析精度に関する研究,” 日本建築学会大会, 東北, Sept. 2018.
- [6] W. Oh et al., “Development of a new environmental index for outdoor and mist spray environments (Part 2) Proposal of a new index using thermal sensation votes,” The Society of Heating Air-Conditioning and Sanitary Engineers of Japan, Sept. 2018.
- [7] W. Oh et al., “Study on thermal indices under mist spray condition through thermal sensation and comfort,” WINDSOR CONFERENCE: Rethinking comfort, vol. 10, pp.110-127, 2018.
- [8] 仲津英治, “自然に学ぶ山陽新幹線の500系電車の開発経験から,” 日本鉄道技術協会誌, 53巻, 9号, pp.61-64, 2010.
- [9] J. D. Hardy et al., “The technic of measuring radiation and convection,” Journal of Nutrition, vol. 15, pp.461-475, 1938.
- [10] ANSI/ASHRAE, Standard 55-2013: Thermal environmental conditions for human occupancy, 2013.
- [11] J.A. Stolwijk et al., “Partitional calorimetric studies of responses of man to thermal transients,” J. Appl. Physiol. vol. 21, issue 6, pp.967-977, 1966.

執筆者紹介



小川 修 Osamu Ogawa
アプライアンス社 カンパニー戦略本部
Company Strategy Div., Appliances Company



尾形 雄司 Takeshi Ogata
アプライアンス社 カンパニー戦略本部
Company Strategy Div., Appliances Company



黒田 遼 Ryo Kuroda
アプライアンス社 カンパニー戦略本部
Company Strategy Div., Appliances Company



田端 大助 Daisuke Tabata
マニファクチャリングイノベーション本部
マニファクチャリングソリューションセンター
Manufacturing Solution Center,
Manufacturing Innovation Div.,



磯見 晃 Akira Isomi
マニファクチャリングイノベーション本部
マニファクチャリングソリューションセンター
Manufacturing Solution Center,
Manufacturing Innovation Div.,



植田 雄輝 Yuki Ueda
マニファクチャリングイノベーション本部
マニファクチャリングソリューションセンター
Manufacturing Solution Center,
Manufacturing Innovation Div.,