

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 5 月 21 日現在

機関番号：10101

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2010～2011

課題番号：22760434

研究課題名（和文）

熱中症リスク評価のための屋外長波放射と着衣のぬれを考慮した人体生理量予測モデル

研究課題名（英文） Human thermal model for evaluating a risk of heat disorders
considering outdoor long-wave radiation and wetness of clothing

研究代表者

栗原 浩平 (KUWABARA KOUHEI)

北海道大学・大学院工学研究院・助教

研究者番号：40374582

研究成果の概要（和文）：芝生や路上で気候要素の垂直分布（50,100,150cm）の測定を行なった。50cm の気温と環境グローブ温（長波放射のみ考慮）は 150cm よりも高いが、気温と環境グローブ温はほぼ等しいため、環境グローブ温の垂直分布は長波長放射よりも気温の影響が大きい。また吸汗速乾素材と綿素材の衣服が生理心理反応に及ぼす影響を評価するために被験者実験を行った。速乾素材の方が汗による着衣重量増加量は有意に少なかったが、平均皮膚温や不快感には有意な差が見られなかった。

研究成果の概要（英文）：Vertical distribution (50,100,150cm) of meteorological factors was measured on the ground or grass. Air and environmental globe temperatures in 50cm were higher than those in 150cm. Because air temperature was almost equal to environmental globe temperature, higher environmental globe temperature in 50cm was strongly affected by air temperature. In order to evaluate the effect of normal cotton and superior sweat-absorbent and quick-drying materials on human physiological and psychological responses, experiment using human subjects was carried out. A weight increase of the quick-drying clothing was significantly larger than that of cotton clothing. However, no difference in mean skin temperature or comfort sensation between these two clothing was observed.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010 年度	1,300,000	390,000	1,690,000
2011 年度	800,000	240,000	1,040,000
年度			
年度			
年度			
総計	2,100,000	630,000	2,730,000

研究分野：人間－熱環境工学

科研費の分科・細目：建築学・建築環境・設備

キーワード：熱中症，環境グローブ温，日射作用温度，平均皮膚温，発汗量，衣服素材，着衣のぬれ，暑熱環境

1. 研究開始当初の背景

(1) 申請者らは、熱中症予防のための温熱指標の開発を目的として、人体生理量予測モデルの研究に従事してきた。まず無効発汗に伴う発汗効率の減少や着衣のぬれによる有効発汗の増加、さらに日射作用温度を導入した

平均皮膚温予測式を提案し、屋内外の被験者実験により予測式の有効性を検証している。

(2) 次に心拍数と深部体温を“作業強度起因心拍数（深部体温）”と平均皮温上昇に伴う“暑さ起因心拍数（深部体温）”の和として

定義し、心肺能力のパラメータとして最大酸素摂取量 VO_{2max} を導入することで、初めて心肺能力の個人差と暑熱負担を考慮した心拍数（深部体温）予測式を提案しており、暑熱環境下における人体生理量の予測に対応しつつある。

(3) 屋外環境における人体生理量を予測するために導入された日射作用温度は、日射の影響を含まない「環境作用温度」と着衣・皮膚表面で吸収される日射量の温度換算値の和として定義される。気象データを利用して熱中症リスクを評価する際、気温、日射量等は入手可能であるが、長波長放射に関するデータは入手できないため、環境作用温度をあらかじめ気温、日射量等で関連付けておく必要がある。

2. 研究の目的

(1) 申請者らは、環境作用温度の近似量として環境グローブ温度（日射の影響を含まないグローブ温度）を定義し、2色の有色グローブ温度計を用いて屋根面や芝生等での上で実測を行い、環境グローブ温度を気温の関数として定義している。しかし熱中症の発生している場所は、農場やグラウンドなど多岐に渡っており、より多くの場所で長波長放射特性を把握しておく必要がある。

(2) また平均皮膚温予測式には、着衣のぬれに伴う有効発汗の増加を有効発汗増加率として組み込み、綿 T シャツと長ズボンを着用した暑熱非順化の被験者実験により得られた値を適用している。但し近年吸汗速乾性の着衣素材が開発されていることから、新しい素材にも対応可能な予測モデルを構築する必要がある。

(3) 本研究では、熱中症の発生が予想される様々な屋外環境において有色グローブ温度計による環境グローブ温度の実測を行い、日射作用温度算出のための基礎資料を得ること、ならびに着衣素材が有効発汗増加率に及ぼす影響を評価するための被験者実験を行い、より汎用性の高い人体生理量予測モデルを開発することを目的とする。

3. 研究の方法

(1) 2010年7~9月にかけて北海道大学構内で有色グローブ温度計による環境グローブ温度の実測を行った。測定項目は、黒色・白色グローブ温度、気温、相対湿度、風速、全天日射量、反射日射量である。測定場所は計11箇所であり、主な場所のアルベドとグローブから見た天空面の形態係数 $F_{gl,sky}$ は以下のとおりである：駐車場（アルベド0.11、形態係数0.27）；土グラウンド（0.12, 0.5）；芝生（0.2,

0.33）；中庭（0.12, 0.16）；工学部屋上（0.19, 0.5）など。熱中症の想定場所として路上、密集市街地の路上、運動上、農場／ゴルフ場、開放空間の5つに集約し、データの分析を行った。分析には、雨天日を除き気温が25℃以上のデータを使用した。

日射作用温度は式(1)で表され、長波長放射の影響を含む環境作用温度 $t_{ope}(=t_a + \Delta t_{rl})$ に着衣と皮膚面の正味日射吸収率を考慮した日射(短波長)による増分(= Δt_{rs})を加えた作用温度として定義している。本研究では、環境作用温度と環境グローブ温度は等しいものと仮定し、環境作用温度 t_{ope} と気温 t_a の差 $\Delta t_{rl}(=t_{gle} - t_a)$ をさまざまな環境における実測から決定する。日射吸収率 a_b , a_m の黒色グローブ温度と白色グローブ温度を高さ1.5mで測定し、二色のグローブ温度計表面の熱収支式より、日射の影響を除く環境グローブ温度を算出する(式(2))。

$$\begin{aligned} t_{opsun} &= t_{ope} + (\alpha_{clm} R_s + f_{cl} \alpha_{skm} / k_{rc}) I_{sun,cl} \\ &= t_a + \Delta t_{rl} + \Delta t_{rs} \end{aligned} \quad (1)$$

$$t_{gle} = \left(t_{gl,m} - \frac{\alpha_m}{\alpha_b} t_{gl,b} \right) / \left(1 - \frac{\alpha_m}{\alpha_b} \right) \approx t_{ope} \quad (2)$$

ここで、 t_{opsun} :日射作用温度[℃], t_{ope} :環境作用温度[℃], R_s :着衣表面熱伝達抵抗[m²K/W], α_{clm} :正味着衣表面日射吸収率[-], α_{skm} :正味皮膚表面日射吸収率[-], f_{cl} :着衣面積率[-], k_{rc} :放射と対流による顕熱流率[W/(m²K)], $I_{sun,cl}$:着衣時体表面への到達日射量[W/m²], t_a :気温[℃], Δt_{rl} :長波長放射による作用温度増分[℃], Δt_{rs} :日射による作用温度増分[℃], t_{gle} :環境グローブ温度[℃], $t_{gl,b}$:黒色グローブ温度 [℃], $t_{gl,m}$:白色グローブ温度[℃], a_b :黒グローブの日射吸収率 [-], a_m :白グローブの日射吸収率 [-].

(2) 屋外熱環境要素の垂直分布（50, 100, 150cm）、そして異なる地表面（屋上、路上、芝生）が人体への熱ストレスに及ぼす影響を評価する事を目的として、様々な環境で環境グローブ温度（環境作用温度として代用する）を実測し、日射作用温度、平均皮膚温を用いて評価した。環境グローブ温度の垂直分布の測定は、2011年7~8月に北海道大学工学部（6階建）屋上で行われた。グローブ温度計の設置高さは、50, 100, 150cmの3点とした。次に2011年8~9月に地表面形態の異なる北海道大学構内の3か所（芝生、路上、屋上）にて環境グローブ温度の同時実測を行なった。グローブ温度計他の設置高さは150cmである。測定項目は、気温、相対湿度、黒グローブ温度、白グローブ温度、全天日射量、反射日射量、風速である。垂直分布の日射量は50, 150cmのみ測定している。測定機器は、おん

どとり (RTR-53A, TR-52S, T&D), アルベドメーター(Pyranometer CM3, CMP3, Kipp&Zoen), 三杯式風速計 (014A, Met One Instruments, Inc) である。結果には, 気温 25°C 以上かつ 9 時から 15 時までの 1 時間平均値を用いる。

(3) 健康な成人男性 7 名を用いて自転車エルゴメーターによる 90 分間の被験者実験を行った (代謝量約 4.5met)。異なる素材から成る 4 種類の服装を使用した: (通常素材) CE1)100%綿 T シャツ, ズボン, (吸汗速乾素材) CE2)100%ポリエステル T シャツ, 60%綿/40%ポリエステルズボン CE3)ポリエステル 75%/綿 25% T シャツ, 60%綿/40%ポリエステルズボン CE4) 100%ポリエステル T シャツ, 60%綿/40%ポリエステルズボン。CE2~4 の T シャツ, ズボン, 靴下は吸汗速乾素材である。パンツと靴は共通素材のものを用いた。測定項目は皮膚温 8 部位, 着衣重量, 裸体体重, 温冷感, 総合的な不快感, 着衣ぬれ感等の主観申告値である。主観申告は数値に置き換え, 不快感では「非常に不快」を 1, 「非常に快適」を -1, 着衣ぬれ感では「非常に感じる」を 1, 「感じない」を 0 とした。30~90 分間の着衣重量増加量(g/h/m²)と発汗ぬれ率の関係や, 発汗量に対する着衣重量増加量と無効発汗率との関係を素材別に示し, 素材により着衣重量増加量が異なるか検証した。

4. 研究成果

(1) 2010 年の実測結果より, 気温 25°C 以上のデータを用いて, 長波長放射の影響 Δt_{rl} ($=t_{gle} - t_a$) を表 1 に示す。空間特性で見ると, $F_{gl,sky}$ の最も小さい路上 (密集市街地) を想定した中庭の値が 0.98°C と最も高く, 農場/ゴルフ場を想定した芝生は -0.22°C, 樹木下 -0.32°C と負の値が得られた。図 1 は, 異なる放射環境における人体熱ストレスを比較するために, 想定場所における日射作用温度 t_{opsun} を日射量に対して例示したもので, 同図に日射量と Δt_{rl} , Δt_{rs} の関係も示してある (図中の A: Albedo, F: $F_{gl,sky}$)。Albedo が等しい運動場と路上 (密集市街地) の比較では, $F_{gl,sky}$ の大きい運動場の方が Δt_{rs} が大きいため熱ストレスは大きい。一方, $F_{gl,sky}$ がほぼ同等の路上と農場/ゴルフ場の比較では, 農場/ゴルフ場の Δt_{rs} は路上より大きい Δt_{rl} は 0.8°C 程小さいため, 日射量が多い環境では両者の t_{opsun} はほぼ等しくなった。

表 1 想定場所の特徴と Δt_{rl} の実測結果

想定場所	Albedo	$F_{gl,sky}$	Δt_{rl}
路上	0.10	0.34	0.58
路上(密集市街地)	0.12	0.16	0.98
運動場	0.12	0.50	0.68
農場/ゴルフ場	0.17	0.33	-0.22
屋上開放空間	0.27	0.50	0.49
樹木下	-	-	-0.32

$F_{gl,sky}$: グローブから見た天空の形態係数

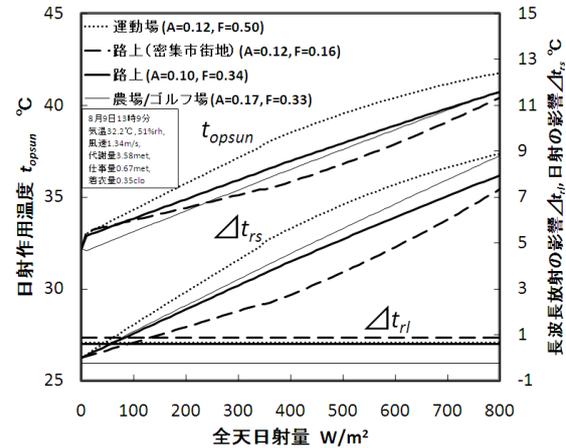


図 1 日射作用温度, Δt_{rl} , Δt_{rs} 計算例

(2) 2011 年の実測期間中の 9~15 時の 1 時間平均値かつ気温 25°C 以上の結果を用いて, 50cm 気温・環境グローブ温と 100, 150cm 気温・環境グローブ温の関係を図 2, 3 に示す。100, 150cm の気温, 環境グローブ温共に 50cm の値よりも低いことがわかる。図 4 に気温と環境グローブ温の関係を示す。9~15 時の間では, 気温と環境グローブ温はほぼ等しい値を示していることがわかる。このことから環境グローブ温度の垂直分布は, 長波長放射の影響よりも気温の影響を大きく受けていることが示唆される。

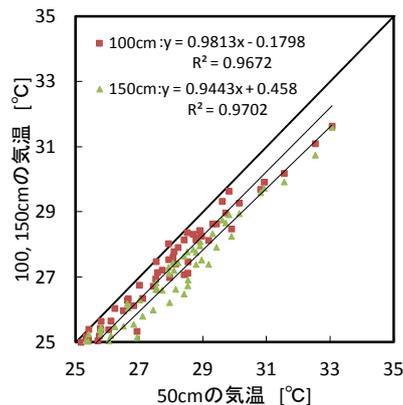


図 2 気温 50cm vs.100,150cm

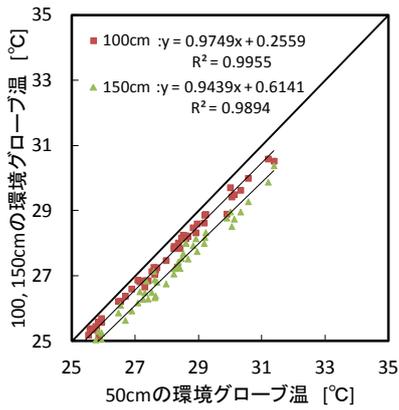


図3 環境グローブ温 50cm vs. 100,150cm

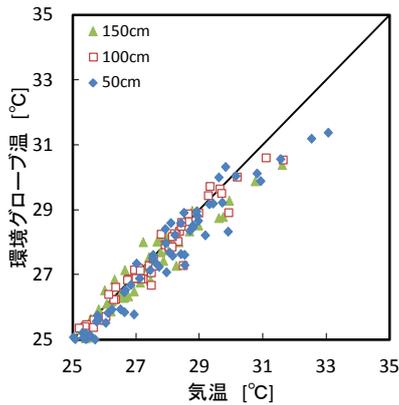


図4 気温 vs.環境グローブ温

図5,6に実測期間中の屋上に対する路上, 芝生の気温, 環境グローブ温の関係を示す。路上, 芝生と屋上との気温差は平均0.58°Cであり, 路上と芝生との間に有意差は見られなかった。一方, 路上の環境グローブ温は屋上よりも平均0.92°C高く, 芝生の環境グローブ温は屋上よりも平均0.35°C低かった。このことから芝生は気温が屋上よりやや高くとも, 長波長放射の影響により環境グローブ温が低く保たれていることがわかる。図7に場所別の気温と環境グローブ温の関係を示す。同じ気温で見ると路上, 屋上, 芝生の順に環境グローブ温が低いことが示された。

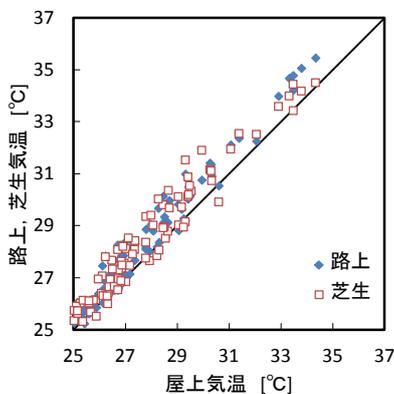


図5 気温 屋上 vs.路上, 芝生

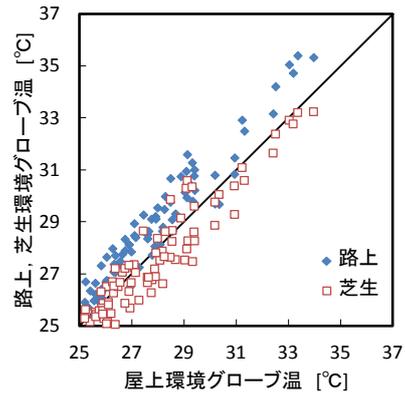


図6 環境グローブ温 屋上 vs.路上, 芝生

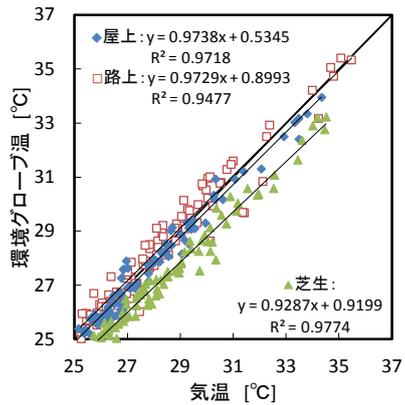


図7 場所別 気温 vs.環境グローブ温

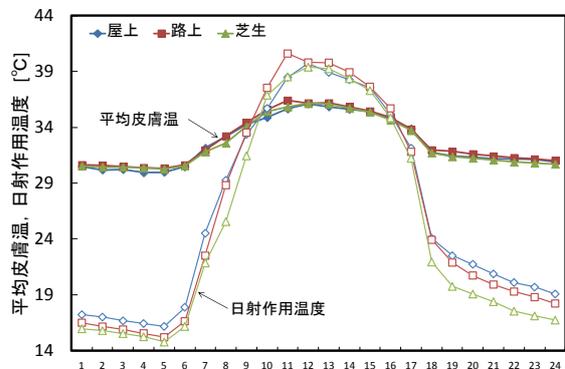


図8 場所別の平均皮膚温の予測値

図8は, 代表日の(2011年8月27日)実測値を用いて場所別の日射作用温度と平均皮膚温を予測したものである。計算条件として, 代謝量 3.58met, 外部仕事 0.67met, 着衣量 0.35clo, 着衣の日射反射率, 日射透過率はそれぞれ 0.44 を採用した。ただし日射の条件を等しくするために, 全天日射量は屋上の値を, アルベドは実測値を適用した。

結果として, 場所ごとに環境グローブ温には差があるにも関わらず, 日射作用温度, 平均皮膚温共に 11 時の路上以外にそれほど差は見られなかった。11 時は路上の風速が低いため日射受熱量が増加したことが影響して

いると考えられる。12時以降は、日射受熱量に及ぼす反射日射量（アルベド）と風速の影響が相殺され差が見られなかったと考えられる。

(3) 通常の綿素材と速乾素材の違いについて検討するため、図ではCE1(通常)とCE2,CE3,CE4(速乾)の2種類に分類する。図9に発汗ぬれ率と全着衣重量増加量の関係を表わす。回帰直線の検定の結果、素材間に有意差がみられた。速乾素材は着衣からの汗の蒸発量が多いため、着衣重量増加量が少なくなっていると考えられる。図10に既往の研究で得られた無効発汗率と発汗量に対する着衣重量増加量の割合の関係を示す。CE1とCE2,CE3,CE4の間で回帰直線の差を検定した結果、有意な差が見られた。すなわち同じ無効発汗率でも、速乾素材の方が着衣に残留した汗量が少ないことが示唆された。平均するとCE1は無効発汗原量の約60%、CE2,CE3,CE4は約45%に相当する量がそれぞれ着衣に残留する結果となった。以上の結果から、重量増加量には有意な差が見られ、CE2,CE3,CE4についてその速乾性を確認することができた。

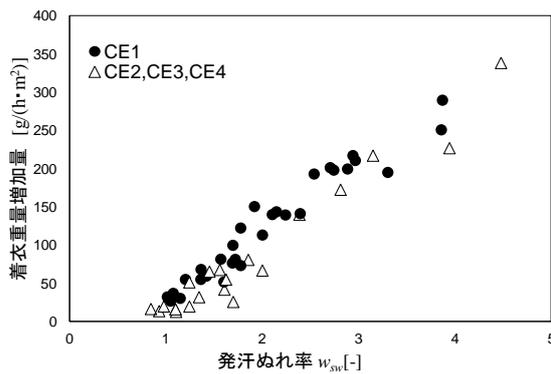


図9 発汗ぬれ率と着衣重量増加量の関係

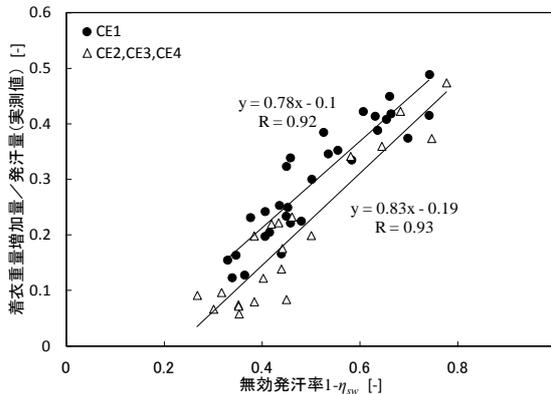


図10 無効発汗率と着衣重量増加量の関係

上記の特性が人体に及ぼす影響を検討するために、綿素材と速乾素材着用時の平均皮膚温や主観申告等を図示した。まず、図11に気温に対する実測平均皮膚温の変化を示

す。平均皮膚温は着用着衣のCE1とCE2,CE3,CE4の間に有意差は見られなかった。しかし、気温が30℃を超える温域では有意な差が発現した。速乾素材は、着衣のべたつき等による不快感を軽減するために汗を素早く吸収し表面に移動させていると考えられる。このことは前述の着衣残留水分量が少ない、すなわち、着衣の熱伝導率を低下させる着衣のぬれが相対的に少ないことに反映されていて、結果的に体を冷やす効果が低下したものと考えられる。

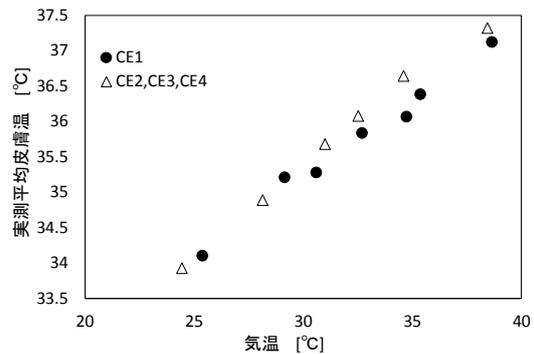


図11 気温と平均皮膚温の関係

また素材により主観申告に差があるかを比較するために、図12に気温に対する総合的な不快感の変化を示す。総合的な不快感は素材の違いによる差は見られなかった。図13に気温と着衣ぬれ感の関係を示す。発汗量が比較的少ない25℃から30℃において差が見られ、30℃以上では差は小さい。Tシャツ全面がぬれない気温30℃程度までの環境であれば、速乾素材は着衣ぬれ感を軽減することが可能であると考えられる。しかしながら着衣ぬれ感に差があるにも関わらず、総合的な不快感に差は見られなかった。

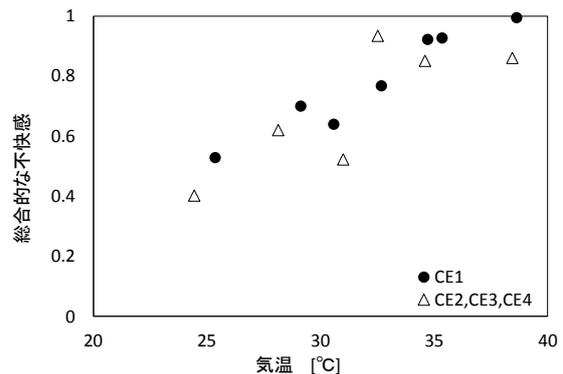


図12 気温と総合的な不快感の関係

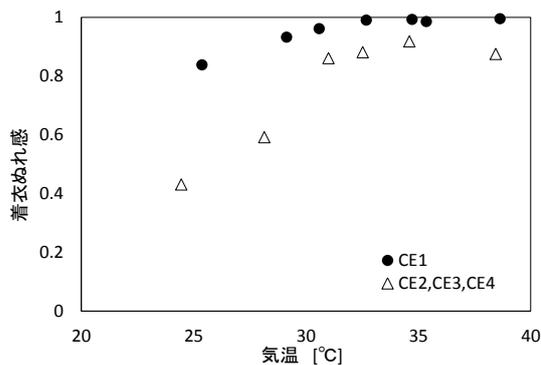


図 13 気温と着衣ぬれ感の関係

以上の結果から吸汗速乾素材は、暑熱負荷が相対的に低い温域では着衣ぬれ感の軽減効果が観察されるものの、暑熱負荷が大きい温域では、汗の蒸発による人体冷却効果を速乾性能が阻害する要因となっている可能性が示唆された。熱中症に代表される暑熱環境のリスクを軽減する観点からは看過できない。さらなる調査を試みたい。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 2 件)

- ① 栞原浩平, 窪田英樹, 素材の異なる着衣のぬれが暑熱環境における平均皮膚温に及ぼす影響, 生理人類学会雑誌, Vol.16, 144-145, 2011, 査読無
- ② 栞原浩平, 窪田英樹, 異なる放射環境における環境グローブ温度の実測と熱ストレスの評価, 日本生気象学会雑誌, Vol.48, S90-S90, 2011, 査読無

[学会発表] (計 4 件)

- ① 栞原浩平, 谷地 誠, 窪田英樹, 濱田靖弘, 中村真人, 長野克則, 異なる地表面における環境グローブ温度の比較, 空気調和・衛生工学会北海道支部第 46 回学術講演会, 2012-3-13, 北海道大学
- ② Kuwabara, K., Kubota, H., Hamada, Y., Nagano, K., Effect of the wetness of clothing made of different materials on the mean skin temperature in a hot environment, 14th International Conference on Environmental Ergonomics, 2011-7-13, Nafplio
- ③ 池田光毅, 栞原浩平, 窪田英樹, 谷地 誠, 濱田靖弘, 中村真人, 長野克則, 暑熱環境における熱ストレスの評価—異なる放射環境における環境グローブ温度の実測, 空気調和・衛生工学会北海道支部第 45 回学術講演会, 2011-3-17, 北海道大学.
- ④ 林健太郎, 栞原浩平, 窪田英樹, 濱田靖

弘, 中村真人, 長野克則, 熱中症の予防等暑熱環境評価のための体温予測モデル (第 10 報) 暑熱馴化の有効性と着衣のぬれに及ぼす影響, 空気調和・衛生工学会大会, 2010-9-2, 山口大学

[図書] (計 1 件)

- ① 彼末一之監修, 朝倉書店, からだと温度の事典, 2010, 391-393

6. 研究組織

(1)研究代表者

栞原 浩平 (KUWABARA KOUHEI)
北海道大学・大学院工学研究科・助教
研究者番号: 40374582

(2)研究協力者

窪田 英樹 (KUBOTA HIDEKI)
北海道大学・大学院工学研究科・元教授
研究者番号: 90002930
濱田 靖弘 (HAMADA YASUHIRO)
北海道大学・大学院工学研究科・准教授
研究者番号: 40280846
中村 真人 (NAKAMURA MAKOTO)
北海道大学・大学院工学研究科・技術専門員
研究者番号: 60374592
長野 克則 (NAGANO KATSUNORI)
北海道大学・大学院工学研究科・教授
研究者番号: 80208032
池田 光毅 (IKEDA KOKI)
北海道大学・大学院工学研究科・修士課程
谷地 誠 (YACHI MAKOTO)
北海道大学・大学院工学院・修士課程
南沢 慶一 (MINAMISAWA KEIICHI)
北海道大学・工学部・4 年