

機能性ウェアへの水分散布による蒸発性熱放散促進 および紫外線散乱による温熱的快適性向上

奈良女子大学 芝 崎 学
(共同研究者) 奈良女子大学 久 保 博 子
奈良女子大学大学院 難 波 真 理

Promotion of Evaporative Heat Dissipation by Water-dispersed Cloth on Functional Wear and Improvement of Thermal Comfort by UV Scattering

by

Manabu Shibasaki, Hiroko Kubo, Mari Namba
Nara Women's University

ABSTRACT

Whole-body cooling is the most effective measure against hyperthermia in a hot environment, but it is important to predict and prevent such an excessive rise of body temperature. Thermal sensation and comfort are critical for prediction. Thermal comfort depends on the core temperature, but also on information from skin temperature receptors. Thus, the thermal sensation can be altered when the condition of the skin surface changes due to radiation {i.e., ultraviolet (UV) and infrared (IR)}, evaporative cooling (i.e., sweating), or skin lotion (i.e., foundation or insect repellent spray, etc). The purpose of this project was to propose a countermeasure against heat stress by utilizing unique clothing. In the laboratory experiment, we investigated the change in temperature sensation due to ultraviolet irradiation and the protective effect of clothing using artificial sunlight. As a practical study, we focused on the transpirational effect of spraying micro-mist over functional innerwear, and investigated the effect of spraying micro-mist on evaporative heat loss. In addition, we

conducted a questionnaire survey involving university students, including university student athletes, about their awareness of heat stroke and how to deal with it. Thermal sensation was more sensitive one day after artificial sunlight exposure, but was preserved by UV-cut wear. Spraying micro-mist promoted evaporative heat loss, making it comfortable to watch sports in a hot environment.

要 旨

暑熱環境下における過度な体温上昇に対する最も効果的な対策は全身冷却であるが、過度に体温が上昇しないように予測し、予防することが重要である。温度感覚や温熱的快適性がその予測のための判断基準となる。温熱的快適性は、核心温度のレベルによっても変化するが、皮膚の温度受容体からの情報によって左右される。また、温度感覚は、環境条件や生体反応によって皮膚表面のコンディションが変化することでも変化的ことが考えられる。つまり、温熱的快適性は、紫外線の照射量や、発汗による蒸発的熱放散量によって影響される可能性は高い。そこで本研究ではウェアを利用して皮膚表面のコンディションの改良を試みた。実験室実験では、人工太陽光を用いて紫外線照射による温度感覚の変化とウェアによる保護作用を検討した。また、実践的研究として、機能性インナーは消費者によって様々な使われ方に転じていることに着目し、放湿性の高さを利用し、マイクロミストを噴霧することによる蒸散性熱放散効果を検討した。並行して大学生アスリート含む大学生へ熱中症に対する意識調査と対処方法についてアンケート調査した。温度感覚は人工太陽光照射によって翌日敏感になったが、UVカットウェア着用によって影響を受けなかった。コンプレッションウェアへのマイクロミスト噴霧は熱放散を促進し、快適な暑熱環境下でのスポーツ観戦を可能にすることが示された。

緒 言

2020年に予定されていた、東京オリンピック・パラリンピックは、COVID-19の影響で1年の延期を経て開催された。本研究の目的は、アスリートよりも観客の熱中症に着目し、既存のウェア、特にインナーを利用した暑さ対策がテーマであったが、様々な思いが溢れていたため、本文ではあえて振り返らないこととする。記録として如何に酷暑下で実施されたかのみを一文だけ記述しておく。当初から懸念された開催時期の酷暑による熱中症を懸念し、マラソンと競歩の会場が東京から札幌に変更され、一部の競技で競技日程の前倒し、及び競技開始時間の繰り上げで実施された。しかし、いくつかの競技は炎天下で実施されていた。8月8日の男子マラソンでは出場した106選手のうち30人が途中棄権し、前回のリオ大会の15人の倍となる過酷なレースとなった。無観客の実施となったが、様々な場面で東京オリンピック・パラリンピックでは暑さ対策が重要視されていたことが映像からも見る事ができた。

熱中症に対する重要な生体調節機能は、行動性および自律性体温調節である。暑熱環境下では皮膚の温度受容器で環境温が感知され、脊髄後角に輸入される。そして、一つは脊髄レベルで外側へ交叉し、大脳皮質の一次体性感覚へ伝達され、行動性体温調節を引き起こし、もう一つは視索前野に伝達され、自律性体温調節反応を誘発する。行動性体温調節とは、衣服の着脱やエアコンの使用といった行動による体温調節を担っている。自律

性体温調節とは、自律神経に支配される汗腺や皮膚血管の拡張による熱放散、皮膚血管の収縮による熱放散抑制や脂肪組織の活性による熱産生によって体温を調節している。暑熱環境下では熱放散が重要となり、身体表面の水分の蒸発による熱放散である蒸散性熱放散（湿性熱放散）と、水分の蒸発によらない熱放散である非蒸散性熱放散（乾性熱放散）によって体内の熱を放散する。前者は汗腺からの汗や、呼吸時の水分放出のことであるが、発汗による蒸散性熱放散の割合が大きい。一方、非蒸散性熱放散では血管の拡張・収縮によって血流量を調節し、熱放散量をコントロールしており、皮膚温と環境温の差に依存する。しかし、皮膚温と環境温の差が小さくなると熱放散ができなくなるため、発汗による蒸散性熱放散が重要となる。

暑熱環境下における過度な体温上昇に対する最も効果的な対策は全身冷却である。アイススラリーや冷水の摂取や、氷嚢や冷媒による直接冷却に勝るものはない。これらは過度に体温が上昇したことを前提としており、競技者は運動による産熱上昇があるため、これらの対策は競技者において熱中症予防のためにも必要不可欠である。一方、観戦者も高温環境下に長時間暴露されると体温が上昇し、熱中症を発症する危険性がある。しかし、観戦者が各々多量の水分や水、冷却材を持参することは現実的ではなく、自らの体温調節能力を十分に発揮することが重要である。発汗による熱放散は非常に強力であるが、汗をかきたくない人や汗をかきにくい体質の人など、発汗による熱放散効果には個人差があり、また発汗による熱放散は全身一様でもない。そのため、有効な熱放散対策が重要である。我々は機能性インナーが消費者によって様々な使われ方に転じていることに着目した。例えば、コンプレッションウェアは本来の運動機能サポートという用途から体温調節サポートとしての利用も増えている。事前調査で野球部の

投手陣から元々は肘を守るつもりで夏に着用したが、多量に発汗すると効果は消失するが、滴る汗によるボールが滑りやすさが軽減するので夏も着用しているとの話があった。これには速乾性の影響がある可能性が考えられた。また、女性では日焼け対策として着用しているとの声も聞かれた。温熱的快適性は、核心温度のレベルによっても変化するが、皮膚の温度受容体からの情報によって左右される。さらに、温度感覚は、環境条件や生体反応によって皮膚表面のコンディションが変化することでも変化することが考えられる。つまり、紫外線の照射量や、発汗による蒸発的熱放散量によって影響される可能性は高い。これらを複合的に考慮し、ユーザーの主観的意見を生理的に評価するために、機能性ウェアの体温調節機能への効果を検証した。

1. 研究方法

本研究は次の実験および調査から構成される。

- ①紫外線による温度感覚の変化と紫外線カットウェアによる効果
- ②コンプレッションウェアへの霧吹きによる水分散布による紫外線散乱の効果と送風による蒸散性熱放散効果の検証
- ③大学生アスリート含む大学生へのアンケート調査

1. 1 実験1 紫外線による温度感覚の変化と紫外線カットウェアによる効果

本実験には、健康な若年女性8名が参加した。全ての被験者には事前に実験の主旨、条件、測定項目、方法、および危険性について事前に書面および口頭で説明し、書面で実験参加の同意を得た。

1. 1. 1 実験手順

被験者は実験室に入室後、座位安静を保持した。照射領域を特定するために、前腕にφ4cmの穴を開けたUVカットのアームカバー（LGO社製）を着用し、照射部以外は紫外線をカットした。照射

領域は人工太陽光の特性を検討した際に用いた分光放射計の反射型拡散板と同面積にした。照射前にレーザードップラー血流画像化装置で皮膚血流速度を測定した。照射部の両端（前腕近位部、前腕遠位部）にT型熱電対を貼付し、照射部中央には、油性ペンで印をつけた。人工太陽光を照射部から33cmの高さに設置し、安静後、前腕内側部を30分間照射した。照射中、被験者は安静を保持し、1分毎にVASを申告した。照射部中央の皮膚温は、照射開始25分後から5分間のみ測定した。照射終了後、再びレーザードップラー血流画像化装置で皮膚血流速度を測定した。その後、測定プローブを照射部位に貼付し、温度刺激負荷を開始した。温度刺激負荷中、被験者は座位安静を保持した。

標準レンズ、紫外線遮蔽レンズ、標準レンズでUVカットのアームカバー着用の3つの条件で前腕内側部を30分間照射した。標準レンズと紫外線遮蔽レンズは同じ日に照射を行い、標準レンズによる照射と紫外線遮蔽レンズによる照射は左右、照射順番をランダムにした。後日、標準レンズを装着した人工太陽光で、UVカットのアームカバーを着用し、照射を行った。照射直後、1日後、4～6日後に温度刺激負荷を繰り返した。

温度刺激には、局所温度制御装置（インタークロス社製、Intercross-210 Thermoception Analyzer）を用いた。照射1日後、4～6日後は、照射直後

と比べ温度刺激負荷前の皮膚温が低いため、装置により皮膚温を33℃から37℃まで15分間かけて上昇させた後、下記の温度刺激負荷を開始した。

測定プローブ温を37℃に設定し、5分間安静をとった。その後毎秒0.5℃で33℃まで冷却し、測定プローブ温が33℃に達してから5分間同温を維持した。その後、毎秒0.02667℃で43℃まで上昇させた（図1）。予備実験において、30分間の人工太陽光照射によって皮膚温が37℃近くまで上昇する被験者もいたこと、冷覚自覚試験への直前までの皮膚温の影響を考慮して、初期設定温度を37℃に決定した。

VASによる各感覚の申告は温度刺激負荷開始0分目に温度感覚を申告し、その後1分毎に5分間温度感覚を申告した。5分目は、冷却刺激が始まる15秒前に申告した。温度下降開始10秒前に、間もなく温度が変化することを促され、申告の準備をした。温度下降時、冷覚を自覚したときにスイッチによる自覚温度の申告と、冷覚自覚温度感覚を申告した。測定プローブ温が33℃に達したとき、温度感覚を再度記入した。その後、記録用紙を変え、プローブ温度が33℃に達した時を0分目とし、以降1分毎に5分間温度感覚を申告した。温度上昇時は皮膚温が2℃上昇する毎に温度感覚を申告した。43℃まで皮膚温が上昇し、温度刺激負荷が終了した直後、記録用紙を変え、痛みの

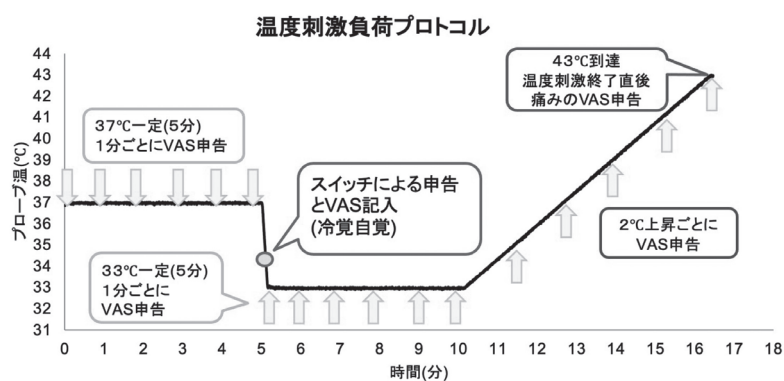


図1 温度刺激負荷プロトコル

VASを申告した。温度感覚の申告の際は、スケール上に印をつけ、その上もしくは下に、0から通し番号を記入した。

1. 1. 2 測定項目

測定項目は、照射中の皮膚温およびVAS、温度刺激負荷中のVASおよび皮膚血流速とした。皮膚温は、T型熱電対を用い、皮膚温測定用アンプ（YOKOGAWA社製、DA100）で計測し、パーソナルコンピュータに取り込んだ。照射前後の皮膚血流速は、レーザーレーザードップラー血流画像化装置（moor instruments社製、LDLS）で測定した。温度刺激負荷には、局所温度制御装置（インタークロス社製、intercross-200）を使用した。この装置は、測定プローブ、サーモコントローラー（温調コントロール部）および制御・解析部分で構成される。測定プローブは、皮膚温度センサーを内包する半径15mmのアルミ製の接触部と、ペルチェ素子を発熱・吸熱機構として使用したサーモモジュール部で構成されている。測定プローブは、水冷式プローブ（半径15mm）を使用し、データはパーソナルコンピュータ（EPSON社製、Endeavor NJ2150）に取り込んだ。温度刺激負荷中の皮膚血流速は、レーザードップラー血流モニタ（moor instruments社製、VMS）で測定した。測定プローブ中央に血流用ファイバーを挿入し、ファイバーの先端が刺激装置の面と同じになるように調節し、温度刺激負荷開始から連続的に記録した。

温度感覚および痛みの感覚の測定は、VASを用いた。A4サイズの紙を横長に2分割し、その中央に200mmのスケールを作成した。痛みの感覚は、「0」を「痛みはない」状態、「100」を「これ以上の痛みはないくらい痛い（これまで経験した一番強い痛み）」状態として、現在の痛みが10cmの直線上のどの位置にあるかを記した。一方、温度感覚は一方向ではなく「熱い、冷たい」の2方向があるため、VAS用紙には線の中心に何も感じない点を記した。

1. 1. 3 データ解析

皮膚温は、T型熱電対を用い、皮膚温測定用アンプ（YOKOGAWA社製、DA100）で30分間連続的に計測し、パーソナルコンピュータに取り込んだ後、エクセル変換を行った。測定部位ごとに1分間の平均を算出した。0分目の値を照射前とし、30分目の値を照射後とした。日による測定誤差を最小限にするために、レーザードップラー画像化装置（moor instruments社製、LDLS）を用いて皮膚血流速を検討した。スキャンした画像をパーソナルコンピュータに取り込み、対象とする部位（ROI）を指定して、照射前後で同じ場所の血流の平均値を求めた。中心の「何も感じない」点からの距離を絶対値（mm）で表したものをVAS絶対値とする。温度感覚はこのVAS絶対値によって評価した。また、「冷たい」はマイナス、「熱い」はプラスで表現した。温度感覚と同様に、VASの絶対値で評価した。「痛みはない」点からの距離をプラスで表現した。血流用ファイバーを局所温度刺激装置の測定用プローブ内に挿入し、レーザードップラー血流モニタ（moor instruments社製、VMS）で連続的に測定し、データロガー（BIOPAC System社製、MP150）を介して、パーソナルコンピュータに取り込んだ。解析にはAcqknowledge3.9（BIOPACK社製）を用い、データをエクセル変換し、10秒平均を算出した。統計にはSigma Plot11.0を用い、温度感覚（mm）、痛みの感覚（mm）、冷覚自覚温度感覚（mm）、皮膚温、冷覚時皮膚温、皮膚血流速を2要因の分散分析（主要因を照射条件（標準レンズ、紫外線遮蔽レンズ、UVカットウェア）と時間（照射直後、1日後、4~6後を比較））で検討した。有意差水準の判定は危険度5%未満とした。

1. 1. 4 結果

本実験には、8名の若年女性に参加したが、温度刺激負荷中に血流用ファイバーで測定した皮膚血流速のデータにおいて欠損値が多くみられた。

皮膚温上昇に伴う皮膚血流速の変化がみられないデータにおいては、欠損値とし、結果から除外した。30分間の人工太陽光照射によって皮膚温および皮膚血流速は増加したが、条件による差は認められなかった。図2の皮膚温は近位部の結果のみであるが、遠位部も同様の結果であった。

図3は人工太陽光照射の翌日（左側）、4～6日後（右側）の温度刺激負荷前（上部）および後（下部）に計測した皮膚血流速を示している。照射1日後の安静時のみ紫外線カットのレンズ（cut）やUV

カットウェア（armcover）を使用しなかった対照群（標準レンズ，normal）において高い値を示した。

温度感覚のVASの結果は3つの視点（皮膚温上昇時，皮膚温下降時，定常温度刺激時）から2つの比較条件（同一日内における照射条件による比較，同一条件内における時間経過による比較）で検討した。

皮膚温上昇時のVASは，照射1日後のみ標準レンズ（normal）のVASが他の条件よりも41℃から明らかに高くなった（図4B）。照射直後，4～6日後には，群差は認められなかった。また，紫外線遮蔽レンズとUVカットウェアでは，照射直後，1日後，4～6日後のいずれも有意差は認められなかった。図4Dは変化が認められたnormal条件の3日間の比較を示した。他の条件には差は認められなかった。また，皮膚温下降時（37℃から33℃），および定常温度刺激時（37℃および33℃）ではいずれの条件においても差は認められなかった。すなわち，高温領域において紫外線照射の影響を受けたnormalのみにおいて温度感覚が亢進していることが認められた。

1. 1. 5 考 察

紫外線（UV-B）は，長時間の日光浴等で肌が赤くなる日焼けの主な原因であり，肌表面の細胞を傷つけ，炎症を引き起こす。炎症が起これば，プロスタグランジンやヒスタミンなどの炎症メディエーターが放出され，それらが侵害性熱刺激受容体であるTRPV1をリン酸化する。その結果，TRPV1の活性化温度閾値が低下し，急性炎症性の痛みを引き起こす¹⁾。つまり，日焼けにより本来痛みを感じないような低い温度刺激で痛みを感じるようになるのは，TRPV1の活性化温度閾値が低下したためであると考えられている。しかし，近年TRPチャネルの研究が進み，2013年には，表皮ケラチノサイトに多く発現するTRPV4が日焼けによる痛みの感覚に関与していることが

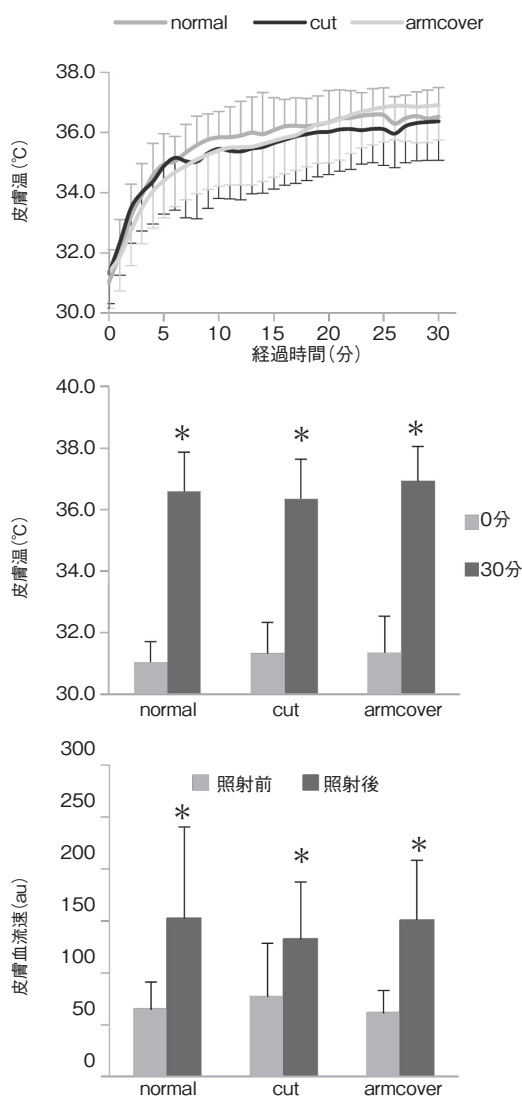


図2 人工太陽光照射時の皮膚温の経時変化(上)と、照射前後の皮膚温(中)と皮膚血流速(下)

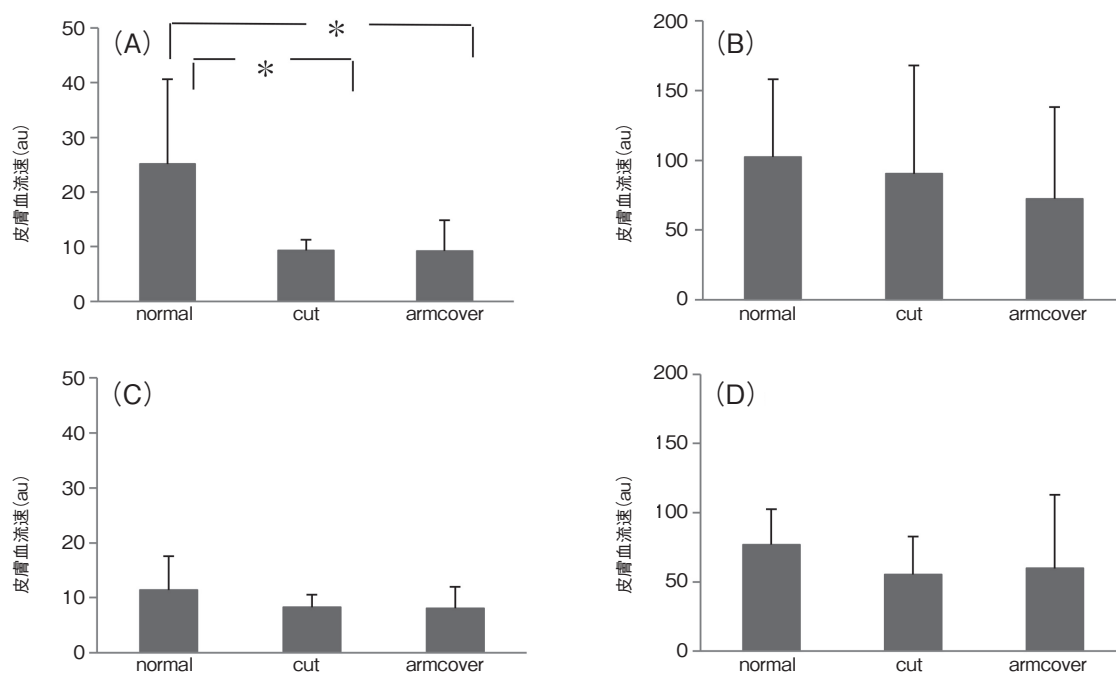


図3 人工太陽光照射1日後の安静時(A)および温度刺激負荷終了後(B)の皮膚血流速および人工太陽光照射4~6日後の安静時(C)および温度刺激負荷終了後(D)の皮膚血流速

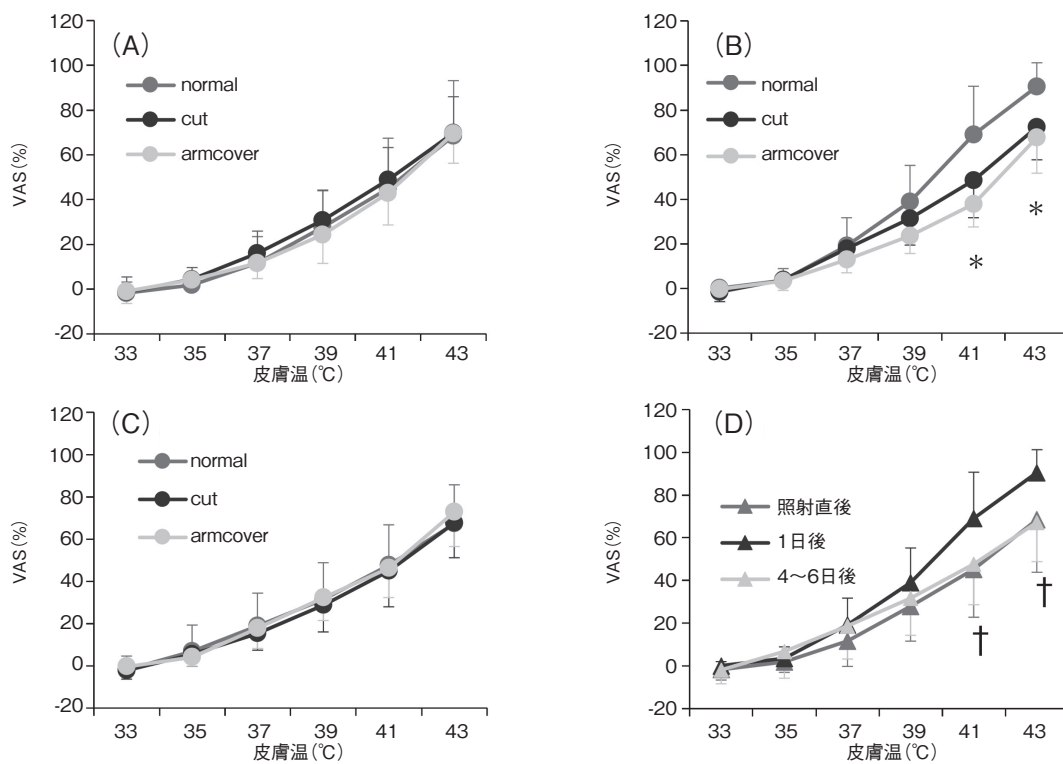


図4 温度刺激負荷の加温中の温度感覚VASの日による変化(A~C)およびnormalの日による比較(D)
A:人工太陽光照射直後, B:1日後, C:4~6日後, *, $P < 0.05$ from normal, †, $P < 0.05$ from 1日後

明らかになった²⁾。TRPV4は、30～40℃の温かい温度で活性化し皮膚の温度受容体であると示唆されているが、紫外線により痛みだけでなく、温度感覚も変化するかどうかは不明である。そこで、本研究では紫外線による皮膚温度感覚への影響をVAS (Visual Analog Scale) で比較検討した。

標準レンズの照射1日後、温度刺激負荷前の安静時(皮膚温33℃)の皮膚血流速が増加し、照射条件による比較をした場合も、時間経過による比較をした場合も有意差が認められた。これは、紫外線(UV-B)により、照射1日後に炎症を起こしたためであると考えられる。炎症を起こすと、炎症部位に浸潤した白血球や肥満細胞、マクロファージから炎症メディエーターと呼ばれる生理活性物質が放出される³⁾。炎症メディエーターには発痛物質であるヒスタミンやセロトニン、プロスタグランジン、炎症性サイトカインであるインターロイキンやTNF- α などが含まれ、これらの炎症メディエーターの発現は、UV-Bの照射後に増加することが報告されている⁴⁾。炎症メディエーターは、血管透過性亢進、血管拡張といった作用がある^{3,5)}。そのため、標準レンズの照射1日後の安静時皮膚血流速が増加したと考えられる。安静時の皮膚の温度は33℃～34℃であるが、炎症を起こし血管が拡張するとその部分の温度が上がる⁵⁾。本研究では、照射1日後に照射部位の皮膚温を測定していないが、紫外線により炎症を起こし、照射部位の皮膚温が上昇していたことが考えられる。

皮膚温上昇時のVASは、標準レンズの照射1日後、紫外線により明らかに高くなり、照射条件による比較した場合も、時間経過による比較した場合も約40℃から有意差が認められた。先行研究で明らかになっている痛覚と同様に⁶⁾、温覚も紫外線の刺激により、照射1日後に敏感になったと言える。また、照射1日後のVASが高値を示し、有意差が認められたのは、約40℃からであったが、

それよりも低温からVASが高くなる傾向が認められた。この温度で被験者は痛みを申告していなかったことから温度感覚も紫外線照射によって亢進したものと考えられる。しかし、定常温度設定の33℃と37℃では温度感覚VASに差は認められなかった。また、皮膚温下降時の冷覚時皮膚温、冷覚自覚VASも、本研究では紫外線による影響はみられなかった。本研究では毎分1.6℃上昇する速度としたが、温度変化勾配によって受容体への刺激も変化した可能性がある。痛みの感覚は、先行研究と同様に照射1日後に高い値を示し、照射条件による比較をした場合も時間経過による比較をした場合も有意差が認められた。数名の被験者は、紫外線により照射直後にも痛みを感じていたが、痛みは1日後に増強し、4～6日後には消失することがわかった。また、先行研究では、紫外線により照射1日後の熱痛覚閾値が42.3℃であり、コントロール(何も刺激を加えていない)の状態と比べて、約5℃低下したと報告されている⁶⁾。本研究では、熱痛覚閾値は測定していないが、温度刺激負荷後、痛みを申告した被験者は41℃のVASを申告する前後から痛みを感じていたため、先行研究とはほぼ一致する結果であった。

1. 1. 6 まとめ

本研究では、人工太陽光を用いて紫外線による皮膚温度感覚への影響をVAS (Visual Analog Scale) で比較検討することを目的とした。紫外線の有無による影響を検討するため、標準レンズ、紫外線遮蔽レンズ、標準レンズでUVカットウェア着用の3つの照射条件で同一日内における照射条件による比較と同一条件内における時間経過の比較を行った。紫外線遮蔽レンズおよびUVカットウェア着用で紫外線をカットした場合は、照射直後、1日後、4～6日後ともにVASおよび皮膚血流速に変化はみられなかった。一方、標準レンズで照射した場合は、照射1日後のみ皮膚温上昇時のVAS、温度刺激負荷後の痛みのVAS、安静

時の皮膚血流速が明らかに高くなった。皮膚温下降時の冷覚時皮膚温および冷覚自覚VASは、今回の実験では紫外線の有無による差はみられなかった。これらの結果から、紫外線による皮膚温度感覚への影響は、照射直後ではなく、1日後の皮膚温上昇時に現れ、4～6日後に消失することが示された。

1. 2 実験2 コンプレッションウェアへの霧吹きによる水分散布による紫外線散乱の効果と送風による蒸散性熱放散効果の検証

本実験には、健康な若年女性12名が参加した。全ての被験者には事前に実験の主旨、条件、測定項目、方法、および危険性について事前に書面および口頭で説明し、書面で実験参加の同意を得た。

1. 2. 1 実験手順

本実験は、生活環境シミュレーターにて実施した。2基の人工気候室（エスベック株式会社製）が配置され、複合実験室（W 4.5m × H 2.23m × D 5.1m）を前室とし、温熱実験室（W 4.07 × H 2.3m × D 3.02m）を暑熱負荷用実験室とし、それぞれ室温を25℃（相対湿度30%）、37℃（相対湿度30%）に設定した。両人工気候室とも気流は0.1 m/s以下と設定した。温熱実験室では扇風機を使用し、至軽風（1.24 m/s）がある状態とした。被験者は、アンダーウェアの上からTシャツとハーフパンツを着用し、Tシャツの下にコンプレッションウェアを着用した。疑似的な発汗効果としてミストスプレーによる噴霧を利用した。ミストあり条件時（Mist on）にはミストスプレー（スプレーボトル 200 ml）を使用し、不使用時には氷水を入れた容器で保管し、ボトル内の水温が1℃前後に維持されるようにした。

被験者はTシャツとハーフパンツを着用し、実験室横にある化粧室で直腸温センサーを挿入してから前室に入室した。前室に入室後、再度Tシャ

ツを脱ぎ、心電図用電極および皮膚温用サーミスタセンサー、皮膚温湿度センサーを貼付した。コンプレッションウェアとTシャツを着用後、椅座位安静にした。椅座位安静30分中に安静データを測定した。その後、隣接する実験室に速やかに移動し、テニスや野球などを椅座位でテレビ観戦し、120分間滞在した。Mist on条件では、実験室に入室後、10分毎にミストスプレーを使用してもらい、10分毎以外にもミストを使用したいと感じた時には使用してもよいことにした。両条件ともに、実験終了後に質問紙の回答を得た。

被験者はNone条件とMist on条件の計2回の実験に参加した。体内の日内リズムを考慮して、両条件とも、実験の時間帯が同じになるように日程を調整した。また、条件の実施順はランダムとし、12名中5名がNone条件から、7名がMist on条件から実施した。

1. 2. 2 測定項目

測定項目は、2点の皮膚温湿度、10点の皮膚温、直腸温（Tre）、体重、血圧（MAP）、心拍数（HR）、および主観的申告とした。皮膚温湿度はセンサー（MSR社製、MSR145W）を右胸部および右前腕部の2点に貼付し、1秒間隔で測定し、装置内のメモリに蓄積し、実験終了後にパーソナルコンピュータ（DELL社製、Vostro 1510）に取り込んだ。測定部位は予備調査で決定した。皮膚温はサーミスタセンサー（グラム株式会社製、LT-ST08-12）を前額部、胸部、腹部、肩甲骨下部、腰部、前腕部、手背部、大腿部、下腿部、および足背部（すべて左側）の10点に貼付し、高精度温度ロガーLT8（同社製、LT-8A）にて30秒間隔で測定し、装置内のメモリに蓄積し、実験終了後にパーソナルコンピュータ（Panasonic社製、CF-S8）に取り込んだ。

直腸温はセンサー（グラム株式会社製、LT-ST08-11）に、専用カバー（日機装サーモ株式会社製、サーミスタ温度プローブ用ゴムカバー）をつ

け、肛門より約10 cm挿入し、LT8にて皮膚温と同時に30秒間隔で測定し、装置内のメモリに蓄積し、実験終了後に上記と同様にパーソナルコンピュータに取り込んだ。体重は体重計（寺岡精工株式会社製、プラットフォーム型スケールS-UKシリーズ）の上に椅子をのせた状態を0 kgとしてリスケールし、実験室にて15分間隔で測定した。血圧（MAP）はオムロンデジタル自動血圧計（オムロンヘルスケア株式会社製、HEM-6111）を使用し、左手首にて30分間隔で測定した。心拍数（HR）は心電図計（NEC社製、BIOMULTI1000）で心電図を前室および実験室に入室後25分経過毎に5分間測定し、1000Hzのサンプリング周波数でデータロガー（BIOPAC社製、MP150）を介して、パーソナルコンピュータ（富士通社製、FMVA03002）に取り込み、演算処理した。

主観的申告は痛みの評価として用いられるVAS（Visual Analog Scale）を応用した。長さ20 cmの直線の中心を普通（0）、両端を相対する感覚の想像できうる極限（100）とし、現在の感覚が直線状のどの位置にあるか申告を得た。0点からの距離をmmで表し、絶対値として評価した。VASスケールを用いて、温冷感、乾湿感、快不快感、および疲労感について評価した。温冷感については右側を「温かい」、左側を「冷たい」とし、全身、頭部、頸部、胸部・腹部、背部、上肢、および下肢の7点を評価した。乾湿感については右側を「湿っている」、左側を「乾いている」とし、全身を評価した。快不快感については右側を「快適」、左側を「不快」とし、全身、頭部、頸部、胸部・腹部、背部、上肢、および下肢の7点を評価した。疲労感については右側を「疲労を感じる」、左側を「疲労を感じない」とし、全身を評価した。実験終了後に、None条件では「実験中にミストがあればどのような位置にかけたかったか」を、Mist on条件では「実験中にミストをかけて特に気持ち良かったところ」を、それぞれ申告を得た。

1. 2. 3 データ解析

実験室へ移動する直前20分間をPreとし、移動直後20分間を除いた20分毎の平均値と標準偏差を算出した。移動直後の値はばらつきが大きいため、解析の対象外とした。データを記載する12名のうち、うまく測定できなかった2名を除いた10名を解析の対象とした。測定した5分間のデータの平均値をそれぞれ算出した。皮膚温と主観申告、皮膚湿度と主観申告、および主観申告間について、データをプロットし、SPSSを用いて相関係数を算出した。先行研究において、皮膚温と温冷感是一次式で、皮膚温と快適感、および温冷感と快適感は二次式で近似させていたため（15-17）、本研究においても、皮膚温と温冷感、および皮膚湿度と温冷感是一次式で、皮膚温と快適感、皮膚湿度と快適感、および主観申告間は二次式で近似させた。心拍数は30分毎に5分間のbeat by beatの周波数解析を実行し、副交感神経活動と交感神経活動の指標であるLFとLF/HFをMemCals（GMS社製）それぞれ算出した。

統計解析にはSPSS（Ver 25.0）とSigma Plot（Ver 12.5）を主として用い、T検定にはExcel（2013）を用いた。Condition（ミスト有無）とTime（経過時間）を要因とし、繰り返しのある二要因の分散分析を行い、下位検定にはStudent-Newman-Keuls検定を用いた。前室において二条件間に差異がないことを確かめるため、繰り返しのあるT検定を用いた。データは全て平均±標準偏差で表記し、有意差水準の判定はいずれも危険率5%未満とした。

1. 2. 4 結果

Pre時の体重、Tre、MAP、HR、皮膚湿度、および皮膚温の平均値に、None条件およびMist on条件の差はなかった。HRはNone条件で 77.5 ± 7.5 bpm から 83.1 ± 8.5 bpmに、Mist on条件で 74.2 ± 6.5 bpm から 79.4 ± 7.6 bpmに有意に上昇し、Mist on条件の方が低くなる傾向がみられた。

LFに条件間に差は認められなかったが、LF/HFはNone条件の方が30分目より有意に高い値を示した。MAPはNone条件で $80.0 \pm 4.9\text{mmHg}$ から $77.8 \pm 8.4\text{mmHg}$ に、Mist on条件で $81.7 \pm 7.0\text{mmHg}$ から $79.7 \pm 6.0\text{mmHg}$ とやや低下傾向はみられたが統計的な差は認められなかった。Treは温熱実験室に入室後少し低下し、None条件では80分目くらいからPreまで戻り、そのまま変化しなかった(Pre: $37.2 \pm 0.3^\circ\text{C}$ 、終了値: $37.2 \pm 0.2^\circ\text{C}$)。Mist on条件では、PreではNone条件と同様($37.2 \pm 0.3^\circ\text{C}$)であったが、40分目には $37.0 \pm 0.3^\circ\text{C}$ まで少し低下し、その後100分目からわずかに上昇して120分目の終了時には $37.1 \pm 0.3^\circ\text{C}$ であった。

温湿度センサーで測定した胸部および前腕部の温湿度は20分間の平均値とその間の変動を示す標準偏差で比較した。図5は典型的な個人のデータを示している(前腕部)。温度が低下しているところは被験者がミストスプレーを利用したところ

を示している。この被験者は 25°C の前室でもすでにわずかに発汗をしていることが確認できる。 37°C の温熱実験室に移動後にNone条件で発汗が増加していることが観察され、Mist on条件でもわずかに発汗反応は認められるが、ミストによって発汗量が大幅に抑制されていることが観察された。これらを定量的に評価するために、20分毎に平均と標準偏差を算出して比較した(図6)。胸部および前腕部ともにMist on条件で皮膚温の平均値は低下した(both, $P < 0.05$)。しかし、湿度の平均値に条件間で有意差は認められなかった。しかし、ミストを噴霧しているのでも、標準偏差が大きくなった。統計的には前腕部で有意差が認められた($P=0.003$)。図5の個人データでも示されたように湿度の上昇は発汗を反映しており、平均値だけで評価すると、条件間に差はなく、両条件とも実験中に上昇した。None条件は発汗を反映しているが、Mist on条件ではミスト噴霧による湿

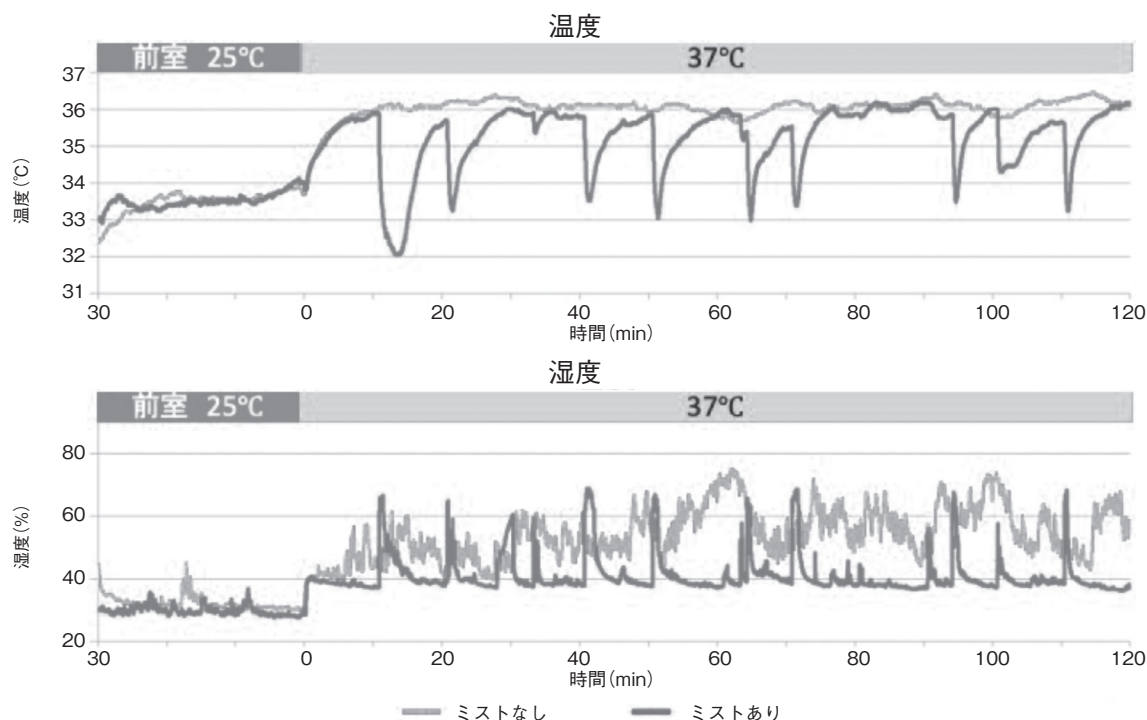


図5 典型的な個人のデータ比較(上段:前腕部皮膚温、下段:前腕部湿度)

前室も温熱実験室も相対湿度を30%としているが、0分目で 25°C の部屋から 37°C の部屋へ移動しているため、相対湿度が上昇した。赤線はNone条件であるため、変動しているのは発汗変動を反映している。青線はMist on条件で噴霧時に大きな湿度変化と温度低下がみられる。

度上昇であることがわかる。胸部ではTシャツの影響で湿度の標準偏差に有意差は認められなかったが、コンプレッションウェアに噴霧した前腕部では湿度の標準偏差が明らかに大きくなった。

表1, 2は10箇所測定した皮膚温の20分間の平均値とその間の標準偏差を示した。いずれの部位も暑熱暴露中増加した。胸部と前腕部の平均値はMist on条件の方がNone条件よりも低値で維持された($P=0.022$ and 0.019 , respectively)。温度のばらつきを示す標準偏差では、前額($P=0.024$)、前腕($P=0.002$)、手背($P=0.067$)、大腿($P=0.042$)に有意差が認められた。

表3, 4は15分ごとにVASで質問した全身、頭部、頸部、胸・腹部、背部、上肢、および下肢の温冷感と温熱的快・不快感を示した。温冷感は両条件とも時間経過で上昇したが、条件間に差は認

められなかった。しかし、ミスト噴霧によって下腿を除いて不快感は軽減した(快を正、不快を負として教示したため)。また、乾湿感と疲労感もミスト噴霧によって軽減した(乾湿感： $P=0.038$ 、疲労感： $P=0.007$)。

1. 2. 5. 考 察

実験2では2つの目的から夏季のスポーツ観戦を想定し、暑熱環境下(37℃ 30%Rh)で2時間のスポーツのテレビ観戦を実施した。1つ目は発汗能力の低い人のための蒸散性熱放散補償法の可能性で、2つ目は行動変容の可能性である。現実的な暑熱負荷としたため、平均皮膚温は上昇したものの、深部体温の指標として直腸温を用いたが統計的に有効な変化が得られなかった。しかし、心拍変動の結果から暑熱負荷によってNone条件は交感神経活動がより賦活していたことから身体的

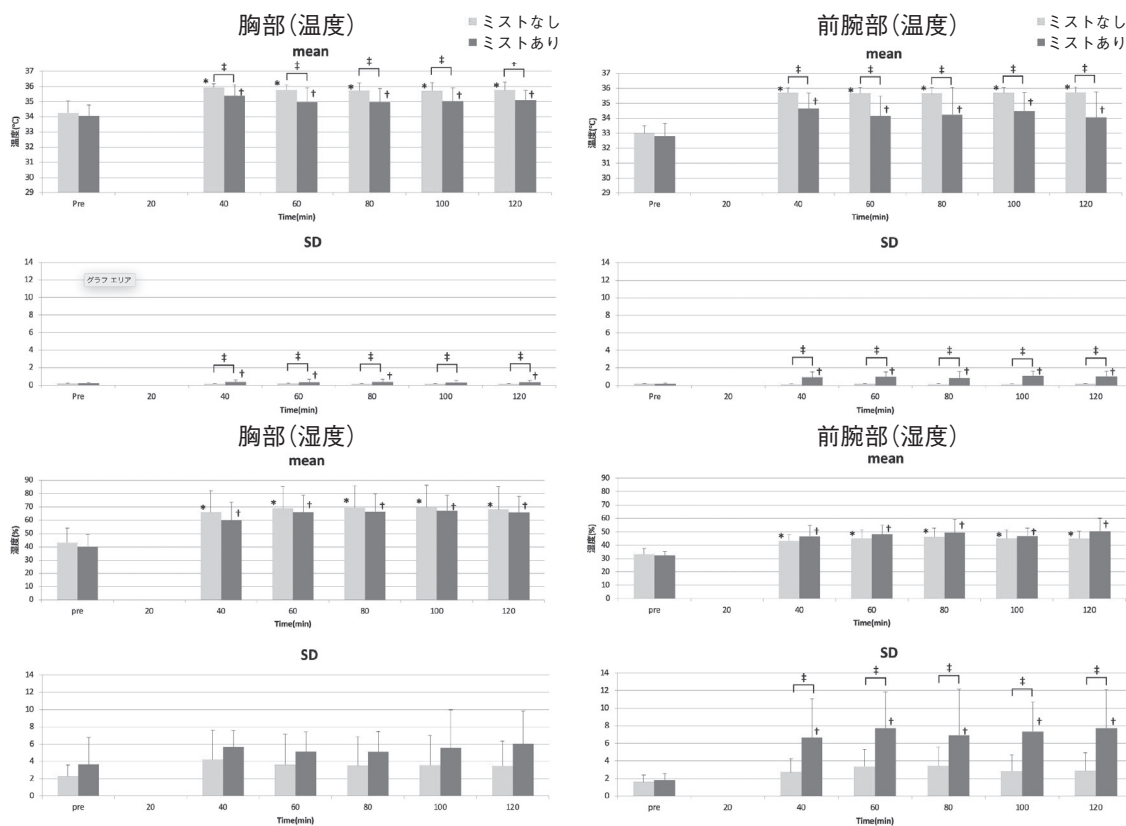


図6 胸部(左)および前腕部(右)の皮膚温(上段)および湿度(下段)の平均値と標準偏差

表 1 各部位の皮膚温の20分間平均の変化

		25℃ 30%Rh			37℃ 30%Rh			P-value			
		Mist	Pre	40min	60min	80min	100min	120min	Condition	Time	Interaction
皮膚温(℃)	前額	none	35.1±0.6	36.5±0.3	36.4±0.4	36.3±0.4	36.3±0.5	36.4±0.5	0.561	<0.001	0.620
	(n=12)	on	34.9±0.8	36.5±0.3	36.5±0.3	36.4±0.3	36.4±0.3	36.4±0.3			
	胸部	none	34.4±0.8	35.9±0.4	35.8±0.6	35.7±0.6	35.6±0.7	35.7±0.9	0.022	<0.001	0.095
	(n=12)	on	34.4±0.8	35.3±0.8	35.1±0.9	35.1±1.0	35.3±1.0	35.1±0.8			
	腹部	none	33.8±1.6	35.6±0.4	35.6±0.4	35.6±0.5	35.6±0.6	35.6±0.6	0.532	<0.001	0.915
	(n=12)	on	34.1±1.2	35.6±0.5	35.6±0.4	35.8±0.5	35.8±0.4	35.7±0.5			
	背部	none	34.5±0.7	35.5±0.7	35.3±0.9	35.3±1.0	35.3±1.1	35.3±1.1	0.950	<0.001	0.056
	(n=12)	on	34.1±1.1	35.6±0.6	35.4±0.7	35.4±0.7	35.4±0.6	35.4±0.7			
	腰部	none	33.2±0.7	35.1±0.5	35.0±0.5	35.1±0.6	35.1±0.7	35.2±0.6	0.427	<0.001	0.804
	(n=10)	on	33.0±1.1	35.1±0.4	34.8±0.8	35.0±0.7	35.2±0.5	35.3±0.4			
	前腕	none	33.5±0.4	35.8±0.3	35.7±0.3	35.7±0.4	35.7±0.3	35.8±0.3	0.019	<0.001	0.110
	(n=11)	on	33.4±0.7	35.0±1.0	34.3±1.3	34.5±1.3	34.5±1.5	34.5±1.6			
	手背	none	33.4±1.2	35.7±0.5	35.6±0.4	35.5±0.4	35.6±0.4	35.5±0.5	0.840	<0.001	0.984
	(n=12)	on	33.3±1.0	35.8±0.3	35.6±0.4	35.5±0.5	35.6±0.4	35.6±0.4			
	大腿	none	32.9±0.5	35.2±0.4	35.3±0.4	35.3±0.4	35.3±0.4	35.4±0.4	0.399	<0.001	0.575
	(n=12)	on	33.2±1.0	35.3±0.7	35.4±0.5	35.3±0.8	35.4±0.5	35.4±0.7			
	下腿	none	31.0±0.8	35.2±0.4	35.4±0.4	35.4±0.3	35.5±0.3	35.6±0.3	0.862	<0.001	0.108
	(n=12)	on	31.3±0.5	35.0±0.4	35.1±0.7	35.4±0.4	35.5±0.4	35.5±0.7			
足背	none	31.2±1.7	35.1±1.2	35.4±1.1	35.4±0.9	35.6±0.8	35.6±0.8	0.459	<0.001	0.057	
(n=12)	on	30.7±1.4	35.5±0.8	35.7±0.5	35.7±0.5	35.9±0.6	35.5±1.0				

表 2 各部位の皮膚温の20分間の標準偏差の変化

		25℃ 30%Rh			37℃ 30%Rh			P-value			
		Mist	Pre	40min	60min	80min	100min	120min	Condition	Time	Interaction
皮膚温(℃)	前額	none	0.097±0.043	0.107±0.066	0.107±0.051	0.091±0.037	0.083±0.044	0.089±0.039	0.024	0.482	0.923
	(n=12)	on	0.129±0.085	0.128±0.120	0.123±0.042	0.094±0.028	0.110±0.063	0.105±0.066			
	胸部	none	0.197±0.128	0.155±0.057	0.204±0.136	0.195±0.162	0.201±0.200	0.201±0.168	0.164	0.066	0.019
	(n=12)	on	0.127±0.050	0.366±0.275	0.306±0.224	0.342±0.250	0.243±0.118	0.357±0.272			
	腹部	none	0.210±0.095	0.113±0.044	0.196±0.235	0.188±0.132	0.138±0.082	0.137±0.098	0.741	0.195	0.172
	(n=12)	on	0.156±0.046	0.163±0.108	0.193±0.096	0.142±0.116	0.129±0.106	0.136±0.100			
	背部	none	0.125±0.064	0.166±0.087	0.142±0.073	0.116±0.059	0.147±0.096	0.139±0.066	0.306	0.545	0.761
	(n=12)	on	0.166±0.091	0.195±0.112	0.157±0.073	0.164±0.081	0.146±0.072	0.191±0.164			
	腰部	none	0.165±0.084	0.106±0.043	0.133±0.088	0.112±0.064	0.093±0.050	0.094±0.035	0.051	0.555	0.776
	(n=10)	on	0.162±0.103	0.192±0.123	0.211±0.163	0.176±0.154	0.177±0.079	0.151±0.073			
	前腕	none	0.140±0.075	0.150±0.071	0.159±0.050	0.132±0.053	0.176±0.084	0.176±0.112	0.002	0.001	0.005
	(n=11)	on	0.139±0.078	0.662±0.535	0.840±0.600	0.720±0.598	0.815±0.524	0.726±0.508			
	手背	none	0.353±0.150	0.199±0.073	0.223±0.111	0.204±0.087	0.200±0.075	0.213±0.084	0.067	0.008	0.252
	(n=12)	on	0.341±0.160	0.224±0.073	0.284±0.131	0.284±0.153	0.352±0.275	0.273±0.112			
	大腿	none	0.164±0.110	0.157±0.164	0.117±0.092	0.170±0.266	0.104±0.061	0.131±0.081	0.042	0.661	0.725
	(n=12)	on	0.250±0.194	0.267±0.239	0.262±0.231	0.383±0.343	0.329±0.355	0.339±0.466			
	下腿	none	0.213±0.103	0.121±0.051	0.111±0.055	0.093±0.045	0.092±0.033	0.098±0.051	0.059	0.070	0.494
	(n=12)	on	0.268±0.140	0.238±0.273	0.263±0.292	0.155±0.116	0.206±0.160	0.276±0.328			
足背	none	0.271±0.076	0.210±0.118	0.113±0.057	0.112±0.066	0.116±0.049	0.091±0.051	0.062	0.130	0.053	
(n=12)	on	0.225±0.098	0.269±0.173	0.187±0.091	0.232±0.286	0.243±0.233	0.349±0.373				

な負担度は上昇する程度の暑熱負荷であり、ミストによって軽減された可能性が示唆された。温熱生理学的には、None条件よりも低く保たれていたため、効果があったように解釈もできるが、0.1℃程度の差では評価は難しい。また、平均皮膚温は、暑熱負荷によって上昇したものの条件間ではほとんど

ど差はなく、統計的有意差は認められなかった。しかし、部位別に評価すると、胸部と前腕部で皮膚温はMist on条件で低く維持された。また、変動の評価に用いた20分間の標準偏差の平均値ではMist on条件でMist none条件に比べ有意に値が上昇し、全体的にミストの使用によって皮膚温にば

表 3 温冷感の変化

温冷感	25℃ 30%Rh										37℃ 30%Rh										P-value	
	全身 (n=12)	頭部 (n=12)	頸部 (n=12)	胸部、 腹部 (n=12)	背部 (n=12)	上肢 (n=12)	下肢 (n=12)	Mist on	Pre	0min	15min	30min	45min	60min	75min	90min	105min	120min	Condition Time	Interaction		
none	on	none	on	none	on	none	on	0.3±8.2	28.2±26.2	29.2±23.0	43.7±27.5	48.9±26.3	46.5±26.3	48.5±24.2	46.5±21.4	45.6±27.9	50.8±29.1	0.287	<0.001	0.169		
none	on	none	on	none	on	none	on	-2.8±8.4	26.8±29.4	34.6±28.8	40.0±26.8	47.3±30.6	48.3±28.1	51.2±26.8	47.0±22.5	50.3±20.8	57.8±20.1	0.870	<0.001	0.015		
none	on	none	on	none	on	none	on	-0.3±4.8	21.6±25.1	25.6±24.8	29.3±27.1	28.1±20.2	31.7±21.5	30.7±17.4	36.3±23.7	32.4±20.2	37.6±18.8	0.123	<0.001	0.450		
none	on	none	on	none	on	none	on	-1.6±8.4	26.3±31.2	30.3±30.7	36.3±30.2	50.5±31.3	45.0±33.5	47.3±29.4	43.5±23.0	45.8±22.0	48.7±22.6	0.101	<0.001	0.092		
none	on	none	on	none	on	none	on	0.0±6.7	19.3±24.4	21.0±26.9	29.3±29.0	30.0±26.7	30.3±25.3	27.6±22.4	36.1±25.0	31.7±22.1	29.8±26.0	0.240	<0.001	0.092		
none	on	none	on	none	on	none	on	-1.2±7.7	18.0±27.2	30.6±27.2	39.1±29.0	44.8±27.2	44.4±26.9	42.5±30.6	43.1±25.6	43.8±20.8	50.1±19.9	0.240	<0.001	0.092		
none	on	none	on	none	on	none	on	2.0±10.5	21.4±19.9	23.2±24.6	30.9±27.6	28.3±19.7	30.7±21.9	30.1±22.5	36.1±27.5	33.9±21.0	38.4±21.9	0.133	<0.001	0.095		
none	on	none	on	none	on	none	on	5.5±19.0	17.5±28.2	32.4±28.5	40.7±30.5	50.8±26.7	51.4±28.7	49.9±24.2	57.4±25.1	51.4±26.1	55.9±28.7	0.101	<0.001	0.048		
none	on	none	on	none	on	none	on	0.7±7.5	22.6±22.9	25.1±24.3	33.0±29.4	32.8±24.1	33.3±23.4	36.0±26.3	35.6±22.5	36.9±22.8	39.4±20.6	0.097	<0.001	0.110		
none	on	none	on	none	on	none	on	3.0±9.8	22.8±22.0	39.3±30.0	37.4±21.0	46.6±21.9	55.3±26.6	48.1±22.8	55.3±21.1	51.7±23.5	58.9±23.8	0.097	<0.001	0.110		
none	on	none	on	none	on	none	on	3.9±13.1	22.2±27.4	18.3±23.8	35.4±27.0	25.9±24.1	32.5±24.6	26.9±25.8	34.3±18.0	26.3±30.9	36.5±25.0	0.097	<0.001	0.110		
none	on	none	on	none	on	none	on	-11.2±13.2	5.8±22.7	13.6±24.9	21.8±26.3	25.2±24.4	33.4±24.9	32.8±26.5	39.4±22.9	37.0±27.9	43.0±29.5	0.097	<0.001	0.110		
none	on	none	on	none	on	none	on	-15.1±14.9	8.7±22.7	7.9±17.0	14.8±17.7	12.3±14.8	17.8±15.5	17.2±10.0	21.8±14.8	18.0±12.7	21.1±14.8	0.097	<0.001	0.110		

表 4 不快感の変化

不快-快感	25℃ 30%Rh												37℃ 30%Rh						P-value		
	全身 (n=12)	頭部 (n=12)	頸部 (n=12)	胸部、腹部 (n=12)	背部 (n=12)	上肢 (n=12)	下肢 (n=12)	Mist on	Pre	0min	15min	30min	45min	60min	75min	90min	105min	120min	Condition Time	Interaction	
不快	none	on	none	none	none	none	none	on	21.6±36.6	-17.0±23.5	-26.7±28.3	-36.6±28.6	-44.5±28.4	-42.6±33.8	-45.9±27.2	-47.3±25.1	-49.2±27.4	-51.3±29.8	0.013	<0.001	0.101
不快	none	on	none	none	none	none	none	on	24.5±37.7	-9.6±15.0	-4.3±10.6	-14.8±15.9	-16.8±12.9	-21.1±21.5	-21.3±10.9	-23.8±15.6	-23.1±20.4	-27.4±21.4	0.021	<0.001	0.037
不快	none	on	none	none	none	none	none	on	27.4±33.7	-15.0±24.4	-24.8±30.2	-32.4±32.0	-42.4±31.8	-45.7±31.8	-43.1±28.5	-45.2±26.7	-44.6±24.9	-53.1±25.4	0.004	<0.001	0.010
不快	none	on	none	none	none	none	none	on	21.7±32.1	-9.3±18.7	-11.4±16.6	-14.1±19.6	-18.9±20.8	-19.4±23.0	-19.6±20.2	-21.4±21.5	-17.8±25.7	-18.4±23.9	0.004	<0.001	0.010
不快	none	on	none	none	none	none	none	on	25.1±34.1	-17.7±23.1	-21.3±27.3	-39.4±34.9	-47.8±33.4	-50.8±34.0	-46.3±30.3	-50.3±29.3	-44.1±25.5	-51.5±33.1	0.004	<0.001	0.010
不快	none	on	none	none	none	none	none	on	22.5±31.5	-4.2±14.6	-7.5±11.5	-12.1±15.5	-11.0±16.7	-15.2±24.0	-11.9±20.9	-15.5±20.8	-13.3±23.3	-13.6±27.7	0.008	<0.001	0.030
不快	none	on	none	none	none	none	none	on	26.9±33.2	-14.2±23.2	-21.4±25.1	-34.9±33.3	-43.0±31.6	-40.8±32.6	-41.5±29.0	-45.5±26.4	-45.9±26.9	-37.8±43.1	0.008	<0.001	0.030
不快	none	on	none	none	none	none	none	on	18.0±30.9	-1.9±10.4	-7.5±13.5	-9.4±18.4	-10.1±13.6	-11.8±18.9	-14.3±19.0	-13.5±19.8	-12.6±20.5	-17.1±24.8	0.007	<0.001	0.046
不快	none	on	none	none	none	none	none	on	18.6±30.0	-15.0±23.3	-26.1±25.1	-37.0±29.9	-50.8±30.5	-40.3±36.4	-49.5±29.3	-55.7±28.1	-53.6±30.7	-57.3±32.0	0.008	<0.001	0.046
不快	none	on	none	none	none	none	none	on	14.6±33.6	-14.5±23.0	-23.8±25.1	-29.4±25.3	-43.6±23.8	-43.4±25.9	-46.8±26.6	-49.6±27.8	-50.5±29.5	-56.9±31.4	0.008	<0.001	0.001
不快	none	on	none	none	none	none	none	on	15.6±33.2	-8.2±9.6	-2.8±23.7	-15.9±17.9	-12.1±22.9	-16.6±19.7	-11.8±18.5	-18.3±16.6	-16.6±22.4	-21.0±23.4	0.009	<0.001	0.041
不快	none	on	none	none	none	none	none	on	14.8±24.2	0.4±22.6	-4.9±28.6	-18.9±23.9	-24.3±27.2	-27.8±27.0	-32.5±25.8	-35.5±27.5	-34.3±26.9	-43.5±27.4	0.209	<0.001	0.041
不快	none	on	none	none	none	none	none	on	13.3±30.3	-2.8±20.0	-4.2±26.4	-15.6±24.3	-13.7±27.2	-18.6±20.8	-13.5±15.3	-15.3±15.8	-13.3±16.0	-18.2±14.1	0.209	<0.001	0.041

らつきが生じたことが示された。すなわち、皮膚温が低下するほどの噴霧はしていないものの、温熱的快を得るために噴霧していたことが示唆された。行動指標評価が不十分であったために、行動指標の数値を達成することはできなかったが、皮膚温の変動からMist on条件でミストスプレーの使用頻度が増加したことが確認された。

予備実験でad libで実施したところ、意図を知らない被験者はほとんど使用しなかったので、10分毎に強制的に利用するように指示した。観戦する際に周囲と違和感のない服装を前提としたため、コンプレッションウェアの上から Cotton のTシャツを着用した。Tシャツの中に直接噴霧する被験者もいればTシャツの上から噴霧する被験者もいて、Tシャツを介した部位の湿度（胸部）は個人差が見られた。実験者の意図はTシャツの上から噴霧することで Cotton の保水能力で低い皮膚温を維持できると予測していたが、前腕部のコンプレッションウェアに直接噴霧した方で温熱的快適性が高かったことから、3分の1の被験者が途中からTシャツ内に噴霧するようになった。主観的要素が影響しやすい実験スタイルであったために、従来の生理学的な評価では数値として群差を導くのは難しい。相対的な発汗活動を評価するセンサーとして温湿度計を胸部と前腕部に貼付した。図5の典型的な個人データが示すように、None条件の湿度変化は発汗を反映している。Mist on条件ではミスト噴霧による湿度上昇であることがわかる。大きな湿度変化間にみられる小さな湿度変化は発汗を反映しているものと思われる。全体の傾向としては、ミストの使用によって皮膚温が低下し、発汗があったグループではミストの使用によって発汗が抑制された。胸部においては、コンプレッションウェアの上にTシャツを着用していたことで、前腕部に比べミストが蒸発しにくくなり、発汗も見られるが湿度が低下した場合および湿度が低下しないパターンが見られた

が、いずれも温度は低く保たれた。前腕部においては、発汗をしていたグループでは発汗が抑制され、発汗していなかったグループではミストが発汗の代わりとして機能し、いずれも温度が低く保たれた。以上のことから、ミストの使用によって皮膚温を低く保つことができ、発汗がある場合はミストが発汗を抑制する機能を持ち、発汗がない場合はミストが発汗の代わりとして機能する可能性が示唆された。熱放散において発汗が大きな役割を担っているが、汗をかきたくない人や汗をかきにくい体質の人など、発汗による熱放散効果には個人差があり、また発汗による熱放散は全身一様でもない。さらに、例えば、女性は男性に比べて汗をかきにくいと言われている。これは、女性は男性に比べ、汗腺のサイズが小さく、同一体温における発汗量が少なくなるためである⁷⁾。また、性周期に関わらず、前額部・胸部・背部・前腕部で女性は男性に比べて発汗量が少なく、大腿部で皮膚血流量が著しく多いことが報告されている⁷⁾。本実験では発汗能力が低い被験者をリクルートしたいために、普段あまり運動をしない女性を被験者とした。実際にはほとんど発汗しなかった被験者は1名であった。しかし、ミストスプレーを他の被験者と比較して多用していたことから好んで使用していたことが示された。1名のデータから蒸散性熱放散の補償方法として有効であるとは言い難いが、後半に定時以外にも噴霧していたことから効果があったと思われる。

主観的評価と個々のデータからでは推測の域を脱しない。そこで、本研究では20分単位で区切り、温度もしくは湿度の変動を評価することを試みた。胸部ではTシャツの影響で湿度の標準偏差に有意差は認められなかったが、コンプレッションウェアに噴霧した前腕部では湿度の標準偏差が明らかに大きくなった。皮膚温の変動はミスト噴霧の影響を受けていると考えられる。表2より、前額、前腕、手背、大腿に噴霧していたことがわ

かる。統計的有意差は認められなかったが、腰部 ($P=0.051$)、下腿部 ($P=0.059$)、足背部 ($P=0.062$) には有意傾向が認められた。温湿度センサーを貼付した胸部では有意差が認められたにもかかわらず、サーミスタで測定した胸部で有意差が認められなかった理由は不明であるが、腹部と背部に有意差がなかったことは服装の影響か、噴霧しにくかったのかは不明である。しかし、暑さを回避するために四肢などに噴霧していたことが皮膚温の変動からも示された。

1. 2. 6 まとめ

本実験では、夏季における屋外スポーツ観戦時の耐暑策として、発汗の代替策を検討するために、室温 37°C 相対湿度30%の実験室にてコンプレッションウェアおよびミストスプレーを使用して実験を行った。暑熱負荷によって平均皮膚温は上昇したが、深部体温の指標として用いた直腸温は変化せず、本実験では深部体温を変化させるほどの暑熱負荷ではなかった。しかし、心拍変動では、暑熱負荷によって交感神経活動の指標であるLF/HFが上昇したが、ミストの使用によってLF/HFの上昇が抑制される傾向にあった。ミストの使用によって温度および湿度ともに低下し、発汗が抑制され、発汗の代わりとして機能することが示唆された。主観申告では、温冷感および快適感ともにミストの使用によって全体として改善し、乾湿感および疲労感においてもミストの使用によって軽減した。

1. 3 実験3 大学生アスリート及び一般学生へのアンケート調査

本調査には、健康な若年男女性782名（男性444名、女性338名）に配布した。このうちクラブ活動をしていない一般学生は377名（男性146名、女性231名）であった。

1. 3. 1 調査方法

アンケート用紙を、大学講義、研究室関係者、

知人を通じて配布し、後日手渡しや郵送またはeメールで回収する自記留め置き方法で行った。回収部数は657部で、回収率は、80.4%であった。有効回答数は618部、有効回答率は94.1%であった。運動習慣による分類方法は集計時、対象者を運動頻度（2019年夏期）の回答によって3群に分類した。週5日以上のをⅠ群、週1～4日の者をⅡ群、まったく運動習慣がなかった者をⅢ群とした。

回収後、集計と解析を行った。解析方法はMicrosoft Excel のシート入力したものをIBM SPSS ソフトウェアを用いて、クロス集計を行い、カイ二乗検定の有意水準を有意差の判断基準とした。

1. 3. 2 結果

1. 3. 2. 1 属性

・年齢 18歳から20歳未満が221人（35.9%）、20歳から25歳未満が390人（63.3%）、25歳以上が4人（0.6%）であった。1人（0.2%）は無回答であった。

・性別 男性が382人（61.8%）、女性が236人（38.2%）であった。

1. 3. 2. 2 普段の熱中症対策

水分補給について、3群とも80%以上が熱中症対策として水分補給を行っていた。全回答者の88.1%が実施しており、普段の熱中症対策として最も実施された対策は水分補給であった。「暑い日の外出を避ける」という回答に有意差が見られ、運動習慣が少ないほど高い傾向があった。

冷房器具の使用について、使用開始時期と設定温度において有意差が見られた。図7に示すように運動習慣が多いほど使用開始時期が早く、図8に示すように設定温度は低かった。冷房器具の使用で気になることとして、運動習慣が多いほど身体やパフォーマンスに関することを気にしており、運動習慣が少ないほど電気料金や環境への影響を気にしていた。

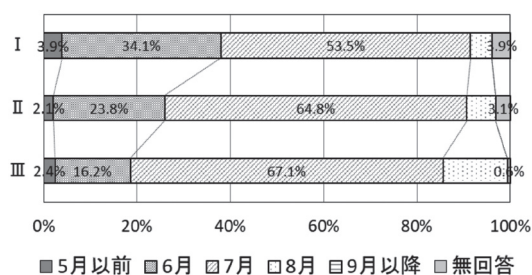


図7 冷房器具の使用開始時期

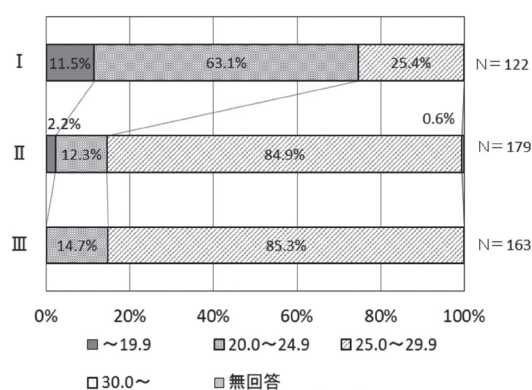


図8 エアコンの設定温度(℃)

1. 3. 2. 3 運動時の熱中症対策

運動時の熱中症対策の実施について有意差が見られ、Ⅰ群Ⅱ群ともに70%前後が実施していた。熱中症対策の方法としては、両群ともに「水分補給」の回答率が最も高かった。

水分補給について有意差が見られた。運動習慣が多いほど喉の渇きに関わらず積極的に行っていた傾向があった。また、運動習慣が多いほど汗をかいたときや運動時に水分補給をよく行い、一日当たりの水分補給量が多かった。量と回数ともにⅠ群がⅡ群よりも多い傾向があった。普段のよく飲む飲料より、運動時に飲む飲料では「スポーツドリンク」を選択する傾向が見られた。

運動時の冷房器具の使用について、Ⅰ群の25.3%、Ⅱ群の20.2%が使用していたことが分かった。使用場所は、トレーニングルーム、体育館武道場などの屋内での使用が多かった。冷房器具の種類としては、エアコンと扇風機が大多数を占め

ていた。使用開始時期と設定温度に関して、有意差が見られた。運動習慣が多いほど使用開始時期が早くエアコンの設定温度が低く、普段の冷房器具の使用と同様の傾向が見られた。使用時の快適感と温冷感について、運動習慣が多いほど快適感が高く、温冷感は「やや涼しい」、「涼しい」という回答率が高かった。冷房器具の使用で気になることは、運動習慣が多いほど身体やパフォーマンスに関することを気にしており有意差が見られ、普段の冷房器具の使用と同様の傾向が見られた。

運動時の服装について、上下ともに半袖・半丈の着用が多かった。

1. 3. 2. 4 熱中症の既往歴

運動習慣が少ないほど有意に多かった。全ての群において、発症時期は「7月」「8月」、場所は「屋内運動施設」、時間帯は「日中」、活動状況は「運動中」、天気は「晴れ」、気温と湿度は「高かった」の回答率が最も高かった。

1. 3. 2. 5 熱中症に関する知識

熱中症の原因として考えられるものについて、群間の回答率に有意差が見られたものは「気温が高い」、「暑い環境に身体が適応できていない」、「水分補給ができていない」、「激しい運動の後」であった。「気温が高い」ではⅢ群で有意に回答率が低かった。「暑い環境に身体が適応できていない」では運動習慣が少ないほど回答率が高かった。「水分補給が適応できていない」では運動習慣が少ないほど回答率が高かった。「激しい運動の後」では運動習慣が多いほど回答率が高かった。熱中症が起きやすいと思う時期について群間の回答率に有意差が見られたものは「8月上旬」、「8月下旬」であった。熱中症対策や発症時に冷やすとよいと思う身体の部位について、群間の回答率に有意差が見られたものは「首」、「腹」、「足の裏」、「わからない」であった。「首」では運動習慣が少ないほど回答率が高かった。「腹」では運動習慣が多いほど回答率が高かった。「足の裏」ではⅡ群で

有意に回答率が低かった。この結果では運動習慣の少ないほど正しい処理方法を知っていることが分かった。

1. 3. 2. 6 熱中症対策の実践意欲

群間の回答率に有意差が見られたものは「外出時に日傘を使う」、「外出時に帽子を被る」、「三食必ず食べる」、「暑くなる前に暑さに慣れておく」、「窓の外に緑のカーテン（植物）を育てる」、「就寝時30℃以上の時には一晩中エアコンを点ける」、「就寝時30℃以上の時にはエアコンをタイマーで点ける」、「就寝時30℃以上の時には一晩中扇風機を点ける」、「部屋の温度をこまめにチェックする」、「部屋の湿度をチェックする」、「体調不良時にはすぐに人に伝える」、「汗を多くかいたときにはスポーツ飲料水を飲む」、「汗を多くかいたときには甘くない塩分を含んだ飲料水を飲む」であった。

1. 3. 3 まとめ

熱中症対策の方法としては、運動習慣に関らず水分補給の実施が最も多かった。また、運動習慣が多いほど、室内の温湿度や熱中症に関する情報の確認、休養を行った傾向が見られた。加えて、夏が来る前に暑さへの順応を目的として運動を行っていたことが明らかとなった。一方、運動習慣が少ないほど暑い日の外出を避け、冷房器具を使用していたという傾向が見られた。熱中症対策の開始時期としては、運動習慣が多いほど早い傾向が見られた。

運動時の熱中症対策としては、水分補給の実施が最も多く、運動習慣が多いほど口渇感に関わらず発汗時や運動時によく行い、一日当たりの水分補給量と給水回数が多い傾向が見られた。また、運動習慣が多いほど冷房器具の使用開始時期が早く、エアコンの設定温度は低い傾向が見られた。冷房器具使用に対し運動習慣が多いほど快適さと涼しさを感じている者が多いことが分かった。熱中症の既往歴から、運動中の発生率が顕著に高かったことから、大学生において熱中症発生リス

クの高い状況は運動中であることが示唆された。

熱中症発症時の対処方法については、運動習慣が多いほど正答率が低かった。この結果から、運動頻度の高い者ほど正しい対処方法を知らないと言える。したがって、熱中症が発生する場面が比較的多い者が、発症時に適切な対処を行うことができない危険が懸念される。

以上から、運動習慣が多いほど体温上昇や水分喪失に応じた対策が多く、運動習慣が少ないほど高温環境や運動など体温上昇の原因を避ける対策を行う傾向が有ることが明らかとなった。また、大学生の熱中症発生は運動中に多いが、運動頻度の高い者ほど熱中症発症時の対処方法の知識に乏しいことが分かった。学校教育への広報は多くの学会や関連機関が発信しているが、生徒や学生にまで浸透していない可能性が示唆された。このことから、熱中症発生及び重篤化予防のため、大学生には熱中症に関して更に知る機会を設けるなど対策を講じる必要があると言える。

2. 総 括

暑熱環境下における過度な体温上昇に対する最も効果的な対策は全身冷却であるが、過度に体温が上昇しないように予測し、予防することが重要である。環境温度が皮膚温よりも高くなると、蒸散性熱放散である発汗が唯一の生理学的な熱放散となる。子供や高齢者、女性は発汗による熱放散能力が成人男性よりも低いと言われている。しかし、発汗機能が低くともそれを代償する行動性熱放散方法があれば対応できる。行動性体温調節には温度感覚や温熱的快適性とその予測のための判断基準となる。温度感覚や温熱的快適性は、環境条件や生体反応によって皮膚表面のコンディションが変化することでも変化することが考えられる。本研究では、紫外線の照射量に着目して紫外線による温度感覚を紫外線カット素材によって軽減できることを示した。さらに、機能性ウェアの

放湿性能に着目し、マイクロミストを噴霧することによる蒸散性熱放散効果を検討し、効果的であることを実験的に証明した。並行して大学生アスリート含む大学生へ熱中症に対する意識調査と対処方法についてアンケート調査し、意識の差を評価した。学校教育現場でも熱中症対策は重視されているにもかかわらず、運動頻度の高い者ほど熱中症発症時の対処方法の知識に乏しいことが分かった。熱中症発生及び重篤化予防のため、指導者だけでなく、実行者が学ぶ機会を設ける必要があるのかもしれない。

謝 辞

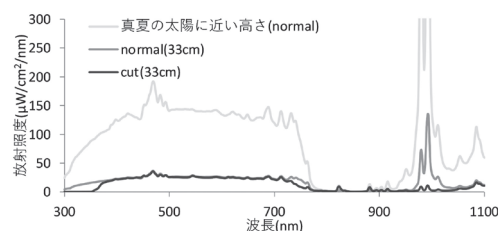
本研究に対して助成を賜りました公益財団法人石本記念デサントスポーツ科学振興財団に深く感謝致します。また、被験者としてご協力いただきました被験者の皆様、計測にご協力を頂きました渡部綾子さん、吉澤秋奈さん、西田由布子さん、森本恵奈さん、澤井紀恵さん、石倉慶子さん、牧井美波さん、阪本実美さんに深く感謝致します。

文 献

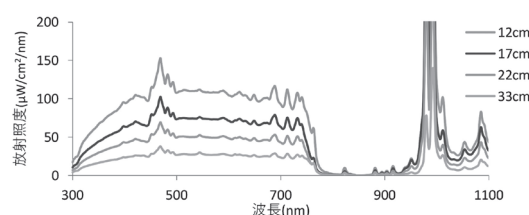
- 1) 富永真琴, 温度受容の分子機構—TRP チャンネル温度センサー—日薬理誌 124: 219-27 (2004)
- 2) Moore C., Cevikbas F., Pasolli H.A., Chen Y., Kong W., Kempkes C., Parekh P., Lee S.H., Kontchou N.A., Yehb I., Jokerst N.M., Fuchsc E., Steinhoff M., Liedtke W.B., UVB radiation generates sunburn pain and affects skin by activating epidermal TRPV4 ion channels and triggering endothelin-1 signaling., *PNAS*, 110 (34) : E3225-34 (2013)
- 3) 小山なつ 痛みと鎮痛の基礎知識—痛みの学説

と電気刺激治療の歴史— 理学療法学 40:726-31 (2013)

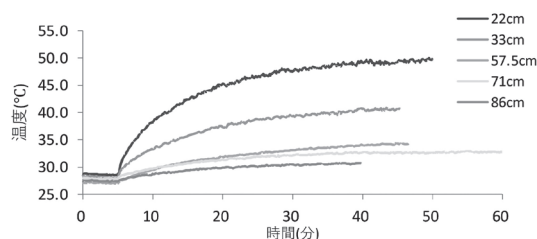
- 4) Dawes J.M., Calvo M., Perkins J.R., Paterson K.J., Kieseewetter H., Hobbs C., Kaan T.K., Oregon C., Bennett D.L., McMahon S.B., CXCL5 mediates UVB irradiation-induced pain., *Sci. Transl. Med.*, 3 (90) ra60 (2011)
- 5) 富永真琴:"TRPチャンネル (TRPV1, TRPA1) の慢性疼痛への関与と鎮痛" 臨床整形外科 48:1175-1178 (2013)
- 6) Weinkauff B., Main M., Schmelz M., Rukwied R., Modality-Specific Nociceptor Sensitization Following UV-B Irradiation of Human Skin., *J. Pain*, 14 (7) : 739-46 (2013)
- 7) Inoue Y., Tanaka Y., Omori K., Kuwahara T., Ogura Y., Ueda H.: Sex- and menstrual cycle-related differences in sweating and cutaneous blood flow in response to passive heat exposure., *Eur. J. Appl. Physiol.*, 94: 323-332 (2005)



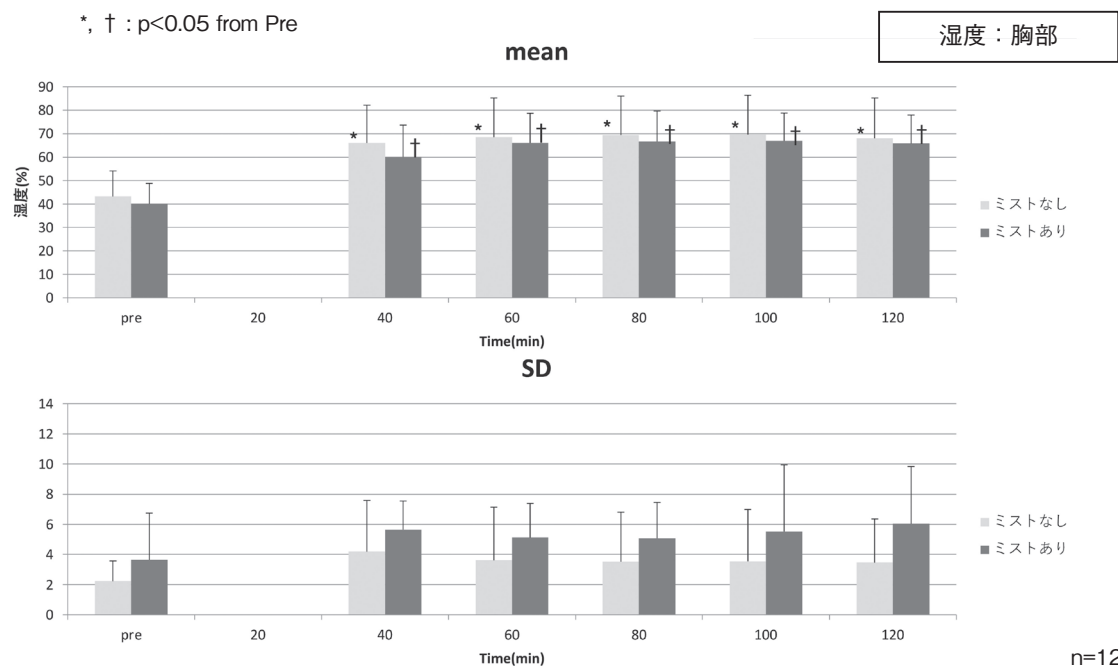
付録 真夏の太陽の放射照度に近い高さと比較



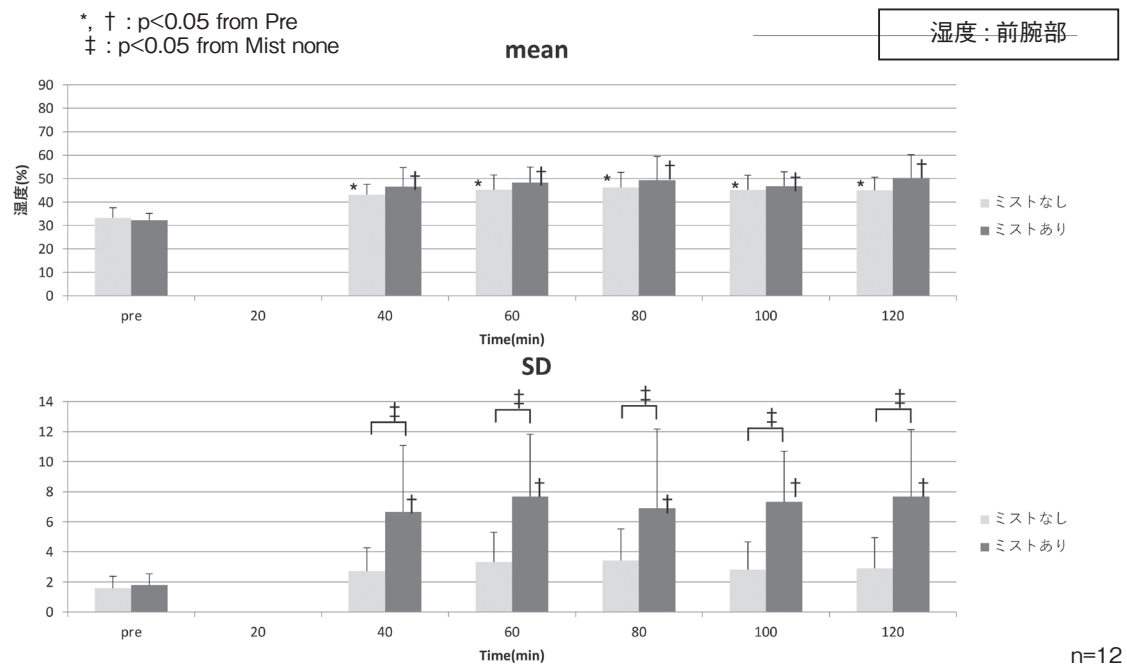
付録 高さの違いによる放射照度の変化



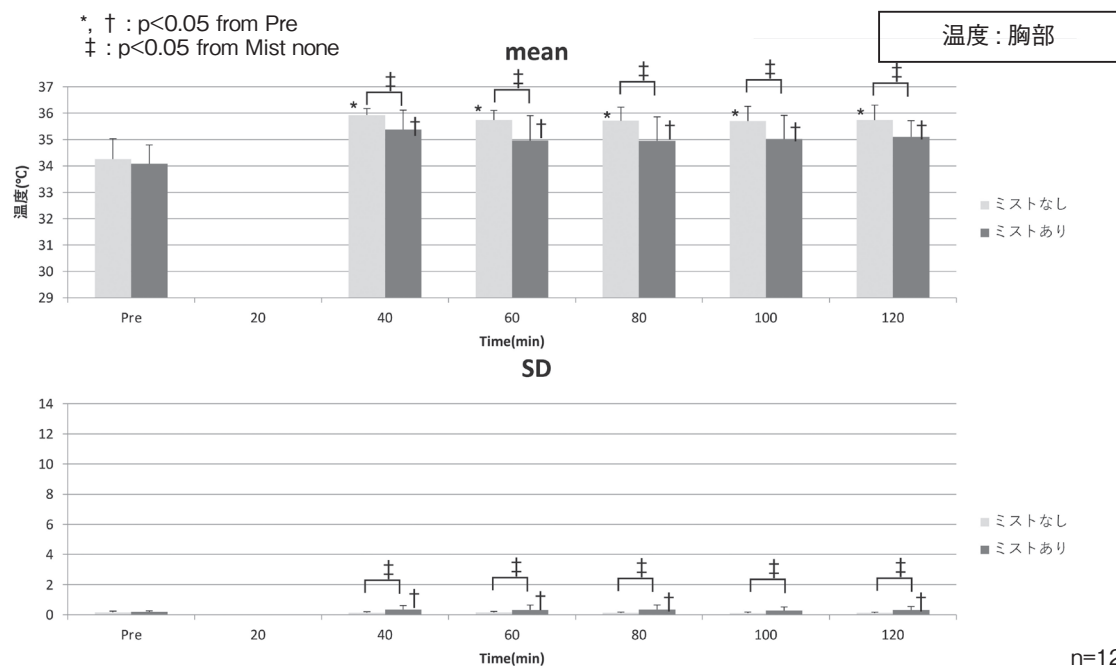
付録 33cmにした理由:30分間の照射に耐えられる温度上昇



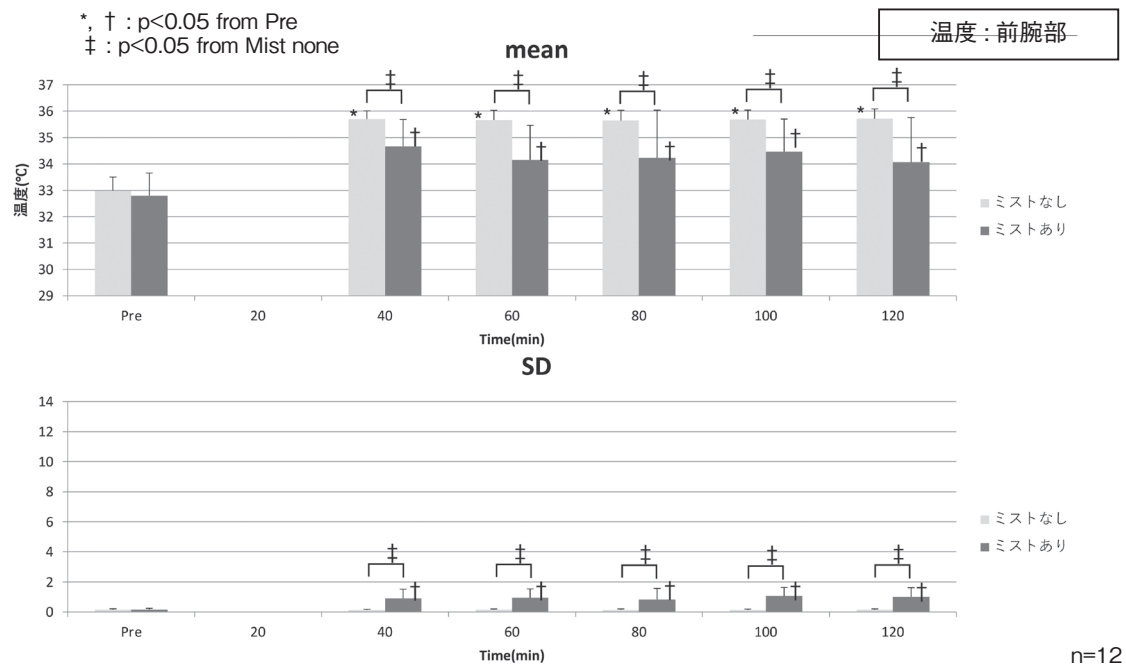
付録



付録



付録



付録