

暑熱環境下での人体へのミスト噴霧による心理・生理的改善効果に関する研究

STUDY ON IMPROVEMENT EFFECTS OF PSYCHOLOGICAL AND PHYSIOLOGICAL RESPONSES BY MIST SPRAYING ON HUMAN BODY IN A HOT ENVIRONMENT

地域環境計画分野 平田 裕貴

Division of Regional Environmental Planning Yuki HIRATA

熱中症被害が増加する中で、暑熱対策としてミストによる冷却効果が注目されている。ミストは空気を冷やすことに使われる一方、人体が濡れることで蒸発放熱が増加する効果もある。本研究ではミスト噴霧による皮膚温度と温冷感申告値の変化を把握した。また Kubota らの人体生理量予測モデルをミスト噴霧環境下での平均皮膚温度を推定することのできるように改良した。本研究の成果は、物理環境計測のみでミスト噴霧による皮膚温度低下と全身温冷感の改善効果を推定することに貢献する。

As heat stroke damage increases, cooling effect by mist spraying is drawing attention as a countermeasure against heat. While mist spraying is used to cool surrounding air, it also has the effect of increasing vaporization heat dissipation as the human body gets wet. In this study, changes in skin temperature and changes in thermal sensation vote due to mist spraying were ascertained directly. We also improved the human body physiology prediction model of Saito et al. So that the mean skin temperature can be estimated under the mist spray environment. In the future, this study will help to estimate the improvement effect of the skin temperature and the whole-body thermal sensation under a mist spraying condition only by physical environment measurement.

1. 研究背景・目的

1.1 研究背景

都市部のヒートアイランド現象による都市の高温化が深刻化しており、熱中症などの被害が起きている。そこで暑熱対策としてミストによる冷却効果を用いた対策が注目されている。ミストは屋外空間に噴霧することで蒸発時に空気中の熱を奪い、周辺の空気を冷やすことができ、屋外と半屋外空間でミスト噴射による気温低下効果は、屋外空間では1.5℃程度、半屋外空間では2~3℃程度であることが確認されている¹⁾。またミストは人体を濡らすことで蒸発放熱が増加する効果も期待できる。

古田ら²⁾は、温熱環境が人体心理生理反応へ与える影響を把握することを目的とし、人体の経路別熱収支と新有効温度を算出し、心理生理反応との関係から屋外熱環境評価を試みた。その結果、人体の熱収支量が0W/m²付近の時、全身温冷感熱的中立付近となるが、熱収支量が正または負の側に大きくなると心理反応と対応しなくなることを確認し、平均皮膚温度と全身温冷感の関係には高い相関関係があることを示した。Kubota et al.³⁾は、皮膚表面での熱収支式と衣服表面での熱収支式から日射と暑さによる着衣の濡れを考慮した暑熱下の人体生理量予測モデルを構築した。三坂ら⁴⁾は、平板型 SAT 計を用いてミストの蒸発冷却効果を定量化するとともに、

ミストが皮膚に触れることに伴う心理的効果を評価することを目的として、実験を行った。その結果、ミストの蒸発潜熱量は99.93W/m²であることを示した。また心理申告から濡れを感じると冷涼感を得られることを確認した。Uchida et al.⁵⁾は、物理環境計測のみでミスト噴霧下における人体の濡れを反映させたミスト噴霧の効果の評価することを目的とし、円筒型発熱 SAT 計を開発し、ミスト噴霧による濡れの判定と蒸発熱流束の算出を行った。

1.2 研究目的

本研究では、ミスト噴霧によって人体を濡らすことで起こる蒸発放熱を促進する効果に着目して研究を進めており、物理環境計測のみでミスト噴霧下における人体の濡れを反映させたミスト噴霧の効果の評価することが最終目標である。そこで、屋外のミスト環境下において被験者実験を行い、ミスト噴霧による人体の生理量である皮膚温度の変化と心理量である全身温冷感などの変化を把握する。そして、全身温冷感と皮膚温度の相関関係を明らかにする。またミスト噴霧で濡れることで増加する蒸発熱流束を円筒型発熱 SAT 計から算出する。その蒸発熱流束からミスト噴霧による着衣の濡れと皮膚表面の濡れによって増加する蒸発熱流束をそれぞれ Kubota et al.の構築した人体生理量予測モデルに考慮す

ることで、ミスト噴霧下における人体の濡れを反映させた平均皮膚温度を推定することのできる人体生理量予測モデルに改良することを目的とする。

2. 綾ノ町実験について

2.1 実験概要

実験は、ミストファン稼働時の効果に注目し、全身温冷感と皮膚温度や SET* との相関関係を分析したうえで、日向条件との比較により暑熱対策装置設置の効果を明らかにすることを目的として行った。また実験は、2016年7/27~30の4日間に被験者5名の参加により実施した。実験スケジュールを表2-1に示す。また暑熱対策装置の概要図を図1に示す。被験者は空調室内で30分間滞在後、路面電車停留場まで日向を5分間歩行し、停留場到着後、被験者3名を日向(sun)・既設テント下(tent)・暑熱対策装置下(mist)の3条件に振り分け、ベンチで15分間着座した。その後、路面電車に乗り、往復20分間着座した。この流れを1セットとし、1日に2回繰り返した。

表 2-1 実験のスケジュール

| 1回目 | | | | 2回目 | | | |
|-------|-------|--|-------|-------|-------|------|--|
| 11:50 | 12:30 | 12:45 | 14:25 | 15:05 | 15:20 | | |
| 30分 | 5分 | 15分 | 20分 | 95分 | 30分 | 5分 | 15分 |
| 室内座位 | 日向歩行 | 屋外着座 (sun) 屋外座位 (tent) 屋外座位 (mist) | 車内座位 | 戻り・休憩 | 室内座位 | 日向歩行 | 屋外着座 (sun) 屋外座位 (tent) 屋外座位 (mist) |
| | | | | | | | 車内座位 |

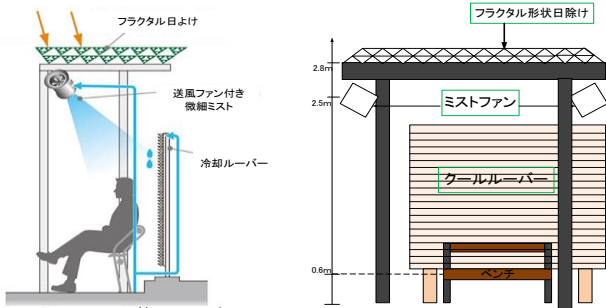


図 1 暑熱対策装置の概要図

2.2 実験で得られた成果の要約

綾ノ町実験で得られた平均皮膚温度や上腕の皮膚温度と全身温冷感申告の関係をそれぞれ図2と図3に示す。平均皮膚温度と全身温冷感の相関係数は0.79と高い相関関係を示し、上腕の皮膚温度と全身温冷感の相関係数が0.89と相関関係を得た。綾ノ町実験では、ミストが上半身に向けて噴霧されるようにミストファンの角度を調節したので、上腕や手の甲などの上半身の皮膚温度はミスト噴霧によって低下しているが、脛や足の甲といった部分の皮膚温度には低下が見られなかった。平均皮膚温度にはミストファン等の対策効果の影響が小さい下半身の影響がでてしまうため、平均皮膚温度より上腕皮膚温度と全身温冷感の関係の方が、ばらつきが大きくなったと考えられる。以上より、今回の実験条件で

はミストファンの影響が大きい上腕の皮膚温度の方が全身温冷感に強い影響を与えていることが明らかになった。

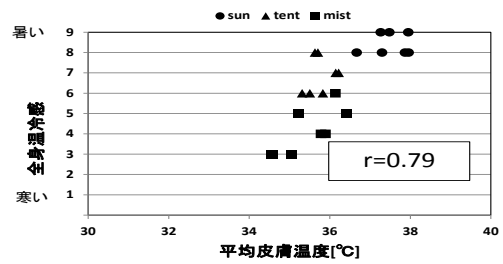


図 2 平均皮膚温度と全身温冷感の関係 (綾ノ町)

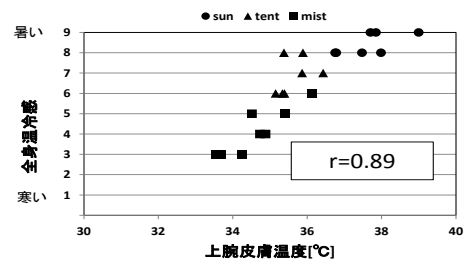


図 3 上腕の皮膚温度と全身温冷感の関係 (綾ノ町)

3. ミストファンによる心理生理量の改善効果検証実験

3.1 実験の概要

実験は、2017年8月22,23,28,30,31日の5日間に被験者2名で実施した。実施期間・場所を表3-1、実験スケジュールを図4に、被験者情報と被験者の実験スケジュールを表3-2と表3-3に示す。被験者は空調室内で30分間滞在後、実験場所まで移動し、実験場所でミストなしの状態を30分間着座した。その後、ミストファンを稼働させミスト噴霧下で30分間着座した。この流れを1セットとし、1日に2回繰り返した。また被験者は、20代の男性2名で、被験者F、Gとした。

表 3-1 実施期間・場所について

| | |
|------|---------------------------------------|
| 実施期間 | 2017年8月22,23,28,30,31日の 11時~15時15分 |
| 実施場所 | 大阪市立大学工学部棟C棟の 前の駐車場付近 |

| 実験① | | | | 実験② | | | | | | | |
|-------|-------|-------|-------|----------|-------|-------|-------|-------|-------|----------|-------|
| 11:00 | 11:30 | 11:40 | 12:10 | 12:15 | 12:45 | 13:30 | 14:00 | 14:10 | 14:40 | 14:45 | 15:15 |
| 30分 | 10分 | 30分 | 5分 | 30分 | 45分 | 30分 | 10分 | 30分 | 5分 | 30分 | |
| 室内座位 | 移動 | 屋外座位 | 予備時間 | ミスト噴霧下座位 | 休憩 | 室内座位 | 移動 | 屋外座位 | 予備時間 | ミスト噴霧下座位 | |

図 4 実験スケジュール

表 3-2 被験者情報

| 被験者 | 身長[m] | 体重[kg] | 体表面積[m ²] | 着衣量 | 代謝量 |
|-----|-------|--------|-----------------------|-----------|--------|
| F | 1.76 | 63.0 | 1.77 | 0.43[clo] | 1.0met |
| G | 1.65 | 50.0 | 1.54 | | |

表 3-3 被験者ごとの実験スケジュール

| 被験者 | 8月22日 | | 8月23日 | | 8月28日 | | 8月30日 | | 8月31日 | |
|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|
| | 実験① | 実験② | 実験① | 実験② | 実験① | 実験② | 実験① | 実験② | 実験① | 実験② |
| F | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ |
| G | | | | | | | | | | |

3.2 計測項目について

3.2.1 温熱環境計測

ミストファンの効果が温熱環境にどのような影響を与えるのかを把握するために表 3-4 に示す項目について測定した。また測定機器の配置図を図 5 と図 6 に示す。ミスト環境下の気温はセンサーが濡れている可能性が考えられるため、3次元超音波風速計の音仮温度を用いた。

表 3-4 温熱環境の計測項目

| 測定項目 | 測定機材 | 測定間隔 |
|----------|--------------|------|
| 乾球温度 | 乾球温度計(強制通風) | 1秒 |
| 相対湿度 | 湿度計 | 1秒 |
| 風速 | 2次元超音波風速計 | 1秒 |
| | 3次元超音波風速計 | |
| グローブ温度 | 黒球・白球温度計 | 1秒 |
| 長波・短波放射量 | 長短波放射計(垂直設置) | 10秒 |
| | 長短波放射計(水平設置) | |

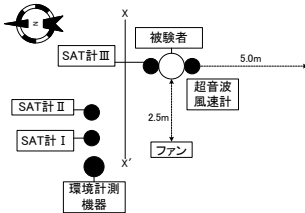


図 5 実験での測器配置位置

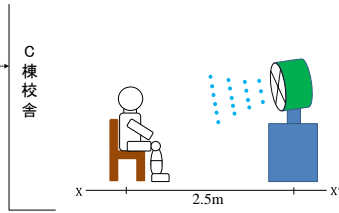


図 6 X-X'断面

3.2.2 生理量計測

ミストファンが人体にどのような影響を与えるのかを把握するために表 3-5 に示す生理量を計測した。

表 3-5 生理量計測項目

| 計測項目 | 測定機材 | 測定間隔 |
|------|--------------------------------|------|
| 心拍数 | 手首型心拍計 | 1秒 |
| 皮膚温度 | 皮膚温度センサー 温度入力解像度 (0.01℃) | 10秒 |
| 額 | | |
| 上腕 | | |
| 手の甲 | | |
| 胴体 | | |
| もも | | |
| 脛 | | |
| 足の甲 | 精密体重計 | 適宜 |
| 発汗量 | | |

3.2.3 心理量計測

ミストファンの効果が人の心理にどのような影響を与えるのかを把握するためにカテゴリ尺度を用いて表 3-6 に示す心理量計測項目を被験者の主観申告として得た。なお、アンケートは「日本建築学会環境基準温熱心理・生理測定法基準・同解説」等に基づき作成した。

表 3-6 心理量計測項目

| 申告項目 | 段階 |
|----------|-----------|
| 全身温冷感 | 9段階 |
| 快適感 | 7段階 |
| 気流感 | 6段階 |
| 発汗度 | 5段階 |
| Tシャツの濡れ感 | 4段階(屋外のみ) |
| 許容度 | 4段階 |
| 満足度 | 4段階 |

3.3 実験結果

実験結果として、今回は 8 月 22 日の実験①の結果について示す。平均放射温度(以降, MRT と表記する)は、黒球温度等からの算出(ISO7726)を参考に算出した。また SET*については、身長・体重等の入力値は各被験者の値を用い、着衣量は半袖長ズボンとして 0.43[clo]、着衣時の代謝量は 1[met]とし算出した。また相対湿度・黒色グローブ温度・白色グローブ温度はミストファンの影響を受けると正確に計測できないので、ミストファンの影響を受けないところで計測し、気温と風速に関しては、ミストファンの影響を受ける被験者の横に設置した 3次元風速計で計測したものをを用いた。また生理量計測における平均皮膚温度は Hardy-DuBuis の 7 点法で算出した。

3.3.1 温熱環境の計測結果

環境計測の結果を図 7 に示す。環境計測のミストあり(12:30~35)とミストなし(12:00~10)の平均値を表 3-7 示す。8 月 22 日ではミストなし時の気温が 32.1℃であった。ミストありの時の気温は 31.7℃でミストなしに比べ約 0.4℃低くなっていた。風速ではミストなしで 1.54[m/s]で、ミストありではファンの影響でミストなしの時より約 0.66[m/s]強い 2.20[m/s]となっていた。MRT は、ミストなしで 54.1℃であった。ミストありの時は、64.0℃で約 9.9℃高くなっていた。SET*は、ミストなしで 34.3℃で、ミストありでは 35.5℃であった。ミストありでは、ミストファンによる気温低下と風速増大したが、ミストなしに比べて SET*が約 1.2℃高くなっていた。

3.3.2 生理量計測の結果

生理量計測の結果として各部位の皮膚温度と平均皮膚温度の結果を図 8 に示す。に各条件での平均皮膚温度の平均値を表 3-9 示す。

平均皮膚温度は、ミストなしの時 34.67℃、ミストありの時ではミストなしの時と比べ約 0.96℃低下し、平均 33.71℃になった。全日程の平均値を見ると、ミストなしの時 35.24℃、ミストありの時 34.53℃であることから、ミスト噴霧による平均皮膚温度低下効果は 0.71℃程度であることが分かった。次に各部位の皮膚温度については、ミストなしの時では額が 35.24℃、腕が 35.25℃、手の甲が 35.57℃、躯体が 34.07℃、大腿が 34.81℃、脛が 34.17℃、足首が 35.78℃であった。ミストありの時は、ミストなしの時と比べると額は約 0.47℃低下し平均

34.77℃、腕は約 1.04℃低下し平均 34.21℃、手の甲は約 0.12℃低下し平均 35.45℃、躯体は約 2.09℃低下し平均 31.98℃、大腿は約 0.39℃低下し平均 34.42℃、脛は約 0.26℃上昇し平均 34.43℃、足首は約 0.04℃上昇し平均 35.82℃であった。額から大腿の上半身部分での皮膚温度の低下が見られた。これはミストファンの設置の仕方を被験者の前方から被験者の胸をめがけてミスト噴霧していることが影響していると考えられる。そのためミストの影響が少ない脛・足首の皮膚温度は上昇した。

3.3.3 心理量計測の結果

心理量計測の結果として、代表して主観申告の全身温冷感 (1: 寒い~9: 暑い) の結果を図 9 に示し、各条件の平均値を表 3-10 に示す。全身温冷感は屋内では 3.0 であった。屋外座位の時では平均 6.3 となっていた。ミスト内座位の時では屋外座位の時より 2.7 ポイント低い平均 3.6 となっていた。全日程の平均値を見ると、屋外座位の時平均 7.7 で、ミスト内座位では平均 4.7 であることからミスト噴霧によって、全身温冷感を 3.0 ポイント改善することが分かった。

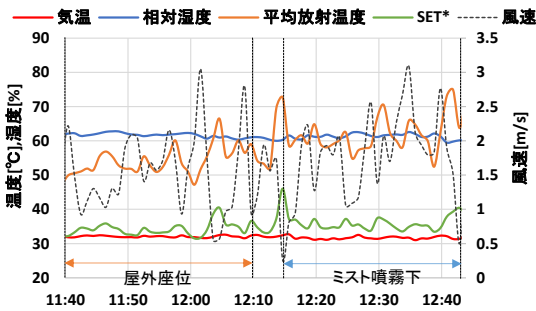


図 7 環境計測の結果 (8月22日実験①)

表 3-7 各条件での平均値

| 条件 | 環境計測 | | | |
|---------|-----------|-------|---------|-------|
| | 8月22日の実験① | | 全日程の平均値 | |
| | ミストなし | ミストあり | ミストなし | ミストあり |
| 気温[℃] | 32.1 | 31.7 | 31.7 | 31.0 |
| 相対湿度[%] | 61.2 | 61.8 | 49.4 | 50.1 |
| 風速[m/s] | 1.54 | 2.20 | 1.68 | 1.94 |
| MRT[℃] | 54.1 | 64.0 | 61.8 | 61.5 |
| SET*[℃] | 34.3 | 35.5 | 35.3 | 34.3 |

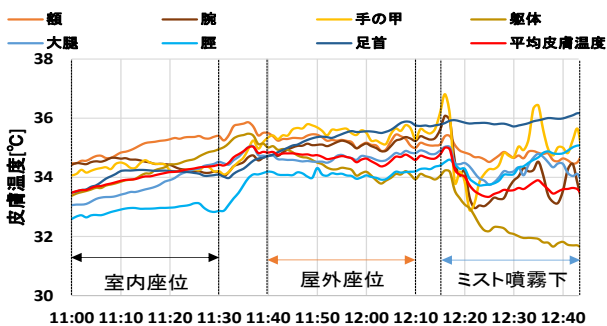


図 8 各皮膚温度の結果 (8月22日実験①)

表 3-8 平均皮膚温度の平均値

| 平均値 | ミストなし | ミストあり |
|-----------|-------|-------|
| 8月22日の実験① | 34.67 | 33.71 |
| 全日程 | 35.24 | 34.53 |

表 3-9 各皮膚温度の平均値

| 平均値 | 条件 | 額 | 腕 | 手の甲 | 躯体 | 大腿 | 脛 | 足首 |
|-----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 8月22日の実験① | ミストなし | 35.24 | 35.25 | 35.57 | 34.07 | 34.81 | 34.17 | 35.78 |
| | ミストあり | 34.77 | 34.21 | 35.45 | 31.98 | 34.42 | 34.43 | 35.82 |
| 全日程 | ミストなし | 35.51 | 35.92 | 35.97 | 34.90 | 35.24 | 34.90 | 35.39 |
| | ミストあり | 34.68 | 34.77 | 35.26 | 33.81 | 34.81 | 34.82 | 35.66 |

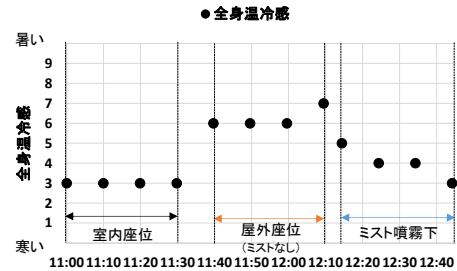


図 9 全身温冷感の結果 (8月22日実験①)

表 3-10 各条件の全身温冷感の平均値

| 全身温冷感の平均値 | 屋内座位 | 屋外座位 | ミスト内座位 |
|-----------|------|------|--------|
| 8月22日の実験① | 3.0 | 6.3 | 4.0 |
| 全日程 | 3.2 | 7.7 | 4.7 |

3.4 考察

3.4.1 皮膚温度と全身温冷感の関係

今回の実験における全身温冷感申告と平均皮膚温度および額・上腕の皮膚温度との関係を図 10~図 12 に示す。図 10 より平均皮膚温度と全身温冷感の相関係数は、0.72 となり、綾ノ町実験の平均皮膚温度と全身温冷感の相関係数 0.79 より少し弱いが同等の結果を得ることができた。次に今回の実験では上腕の皮膚温度と全身温冷感の相関係数は、0.64 という相関関係を得た。綾ノ町の実験に比べて相関係数が小さくなったのは、ミスト噴霧による濡れ方の違いが原因であると考えられる。そこで、今回の実験においてミストが付着しよく濡れた額の皮膚温度と全身温冷感の関係をみると相関係数が 0.73 という結果が得られた。以上のことから、ミスト噴霧による皮膚温度と全身温冷感の関係性については、ミストファンの設置位置を変更してもミスト噴霧の影響の大きい部位の皮膚温度と全身温冷感の相関関係と平均皮膚温度と全身温冷感の相関関係が高いことがわかった。

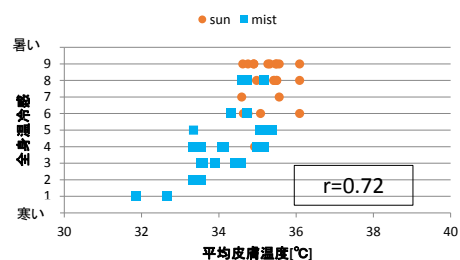


図 10 平均皮膚温度と全身温冷感の関係 (学内)

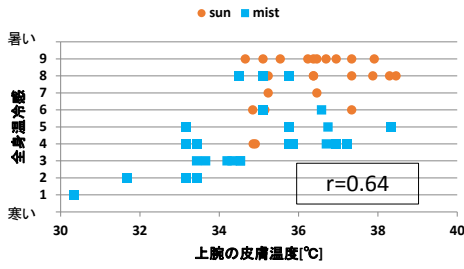


図 11 上腕の皮膚温度と全身温冷感の関係 (学内)

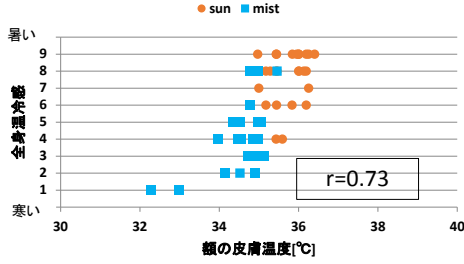


図 12 額の皮膚温度と全身温冷感の関係 (学内)

4. 人体生理量予測モデルの改良提案の検討

4.1 はじめに

ここでは、Kubota et al.のモデルの改良についての検討を行う。本研究では、ミスト噴霧下におけるミストで濡れることも考慮した平均皮膚温度を推定するために、Kubota et al.の人体生理量予測モデルをミストによる濡れの影響を SAT 計で計測し、SAT 計から算出される蒸発熱流束から皮膚表面と衣服におけるミスト噴霧による濡れを考慮したモデルに改良する。そしてモデル改良前後の推定値と実測値を比較し、評価する。

4.2 モデルへのミストによる濡れの考慮方法

4.2.1 増加する蒸発熱流束の算出について

ミストによる着衣と皮膚表面の濡れによる蒸発熱流束 E_{cl} と E_{sk} の算出について示す。まず SAT 計で計測したミストの蒸発熱流束 E_{SAT} から SAT 計の濡れ面積率 w_{SAT} を算出する。その算出式を式 1 に示す。式 2 に示すように、その SAT 計の濡れ面積率を用い、その時の着衣表面温度における飽和水蒸気圧 P_{sk}^* を用いてミスト噴霧での濡れによる蒸発熱流束 E'_{mist} を算出する。ミスト噴霧による着衣の濡れで増加する蒸発熱流束 E_{cl} の算出式を式 3 に示す。本研究では、Kubota et al.の人体生理量予測モデルにおいて濡れた着衣は、着衣の熱抵抗がなくなる仮定に倣い、着衣表面温度と皮膚表面温度が同等になるとしている。また今回の実験では、ミストファンが被験者の正面から上半身を狙って設置されていることから、ミストが濡れると想定される着衣の面積率 $w_{cl,mist}$ は、蔵澄ら⁹⁾を参照し、用いてミストの濡れによる着衣の蒸発熱流束の増分を算出した。また同様に、ミスト噴霧による皮膚表面の濡れで増加する蒸発熱流束 E_{skm} の算出について示す。ミスト噴霧での濡れによる蒸発熱流束 E'_{mist} まではミスト噴霧による着衣の濡れで増加する

蒸発熱流束 E_{clm} と同様で、式 5 のように示される。またこちらにも同様に、ミストファンが被験者の正面から上半身を狙って設置されていることから、ミストが濡れると想定される皮膚表面の面積率 $w_{sk,mist}$ は蔵澄ら⁹⁾を参照し、用いてミストの濡れによる皮膚表面の蒸発熱流束 E_{skm} の増分を算出した。

$$w_{SAT} = \frac{E_{SAT}}{LRh_{cSAT}(P_{SAT}^* - P_a)} \quad \text{式 1}$$

$$E'_{mist} = LRh_c(P_{sk}^* - P_a)w_{SAT} \quad \text{式 2}$$

$$E_{clm} = E'_{mist} \times w_{cl,mist} \quad \text{式 3}$$

$$P_{sk}^* = a_{sk}t_{sk} + b_{sk} \quad \text{式 4}$$

$$E_{skm} = E'_{mist} \times w_{sk,mist} \quad \text{式 5}$$

LR: ルイス数 [K/kPa], t_{sk} : 平均皮膚温度 [°C], a_{sk}, b_{sk} : 平均皮膚温度における飽和水蒸気圧の近似係数 [-], P_a : 大気水蒸気圧 [kPa], h_{cSAT} : SAT 計の対流熱伝達率 [W/(m² · K)], h_c : 人体の対流熱伝達率 [W/(m² · K)], P_{SAT}^* : SAT 計表面温度の飽和水蒸気圧 [kPa], P_{sk}^* : 平均皮膚温度における飽和水蒸気圧 [kPa], E_{clm} : 着衣の濡れで増加する蒸発熱流束 [W/m²], E_{skm} : 皮膚表面の濡れで増加する蒸発熱流束 [W/m²], $w_{sk,mist}$: ミストによって皮膚表面が濡れる面積率 [-], $w_{cl,mist}$: ミストによって皮膚表面が濡れる面積率 [-], w_{SAT} : SAT 計の濡れ率 [-]

4.2.2 ミストによる衣服の濡れの考慮方法について

ミストによる着衣の濡れの増加を Kubota et al.のモデルにおける着衣の濡れ域表面からの蒸発熱流量に加える。Kubota et al.のモデルにおける着衣の濡れ域表面からの蒸発熱流量の式に、ミスト噴霧による着衣の濡れで増加する蒸発熱流量 $E'_{mist} \cdot A_{cl,mist}$ を加えた式を式 6 に示す。そして、式 7 のように展開し、両辺を体表面積 A_D で割ることで、式 8 を得ることができる。式 8 より、最終的にミスト噴霧による着衣の濡れで増加する蒸発熱流束 E_{clm} は着衣の濡れ面積率の式に加えられる。

$$\left(\frac{A_{cl,w}}{f_{cl}} \right) \cdot E_{max,w} = \left(\frac{A_{cl,w}}{f_{cl}} \right) \cdot E_{max,d} + k_{evp} \cdot S_{wdr} \cdot A_D + E'_{mist} \cdot A_{cl,mist} \quad \text{式 6}$$

$$\frac{A_{cl,w}}{f_{cl}} (E_{max,w} - E_{max,d}) = k_{evp} \cdot S_{wdr} \cdot A_D + E'_{mist} \cdot A_{cl,mist} \quad \text{式 7}$$

$$w_{cl} = \frac{k_{evp} \cdot S_{wdr} + E'_{mist} \cdot w_{cl,mist}}{E_{max,w} - E_{max,d}} = \frac{k_{evp} \cdot S_{wdr} + E_{clm}}{E_{max,w} - E_{max,d}} \quad \text{式 8}$$

ここで、 $A_{cl,w}$: 濡れ着衣面積 [m²], f_{cl} : 着衣表面増加率 [-], $E_{max,w}$: 濡れた着衣における濡れた皮膚からの最大蒸発熱流量 [W/m²], $E_{max,d}$: 乾いた着衣における濡れた皮膚からの最大熱流量 [W/m²], k_{evp} : 蒸発率 [-], S_{wdr} : 乾いた着衣部の仮想無効発汗量 [W/m²], $A_{cl,mist}$: ミストで濡れる面積 [m²], $q_{rc,d}$: 乾き着衣における放射と対流による顕熱流量 [W/m²], $A_{cl,mist}$: ミストで濡れる着衣の面積 [m²]

4.2.3 ミストによる人体の濡れの考慮方法

ミストによる人体の濡れの増加分は、ミストを汗とみなし Kubota et al.のモデルの発汗量にミストの濡れによる蒸発熱流量として加える。発汗量の式にミストの濡れによる皮膚表面の蒸発熱流量の増分 E_{skm} を加えた式を式 9 に示す。

$$S_w = S_{WR} + S_{WE} + E_{skm} \quad \text{式 9}$$

S_w : 発汗量[W/m²], S_{wR} : 温熱性発汗量[W/m²], S_{wE} : 熱的中立な身体状況下での運動による発汗量[W/m²]

4.3 平均皮膚温度予測式の導出

ここまでミスト噴霧による着衣と皮膚表面の濡れの増分の追加について示した。ここからは、その増分を人体の熱収支式に加え、人体の熱収支式から平均皮膚温度を予測する式を導出していく。以下に人体の熱収支式から平均皮膚温度を算出する式を導いていく。

$$M - W + \alpha_{sk} f_{cl} I_{sunp} = S + C_{res} + E_{res} + k_{rc,d}(t_{sk} - t_{opsun}) + (1 + K_s) E_{clm} + \left\{ a_{dr} \left(1 - \frac{k_{dif}}{k_{max,d}} \right) + (1 - a_{dr})(K_s + K_E) k_{evp} \right\} \{ k_{swsk}(t_{sk} - t_{sksw}) + S_{wE} + E_{skm} \} + \left[(1 - b_{dr}) \frac{k_{dif}}{k_{max,d}} + b_{dr} \{ 1 - (K_s + K_E) k_{evp} \} \right] k_{max,d} (a_{sk} t_{sk} + b_{sk} - p_a) \quad \text{式 10}$$

$$t_{sk} = \frac{M - W + \alpha_{sk} f_{cl} I_{sunp} - S - C_{res} - E_{res} - (1 + K_s) E_{clm} + k_{rc,d} t_{opsun} - \left\{ a_{dr} \left(1 - \frac{k_{dif}}{k_{max,d}} \right) + (1 - a_{dr})(K_s + K_E) k_{evp} \right\} (S_{wE} + E_{skm} - k_{swsk} t_{sksw}) - \left[(1 - b_{dr}) \frac{k_{dif}}{k_{max,d}} + b_{dr} \{ 1 - (K_s + K_E) k_{evp} \} \right] k_{max,d} (b_{sk} - p_a)}{\left[k_{rc,d} + \left\{ a_{dr} \left(1 - \frac{k_{dif}}{k_{max,d}} \right) + (1 - a_{dr})(K_s + K_E) k_{evp} \right\} k_{swsk} \right] + \left[(1 - b_{dr}) \frac{k_{dif}}{k_{max,d}} + b_{dr} \{ 1 - (K_s + K_E) k_{evp} \} \right] a_{sk} k_{max,d}} \quad \text{式 11}$$

M : 代謝量[W/m²], W : 外部仕事量[W/m²], S : 人体蓄熱量[W/m²], C_{res} : 呼吸による対流熱伝達[W/m²], E_{res} : 呼吸による蒸散熱伝達[W/m²], t_{opsun} : 日射作用温度[°C], $k_{rc,d}$: 乾き着衣全体における放射と対流による顕熱移動係数[W/(m² · K)], k_{dif} : 不感蒸散放熱に関わる係数[W/(m² · kPa)], $k_{max,d}$: 乾き着衣における顕熱移動係数[W/(m² · K)], k_{swsk} : 発汗係数[W/(m² · K)], t_{sksw} : 体温調節発汗が始まる臨界温度[°C], a_{dr} , b_{dr} , K_s , K_E : 発汗効率の近似式に関する係数[-]

4.4 人体生理量予測モデルの改良結果の検証

ミスト噴霧下での人体生理量予測モデルの改良前後の予測値と実測値を比較することで、モデルの改良結果を検証する。人体生理量予測モデルに用いる入力値とSAT計から算出した着衣と皮膚のミストによる増加蒸発熱流束の結果を表 4-1 に示す。改良前後のモデルの予測値と実測値の結果を図 13 に示す。SAT計の表面温度から算出された着衣と皮膚の増加蒸発熱流量はそれぞれ 3.69W/m² と 5.54W/m² であった。平均皮膚温度は、実測値が 33.71°C、改良前の予測値が 33.85°C で、改良後の予測値が 33.72°C だった。改良前後を比較するとミストによって濡れることによる効果を加えることで 0.13°C の平均皮膚温度低下が見られた。表 4-2 より、綾ノ町の平均皮膚温度低下効果と今回の実験で計測した平均皮膚温度低下効果を比べると、0.2°C の差があった。この差をミスト噴霧によって濡れるか濡れないかの違いによるものと考え、モデルを改良することで得られたミストの濡れによる平均皮膚温度低下効果である 0.13°C と同等程度であることから、モデルの改良は有効であると考えられる。また全日程でみると実測値と改良後のモデルの予測値の誤差が -0.50 ~ +0.26°C で、改良前のモデルの誤差が -0.53 ~ +0.47°C であった。このことから人体生理量予測モデルの改良によって誤差が小さくなった。

表 4-1 入力値と算出した各増加蒸発熱流量

| 入力条件(8月22日実験①) | | | | | |
|-------------------------------|-------|-------------------------------|------------|---------|------------------|
| 気温[°C] | 湿度[%] | 黒色グローブ[°C] | 白色グローブ[°C] | 風速[m/s] | SAT計 表面温度[°C] |
| 31.7 | 61.8 | 41.2 | 34.6 | 2.20 | 50.8 |
| 皮膚の増加蒸発熱流束[W/m ²] | | 着衣の増加蒸発熱流束[W/m ²] | | | |
| 5.54 | | 3.69 | | 3.69 | |

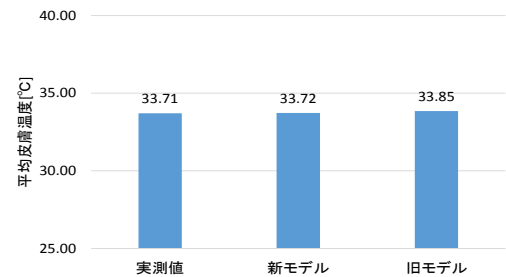


図 13 各平均皮膚温度の結果 (8月22日の実験①)

表 4-2 平均皮膚温度低下効果の比較

| 実験 | 綾ノ町の実験 | 学内実験 | 改良前 | 改良後 |
|---------------------|----------|---------|------|------|
| 条件 | ミストで濡れない | ミストで濡れる | | |
| ミスト噴霧前後の平均皮膚温度差[°C] | 0.50 | 0.70 | 0.26 | 0.39 |

5. まとめ

- 1) ミストファンの設置位置が異なっても平均皮膚温度と全身温冷感の相関関係が高いこと示した。
- 2) Kubota et al. のモデルを SAT 計で計測した蒸発熱流束からミスト噴霧による濡れを着衣と皮膚表面それぞれの増加する蒸発熱流束として考慮した平均皮膚温度を推定するモデルに改良した。
- 3) ミストで濡れるか濡れないかの違いによる平均皮膚温度低下効果は被験者実験では 0.2°C 程度であり、推定モデルにおけるミストの濡れによる平均皮膚温度低下効果は 0.13°C となった。
- 4) 改良後のモデルの予測値の誤差は、-0.50 ~ +0.26°C であることがわかった。また改良前のモデルの予測値の誤差が -0.53 ~ +0.47°C であることから、改良後のモデルの有効性を示した。

【参考文献】

- 1) 環境省 PDF 適応策の技術に関する調査
URL : <https://www.env.go.jp/air/report/h22-05/02.pdf> (閲覧日 : 12月20日)
- 2) 古川隆司 他 : 都市空間における人体熱収支と生理心理反応に基づいた体感気候評価の試み, 日本建築学会計画系論文集, 第 533 号, 2000 年
- 3) H.Kubota et al. : The development and initial validation of a virtual dripping sweat rate and a clothing wetness ratio for use in predictive heat strain models, Int. J of Biometeorology, 58(6): 1339/1353, DOI 10.1007/s00484-013-0736-x
- 4) 三坂育正 他 : 微細ミストによる暑熱環境緩和に関する研究 (第 3 報) 擬似発汗による冷却効果の評価, 空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集, 2017 年 9 月
- 5) Y.Uchida et al. : A study on the cooling method of the human body by mist spray Development of a measuring instrument for estimating the degree of wetness
- 6) 蔵澄登仁 他 : 日本人の体表面積に関する研究, 日生気誌 31(1):5-29, 1994 年