

着衣と人体生理状態を考慮した無線通信による熱中症予防支援システムの構築

研究課題番号 15H02888

平成 27 年度～平成 30 年度 科学研究費補助金（基盤研究（B））

## 研究成果報告書

平成 31 年 3 月

研究代表者 薩本弥生

（横浜国立大学 教育人間科学部）

## 目次

1. はじめに
  - 1-1 研究の概要
  - 1-2 研究の背景
  - 1-3 研究の目的
  - 1-4 研究成果
  
- 2 ウェアラブル無線 BAN システムの構築 (杉本千佳)
  
- 3 被験者実験による着衣・周辺環境のデザインの最適化(薩本弥生)
  - 3-1 スポーツウェアの換気および熱水分移動性能への着衣のデザインによる影響
    - 3-1-1 暑熱環境下で熱中症予防に適したスポーツウェアの検討 (池田・薩本・櫻井)
    - 3-1-2 スポーツウェアの熱水分移動能に背部の立体的な換気口がおよぼす効果 (林・薩本)
  - 3-2 暑熱環境下での日常生活環境のウェアの評価
    - 3-2-1 暑熱環境下の日常生活での Y シャツのデザインの工夫による熱中症予防効果 (風間・薩本)
  
- 4 被服環境デザインの着衣モデルによる評価
  - 4-1 サーマルマネキンによる着衣の熱水分移動性の評価 (薩本・小柴)
    - 4-1-1 アウトドアパーカの蒸発熱伝達および換気性能に素材の透湿性能と換気口がおよぼす効果  
—発汗サーマルマネキンを用いた模擬実験— (薩本・小柴)
    - 4-1-2 着衣の素材およびデザインと風、歩行の熱移動および換気への効果 (薩本・小柴)
  - 4-2 防護服着用を想定した Wet Bulb Globe Temperature の補正 (佐古井智紀)
  - 4-3 着衣モデルによる着衣の素材およびデザインの熱移動および換気への効果 (島崎康弘)
  - 4-4 靴の換気計測用模擬歩行装置を用いた着靴時足部の温熱評価および改善策の検討 (薩本・池田)
  
- 5.居住環境デザインの最適化 (島崎康弘・西原直枝)
  - 5-1 夏季における高齢者の日常生活における温熱環境および心拍の計測 (西原直枝)
  - 5-2 保水性舗装温熱環境評価に関する研究 (島崎康弘)
  
- 6.総括  
公開研究業績一覧

# 1 はじめに

## 1-1 研究の概要

本研究は、研究課題「着衣と人体生理状態を考慮した無線通信による熱中症予防支援システムの構築」として、平成 27 年度から平成 31 年度までの 4 年間にわたって文部科学省研究費補助金 基盤研究 (B) の交付を受けて行ったものである。研究課題名、研究経費、研究組織、役割分担、研究成果は以下の通りである。

### (ア) 研究課題名

着衣と人体生理状態を考慮した無線通信による熱中症予防支援システムの構築

### (イ) 研究経費

平成 27(2015)年度：	5,070 千円	(直接経費： 3,900 千円	間接経費： 1,170 千円)
平成 28(2016)年度：	4,290 千円	(直接経費： 1,300 千円	間接経費： 990 千円)
平成 29(2017)年度：	5,460 千円	(直接経費： 4,200 千円	間接経費： 1,260 千円)
平成 30(2018)年度：	2,340 千円	(直接経費： 1,800 千円	間接経費： 540 千円)

### (ウ) 研究組織と役割分担

- 研究代表者 薩本弥生 (横浜国立大学 教育人間科学部)
- 研究分担者 杉本千佳 (横浜国立大学 工学研究院)
- 研究分担者 田中英登 (横浜国立大学 教育人間科学部)
- 研究分担者 島崎康弘 (豊橋科学技術大学 工学部)
- 研究分担者 西原直枝 (聖心女子大学 文学部)
- 研究分担者 佐古井智紀(信州大学 繊維学部)
- 研究分担者 小柴朋子 (文化学園大学 服装学部)

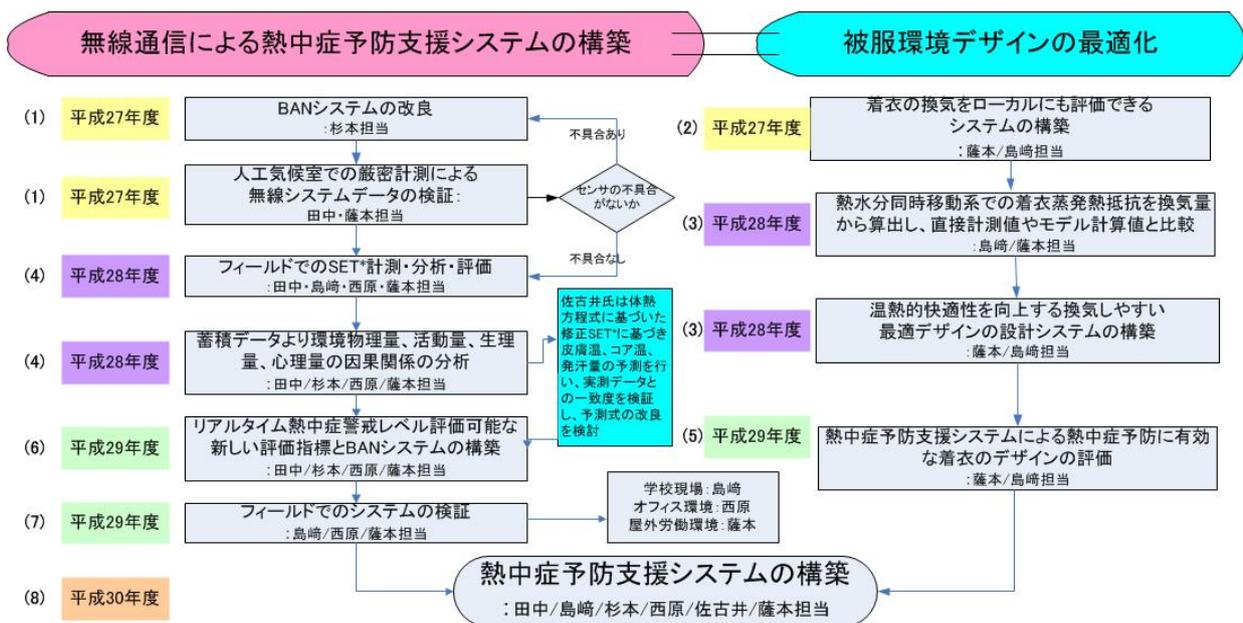


図 1 研究の構想と役割分担

## 1-2. 研究の背景

団塊の世代が 65 歳を迎え、高齢者人口が急速に増えつつある超高齢化社会を迎える我が国にとって、高齢者の予防医学的な環境整備に加えて、生活習慣病予防や健康増進もその重要性を増している。こうした社会状況にあっては、医学的な治療技術の向上に加えて日常生活における健康状態・快適性の向上を図ることは、健康国家の実現と予防医学並びに介護環境の充実に大きく貢献することが可能であり、国民の QOL 向上において必要不可欠な開発技術である。これまで健康を謳った製品が数多く市場に出されているが薬事法の適用が厳しくなった 2004 年頃から、エビデンスが強く求められるようになってきている。人間周りの温熱環境の改善のためには、実際の生活環境での温熱環境状態計測を継続して行う必要がある。

夏季には熱中症が毎年多数、報告されている。若年者では暑熱環境下の屋外でのスポーツや肉体作業時に多い。一方で、高齢者では住宅内部での熱中症が多数報告されている。高齢者、幼児、暑熱順化していない人、持久力のない人、肥満傾向の人は、体温調節機構が機能不全になりやすく、死亡事故につながりやすく、危険であり、対策が必要である。特に高齢者の温冷感の鈍化や同居の家族を含め住まいへの慣れ等により、健康を脅かす問題にも関わらず、自覚されていない。したがって高齢者の居住する住宅内部での熱中症対策は重要であり、居住者の負担にならない温熱環境改善手法を示すことが課題となっている。

現在の熱中症予防のための予防指針には、人体の熱収支に影響の大きい気温、湿度、輻射熱の 3 つを取り入れた WBGT (湿球黒球温度) が用いられているが、被験者の生理量と組合せて細やかな対策がなされていない現状では、予防指針としては、不十分といえる。

また、暑熱環境での衣服の役割は大きい。身体からの放熱量、外部からの輻射熱、水分蒸発の 3 つの観点から人体周りの熱収支の調節が出来る。同じ衣服でも着用する環境や人体の状態が異なれば、快にもなるし不快にもなる。安静時の着衣の温熱的快適性の指標としては衣服内気候が影響し、快適な時は一定の温湿度環境に保たれている。しかし、特に暑熱環境下や運動時などでは動的な環境ではその限りではなく、人体の生理と心理および環境に応じた衣服の温熱的快適性を図るためのシステム作りが不可欠である。このような環境での着衣の温熱的快適性には衣服の熱水分移動性能、特に蒸発放熱が支配的で、暑熱環境時の熱中症予防のため、暑熱時に温熱的に快適にするための条件として着衣素材の種類のみでなく着衣のデザインや、人の動作、環境の風速等の寄与は大きい。そこで、被験者の個別の状況に応じて病的状態にならないうちに運動を中断するために、熱中症への移行状態の早期把握と、その予防システムの構築が必要である。

2020 年に開催される東京オリンピック・パラリンピックに関連して、スポーツのパフォーマンスを高め、かつ、安全にスポーツを行うための研究面での成果が期待されている。そのため、これまで科学研究費基盤研究 A の「無線通信による熱中症予防支援システムの構築と被服環境デザインの最適化」(業績 1) および横浜国立大学医療 ICT センター (代表: 河野隆二) の医療情報システムの創生部門の重点プロジェクト「人間生活環境の温熱的快適性評価による QOL 向上のためのウェアラブルシステム開発に関わる研究プロジェクト」(業績 2) において、特にスポーツ時の熱中症予防に向けての研究を進めてきた。温熱環境の人-着衣-環境に関わる温熱環境物理量を計測し、これらのデータを無線で集積し、同期して人の温熱的快適性の指標となる温熱生理計測を行って、被験者に装着負荷が少なく、常時モニタリング可能な無線機能付きのウェアラブルシステムを開発することをめざし、着衣時の環境状態計測評価を試みてきた。着衣の調整は空調負荷削減に繋がり、建築の省エネルギー技術に寄与する。

### 1-3 研究の目的

そこで本研究では人-着衣-環境に関わる温熱環境物理量を計測し無線で集積し、同期して人の温熱的快適性の指標となる温熱生理計測(耳型体温, 心拍, 活動量, 皮膚温, 衣服内気候等)および心理申告データの蓄積ができ, 着衣の素材の種類やデザインの影響を考慮し, さらに, 被験者に装着負荷が少なく, 常時モニタリング可能な無線機能付きのウェアラブルシステムを改良し, スポーツ時や高齢者等の日常生活での環境状態および人間状態の計測・分析をし, 着装時の環境状態計測評価を試みる. さらに各種作業時の常時モニタリングシステムへ応用し, 取得したデータからの熱中症行動・状態モデルの構築と新たな評価指標による熱中症予防支援システムを構築することを目的とする.

手足の揺動による着衣のふいご作用による換気は, 人体からの熱水分移動性を促進させるため環境の風の効果以上に着衣の温熱快適性向上に重要であるが, しかし, 現状では, きちんとした定量法が規定されていない状況である. そこで, 本研究では, 熱中症予防に効果的な着衣の条件を検討するため発汗・歩行動作マネキンとトレーサガス法を用いて温熱的に快適な着衣のデザインを検討する評価法を構築する. さらに換気の生じやすい着衣デザインを考案し, サーマルマネキンを用いて Havenith 氏の提案する間接法で評価を行い, 熱中症予防に効果的な着衣デザインをデータエビデンスに基づいて提案したい.

#### <参考文献>

1. 平成 23~26 年度科学研究費補助金, 基盤研究 A, 課題番号: 23240099, 「無線通信による熱中症予防支援システムの構築と被服環境デザインの最適化」, 研究代表者: 薩本弥生, 研究分担者: 杉本千佳, 田中英登, 河野隆二, 竹内正顯, 香川利春, 島崎康弘, 榎本ヒカル, 一木正聡, 鈴木章夫, 上野哲, 佐古井智紀, 研究成果報告書, <http://hdl.handle.net/10131/10172>
2. 平成 22~26 年度横浜国立大学医療 ICT センター (代表: 河野隆二), 重点プロジェクト: 「人間生活環境の温熱的快適性評価による QOL 向上のためのウェアラブルシステム開発に関わる研究プロジェクト」, 研究総括者: 薩本弥生, 研究分担者: 杉本千佳, 田中英登, 年報

### 1-4 科研費による研究の研究成果

#### WBANシステムによる熱中症予防システムの構築

- WBAN (ウェアラブル<sup>※</sup> データエリアネットワーク) 熱中症予防システムの構築 (図1) と熱中症予防評価モデルの構築と暑熱環境での着衣の温熱環境・人体生理・心理の評価とモデルの精度検証

#### 被服・周辺環境デザインの最適化

- トレーサガス法による換気速度計測 (図2) と発汗サーマルマネキンの熱および蒸発熱伝達評価法 (図3) と被験者実験による主観を含めた同評価法 (図4) を用いた着衣デザインと発汗・風・動作が着衣の換気・熱水分移動性能におよぼす影響の評価、保水性舗装路素材が暑熱環境下の人に及ぼす影響について把握 (図5)

#### 高齢者の夏季の環境評価と生理・心理の実態把握

- WBANを用いた高齢者の温熱環境の実態把握

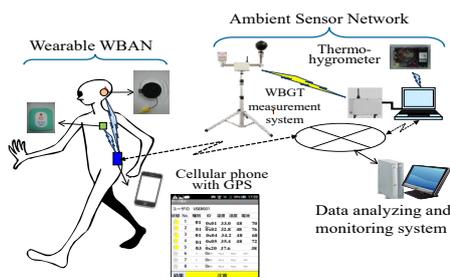


図1 WBAN 熱中症予防システムの構築

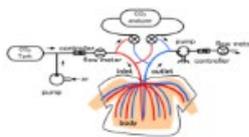


図2 トレーサガス法



図3 発汗サーマルマネキン



図5 舗装路温熱評価

図3 発汗サーマルマネキン

### 1-5 研究成果のその後の展開など

- ・ 図1のWBANシステム構築により温熱環境・人体生理データ、屋内外のフィールド環境においてリアルタイムに温熱状態評価とデータ蓄積による生体状態の解析評価が可能になる。
- ・ 着衣の素材・デザインに関して様々な熱中症予防の工夫をした着衣の換気、熱水分移動性能、主観への影響を評価し、大きく影響することが明らかになり、データを蓄積した。
- ・ 足部および全身の温熱状態と環境、活動状態の関連性について明らかにした。熱エネルギーの流れに着目し、着靴時の足部温熱環境形成に与える因子について検討した。着靴に起因する足部温熱環境の評価法が確立し、改善策等の検討に活用できる知見を得た。

・ 熱中症予防評価モデルの等価 SET\* を用い図6に示す6項目を入力値として深部温、皮膚温の予測値を算出し実測値と比較したところ、皮膚温は良く一致した。着衣の熱抵抗の運動時の低減率に若干実測と乖離があった。今後、さらに多くのデザインの着衣量での熱抵抗の低減率に寄与するかデータを蓄積し、モデルに入れ込むことでより予測の精度が向上すると考える。着衣のデザインによる低減効果を組込んだ熱中症予防システムのさらなる改良を進めたい。



図6 SET\*予測モデルの概要

### 今後期待される波及効果、社会への還元など

図7に示す熱中症予防システムが完成すれば、学校現場や職場での健康管理のあり方に革新をもたらすものであり、ライフ・イノベーションとなる。その提案と普及を通じて新規産業創出にも貢献すると考えられる。

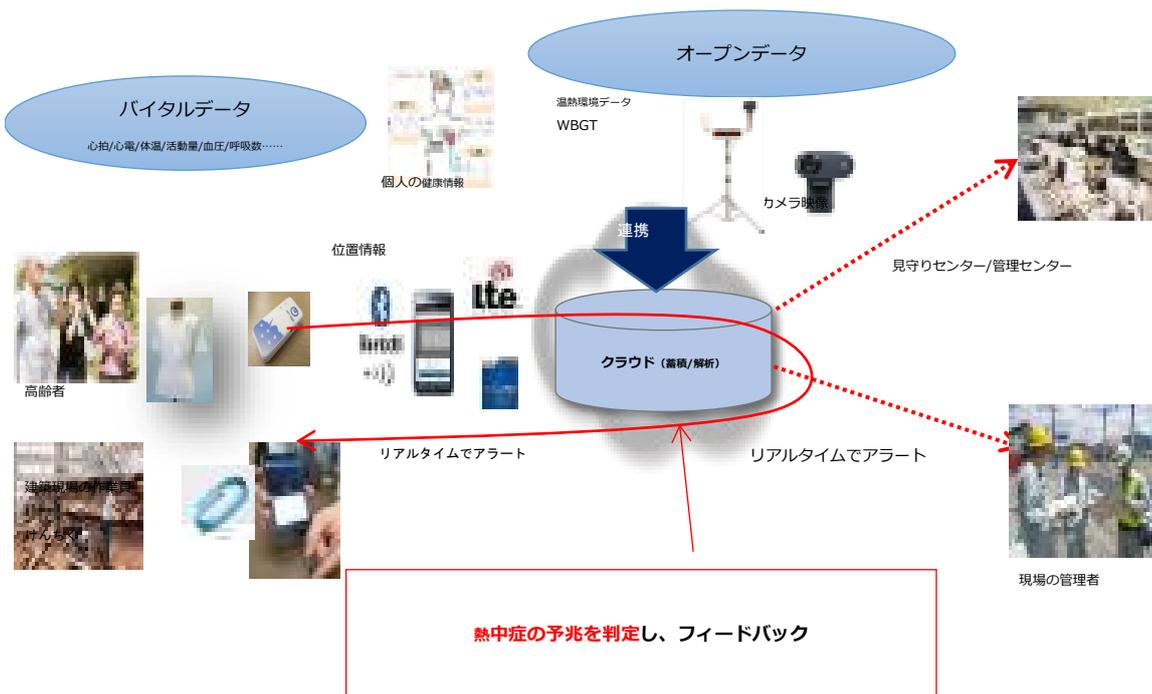


図7 熱中症予防システムの完成イメージと応用・使用対象

## 2 熱中症予防の警報メールシステムの構築

### ウェアラブル無線 BAN システムの構築

横浜国立大学大学院 工学研究院 杉本千佳

#### 2.1 はじめに

温熱環境における人の快適性状態や熱ストレス状態を正しく評価するためには、単に環境情報のみを取得して判断するのではなく、個々人の生理状態を考慮することが必要である。日常生活環境において人の生理状態を計測するために、出来るだけ無拘束で低侵襲な方法が求められており、ウェアラブル無線 BAN システムが有用であると考えられる。ウェアラブル無線 BAN システムでは、ウェアラブルセンサと体のまわりのネットワークである BAN (ボディエリアネットワーク) によりデータを取得することが可能になる。また、クラウド上の DB にデータを収集することで、広くデータの活用が可能になる。収集したデータを学習して温熱環境下での生体状態評価のための状態推定モデルを作成することで、熱中症予防のための生体評価モデルを構築し、熱中症予防支援につなげることを目指す。

#### 2.2 ウェアラブル無線 BAN システム

ウェアラブル無線 BAN システムにより生体データを取得し、環境センサシステムの環境データと統合することで、熱中症予防支援システムを構築する。ウェアラブル無線 BAN システムは、①耳孔内温度センサ (図 1)、②皮膚温度センサ、兼、衣服内気候センサ (図 2)、③活動量センサ (心拍・温度・加速度センサ) (図 3) から構成される。環境センサシステムは、環境中に配置した WBGT センサ (図 4)、温湿度センサ (図 5) で構成する。これらのセンサによって取得されたデータはネットワークを介しクラウドサーバに蓄積されるとともに、時々刻々の生体状態を評価してフィードバックを行うことが可能である。ユーザーの装着・測定負担が低く、スマートフォン等のモバイル端末でリアルタイムにデータをモニタリングできるように、上記の熱中症予防支援システム構築に必要なセンサやアルゴリズムの開発および改良を行った。



図 1 耳孔内温度センサ



図 2 皮膚温度センサ、  
衣服内気候センサ



図 3 活動量センサ



図 4 WBGT センサ



図 5 温湿度センサ

### 2.3 BAN の高信頼化

センサとコーディネータ間の無線方式は、現在、スマートフォンに標準搭載されている Bluetooth や IEEE802.15.4 に準拠した 2.4GHz 帯の周波数による無線通信が一般的である。一方で、生体データを日常環境で扱うためには、信頼性を確保した通信方式が必要である。このため、BAN は IEEE802.15.6 で標準化が行われている。そこで、標準規格 IEEE802.15.6 に基づいた通信方式について検証した。

BAN により生体データを高信頼に収集するための通信手法の検討として、マルチホップによりデータ収集するための WBAN における性能評価を行った[1,2,7]。また、物理層と MAC 層のクロスレイヤーで誤り制御を行って信頼性を高める手法を提案[3]し、その性能を評価した。将来的には、ヘルスケアや生活支援等様々な目的のためにウェアラブルセンサを装着することが考えられる[5]。よって、複数の WBAN 環境において、優先度が高い情報を高信頼に送受信するための新たな誤り制御方式の提案[6]を行い、高い性能が得られることを示した。

### 2.4 熱中症予防支援システム

熱中症予防支援システムの全体構成を図 6 に示す。センサにより計測されたデータはモバイル端末(以下、スマートフォン)に保存できるとともに、スマートフォンにより外部ネットワークに接続し、データを設定時間間隔でサーバに送信する。サーバではデータを受信管理して解析・表示でき、解析結果をスマートフォンにフィードバックする。また、PC やデータロガーでもセンサの測定データを同時に受信可能である。このシステムにより、屋内外のフィールド環境において、リアルタイムのデータにより温熱的生体状態評価が可能になった。

一方で、生体評価モデルの作成と検証には、熱中症に関連する詳細な生理指標のデータ取得が必要である。そこで、直腸温センサ、発汗センサ、運動量・運動強度センサ等のこれまで使用されてきたセンサを必要に応じて用いることでデータの収集を行い、アルゴリズムを評価することとした。

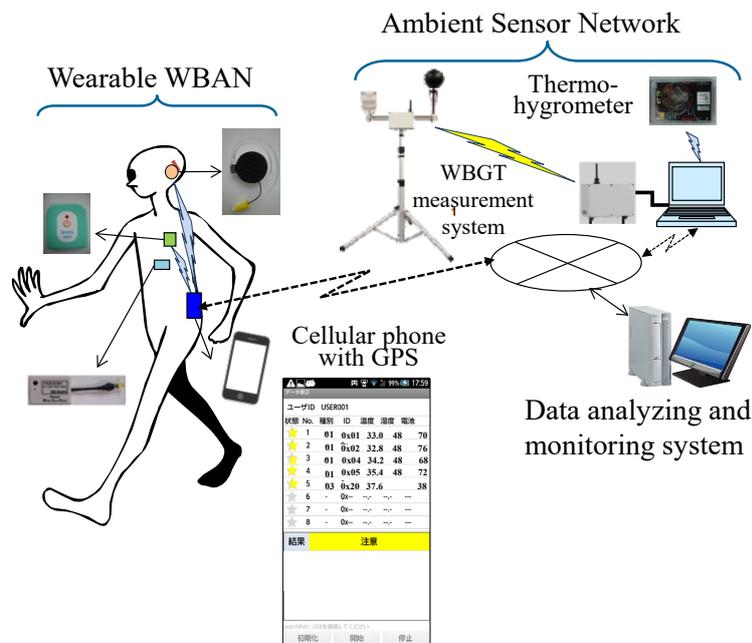


図 6 熱中症予防支援システム

## 2.5 まとめ

本研究において、熱中症予防支援システムのフレームワーク構築を行った。このシステムを熱中症予防支援に真に役立つシステムとするためには、温熱環境下での長期にわたるデータを取得し、生体状態をより正確に評価できるモデルを作成することが望まれる。よって、今後も熱中症予防評価指標の更なる改良を重ねる。

### 学術論文

[1] Kento Takabayashi, Hirokazu Tanaka, Chika Sugimoto, Ryuji Kohno, Performance Analysis of Multiplexing and Error Control Scheme for Body Area Networks,” EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking, 2016:70, pp.1-16, 2016

### 国際学会発表

[2] Kento Takabayashi, Hirokazu Tanaka, Chika Sugimoto, Ryuji Kohno, Performance Evaluation of Error Control Scheme in Multihop WBAN Based on IEEE802.15.6, The International Symposium on Information Theory and Its Applications 2016 (ISITA 2016), Monterey, pp.370-374, 2016.10

[3] Kento Takabayashi, Hirokazu Tanaka, Chika Sugimoto, Ryuji Kohno, Performance Analysis of Cross-layer Approach About Error Control Scheme for WBANs, The 11th International Symposium on Medical Information and Communication Technology (ISMICT 2017), Lisbon, 2017.2

[4] Koji Saito, Takumi Kobayashi, Chika Sugimoto, Ryuji Kohno, Routing Algorithm Considering Nodes Residual Power to Prolong Ad-Hoc Network Lifetime, Proc. of the 20th International Symposium on Wireless Personal Multimedia Communications (WPMC 2017), Yogyakarta, 2017.12

[5] Chika Sugimoto, Body Sensor System for Health Support Based on Machine Learning, Proc. of IEEE 15th International Conference on Wearable and Implantable Body Sensor Networks (BSN-2018), TuPO.19, Las Vegas, 2018.3

### 国内学会発表

[6] 高林健人, 田中宏和, 杉本千佳, 河野隆二, 複数 WBAN 環境における緊急情報のための誤り制御方式に関する一検討, 2015 年度 IEICE ソサイエティ大会, B-8-7, 東北, 2015.9

[7] 高林健人, 田中宏和, 杉本千佳, 河野隆二, 標準規格に基づいたマルチホップ WBAN における通信距離に関する性能評価, 第 39 回情報理論とその応用シンポジウム(SITA 2016)、岐阜、2016.12

### 3 被験者実験による着衣・周辺環境のデザインの最適化

#### 3-1 スポーツウェアの換気および熱水分移動性能への着衣のデザインによる影響

##### 3-1-1 暑熱環境下で熱中症予防に適したスポーツウェアの検討

##### スポーツ用パーカの換気効率化

薩本弥生<sup>1)</sup>，池田文美<sup>1)</sup>，櫻井大樹<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup> 横浜国立大学教育学部，<sup>2)</sup> ミズノ株式会社グローバルアパレルプロダクト本部

**要旨：**スポーツ用パーカの換気効率を向上させるため有風時の着衣換気と着衣内微風速分布から換気口の最適位置を検討し、候補位置に配置した換気口のあるスポーツ用パーカを試作した。さらに試作パーカの換気口の効果を明らかにすることを目的として被験者実験を行なった。換気口の開口により閉鎖と比較して温冷感、湿潤感が改善され、発汗効率が向上し、衣服内湿度が低く抑えられ、熱通過率や蒸発熱伝達率が上昇し、熱水分移動が効率的に起きることが明らかとなった。

**キーワード：**換気効率、衣服内温湿度、熱通過率、蒸発熱伝達率、スポーツ用パーカ

#### 1. はじめに

暑熱環境下の温熱的快適性には環境要因、人体要因のほか、着衣の熱水分移動特性が重要な役割を果たし、衣服は身体からの放熱量、外部からの輻射熱、水分蒸発の3つの観点から人体周りの熱収支の調節ができるものとしてその役割は大きい。特に、暑熱環境下では環境と皮膚温との温度差が小さく、発汗が重要な放熱の手段となるため、汗の蒸発による蒸発放熱を促進するような衣服が望まれる。そのため、着衣の温熱的快適性には衣服の熱水分移動性能、特に蒸発放熱が重要であり、暑熱環境時の熱中症予防のために、暑熱時に温熱的に不快感を減らすための条件として着衣素材の種類のみでなく着衣のデザインや、人の動作、環境の風速などを工夫する必要がある。

本研究の先行研究として行われたスポーツ用パーカの換気効率を向上させるため有風時の着衣換気と着衣内微風速分布から着衣の前部と後部の2か所に配置する換気口の最適位置を検討し、候補位置に配置した換気口のあるスポーツ用パーカを試作した。

本研究では、試作したスポーツ用シャツを用い、前部の換気口を開口した場合と閉鎖した場合の2条件において、被験者実験を通して人体の温熱的快適性と熱水分移動性にどのような効果が見られるかを明らかにすることを目的とした。

#### 2. 方法

##### 2.1 調査対象と調査期間

本実験は2017年10月下旬～11月上旬に、横浜国立大学構内の先端技術高等研究院棟（IAS棟）内の人工気候室で行った。被験者は横浜国立大学陸上競技部に所属する学生6名である。この調査と実験における被験者の身体的特徴として被験者の身長は $168.5 \pm 8.04$ cm、体重が $56.833 \pm 6.85$ kg、BMIが $20.0 \pm 2.0$ であり、日本の成人男性の平均を下回っているが、BMIの評価はどの被験者とも標準であった。体表面積は $1.645 \pm 0.13$ m<sup>2</sup>であった。また、調査にあたり被験者には実験について十分に説明

し、同意書に署名を得たうえで行った。実験に当たっては本学の倫理委員会の審査を経ている。

##### 2.2 着衣条件

実験では各被験者はスポーツ用シャツを着用し、換気口の開口と閉鎖の2条件で行った。実験は1日1条件とし、時間帯は10時から12時、16時から18時の午前と午後に分け、2日間で体温の日内変動（サーカディアンリズム）の影響を避けるため、同一被験者では、それぞれ時間帯を固定して同じ時間帯に行った。開口と閉鎖は前面にあるファスナーで調整を行った。背面の換気口は両条件時ともに開口のままとした。実験着の下には、Tシャツ（ポリエステル90%、レーヨン10%）を着用し、下半身は下着の上から、実験に影響しないよう、体に密着するスポーツ用スパッツ（ポリエステル(PET)84%、ポリウレタン(PU)16%）のを着用した。実験のウェアの着用の様子を Fig.1 に示す。



Fig.1 実験用ウェア（着衣状態）

実験に用いたスポーツ用シャツの諸元を Table1 に示す。KES 測定装置を用いて計測した。ウェアは、裏地がついているため、表地と裏地毎に諸元を示す。値は試料2枚の平均値である。

Table.1 実験用ウェアの諸元

	組成 (%)	厚さ (mm)	熱伝導率 (W/m/K)	通気抵抗 (kPa・s/m)
表地	PET83% PU17%	0.201	0.162	0.081
裏地	PET100%	0.424	0.061	0.012

### 2.3 実験手順と内容

横浜国立大学先端技術高等研究院棟(IAS棟)の人工気候室にて実験を実施した。人工気候室は26°C、湿度は50%RHに設定した。実験は午前と午後でそれぞれ2名ずつ行った。被験者は上半身が裸の状態、実験着のスパッツのみ着用した状態で体重を測定し、その後、被験者は実験者によって各センサ(皮膚温計、衣服内温度・湿度計、放熱束計、外耳道温計、心拍計)を貼付された。その後靴下、運動靴、Tシャツ、スポーツ用シャツの順に着装し、体温を測定した。最後に実験者が定量した200gのスポーツドリンクを摂取し、実験を開始した。実験は10分間の座位安静、20分間のトレッドミルを用いてランニング(12km/h)を行い、30分間の座位安静の手順で行った。ランニング後の安静時を回復期とする。ランニング後、各被験者に用意したタオルで顔や額などの表に出ている部分の汗は拭いてもらい、拭き終わったらその都度回収し袋に保管した。実験終了後、実験着やセンサを外し、身体に付着している汗を拭きとったのち、体温の測定を行った。その後、スパッツのみ着用した状態で体重の測定を行った。以上の内容を実験者が1人の被験者につき1日1条件(サーカディアンリズムを考慮し、同一時間帯に開始)、開口・閉鎖の計2条件での着衣条件で実験を行わせた。実験のタイムテーブルをFig.2に示す。被験者はタイムテーブルに示す時間ごとに主観申告を回答した。

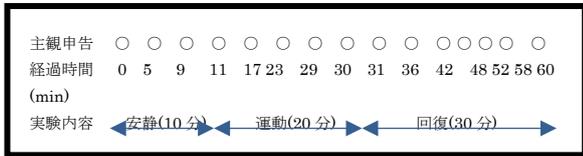


Fig.2 実験のタイムテーブル

### 2.4 計測項目

#### a) 皮膚温、衣服内温湿度、

皮膚温の測定には、有線温度センサロガ(株グラム社製:LT-200SA,LT8A)を使用し、皮膚温7点(前額・上腕・手の甲・上腹・大腿・下腿・足の甲)を10秒毎に測定した。Fig.2-25に人体分割部位とその主な測定点を示す衣服内温湿度の測定には、有線温湿度センサロガ(株グラム社製:LT8B)を使用し、衣服内温湿度3点(胸部・上背部・下背部)の温湿度を5秒毎または10秒毎に測定した。

#### b) 熱流束

熱流束の測定には、1cm×1cmの熱流計(型式:S11A、(株)江藤電気社製)を使用し、同社のデータロガ(Thermic)で胸部・上背部・下背部の3点を10秒毎に収録した。

#### c) 外耳道温、口腔温

外耳道温は有線温度センサロガ(株グラム社製:LT8B)を使用し、10秒毎に測定した。口腔温は体温計を舌下に銜えて使用し、実験前後に2回測定した。

#### d) 着衣量およびタオル、心拍計用バンドの重量

被験者の体重は実験前後の2回計測を行い、着衣量、タオル重量、心拍計ポラールバンド重量は、密閉袋に入れて

電子天秤を用いて測定した。タオルは予め用意し、実験後は被験者の汗を拭き取った後で測定した。

#### e) 主観申告

主観申告は、実験中の約5分間隔で実験者が指示した時間に計15回実施した。項目は温冷感、湿潤感、快適感、べとつき感、蒸れ感の5項目とした。主観申告の回答項目の内容をTable.2に示す。

Table 2 主観申告表

温冷感		湿潤感		快適感		べとつき感		蒸れ感	
とても暑い	3	とても湿っている	5	とても快適	3	とてもべとつく	5	とても蒸れている	5
暑い	2	湿っている	4	快適	2	べとつく	4	蒸れている	4
やや暑い	1	やや湿っている	3	やや快適	1	ややべとつく	3	やや蒸れている	3
どちらでもない	0	ほとんど湿っていない	2	どちらでもない	0	ほとんどべとつかない	2	ほとんど蒸れていない	2
やや寒い	-1	全く湿っていない	1	やや不快	-1	全くべとつかない	1	全く蒸れていない	1
寒い	-2			不快	-2				
とても寒い	-3			とても不快	-3				

#### f) 心拍

心拍数の測定には、心拍計(ポラール:v800)を用いて腕時計型の受信機で10秒毎にデータ収録を行った。

#### g) 発汗

発汗量の測定にはスキノス株式会社のSKK2000とSKN2000を使用した。10秒毎に連続計測した。

## 3. 結果

換気口のあるスポーツ用シャツを着装し、前部の換気口を開口したときと閉鎖したときの、それぞれの実験中の安静時・運動時・回復時に開口部がどのように熱移動や水分移動、被験者の主観に影響するのか検討した結果を示す。

また、文中の図やグラフでは、実験の0分から10分の安静時を安静、10分から30分のランニング時を運動、30分から60分の実験終了までの回復時を回復とする。また、各条件における比較をする際は、開口条件をopen、閉鎖条件をclosedとし、以後openとclosedと表記する。

### 3.1 被験者平均の総熱通過率

被験者平均値の総熱通過率の推移を条件毎にFig.3に示す。

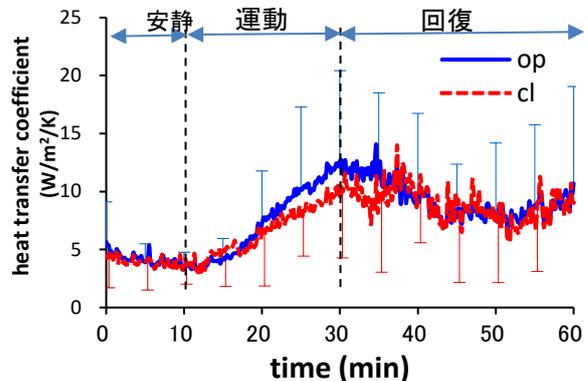


Fig.3 総熱通過率(被験者平均)の推移

安静時には熱通過率はあまり変化せず、運動開始からゆるやかに上昇し、実験開始 20 分後から両条件間に少し差がみられるようになる。運動終了と同時にピークを迎え、それ以降は下降する。その後、実験終了まで熱通過率はほとんど変化しないが、安静時よりも熱通過率が高い状態を示しているため、完全に回復には至っていないものと考えられる。両条件間に有意差は認められなかった。

### 3.2 発汗および湿度

被験者の実験前後の重量変化や、着衣などの実験前後の重量変化から発汗量などを求めた。Fig.4 に有効発汗量および発汗効率の結果を示す。

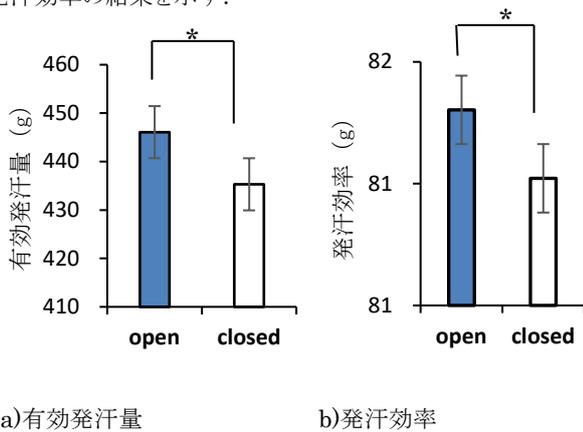


Fig. 4 有効発汗量と発汗効率 : \* :  $p < 0.05$

Fig.4 に示すように open 条件時のほうが closed 条件よりも有効発汗量が多い結果となった。このことから open では開口した部分から汗が蒸発していったことが分かる。逆に closed では汗が衣服外へ出ていきにくく、衣服内にこもっていたことが分かる。以上の結果から open のほうが、発汗効率が良いことが分かる。したがって、open のほうがかいた汗が効率的に衣服外に放散されている。有意差は認められなかった。

### 3.3 蒸発熱伝達率

胸部の蒸発熱伝達率の推移を Fig.5 に示す。

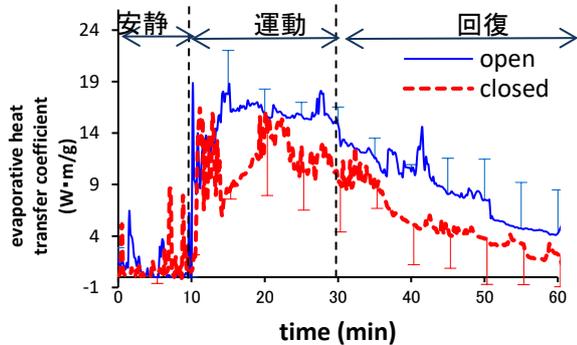


Fig.5 胸部の蒸発熱伝達率の推移

Fig.5 のように胸部では、運動開始から open 条件で蒸発熱伝達率が上回り、その後も open 条件が closed 条件を上回り続

けた。回復期に入ってから両条件ともゆるやかに下降していくが、その差はほとんど変わらなかった。平均値では、大きく差がある、実験開始から 15 分や 40 分のところにおいて 5 分ごとに対応のある平均値の差の検定をしたところ、有意差は認められなかった。上背部でも、同様の傾向がみられた。有意差は認められなかった。

胸部の衣服内湿度の推移を Fig.6 に示す。運動開始からすぐに湿度が上がり始め、胸部では、運動終了直後にピークを迎え、上背部・下背部では運動終了までにピークを迎える。そして、いずれの部位(胸部・上背部・下背部)においても回復期に若干湿度が下がる傾向がみられるが、実験終了までの時間では初期値までの回復には至らない。いずれの部位(胸部・上背部・下背部)においても運動中は closed 条件の方が湿度が高くなっており、汗が衣服外へ出ていかず、衣服内にとどまることが分かる。衣服内湿度において有意差は認められなかった。

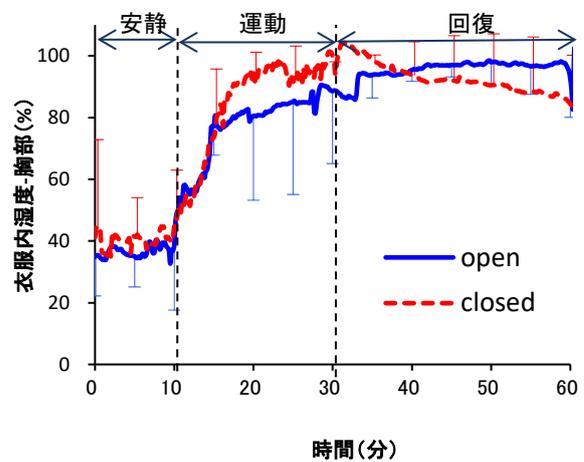


Fig.6 胸部の衣服内湿度の推移

### 3.4 主観申告結果

快適感は運動開始から不快にむかい、運動終了時にピークを迎える(Fig.7)。運動中に closed のほうが不快になり、そのまま差が広がった。回復期には再び快適へ向かっていくが、実験開始時のところまでは回復しなかった。快適感において有意差は認められなかった。

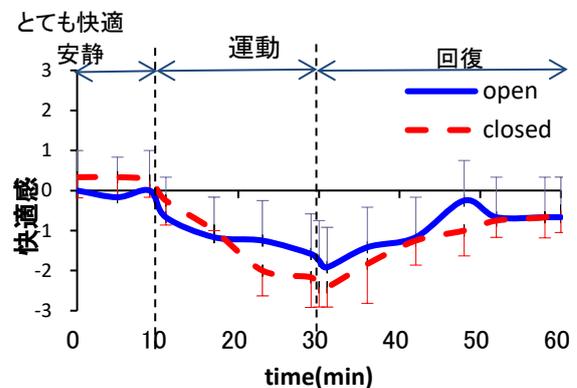


Fig.7 開口部が快適感におよぼす効果

#### 4. 考察

熱通過率は安静時には動作がなく、衣服内の空気が動かないのでほとんど変化しないが、運動時に open と closed の条件を比較すると、open で熱通過率の上昇がみられる。これは前面を開口することでランニングにおけるふいご作用の効果が増大し、着衣内に生じる対流が熱通過率に影響を与えたと考えられる。

発汗量の比較から、換気口の開口条件時にはスポーツ用シャツ内の換気が促進されてその効果を発揮し、総発汗量としては多くなったが、その多くは有効発汗量として衣服外へ出ていき、相対湿度・絶対湿度の上昇の抑制に結び付いたと推察される。また、換気口の効果が下背部・運動時においてよく見られたことは、青柳ら(2015)の研究から明らかになっているように着衣の開口部、特に裾の部分からの換気は運動時に向上し、背部に設けた換気口の効果が顕著に表れたと示唆される。

蒸発熱伝達率は、どの部位においても運動開始からしばらくは、蒸発熱伝達率が上昇する。これは運動開始時から数分は、安静時に発生した不感蒸泄がランニングによって強制対流で換気が起こり、シャツ内の絶対湿度が下がり、蒸発熱伝達率が上昇したと考えられる。運動時間が進むにつれて発汗が起こり、衣服内の絶対湿度が上がってくると、蒸発熱伝達率は低下していく。この考えに基づくと、回復期には衣服内の絶対湿度が下がり、再び蒸発熱伝達率は上昇するが、今回の実験では、回復期も衣服内の絶対湿度が高い状態のままであったため、その現象は見られなかった。主観申告に関しては、人工気候室内は不感気流の状態であったことで、フィールド実験よりも差が開かなかったが、open のほうが暑さや蒸れを感じにくく、快適感につながっていたことが示唆された。

#### まとめ

スポーツ用シャツの前後に配置された換気口の全部開口の影響を被験者実験で検討したところ、胸部換気口の閉鎖と比較して発汗効率が向上し、衣服内湿度が低く抑えられた。また、

熱通過率や蒸発熱伝達率が向上し、熱や水分の移動が効率的に行われたことによって平均皮膚温や衣服内湿度を低く抑えることにも効果が見られた。胸部・上背部では open のほうが高い結果が見られ、前面、背面のどちらの換気口からも熱や水分の移動が行われていることが明らかとなった。背部だけではなく、前部にも換気口があることでランニング時に前から受ける風速が通り抜けること、ふいご作用によって対流放熱が向上し熱通過率、蒸発熱伝達率に影響を及ぼしたと示唆される。これらの結果から温冷感や湿潤感などの主観にも差が見られ、快適感に影響することが分かった。

**謝辞** 本研究は基盤研究(B)15H02888「着衣と人体生理状態を考慮した無線通信による熱中症予防支援システムの構築」(研究代表者:薩本弥生)および産学連携研究(美津濃株式会社共同研究)「スポーツ用シャツの換気効率化」の研究助成を受け実施した。ここに記して謝意を示す。

#### 6. 文献

青柳卓也, 薩本弥生, 2015.アウトドア用パーカ前部に設置した換気口が温熱的快適性に及ぼす効果, HES39 要旨集

---

#### 連絡先>

連絡先氏名:薩本弥生  
住所:横浜市保土ヶ谷区常盤台 79-2  
所属:横浜国立大学教育学部  
E-mail アドレス:satumoto@ynu.ac.jp

### 3-1-2 スポーツウェアの熱水分移動性能に背部の立体的な換気口がおよぼす効果

○薩本弥生（横浜国大）、林静紅（元横浜国大院）

**【背景と目的】** 着衣の温熱的快適性には被服素材だけでなく着衣のデザインの寄与が大きい。従来の研究により運動時の発汗が一番多い部位は背中中央上部であることが明らかにされている。そこでスポーツウェアの背部に換気口を設けた先行研究がいくつかあり、着衣の換気量や熱通過率が増加することを明らかにしているが、いずれも開口部付近の局所的な放熱の増加で、効果は不十分であった。また、本研究室の先行研究で中田は背中中央上部の肩甲骨間に空間があれば放熱がより促進できるのではないかと課題提起していた。そこで、熱中症予防に有効で温熱的に快適な着衣のデザインの最適化のため、本研究ではスポーツウェアの背中中央上部の肩甲骨間に立体的な換気口を設置することによる着衣の熱、水分移動性および温熱的快適性への効果を明らかにすることを目的とする。

**【方法】** 換気口無（ベーシック:BA）、多孔編み物の肌側に布製の凹凸の立体スペーサを数本縫い付けた換気口（ラッセル:R）および樹脂パーツを用い、3Dプリンタで製作した立体的な換気口（3D）（Fig.1参照）、この3種の換気口条件のスポーツウェアで本学アメフト部所属の健康な男子計6名（19±0.6歳）を被験者に25°C・50%RHの人工気候室での運動による温熱負荷被験者実験を行った。被験者はセンサ類を貼付された後、椅座安静で10分間過ごし、20分間トレッドミル上で6.5km/hの早足歩行をし、20分間、再び椅座安静で過ごした（回復期）。実験中は5分毎に主観申告を行った。発汗量、皮膚温、直腸温、衣服内温湿度、放熱量等を計測し、熱通過率、蒸発熱伝達率を算出した。

**【結果及び考察】** 最も立体的な換気口を設けた3D着用時の平均皮膚温、直腸温（Fig.2参照）、衣服内平均温度、衣服内胸部温度、衣服内胸部相対湿度、衣服内胸部絶対湿度、主観申告が他のウェア着用時より有意あるいは有意傾向が見られ、低値であった。立体的な換気口がある3D着用時は運動中衣服内外の換気が促進され、効率よくある3D着用時は運動中衣服内外の換気が促進され、効率よく熱、水分移動が行われているからと考えられる。

**【結論】** スポーツウェア中上部の肩甲骨間に立体的な換気口を設置することにより、着衣の熱、水分移動が高まり、温熱快適性が向上することが明らかにされた。スポーツウェアの改善は運動時の温熱快適性を向上させ、熱中症予防に貢献できると考えられる。

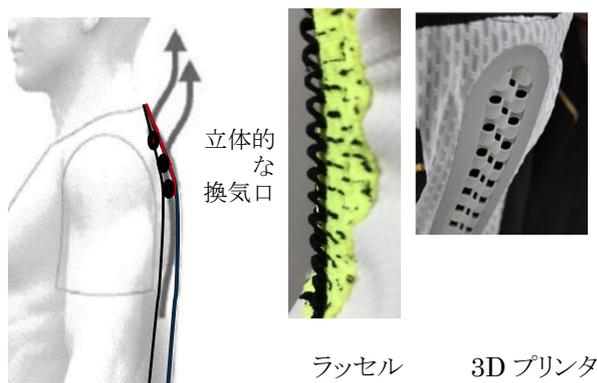


図1 背面上部の換気口

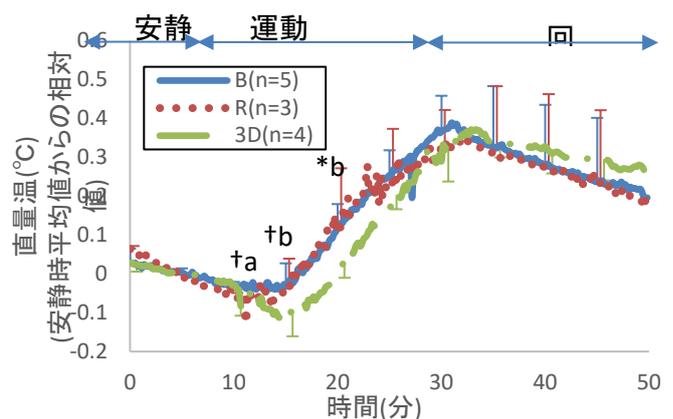


図2 直腸温の安静時の平均値からの相対値の比較  
(\*b: Bと3Dにおいて有意差がある( $p < 0.05$ ))

**【謝辞】** 本研究は文部科学省科学研究費(B)15H02888(2015-2018)およびミズノ株式会社との共同研究での助成を受けて実施した。実験ウェアの試作に関してはミズノ株式会社に共同研究の一環で試作いただいた。

被験者や実験協力者として横浜国立大学の学生の皆さんに協力いただいた。ここに記して謝意を示す。

### 3-2 暑熱環境下での日常生活環境のウェアの評価

#### 3-2-1 暑熱境下で制服用 Y シャツのデザインの工夫による熱中症予防効果

風間里恵\*, 林青紅\*, 大矢幸江\*, 薩本弥生\*\*

\*元横浜国立大学大学院, \*\*横浜国立大学

#### 【目的】

生徒が制服として着用する Y シャツは、首元までボタンをとめるタイプの Y シャツが主流である。近年、教室でエアコンを使用できる学校もあるが、暑熱環境下でクールビズを推奨する中、日中の学習環境において、エアコンに過度に頼らず着衣の工夫で温熱環境条件を適切に保つことが重要な課題となる。着衣の温熱的快適性では、着衣の熱水分移動特性が重要な役割を果たし、素材特性と着衣の構成要因が複合的に影響する。本研究では、制服用 Y シャツの襟元のデザインと脇から裾にかけてのゆとり量が Y シャツの換気や熱水分移動性および温熱的快適性におよぼす効果を明らかにすることを目的とする。

【研究方法】実験用着衣: ポリエステル 65% 綿 35% の同じ素材でデザインの異なる3種類の Y シャツ(図1)を(株)チクマに試作いただき、実験に供した。

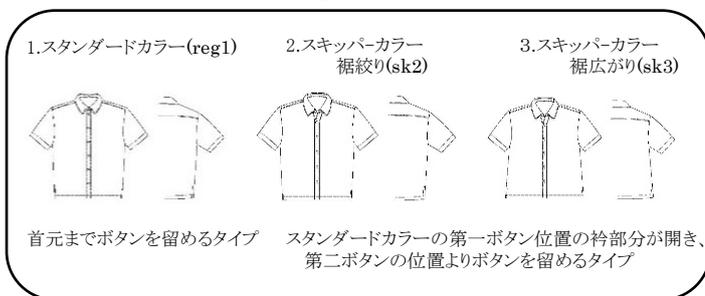


図1 制服用 Y シャツのデザインの特徴

#### 1. トレーサガス法-換気速度測定-

温度 28℃, 湿度 50%RH の人工気候室の温熱環境下でトレーサガスとして炭酸ガス(CO<sub>2</sub>)を用いて各条件の換気速度を測定した。

#### 2. 温熱的快適性評価のための温熱生理計測

温度 28℃, 湿度 50%RH の温熱環境下で、健康な成人男性 6 名を被験者とし、皮膚温 7 点, 衣服内温湿度, 熱流束などを測定した。実験手順を図2に示す。



図2 人工気候室歩行実験の手順

#### 【実験結果】

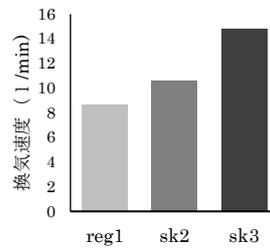


図3 換気速度比較

トレーサガス法を用いた換気実験より、Y シャツのデザインによる換気の工夫の増加が確認できた(図3)。また、温熱負荷実験より、胸部の熱通過率の増加や腹部の発汗量の増加が観察された。

さらに、Y シャツを実際に着用した被験者の主観申告からも効果的であると示された(図4)。特に運動終了 5 分後に有意に sk3 が reg1 よりもべとつき感が小さかった。

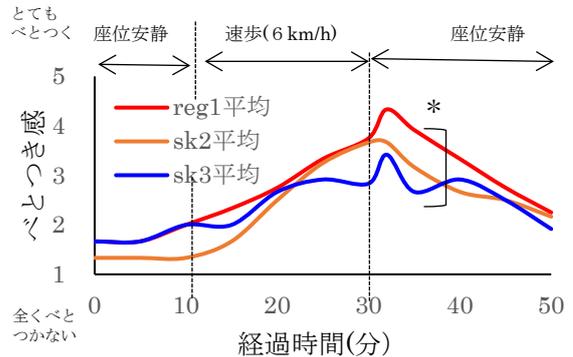


図4 べとつき感の主観申告 (\*: reg1 と sk3 において  $p < 0.05$  で有意)

#### 【まとめと今後の課題】

Y シャツデザインの工夫により放熱や汗の蒸発が促進されたと考えられる。今後、吸水性や速乾性など素材特性も合わせ、着衣の工夫で暑熱環境下における温熱環境条件を適切に保つことを学校現場で考えていく必要がある。

謝辞: 本研究は基盤研究(B)15H02888「着衣と人体生理状態を考慮した無線通信による熱中症予防支援システムの構築」(研究代表者: 薩本弥生) および(株)チクマの共同研究として実施した。ここに記して感謝の意を示す。



## 4 被服環境デザインの着衣モデルによる評価

### 4-1 サーマルマネキンによる着衣の熱水分移動性の評価（薩本・小柴）

#### 4-1-1 アウトドアパーカの蒸発熱伝達および換気性能に素材の透湿性能と換気口がおよぼす効果 —発汗サーマルマネキンを用いた模擬実験—

薩本弥生<sup>1)</sup>, 青柳卓也<sup>2)</sup>, 小柴朋子<sup>3)</sup>, 田村照子<sup>3)</sup>

<sup>1)</sup>横浜国立大学, <sup>2)</sup>横浜国立大学大学院, <sup>3)</sup>文化学園大学

### Effect of vapor permeability and opening design of outdoor parka on its water vapor transfer and ventilation rate

Yayoi Satsumoto<sup>1)</sup>, Takuya Aoyagi<sup>2)</sup>, Tomoko Koshiba<sup>3)</sup>, Teruko Tamura<sup>3)</sup>

<sup>1)</sup>Yokohama National University, <sup>2)</sup>Graduate school of Yokohama National University, <sup>3)</sup>Bunka Gakuen University, Japan

**要旨:** 本研究では暑熱に効果的な着衣の条件を検討するため、発汗サーマルマネキン、トレーサガス法を用いた実験によりアウトドアパーカ着装時の蒸発熱伝達率や換気速度にパーカの透湿特性や換気口の開口がどのように影響するかを明らかにすることを目的とした。さらに、蒸発熱伝達率と換気速度評価を同期して行い、両者を比較することで、着衣の蒸発熱移動性の評価法として換気速度からの間接的評価法の妥当性を検証することを第 2 の目的とした。素材の透湿性および換気口は立位安静で無風環境でも蒸発熱伝達率向上に有効であった。換気速度と蒸発熱伝達率には相関係数 0.68 で相関関係があることが明らかになった。

**キーワード:** 温熱的快適性, 換気速度, 蒸発熱伝達率, 換気口, アウトドア用パーカ, 発汗サーマルマネキン 1. はじめに

着衣の温熱的快適性のためには着衣の熱水分移動特性が重要な役割を果たす。熱水分移動性には素材特性と着衣の構成要因が複合的に影響する。着衣の構成要因として換気口の開口条件等が影響を与える。アウトドア用のパーカでは、人体からの不感蒸散や発汗などの水分を衣服外に放出するとともに外部からの雨を防ぐ必要がある。最近透湿防水布が用いられるため、快適性は顕著に向上したが、運動が長期で大量な発汗が生じた場合は、透湿性だけでは賄いきれない。この場合、効果的に汗を放出するためには換気を促す開口部を設けるとよい。

換気口や透湿性の効果を検討した研究として Ruckman ら (1998) [1] は換気口を設け改良したジャケット着用時のトレッドミル実験を行い、運動中は平均皮膚温に差がみられ、換気口によるふいご効果がみられることを明らかにした。しかし、この論文では換気量を実測するのではなく、平均皮膚温や総発汗量で換気量を推測するに留まっていた。手足の揺動による着衣のふいご作用による換気は、人体からの熱水分移動性を促進させる

ため、着衣の温熱快適性向上に重要であるが、現状では、上記の論文の例のように多くの論文では換気量そのものを定量的に計測する方法が規定されていない。

換気量を直接計測するトレーサガス法は Crockford ら (1972) [2] によって衣服の換気測定として導入された。Berglund ら (1997) は、おむつの換気性能をトレーサガス定常法と過渡法で実験し、比較を行った。その結果、定常法の方が再現性がよく、連続測定するのに好ましいと明らかにしている [3]。Havenith ら (2000, 2010) [4][5] は窒素と炭酸ガスの 2 つのトレーサガス法で比較実験した。結果、どちらでも換気速度の計測値の精度に遜色がないことを明らかにした。また、Havenith ら (2000) [4] はトレーサガス法の過渡法と定常法で比較実験を行い、過渡法は換気速度を算出するためにおむつ内の空気の内容積の計測が必要であり、トレーサガス法の実験と同時に容積を計測することは困難で別途計測するとしても、計測は高価で時間がかかると指摘している。また、Havenith 氏ら (2000) [4] はトレーサガス法により算出した

換気速度から蒸発熱伝達率を間接的に算出する方法を提案している。この方法は直接法よりも簡便に計測でき、着衣の熱抵抗、蒸発熱抵抗に着衣のデザインや環境の風速・歩行がどのように影響をおよぼすかについても評価が可能である。著者ら(2010)[6]はおむつの換気性能を評価する装置としてトレーサガス法の定常法を用いた装置を開発している。また、著者らは被験者実験でトレーサガス法を用いた結果を報告したが(薩本ら, 2012)[7], 動的な着衣の換気量や伝熱性能を精度良く評価するためには、被験者実験では人体の運動は個人差、時間変動が生じるため、着衣の周期的な動作を模擬する装置を用いることが重要となる。そこで着衣の熱抵抗、蒸発熱抵抗が直接計測できる発汗歩行マネキンをを用いてトレーサガス法の計測システムによる換気計測を同時に行い、換気速度、着衣の熱通過率の関係を明らかにし、それらの物性に着衣のデザインや歩行、環境の風速等がどのように影響するかを評価すること、発汗歩行サーマルマネキンをを用いて直接法で熱通過率、蒸発熱伝達率を算出し、一方で Havenith 氏の提案する間接法で評価を行い蒸発熱伝達率を算出し、両者を比較することで間接法での評価の制度を検証することを目的とする。

## 2. 方法

### 2.1 アウトドア用パーカの素材と換気口の開口条件

アウトドア用パーカの換気口のデザインはこれまでの研究により換気に効果があると考えられる配置になるよう、換気口を前面には胸部と胴部、背面には全面と同様の高さの背中と腰部に設置してあるものを帝人株式会社 に依頼して3段階の透湿性レベルの素材を用いて試作いただいた (Fig.1 参照)。実験に用いた2種のパーカの素材と模擬皮膚の諸元を Table1 に示す。素材はいずれも防水性で通気性はなく、ゴアテックスラミネートタイプの高透湿性布 (High Permeable : HP) と塩化ビニル製

の不透湿布 (Impermeable:IM) である。実験に用いたアウトドア用パーカの透湿性をカップ法ウォータ法(A-2法) (JIS-L1096,1990) により計測し、素材の剛軟性をカンチレバー法 (A 法) (JIS-L1096,1990) により計測し、その結果も Table 1 に示す。着衣の換気への換気口の開口条件を検討するため、比較のために各素材の試作パーカの換気口を閉鎖条件では閉じた (Fig.1 下段)。着衣の換気口の条件として、開口 (OP と略す)、閉鎖 (CL と略す) を条件とした。

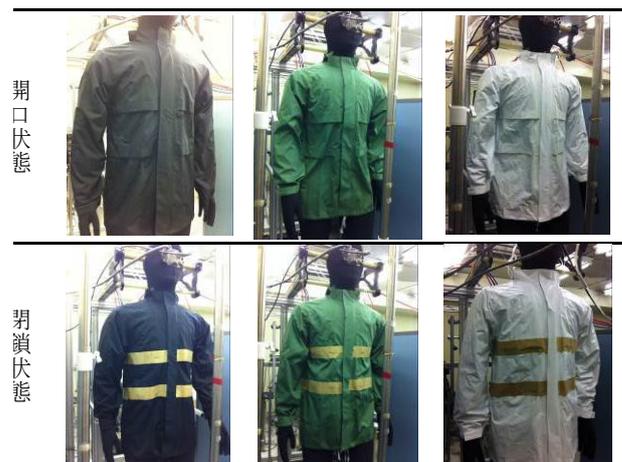


Fig.1 Variation of outdoor parker used in experiments

### 2.2 トレーサガス法

トレーサガス法 (定常法) を用いてアウトドア用パーカの換気性能を評価した。システム概念図を Fig.2 に示す。

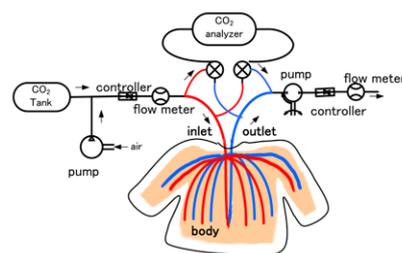


Fig.2 Schematic diagram of tracer gas system.

トレーサガスとして炭酸ガス (99.95%の純度) を用い、

Table 1 Characteristics of parker material.

Material	Thickness (mm)	Thermal conductivity (W/m/K)	Thermal resistance (K·mm <sup>2</sup> )	Air resistance (kPa·s/m)	Vapor resistance (s/m)	Bending resistance (mm)	
						Warp	weft
High permeable	0.170	0.205	3.14	∞	85.72	26.5±0.9	21.0±0.5
Middle permeable	0.270	0.175	5.02	∞	113.7	33.3±1.2	19.5±2.6
Impermeable	0.164	0.349	2.37	∞	∞	32.2±1.3	28.3±1.0
Simulated skin	0.574	0.130	7.90	∞	70.35		

マスフローコントローラー兼流量計（山武株式会社製，型式：MQV）により外気とミックスしたガスを一定炭酸ガス濃度でアウトドア用パーカ内に導入する．アウトドア用パーカ内で均等に導入されるように Inlet チューブは 8 つに分岐させ，一定の流量（0.5ml/min）で流し，それと同様の流量で同じように分岐

させ均等に配置した outlet チューブでサンプリングし，アウトドア用パーカ内と環境の炭酸ガス(CO<sub>2</sub>)濃度を計測し換気量を計測した．導入・排出経路各々分岐した 8 つのチューブはマネキンの前身頃部 2 箇所，腕部 4 箇所，後身頃部 2 箇所である．サージカルテープで身体に留めつけた．

アウトドア用パーカ内に挿入する部分のチューブはできる限り着衣内空隙を乱さないように均等分布させるためチューブの径は外径 2.0mm，内径 1.0mm の硬質チューブを用いた．また，出口から 1cm 間隔で先端から 50cm まで片側 50 か所の孔をチューブにドリルで開けてアウトドア用パーカ内でさらに均等に炭酸ガスが分布するように工夫した．トレーサガス法（定常法）ではトレーサガスをチューブで着衣したアウトドア用パーカ内の衣服内空間に分岐させた Inlet チューブで均等に分布するように一定の流量で流し，それと同様の流速で同じように分岐させ均等に配置した outlet チューブでサンプリングし，各々の位置と環境の炭酸ガス(CO<sub>2</sub>)濃度を計測し換気量を計測する．換気の指標である ventilation rate (VENT) は equation (1)で算出される．

$$VENT = V \frac{CO_{2in} - CO_{2out}}{CO_{2out} - CO_{2e}} \dots \dots \dots (1)$$

ここで，CO<sub>2in</sub>: inlet に流入する CO<sub>2</sub> の濃度 (ppm), CO<sub>2out</sub>: outlet に流出する CO<sub>2</sub> の濃度 (ppm), CO<sub>2e</sub>: 環境の CO<sub>2</sub> 濃度(ppm), V: inlet と outlet の流量 (l/min).

### 2.3 発汗サーマルマネキン

発汗サーマルマネキンの京都電子工業株式会社製で総体表面積は 1.0m<sup>2</sup> で○分割されており，各々温度センサと発熱抵抗線が埋め込まれている．制御ソフトでゾーン毎に表面温を±0.1℃で精密に制御できる．サイズは成人日本人男性の平均の体格である．Fig.3 に発汗マネキンに実験用アウトドアパーカを着装させた様子を示す．



A 透湿パーカ着装時                      B 不透湿パーカ着装時

Fig.3 発汗マネキンのアウトドアパーカ着装様子

### 2.4 実験手順

34℃，45%に設定した人工気候室で実験を行った．発汗マネキンの模擬皮膚の濡れ率を 1 に保ち，その上からゴアテックスの透湿性のある模擬皮膚を上に着せ人体の不感蒸散を模擬し，表面温度を環境温と等温条件の 34℃に保つことにより顕熱移動をなくすように制御した．マネキンは立位のみで，パーカは 2 種類（HP, IM），換気口の開口と閉鎖の 2 条件で計 4 条件の実験を 3 回の繰り返して，計 12 条件で行った．マネキンの表面温度が安定したところで実験を開始し，衣服内湿度と換気速度を 30 分間計測した．

### 2.5 直接法と間接法による蒸発熱伝達率の算定

Havenith の提案する間接法により蒸発熱伝達率が算出できる．直接法での算出により，素材や換気口条件が蒸発熱伝達率に及ぼす効果を比較する．また，直接法と間接法で導き出した値を比較し間接法の有用性を検証する．

パーカは IM(透湿性なし)と HP(高透湿)を使用し，発汗マネキンを用いて検証を行う．

### 2.5 解析方法

直接法で蒸発熱伝達率は equation(2)で算出される。

$$\text{直接法} \quad h_e = \frac{L \cdot m}{C_{sk} - C_e} \cdot \dots \cdot (2)$$

ここで  $h_e$ :蒸発熱伝達率  $L$ :潜熱係数 (2430 J/g)  $m$ :マネキン皮膚表面からの水蒸気蒸発速度(g/m<sup>2</sup>/s)  $C_{sk}$ :衣服内の絶対湿度(g/m<sup>3</sup>)

$C_e$ :環境の絶対湿度(g/m<sup>3</sup>)

間接法で蒸発熱伝達率は equation(3)で算出される。

$$\text{間接法} \quad h_e = \frac{L \cdot m \cdot VENT \cdot 0.001}{A_{sk} \cdot 60} \cdot \dots \cdot (3)$$

ここで  $VENT$ :換気速度(L/min)  $A_{sk}$ :マネキンの体表面積

蒸発熱伝達率や換気速度に素材, 開口の2要因が有意に寄与するかを SPSSVer.20 を用い, 平均値の差の検定あるいは分散分析で解析した。

### 3. 結果

#### 3.1 換気速度の結果

換気速度の結果について素材条件・開口条件の比較を Fig. 4 に示す。

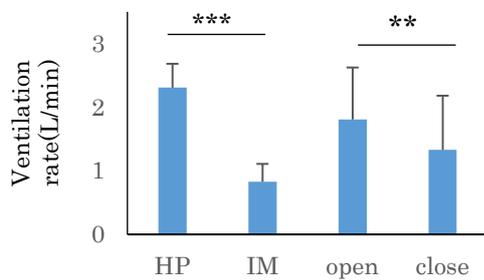


Fig.4 換気速度に素材・換気口の開口条件が及ぼす影響

Fig.4 より, HP が IM よりも換気速度が高値を示す結果となった。透湿性がある素材が CO<sub>2</sub> を通すため, 透湿性なしの IM と高透湿の HP 素材で同じデザインでも差が生じ, 有意差が認められたと考えられる。

Fig.4 より, 換気口の開口条件でも有意差が認められ, 開口が閉鎖よりも有意に高値を示した。立位安静条件でも前部・背部と開口することにより換気速度に影響を与えることが明らかとなった。

#### 3.2 蒸発熱伝達率の結果

蒸発熱伝達率の結果について, 直接法・間接法によ

り算出した結果を素材, 開口条件別に各々 Fig.5, Fig.6 に示す。

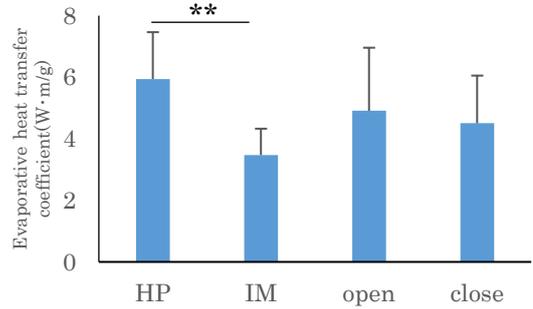


Fig.5 蒸発熱伝達率に素材・換気口の開口条件が及ぼす影響 (直接法) \*\*:  $P < 0.01$

Fig.5 より, 直接法による蒸発熱伝達率は HP の方が IM よりも有意に高値を示す結果となった。両パーカの透湿抵抗の違いが蒸発熱伝達率に影響を及ぼしたと考えられる。換気口の開口条件では有意差は認められなかったが平均値は開口が閉鎖よりも高値を示した。

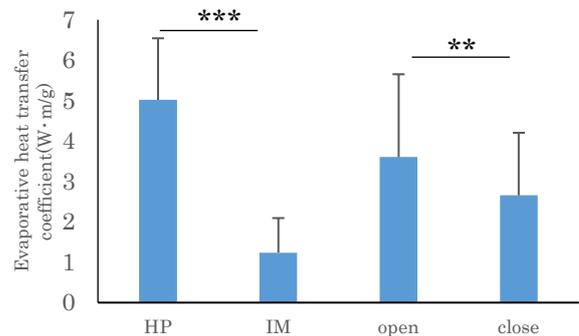


Fig.6 蒸発熱伝達率に素材・開口部の開口条件が及ぼす影響 (間接法) \*\*\*:

$P < 0.001$ , \*\*:  $P < 0.01$

Fig.6 より, 間接法による蒸発熱伝達率も HP が IM よりも高値を示し, 有意差が認められた。換気口の開口条件でも有意差が認められ, 開口が閉鎖よりも有意に高値を示した。立位安静条件でも前部・背部と開口することにより蒸発熱伝達率に影響を与える結果となった。これは, 換気速度が HP の方が大きく, それが顕著に反映された結果と考える。

#### 3.3 蒸発熱伝達率の直接法と間接法の比較

各素材条件における直接法・間接法により算出した



同様の結果が得られるか検証する必要がある。

#### 謝辞

本研究は科学研究費補助金一般研究 B(15H02888)平成 27-30 年の助成により実施した。お礼申し上げます。また、本実験の遂行のため重要な位置を占める発汗サーマルマネキンの使用に当たりご助力いただきました文化学園大学の傳法谷氏に感謝いたします。日本家政学会第 69 回大会で発表した。

#### 文献

- [1]J.E. Ruckman and R. Murray, 1998. Engineering of clothing systems for improved thermophysiological comfort The effect of openings. International Journal of Clothing Science and Technology. vol. 11
- [2]Crockford, G.W., M. Growder, and S.P. Prestidge, S.P., “A tracer gas technique for measuring clothing microclimate air exchange rates”, Brit, J. Indust. Med. 29, 378-386 (1972)
- [3]Berglund, L.G. and Akin, F. J., “Measurement of air

exchange in diapers by tracer gas methods”, TAPPI J., 80(9), 173-178 (1997)

- [4]Havenith, G. and Zhang, P., “Comparison of Different Tracer Gas Dilution Methods For The Determination of Clothing Vapour Resistance”, EPSRC Report on Project GR/N10509/01 (2000)
  - [5]Havenith, G. Ping Zhang, Kent Hatcher and Hein Daanen, “Comparison of two tracer gas dilution methods for the determination of clothing ventilation and of vapour resistance”, submitted to ergonomics (2010).
  - [6]Satsumoto, Y., and Havenith, G., 2010, Evaluation of overall and local ventilation in diapers, Textile Research Journal, 80(17): 1859/1871.
  - [7]薩本弥生, 劉雨, 福山照芳, 尾川晃一, 山本晃, レインコートの換気性能に素材の透湿性や換気口がおよぼす効果, HES36 要旨集(2012)
  - [6]薩本弥生, 川村友希, 杉本千佳: 暑熱環境下で熱中症予防に適した剣道用稽古着の検討服装と熱中症, 繊維製品消費科学会, 54(3),20-30(2013)
-

#### 4-1-2 着衣の素材およびデザインと風，歩行の熱移動および換気への効果（薩本・小柴）

### Effect of Vapor Permeability and Aperture of Outdoor Parka and Environmental Velocity on Evaporative Heat Transfer and Ventilation rate

-Using sweating thermal manikin and tracer gas methods-

Yayoi Satsumoto<sup>1</sup>, Takuya Aoyagi<sup>2</sup>, Ayano Dempoya<sup>3</sup>, Tomoko Koshiba<sup>4</sup>, Teruko Tamura<sup>4</sup>

<sup>1</sup> College of Education and Human Sciences, Yokohama National University, <sup>2</sup>Former Student of Graduate school of Yokohama National University, <sup>3</sup>Department of Architecture, Faculty of Engineering, <sup>4</sup>Department of Fashion technology, Bunka Gakuen University

**AIM:** This study aims to find out the effect of vapor permeability and aperture of outdoor parka and environmental velocity on its heat and vapor transfer and ventilation rate. Experiments using sweating thermal manikin and tracer gas method was conducted.

**METHODS:** To make clear the effect of the aperture and the vapor permeability of the material, outdoor parkas were made whose vapor permeable levels are 3 levels (high permeable HP, middle permeable MP, impermeable IM) and whose aperture can be changed open or closed. To make the reproducibility improve heat and vapor transfer, a sweating thermal manikin was used. The ventilation rates were estimated using tracer gas method concurrently. To make the influence of the wind velocity of the environment clear, ventilation rate was measured at wind velocity 0, 0.5 and 1.0m/s.

**RESULTS:** It was found that the vapor permeability of the material and the apertures were effective in improvement of evaporative heat transfer and there was a correlation in ventilation rate and evaporative heat transfer in correlation of 0.85 except for MP. When the permeability of the material for carbon dioxide were estimated, it became clear that the MP was impermeable for carbon dioxide. The indirect evaluation method of evaporative heat transfer from ventilation rate by tracer gas method can be applied except MP. Contribution of vapor permeability of the material was big and the influence of the aperture was small up to 0.5m/s, but the effect of the aperture equaled vapor permeability in 1.0m/s, and it became conspicuous. There was correlation in the wind velocity of the environment for ventilation rate.

**CONCLUSION:** It was found out that the vapor permeability and the apertures of outdoor parka were effective on its vapor transfer and ventilation rate by experiments using sweating thermal manikin and tracer gas methods. The validity of the indirect evaluation method of evaporative heat transfer from ventilation rate by tracer gas method was verified except MP which was impermeable for carbon dioxide but permeable for vapor. There was correlation in the wind velocity of the environment for ventilation rate. Contribution of vapor permeability of the material was big to 0.5m/s, and the influence of the aperture was small, but the effect of the aperture equaled vapor permeability in 1.0m/s.

#### ACKNOWLEDGMENT

繊維学会 International fiber conference にて発表した。

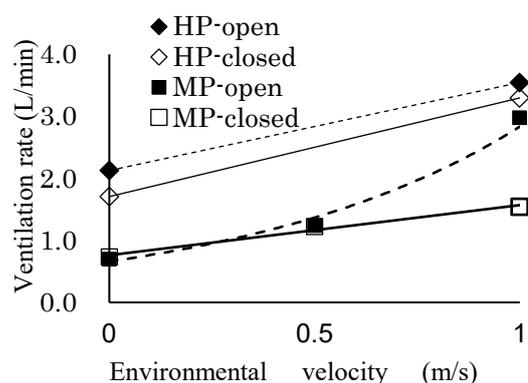


Fig.1 Relation between environmental velocity & ventilation rate

## 4-2 防護服着用を想定した Wet Bulb Globe Temperature の補正 Expansion of Effective Wet Bulb Globe Temperature for Vapor Impermeable Protective Clothing

佐古井 智紀<sup>a\*</sup>, 持田 徹<sup>b</sup>, 藏澄美仁<sup>c</sup>, 澤田 晋一<sup>d</sup>, 堀場洋輔<sup>a</sup>, 栗原浩平<sup>e</sup>

Tomonori SAKOI<sup>a\*</sup>, Tohru MOCHIDA<sup>b</sup>, Yoshihito KURAZUMI<sup>c</sup>, Shin-ichi SAWADA<sup>d</sup>, Yohsuke HORIBA<sup>a</sup>,  
and Kohei KUWABARA<sup>e</sup>

<sup>a</sup>Institute of Textile Science and Technology, Academic Assembly, Shinshu University, <sup>b</sup>Hokkaido University, <sup>c</sup>School of Life Studies, Sugiyama Jogakuen University, <sup>d</sup>Hazard Evaluation and Epidemiology Research Group, National Institute of Occupational Safety and Health, <sup>e</sup>National Institute of Technology, Kushiro College,

Corresponding author: Tomonori Sakoi, t-sakoi@shinshu-u.ac.jp

**Abstract:** The wet bulb globe temperature (WBGT) is an effective measure for risk screening to prevent heat disorders. However, a heat risk evaluation by WBGT requires adjustments depending on the clothing. In this study, we proposed a new effective WBGT ( $WBGT_{eff}^*$ ) for general vapor permeable clothing ensembles and vapor impermeable protective clothing that is applicable to occupants engaged in moderate intensity work with a metabolic heat production value of around 174 W/m<sup>2</sup>.  $WBGT_{eff}^*$  enables the conversion of heat stress into the scale experienced by the occupant dressed in the basic clothing ensemble (work clothes) based on the heat balances for a human body. We confirmed that  $WBGT_{eff}^*$  was effective for expressing the critical thermal environments for the prescriptive zones for occupants wearing vapor impermeable protective clothing. Based on  $WBGT_{eff}^*$ , we succeeded in clarifying how the weights for natural wet bulb, globe, and air temperatures and the intercept changed depending on clothing properties and the surrounding environmental factors when heat stress is expressed by the weighted sum of natural wet bulb, globe, and air temperatures and the intercept. The weight of environmental temperatures (globe and air temperatures) for  $WBGT_{eff}^*$  for vapor impermeable protective clothing increased compared with that for general vapor permeable clothing, whereas that of the natural wet bulb temperature decreased. For  $WBGT_{eff}^*$  in outdoor conditions with a solar load, the weighting ratio of globe temperature increased and that of air temperature decreased with air velocity. Approximation equations of  $WBGT_{eff}^*$  were proposed for both general vapor permeable clothing ensembles and for vapor impermeable protective clothing.

**Key words:** Heat stress, Protective clothing, Occupational environment, Wet bulb globe temperature, Solar radiation, Air velocity, Clothing vapor permeability

要旨

熱中症予防のためのリスクスクリーニングにはWBGTが有効な指標となる。しかし、WBGTによる暑熱リスク評価は、着衣による補正が必要である。そこで本研究では、代謝熱生産量が174W/m<sup>2</sup>程度の中強度作業に従事する者に適用可能な、一般的な透湿性のある着衣と不透湿防護服向けの新しい有効 WBGT ( $WBGT_{eff}^*$ )を提案した。 $WBGT_{eff}^*$ は、人体の熱収支に基づき、基本アンサンブル(作業服)を着用した者が受ける熱ストレスのレベルに換算することが可能である。 $WBGT_{eff}^*$ は、不透湿性防護服を着用した者の規定区域の臨界熱環境を表現するのに有効であることを確認した。 $WBGT_{eff}^*$ に基づき、熱ストレスを自然湿球温度、グローブ温、気温、切片で表した場合、衣服の特性や周辺環境因子によって自然湿球温度、グローブ温、気温の加重がどのように変化するかを明らかにすることに成功した。不透湿性防護服着用時の  $WBGT_{eff}^*$ は、日常的な着衣と比べて環境温(気温と黒球)の重みが増加し、湿球の重みは減少した。日射負荷のある屋外での  $WBGT_{eff}^*$ は、風速が大きくなると、黒球温の割合が増加し、気温の割合が減少することがわかった。 $WBGT_{eff}^*$ の予測式が日常の透湿性のある着衣向けと不透湿の防護服向けに提案された。

1 はじめに

WBGT (Wet Bulb Globe Temperature) は、軍事訓練センターでの熱中症を防ぐために、Yaglou と Minard (1957) によって提案された。日射負荷のない建物内外(日陰)の WBGT は、式(1)に示すように、自然湿球温度( $T_w$ )と黒球温度( $T_g$ )の加重平均によって与えられる。日射負荷のある建物外部(晴天)の WBGT は、 $T_w$ ,  $T_g$ , および気温( $T_a$ )の加重平均で、式(2)により与えられる。

$$WBGT = 0.7 T_w + 0.3 T_g \quad (1)$$

$$WBGT = 0.7 T_w + 0.2 T_g + 0.1 T_a \quad (2)$$

これらの簡単な計算により、WBGT を職業環境におけるリスクスクリーニングに利用することができる。WBGT は、

米国労働安全衛生研究所基準(NIOSH, 2016), 国際標準化機構基準(ISO, 2017), 米国産業衛生専門家会議(ACGIH, 2015)の閾値限界値内で熱ストレスの指標として採用されている。

WBGT による熱ストレス評価では, 着用する衣服によって調整が必要である。一般的な透湿性衣服アンサンブル(透湿性)の場合, 着用する衣服の調整係数(AF)を加減することでのみ調整が可能である(ACGHI, 2009, 2015; Bernard and Ashley, 2009; Bernard et al., 2005, 2008; ISO, 2017; Kenney, 1987; NIOSH, 2016; Ramsey, 1978)。なお, 現在, AF は衣服調整値と呼ばれている(ISO, 2017)。基本的なアンサンブル(作業服: 長袖シャツとズボン)を着用した者の WBGT で表される熱ストレス尺度は, 実効 WBGT ( $WBGT_{eff}$ )として知られている(ACGHI, 2009, 2015; Bernard and Ashley, 2009)。 $WBGT_{eff}$  は, WBGT と AF を用いて式(3)で与えられる。

$$WBGT_{eff} = WBGT + AF \quad (3)$$

しかし,  $WBGT_{eff}$  を決定するための調整手順は, 不透湿性防護服(imperm)の場合, 複雑である。imperm の場合, 居住者に熱ストレスを与える際の湿度と環境温度の相対的な影響度が perm の場合とは異なる。そのため, imperm の AF は湿度によって異なる(Bernard et al., 2005)。imperm の AF を単一の値で与えてしまうと, その値は衣服の AF が最大となり, 熱ストレスが過大評価され, 保守的な熱ストレス評価となる。

我々は, 先行研究(Sakoi et al., 2018)において,  $WBGT_{eff}$ と同じ形を持つ人体の熱収支モデルを提案した。提案したモデルに基づき,  $T_g$  と  $T_a$  の加重比の決定要因を説明することに成功し, 代謝熱生産値  $174 \text{ W/m}^2$  程度の中強度作業に従事する居住者の AF の決定方法を提案した。そして, 衣服の熱・水分移動特性と風速( $v$ )を用いて決定できる AF を加えるだけで, 透湿性着衣用の WBGT の調整が可能であることを確認した。決定した AF は, これまで報告されている人体応答観測で得られた AF と比較し, 検証した。しかし, WBGT の不透湿性防護服(imperm)に対する調整は, 単に AF を追加するだけでは実現できない。そこで,  $WBGT_{eff}$  の  $T_w, T_g, T_a$  の重みを同時に調整する必要があると結論づけた。

本研究では, 代謝熱生産量が  $174 \text{ W/m}^2$  程度の中強度労働に従事する居住者の perm と imperm の両方について  $WBGT_{eff}$  式を提案した。これらは WBGT と同じ形で人体の熱収支モデルに基づいて導出されているため, 従来の  $WBGT_{eff}$  と区別するために, 新しい有効湿球地球 温度( $WBGT_{eff}^*$ )と呼ぶことにした。 $WBGT_{eff}^*$  の imperm 用を perm 用の  $WBGT_{eff}^*$  と比較することにより, その特徴を明らかにした。

## Introduction

The wet bulb globe temperature (WBGT) was proposed by Yaglou and Minard (1957) to prevent heat casualties at military training centers. The WBGT inside or outside buildings without a solar load (*shady*) is given by the weighted average of the natural wet bulb temperature ( $T_w$ ) and the black globe temperature ( $T_g$ ) as shown in Eq. (1). The WBGT outside buildings with a solar load (*sunny*) is given by Eq. (2), with the weighted average of  $T_w, T_g$ , and air temperature ( $T_a$ ).

$$WBGT = 0.7 T_w + 0.3 T_g \quad (1)$$

$$WBGT = 0.7 T_w + 0.2 T_g + 0.1 T_a \quad (2)$$

These simple calculations enable the use of WBGT for risk screening in occupational environments. The WBGT has been adopted as a measure of heat stress within the National Institute for Occupational Safety and Health criteria (NIOSH, 2016), the International Organization for Standardization standard (ISO, 2017), and the threshold limit value of the American Conference of Governmental Industrial Hygienists (ACGIH, 2015).

Heat stress evaluations by WBGT require adjustments depending on the clothing worn. For general vapor permeable clothing ensembles (*perm*), adjustments can be achieved only by adding or subtracting the adjustment factor (*AF*) of the clothing worn (ACGHI, 2009, 2015; Bernard and Ashley, 2009; Bernard et al., 2005, 2008; ISO, 2017; Kenney, 1987; NIOSH, 2016; Ramsey, 1978). It is worth noting that the *AF* is currently referred to as the clothing adjustment value (ISO, 2017). The heat stress scale expressed in WBGT for an occupant wearing basic clothing (work uniform: long-sleeved shirts and pants) is known as the effective WBGT ( $WBGT_{eff}$ ) (ACGHI, 2009, 2015; Bernard and Ashley, 2009). The  $WBGT_{eff}$  is given by Eq. (3) using WBGT and *AF*.

$$WBGT_{eff} = WBGT + AF \quad (3)$$

However, the adjustment procedure to determine  $WBGT_{eff}$  is complex for vapor impermeable protective clothing (*imperm*). For *imperm*, the relative influence of humidity and environmental temperature during heat stress imposed on occupants is different from that for *perm*. Therefore, the *AF* for *imperm* differs depending on humidity (Bernard et al.,

2005). If the  $AF$  for *imper* is given by a single value, the value is the largest  $AF$  for the clothing, and this will result in the overestimation of heat stress and conservative heat stress evaluations.

In our previous study (Sakoi et al., 2018), we proposed heat balance models for the human body that have the same form as the  $WBGT_{\text{eff}}$ . Based on the proposed models, we succeeded in explaining the determinants of the weighting ratio between  $T_g$  and  $T_a$  and proposed a determination method of  $AF$  for the occupants engaged in moderate intensity work with a metabolic heat production value of around  $174 \text{ W/m}^2$ . We then confirmed that the adjustment of  $WBGT$  for *perm* can be achieved simply by adding the  $AF$ , which can be determined by using the heat and vapor transfer properties of clothing and air velocity ( $v$ ). The determined  $AF$  was validated through comparisons with the previously reported  $AF$  obtained through human response observations. However, the adjustment of  $WBGT$  for *imper* cannot be achieved by simply adding an  $AF$ . We thus concluded that the weights of  $T_w$ ,  $T_g$ , and  $T_a$  of  $WBGT_{\text{eff}}$  need to be adjusted simultaneously.

In this study, we proposed  $WBGT_{\text{eff}}$  formulas for both *perm* and *imper* for occupants engaged in moderate intensity work with a metabolic heat production value of around  $174 \text{ W/m}^2$ . Because they are derived based on the heat balance models for the human body in the same form as the  $WBGT$ , we refer to them as new effective wet bulb globe temperatures ( $WBGT_{\text{eff}}^*$ ) to distinguish them from the existing  $WBGT_{\text{eff}}$ . We clarified the characteristics of  $WBGT_{\text{eff}}^*$  for *imper* by comparing it to  $WBGT_{\text{eff}}^*$  for *perm*.

## 2 方法

人体と環境の間の熱収支式を基にぬれ率を一定(0.45)と近似して、皮膚温の上昇度合いを  $WBGT$  と同様、自然湿球温度  $T_w$ 、黒球温度  $T_g$ 、気温  $T_a$  による線形和と切片の形で表した式<sup>2)</sup>を用いる。この式の出力は一定の係数と定数による皮膚温の一次式となり、上限  $WBGT$  が明示されている夏期の作業着条件において既存の  $WBGT$  と完全に一致する。平均放射温や湿度などを既存の  $WBGT$  の変数で置換し、加減乗除により変形した人体の熱収支式である。

日常着衣および非透湿性防護服の両条件に対して深部体温を維持できる上限の温湿度条件が報告<sup>3)</sup>されている。この式の妥当性を、日常着衣の熱・湿気輸送特性、日常着衣での上限温湿度条件を代入して得られる出力と非透湿性防護服の熱・湿気輸送特性、上限温湿度条件を入力して得られる出力の比較から検証する。

妥当性を確認した上で、防護服着用時の補正  $WBGT$  式が日常衣服を対象とする既存  $WBGT$  式と如何に異なるかを、 $T_w$ 、 $T_g$ 、 $T_a$  による線形和と切片の具体値を基に示していく。

熱収支に基づく新しい有効な  $WBGT$  方程式を提案

先行研究 (Sakoi et al, 2018) で述べたように、日陰の場合の人体熱収支式は式 (4)、日向の場合のそれは式 (5) で表すことができる。

## Methods

### New effective $WBGT$ equations proposed based on heat balances

As described in our previous study (Sakoi et al., 2018), the human body heat balance equation for *shady* conditions can be expressed by Eq. (4) and that for *sunny* conditions by Eq. (5).

$$WBGT_{\text{effT}} = \frac{\eta_{is}}{\alpha_{is} + \beta_{is}} T_{sk} + \frac{S - \delta_{is}}{\alpha_{is} + \beta_{is}} = \alpha_i^{**} T_w + \beta_i^{**} T_g + AF_i^{**} \quad (4)$$

$$\text{provided that } \alpha_i^{**} = \frac{\eta_{is}}{\alpha_{is} + \beta_{is}} \frac{\alpha_i}{\eta_i}, \quad \beta_i^{**} = \frac{\eta_{is}}{\alpha_{is} + \beta_{is}} \frac{\beta_i}{\eta_i}, \quad AF_i^{**} = \frac{\eta_{is}}{\alpha_{is} + \beta_{is}} \left( \frac{\delta_i - S}{\eta_i} - \frac{\delta_{is} - S}{\eta_{is}} \right)$$

$$WBGT_{\text{effT}} = \frac{\eta_{is}}{\alpha_{is} + \beta_{is}} T_{sk} + \frac{S - \delta_{is}}{\alpha_{is} + \beta_{is}} = \alpha_o^{**} T_w + \beta_o^{**} T_g + \gamma_o^{**} T_a + AF_o^{**} \quad (5)$$

$$\text{provided that } \alpha_o^{**} = \frac{\eta_{is}}{\alpha_{is} + \beta_{is}} \frac{\alpha_o}{\eta_o}, \quad \beta_o^{**} = \frac{\eta_{is}}{\alpha_{is} + \beta_{is}} \frac{\beta_o}{\eta_o}, \quad \gamma_o^{**} = \frac{\eta_{is}}{\alpha_{is} + \beta_{is}} \frac{\gamma_o}{\eta_o},$$

$$AF_o^{**} = \frac{\eta_{is}}{\alpha_{is} + \beta_{is}} \left( \frac{\delta_o - S}{\eta_o} - \frac{\delta_{is} - S}{\eta_{is}} \right)$$

ここで、 $T_{sk}$  は皮膚温(°C)、 $S$  は人体の蓄熱量(°C)、 $WBGT_{\text{eff}}$  は皮膚温上昇の指数である。式(4)において、 $\alpha_i$  と  $\beta_i$  は、それぞれ式(6)と式(7)で与えられる  $S(\text{W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C})$  に対する正の寄与を表す  $T_w$  と  $T_g$  の重み。 $\eta_i$  は、式(9)で与えられる  $S(\text{W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C})$  に対する負の寄与を表す  $T_{sk}$  の重みである。 $\delta_i$  は、 $T_w$ 、 $T_g$ 、 $T_{sk}$  から独立したパラメータで、式(8)で与えられる  $S(\text{W/m}^2)$  を表現している。式(5)において、 $\alpha_o$ 、 $\beta_o$ 、 $\gamma_o$  は、それぞれ式(10)～(12)で与えられる  $S(\text{W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C})$  に対する正の寄与を表す  $T_w$ 、 $T_g$ 、 $T_a$  の重みである。 $\eta_o$  は式(14)で与えられる  $S(\text{W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C})$  に対する負の寄与を表す  $T_{sk}$  の重みである。 $\delta_o$  は、 $T_w$ 、 $T_g$ 、 $T_a$ 、 $T_{sk}$  から独立したパラメータで、式(13)で与えられる  $S(\text{W/m}^2)$  を表現するものである。これらの値はすべて、人体、自然湿球温度計、黒球温度計の熱収支式に用いられている特性を用いて求めることができる。式(4)、(5)において、 $\alpha_{is}$ 、 $\beta_{is}$ 、 $\delta_{is}$ 、 $\eta_{is}$  はそれぞれ、WBGT調整の基本服(作業着)について、等温環境下で  $v$  値が 0.2 から 0.5 m/s の範囲で求めた  $\alpha_i$ 、 $\beta_i$ 、 $\delta_i$ 、 $\eta_i$  の平均値である。決定された  $\alpha_{is}$ 、 $\beta_{is}$ 、 $\delta_{is}$ 、 $\eta_{is}$  の値は、それぞれ 14.3 W/(m<sup>2</sup> °C)、5.8 W/(m<sup>2</sup> °C)、273 W/m<sup>2</sup>、23.3 W/(m<sup>2</sup> °C)であった。

where  $T_{sk}$  is the skin temperature (°C);  $S$  is the heat storage rate of the human body (°C); and  $WBGT_{\text{eff}}$  is the index of the rise in skin temperature. In Eq. (4),  $\alpha_i$  and  $\beta_i$  are the weights of  $T_w$  and  $T_g$  that express their positive contributions on  $S(\text{W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C})$  given by Eqs. (6) and (7), respectively.  $\eta_i$  is the weight of  $T_{sk}$  that expresses its negative contribution on  $S(\text{W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C})$  given by Eq. (9).  $\delta_i$  is the independent parameter from  $T_w$ ,  $T_g$ , and  $T_{sk}$  that expresses  $S(\text{W/m}^2)$  given by Eq. (8). In Eq. (5),  $\alpha_o$ ,  $\beta_o$ , and  $\gamma_o$  are the weights of  $T_w$ ,  $T_g$ , and  $T_a$  that express their positive contributions on  $S(\text{W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C})$  given by Eqs. (10)–(12), respectively.  $\eta_o$  is the weight of  $T_{sk}$  that expresses its negative contribution on  $S(\text{W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C})$  given by Eq. (14).  $\delta_o$  is the independent parameter from  $T_w$ ,  $T_g$ ,  $T_a$ , and  $T_{sk}$  that expresses  $S(\text{W/m}^2)$  given by Eq. (13). All these values can be determined by using the properties used in the heat balance equations for the human body, natural wet bulb thermometer, and black globe thermometer. In Eqs. (4) and (5),  $\alpha_{is}$ ,  $\beta_{is}$ ,  $\delta_{is}$ , and  $\eta_{is}$  are the mean values of  $\alpha_i$ ,  $\beta_i$ ,  $\delta_i$ , and  $\eta_i$ , respectively, which are determined for the basic clothing of WBGT adjustments (the work uniform) for  $v$  values ranging from 0.2 to 0.5 m/s in an isothermal environment. The determined  $\alpha_{is}$ ,  $\beta_{is}$ ,  $\delta_{is}$ , and  $\eta_{is}$  values were 14.3 W/(m<sup>2</sup> °C), 5.8 W/(m<sup>2</sup> °C), 273 W/m<sup>2</sup>, and 23.3 W/(m<sup>2</sup> °C), respectively.

$$\alpha_i = \frac{(h'_c + h'_r + LRh'_c \kappa') (LRh'_c F_{pcl} f_{cl} w + 0.0173M)}{LRh'_c} \quad (6)$$

$$\beta_i = f_{cl} F_{cl} (h_c + h_r) + 0.0014M - \frac{(LRh'_c F_{pcl} f_{cl} w + 0.0173M)}{LRh'_c} (h'_c + h'_r) \quad (7)$$

$$\delta_i = \left[ \begin{array}{l} f_{cl} F_{cl} \left( h_c - \frac{h''_c}{h_r} h_r \right) + 0.0014M \\ + \frac{(LRh'_c F_{pcl} f_{cl} w + 0.0173M)}{LRh'_c} \left( -h'_c + \frac{h''_c}{h_r} h_r \right) \end{array} \right] \Delta T \quad (8)$$

$$- LRh'_c F_{pcl} f_{cl} w (\zeta - \zeta') + M \left[ 1 - 0.0014 \cdot 35 - 0.0173 \cdot (5.624 - \zeta') \right] - W$$

$$\eta_i = (h'_c + h'_r) f_{cl} F_{cl} + LRh'_c F_{pcl} f_{cl} \kappa w \quad (9)$$

$$\text{provided that } \Delta T = - \frac{h''_r}{h''_c + h''_r} (T_r - T_a)$$

$$\alpha_o = \frac{(h'_c + h'_r + LRh'_c \kappa') (LRh'_c F_{pcl} f_{cl} w + 0.0173M)}{LRh'_c} \quad (10)$$

$$\beta_o = \left( \frac{h_c'' + h_r''}{h_r''} \right) \left[ f_{cl} F_{cl} h_r \theta - h_r' \theta' \frac{(LR h_c F_{pcl} f_{cl} w + 0.0173M)}{LR h_c'} \right] \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \gamma_o = f_{cl} F_{cl} \left[ (h_c + h_r) - \left( \frac{h_c'' + h_r''}{h_r''} \right) h_r \theta \right] + 0.0014M \\ + \left[ \left( \frac{h_c'' + h_r''}{h_r''} \right) h_r' \theta' - (h_c' + h_r') \right] \frac{(LR h_c F_{pcl} f_{cl} w + 0.0173M)}{LR h_c'} \end{aligned} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} \delta_o = \left( \frac{h_c'' + h_r''}{h_r''} \right) \left[ \frac{h_r f_{cl} F_{cl} (1 - \theta)}{LR h_c'} - \frac{(LR h_c F_{pcl} f_{cl} w + 0.0173M)}{LR h_c'} h_r' (1 - \theta') \right] \Delta T' \\ - LR h_c F_{pcl} f_{cl} w (\zeta - \zeta') + M [1 - 0.0014 \cdot 35 - 0.0173 (5.624 - \zeta')] - W \end{aligned} \quad (13)$$

$$\eta_o = (h_c + h_r) f_{cl} F_{cl} + LR h_c F_{pcl} f_{cl} \kappa w \quad (14)$$

$$\text{provided that } \Delta T' = \frac{h_r''}{h_c'' + h_r''} (T_r - T_a), \quad \theta = \frac{\varepsilon_r' h_r''}{\varepsilon_B'' h_r' f_r''}, \quad \theta' = \frac{\varepsilon_w' f_r' h_r''}{\varepsilon_B'' h_r' f_r''}$$

ここで、 $f_{cl}$  は衣服面積係数(無次元(ND)),  $F_{cl}$  及び  $F_{pcl}$  はそれぞれ衣服熱伝達係数及び衣服蒸気伝達係数(ND),  $f_r$ ,  $f_r'$ , 及び  $f_r''$  はそれぞれ人体の外表面, 自然の湿球温度計, 及び地球儀温度計に対する実効放射面積係数(ND)である。 $h_c$ ,  $h_c'$ ,  $h_c''$  はそれぞれ人体, 自然湿球温度計, 地球儀温度計の対流熱伝達係数( $W/(m^2 \cdot ^\circ C)$ )である。 $h_r$ ,  $h_r'$ ,  $h_r''$  はそれぞれ人体, 自然湿球温度計, 地球儀温度計の線形放射熱伝達係数( $W/(m^2 \cdot ^\circ C)$ );  $LR$  はルイス比( $^\circ C/kPa$ );  $M$  は代謝率( $W/m^2$ );  $T_r$  は平均放射温度(太陽の影響なし)( $^\circ C$ );  $w$  は皮膚湿潤(ND)です。 $W$  は外的仕事 ( $W/m^2$ );  $\Delta T$  および  $\Delta T'$  は  $T_a$  と比較しての長波放射による作業温度の増加分 ( $^\circ C$ ) です。 $\varepsilon$ ,  $\varepsilon_w'$ ,  $\varepsilon_B''$  はそれぞれ人体外面, 自然湿球温度計, 黒球温度計の太陽吸収効率(ND);  $\zeta$ ,  $\zeta'$  はそれぞれ  $T_{sk}$ ,  $T_w$  における飽和蒸気圧(kPa)の線形近似式の切片である。 $\theta$  及び  $\theta'$  は, 人体又は自然湿球温度計の操作温度に対する日射の影響を, それぞれ  $T_g$  及び  $T_a$  (ND)の加重平均で表した  $T_g$  の加重比,  $\kappa$  及び  $\kappa'$  は, それぞれ  $T_{sk}$  及び  $T_w$  の飽和蒸気圧(kPa/ $^\circ C$ )の線形近似式の傾きである。

where  $f_{cl}$  is the clothing area factor (non-dimensional (ND));  $F_{cl}$  and  $F_{pcl}$  are the clothing heat transfer and clothing vapor transfer coefficients (ND), respectively;  $f_r, f_r'$ , and  $f_r''$  are the effective radiation area factors (ND) for the human body's outer surface, natural wet bulb thermometer, and globe thermometers, respectively;  $h_c, h_c'$ , and  $h_c''$  are the convective heat transfer coefficients ( $W/(m^2 \cdot ^\circ C)$ ) for the human body, natural wet bulb thermometer, and globe thermometer, respectively;  $h_r, h_r'$ , and  $h_r''$  are the linear radiative heat transfer coefficients ( $W/(m^2 \cdot ^\circ C)$ ) for the human body, natural wet bulb thermometer, and globe thermometer, respectively;  $LR$  is the Lewis ratio ( $^\circ C/kPa$ );  $M$  is the metabolic rate ( $W/m^2$ );  $T_r$  is the mean radiant (without solar influences) temperature ( $^\circ C$ );  $w$  is the skin wettedness (ND);  $W$  is the external work ( $W/m^2$ );  $\Delta T$  and  $\Delta T'$  are the increase of operative temperatures caused by long wave radiation compared with  $T_a$  ( $^\circ C$ );  $\varepsilon$ ,  $\varepsilon_w'$ , and  $\varepsilon_B''$  are the solar absorption efficiencies (ND) of the human body's outer surface, natural wet bulb thermometer, and black globe thermometer, respectively;  $\zeta$  and  $\zeta'$  are the intercepts of the linear approximated equations of the saturated vapor pressure (kPa) at  $T_{sk}$  and  $T_w$ , respectively;  $\theta$  and  $\theta'$  are the weighting ratios of  $T_g$  that express the influence of solar radiation on operative temperatures for the human body or the natural wet bulb thermometer by the weighted average of  $T_g$  and  $T_a$  (ND), respectively; and  $\kappa$  and  $\kappa'$  are the slopes of the linear approximated equations of the saturated vapor pressure (kPa/ $^\circ C$ ) at  $T_{sk}$  and  $T_w$ , respectively.

式(4), (5)の中強度作業に従事する乗員のWBGT<sub>eff</sub>sは,  $w$ が0.45, 静止衣の断熱値( $I_{clst}$ )が0.6 clo (ISO (2017)の基準となる衣服アンサンブルの断熱値), 静止衣の蒸気透過効率( $i_{clst}$ )が0.34 ND(蒸気透過衣料の一般値(ISO, 2007))であれば式(1), (2)のWBGTと一致することが確認できた。そして, 式(4)の $\alpha_i^{**}$ と $\beta_i^{**}$ , 式(5)の $\alpha_o^{**}$ ,  $\beta_o^{**}$ ,  $\gamma_o^{**}$ を式(3)のWBGT<sub>eff</sub>を計算する際の重みとし,  $w$ を0.45としてWBGT<sub>eff</sub>を計算する際の $AF_i^{**}$ ,  $AF_o^{**}$ と見なし

た. なお, 式(3)において  $WBGT_{\text{eff}}$  (熱収支に基づいて決定)を既存の  $WBGT_{\text{eff}}$  と区別するために, 以下では  $WBGT_{\text{eff}}$  を新しい有効  $WBGT$  ( $WBGT_{\text{eff}}^*$ ) と呼ぶことにする.  $WBGT_{\text{eff}}$  と同様に,  $WBGT_{\text{eff}}^*$  は, 様々な条件の熱ストレスを, 基本的な衣服(作業服)を着た居住者が体験する熱ストレスの尺度に変換するものである. 結果と考察のセクションでは, 式(4)の  $\alpha_i^{**}, \beta_i^{**}, AF_i^{**}$  と式(5)の  $\alpha_o^{**}, \beta_o^{**}, \gamma_o^{**}, AF_o^{**}$  が, 選択した衣類アンサンブルと風速について決定されている. さらに,  $T_{sk}$  による飽和蒸気圧の線形回帰の  $\kappa$  と  $\zeta$  は, それぞれ 0.312 kPa/°C と -5.27 kPa に設定した. この回帰の相対誤差は,  $T_{sk}$  が 33~37 °C の範囲では, <0.4%であった. また,  $\kappa'$  と  $\zeta'$  については, *imper*m の臨界熱環境に相当する  $T_w$  は *perm* よりも低くなければならないため, *perm* と *imper*m でそれぞれ異なる値を設定した. その結果,  $\kappa'$  と  $\zeta'$  は *perm* ではそれぞれ 0.222 kPa/°C, -2.37 kPa, *imper*m ではそれぞれ 0.171 kPa/°C, -1.08 kPa とした. 回帰に伴う相対誤差は, *perm* の  $T_w$  が 23~33 °C の範囲では <2.7%, *imper*m の  $T_w$  が 18~28 °C の範囲では <3.2%であった.  $i_{cl,st}$  と  $f_{cl}$  の値を特定しない一般的な計算では, 前者は *perm* で 0.34ND (ISO, 2007), *imper*m で 0.10ND とし,  $f_{cl}$  は  $I_{cl,st}$  を用いて  $f_{cl} = 1 + 0.28 I_{cl,st}$  のように求めた. 居住者の相対  $v$  は与えられた代謝率に対応する水平歩行の速度(迫井と持田, 2013)を用いて求めた. その他の値については, 先行研究(Sakoi et al., 2018)で使ったものと同じ特性を入力した.

The  $WBGT_{\text{eff}}$ s for the occupants engaged in moderate intensity work in Eqs. (4) and (5) coincided with the  $WBGT$ s in Eqs. (1) and (2) when  $w$  was 0.45, the static clothing insulation value ( $I_{cl,st}$ ) was 0.6 clo (the insulation of the base clothing ensemble of ISO (2017)), and the static clothing vapor permeation efficiency ( $i_{cl,st}$ ) was 0.34 ND (the general value for vapor permeable clothing (ISO, 2007)). We then regarded  $\alpha_i^{**}$  and  $\beta_i^{**}$  in Eq. (4) and  $\alpha_o^{**}, \beta_o^{**}$ , and  $\gamma_o^{**}$  in Eq. (5) as the weights for calculating  $WBGT_{\text{eff}}$  in Eq. (3) and  $AF_i^{**}$  and  $AF_o^{**}$  as the  $AF$  of  $WBGT_{\text{eff}}$  when they are calculated using  $w$  at 0.45. To distinguish  $WBGT_{\text{eff}}$  (determined based on the heat balances) from the existent  $WBGT_{\text{eff}}$  in Eq. (3), we hereinafter refer to  $WBGT_{\text{eff}}$  as a new effective  $WBGT$  ( $WBGT_{\text{eff}}^*$ ). Similar to  $WBGT_{\text{eff}}$ ,  $WBGT_{\text{eff}}^*$  converts the heat stress of various conditions into the heat stress scale experienced by the occupant dressed in basic clothing (work clothes). In the results and discussion section,  $\alpha_i^{**}, \beta_i^{**}$ , and  $AF_i^{**}$  in Eq. (4) and  $\alpha_o^{**}, \beta_o^{**}, \gamma_o^{**}$ , and  $AF_o^{**}$  in Eq. (5) are determined for selected clothing ensembles and air velocities. Furthermore,  $\kappa$  and  $\zeta$  for the linear regression of the saturated vapor pressure by  $T_{sk}$  were set at 0.312 kPa/°C and -5.27 kPa, respectively. The relative error of this regression was <0.4% for  $T_{sk}$  ranging between 33 and 37 °C. With regard to  $\kappa'$  and  $\zeta'$ , we set different values for *perm* and *imper*m, respectively, because the  $T_w$  corresponding to the critical thermal environment for *imper*m must be lower than that for *perm*. Consequently,  $\kappa'$  and  $\zeta'$  were set at 0.222 kPa/°C and -2.37 kPa, respectively, for *perm* and 0.171 kPa/°C and -1.08 kPa, respectively, for *imper*m. The relative error accompanied by the regressions was <2.7% for  $T_w$  ranging between 23 and 33 °C for *perm* and <3.2% for  $T_w$  ranging between 18 and 28 °C for *imper*m. For general calculations without specifying the values of  $i_{cl,st}$  and  $f_{cl}$ , the former was set at 0.34 ND (ISO, 2007) for *perm* and 0.10 ND for *imper*m, and  $f_{cl}$  was determined by using  $I_{cl,st}$  as follows:  $f_{cl} = 1 + 0.28 I_{cl,st}$ . The relative  $v$  to occupants was determined by using the speed of horizontal walking that corresponded to the given metabolic rate (Sakoi and Mochida, 2013). For the other values, the same properties were input as those used in our previous study (Sakoi et al., 2018).

#### $WBGT_{\text{eff}}^*$ の測定方法

自然湿球温度計の熱収支式は, 日陰の場合は式(15), 日向の場合は式(16)で表すことができる.

#### Determination method of $WBGT_{\text{eff}}^*$

The heat balance equation for the natural wet bulb thermometer can be expressed by Eq. (15) for *shady* conditions and by Eq. (16) for *sunny* conditions.

$$h_c'(T_w - T_a) + h_r'(T_w - T_r) + LRh_c'(P_w^* - P_a) = 0 \quad (15)$$

$$h_c'(T_w - T_a) + h_r'(T_w - T_r) - \varepsilon_w' f_r' H + LRh_c'(P_w^* - P_a) = 0 \quad (16)$$

ここで,  $H$  は単位有効放射面積に対する日射量 ( $W/m^2$ ),  $P_a$  は環境蒸気圧 (kPa),  $P_w^*$  は  $T_w$  における飽和蒸気圧 (kPa) である. 黒球温度計の熱収支式は, 日陰の場合は式(17), 日向の場合は式(18)で表すことができる.

$$h_c''(T_g - T_a) + h_r''(T_g - T_r) = 0 \quad (17)$$

$$h_c''(T_g - T_a) + h_r''(T_g - T_r) - \varepsilon_B'' f_r'' H = 0 \quad (18)$$

$P_w^*$  は、式(19)の Antoine 方程式で近似できる(ISO, 2005).

$$P_w^* = e^{16.6536 - \frac{4030.183}{235 + T_w}} \quad (19)$$

$h_c'$  と  $h_c''$  は  $v$  (in m/s) の関数であるから、 $H, T_a, T_r, P_a, v$  が与えられれば、式 (15), (17), (19) または式 (16), (18), (19) を組み合わせて  $T_w, T_g$  が一意に決定できる。WBGT<sub>eff</sub><sup>\*</sup> は、決定された  $T_w, T_g$  と、与えられた  $T_a$  を用いて一意に決定することができる。

where  $H$  is the solar radiation for a unit effective radiant area (W/m<sup>2</sup>);  $P_a$  is the environmental vapor pressure (kPa); and  $P_w^*$  is the saturated vapor pressure at  $T_w$  (kPa).

The heat balance equation for the black globe thermometer can be expressed by Eq. (17) for *shady* conditions and by Eq. (18) for *sunny* conditions.

$$h_c''(T_g - T_a) + h_r''(T_g - T_r) = 0 \quad (17)$$

$$h_c''(T_g - T_a) + h_r''(T_g - T_r) - \varepsilon_B'' f_r'' H = 0 \quad (18)$$

$P_w^*$  can be approximated by the Antoine equation in Eq. (19) (ISO, 2005).

$$P_w^* = e^{16.6536 - \frac{4030.183}{235 + T_w}} \quad (19)$$

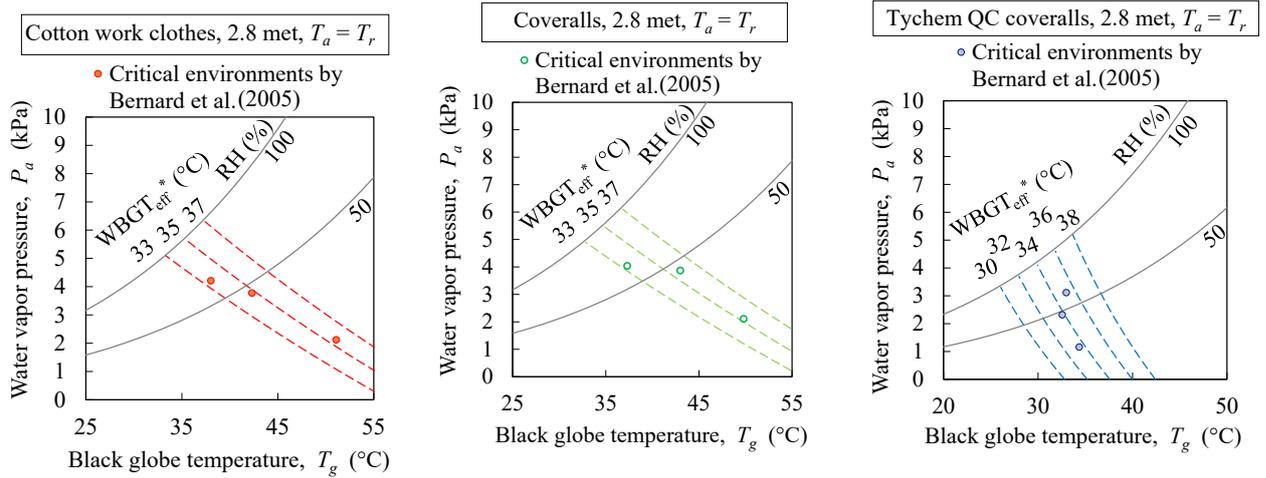
Because  $h_c'$  and  $h_c''$  are the functions of  $v$  (in m/s),  $T_w$  and  $T_g$  can be determined uniquely by combining Eqs. (15), (17), and (19) or Eqs. (16), (18), and (19) when  $H, T_a, T_r, P_a$ , and  $v$  are given. WBGT<sub>eff</sub><sup>\*</sup> can be determined uniquely by using the determined  $T_w$  and  $T_g$  and the given  $T_a$ .

### 3 結果と考察

不透湿防護服 (impermeable) における WBGT<sub>eff</sub><sup>\*</sup> の検証

まず、衣服の種類や環境温湿度の違いにもかかわらず、WBGT<sub>eff</sub><sup>\*</sup> で評価される熱ストレスレベルがこれらの臨界熱環境において同様であるかどうかを検証するために、Bernard ら (2005) が用いた綿の作業服、カバーオール、タイケム QC カバーオールの恒温線とサイコメトリ図上に示した臨界熱環境とを比較した。綿の作業着とカバーオールは *perm* に属し、Tychem QC カバーオールは *impermeable* に属した。このように、臨界環境は温度調節の規定域の上限であるため、熱ストレスは同じであったといえる。上記 3 つの衣服アンサンブルの  $I_{cl, st}$  と  $f_{cl}$  は、ISO (2004, 2007) 規格と Caravello ら (2008) が提供する静的衣服総断熱量に基づいて決定されたものである。さらに、 $i_{cl, st}$ 、ISO (2004, 2007) 規格と、英国ラフバラ大学でのサーマルマネキン実験によって決定された静止の蒸気抵抗の合計の両方に基づいて設定された。すべての衣服について、Bernard ら (2005) の示す値に従い、 $v$  を 0.5m/s、 $M$  を 160W/m<sup>2</sup> (本研究の目標代謝量である 174W/m<sup>2</sup> に近い値) に設定した。

図 1、図 2 に綿の作業着と不透湿性防護服である Tychem 防護服着用時の上限温湿度環境、および、それぞれの熱・水分輸送特性と環境条件を入力とする式の出力(WBGT<sub>eff</sub><sup>\*</sup>)を示す。どちらの着衣においても WBGT<sub>eff</sub><sup>\*</sup> 約 35°C が深部体温を維持の上限環境に対応した。着衣の水分輸送特性が大きく異なる場合でも同一の熱ストレスがほぼ同じ WBGT<sub>eff</sub><sup>\*</sup> 値に対応しており、着衣条件の異なる場合の熱ストレスを表すうえで WBGT<sub>eff</sub><sup>\*</sup> が有効といえる。



a) Cotton work clothes

綿の作業着 d の上限温熱環境における  $WBGT_{eff}^*$

b) Coveralls

非透湿性カバーオールでの上限温熱環境における  $WBGT_{eff}^*$

c) Tychem QC coveralls

非透湿性化学防護服 (Tychem QC) での上限温熱環境における  $WBGT_{eff}^*$

Fig.1 Constant new effective wet bulb globe temperature ( $WBGT_{eff}^*$ ) lines and critical thermal environments for (a) cotton work clothes, (b) coveralls, and (c) Tychem QC coveralls;  $T_a$ : air temperature;  $T_r$ : mean radiant temperature

## Results and discussion

### Validation of $WBGT_{eff}^*$ for imperm

We first compared the constant  $WBGT_{eff}^*$  lines and the critical thermal environments indicated by Bernard et al. (2005) on a psychrometric chart for cotton work clothes, coveralls, and Tychem QC coveralls used by these authors to validate whether the heat stress level evaluated by  $WBGT_{eff}^*$  was similar for these critical thermal environments despite the differences in clothing type as well as the environmental temperature and humidity. The cotton work clothes and coveralls belonged to *perm* and Tychem QC coveralls to *imperp*. Because the critical environments were the upper limits of the prescriptive zone of thermal regulation, it can be said that their heat stress was the same.  $I_{cl,st}$  and  $f_{cl}$  for the above mentioned three clothing ensembles were determined based on ISO (2004, 2007) standards and the total static clothing thermal insulations provided by Caravello et al. (2008). Furthermore,  $i_{cl,st}$  was set based on both ISO (2004, 2007) standards and the total static clothing vapor resistances, of which the latter were determined through thermal manikin experiments at Loughborough University, United Kingdom. For all clothing types,  $v$  and  $M$  were set at 0.5 m/s and 160 W/m<sup>2</sup> (close values to the target metabolic rate of this study at 174 W/m<sup>2</sup>), respectively, in accordance with the values indicated by Bernard et al. (2005).

図 1(a)-(c) に示すように、臨界熱環境は、綿の作業着では  $WBGT_{eff}^*$  が 33.5~35.6 °C (平均 34.6 °C)、カバーオールでは 33.4~35.8 °C (平均 34.8 °C)、Tychem QC カバーオールでは 33.4~35.2 °C (平均 34.1 °C) に位置している。すべての臨界  $WBGT_{eff}^*$  は 34.5 °C 付近に位置していたため、 $WBGT_{eff}^*$  は *imperp* を含む様々な種類の衣服に対する熱ストレスを適切に反映していると結論づけることができる。

As shown in Figs. 1(a)-(c), the critical thermal environments were located between  $WBGT_{eff}^*$  of 33.5 and 35.6 °C (mean, 34.6 °C) for the cotton work clothes, 33.4 and 35.8 °C (mean, 34.8 °C) for the coveralls, and 33.4 and 35.2 °C (mean, 34.1 °C) for the Tychem QC coveralls. Because all critical  $WBGT_{eff}^*$  were located around 34.5 °C, it can be concluded that  $WBGT_{eff}^*$  adequately reflects the heat stress for various clothing types, including *imperp*.

### $WBGT_{eff}^*$ における湿球温度と乾球温度( $T_g$ , $T_a$ )の重み

ここではまた、代謝産熱量  $M$  を 174.5 W/m<sup>2</sup> とする。図 2 は、 $I_{cl,st}$  を変化させたときの 不透湿防護服 *imperp* の湿球の係数  $\alpha_{i,im}^{**}$  と黒球の係数  $\beta_{i,im}^{**}$  ( $\alpha_{i,im}^{**}$ ,  $\beta_{i,im}^{**}$ ) と 透湿性のある着衣 *perm* の  $\alpha_{i,p}^{**}$ ,  $\beta_{i,p}^{**}$  を示しており、 $I_{cl,st}$  の増加とともに湿球係数 湿球  $\alpha_{i,im}^{**}$  は若干減少し、黒球  $\beta_{i,im}^{**}$  が増加したことがわかる。 $I_{cl,st}$  に依存する透湿性着衣の  $\alpha_{i,p}^{**}$  と  $\beta_{i,p}^{**}$  の変化は、不透湿性着衣  $\alpha_{i,im}^{**}$  と  $\beta_{i,im}^{**}$  の変化より小さかった。皮膚表面と

周囲環境の間の全熱抵抗と全蒸発抵抗は、衣服と空気の熱抵抗/蒸発抵抗の一連の抵抗を表している。空気の熱・蒸発抵抗はほぼ一定であったが、衣服の熱・蒸発抵抗は  $I_{cl, st}$  に従って増加した。 $I_{cl, st}$  に伴って不透湿防護服  $imper$  の蒸発抵抗の総和が  $perm$  より大きくなるため、 $I_{cl, st}$  の変化に対して  $perm$  ではほぼ均衡していた  $\alpha_i^{**}$  と  $\beta_i^{**}$  が不均衡となり、透湿性着衣の  $\alpha_{i, p}^{**}$  と  $\beta_{i, p}^{**}$  の変化よりも不透湿着衣の  $\alpha_{i, im}^{**}$  と  $\beta_{i, im}^{**}$  が大きくなった。 $\alpha_o^{**}$  と sunny WBGT<sub>eff</sub>\* の  $\beta_o^{**}$  と  $\gamma_o^{**}$  の和にも同じ傾向が観察された。

#### Weights of wet bulb and dry temperatures ( $T_g$ and $T_a$ ) in WBGT<sub>eff</sub>\*

Hereafter, we again set  $M$  as  $174.5 \text{ W/m}^2$ . Figure 2 shows  $\alpha_i^{**}$  and  $\beta_i^{**}$  determined for  $imper$  ( $\alpha_{i, im}^{**}$  and  $\beta_{i, im}^{**}$ ) and those for  $perm$  ( $\alpha_{i, p}^{**}$  and  $\beta_{i, p}^{**}$ ) at several levels of  $I_{cl, st}$ ;  $\alpha_{i, im}^{**}$  decreased slightly with the increase in  $I_{cl, st}$ , while  $\beta_{i, im}^{**}$  increased. The changes in  $\alpha_{i, p}^{**}$  and  $\beta_{i, p}^{**}$  depending on  $I_{cl, st}$  were smaller than those in  $\alpha_{i, im}^{**}$  and  $\beta_{i, im}^{**}$ . Total thermal resistance and total evaporative resistance between the skin surface and the surrounding environment represent a series of resistances of the thermal/evaporative resistances of clothing and air. The thermal/evaporative resistances of air were almost constant, whereas those of clothing increased with  $I_{cl, st}$ . The larger increase in the total evaporative resistance for  $imper$  than that for  $perm$  accompanied by  $I_{cl, st}$  caused an imbalance between  $\alpha_i^{**}$  and  $\beta_i^{**}$ , which were almost balanced for  $perm$  for the change in  $I_{cl, st}$ , and this resulted in larger changes in  $\alpha_{i, im}^{**}$  and  $\beta_{i, im}^{**}$  than those in  $\alpha_{i, p}^{**}$  and  $\beta_{i, p}^{**}$ . The same tendencies were observed for  $\alpha_o^{**}$  and the sum of  $\beta_o^{**}$  and  $\gamma_o^{**}$  of sunny WBGT<sub>eff</sub>\*.

#### AF の着衣の保温性への依存度

図 3 は、いくつかの  $I_{cl, st}$  において、 $imper$  の  $AF_i^{**}$  ( $AF_{i, im}^{**}$ ) と  $perm$  の  $AF_{i, p}^{**}$  を比較したもので、両者とも  $I_{cl, st}$  に対して直線的に増加した。しかし、 $AF_{i, im}^{**}$  の傾きは 1.6 倍であった。しかし、 $AF_{i, p}^{**}$  の傾きは 1.6 倍大きかった ( $AF_{i, im}^{**}$  は  $I_{cl, st} = 0.5 \text{ clo}$  のとき  $2.7^\circ\text{C}$ ,  $I_{cl, st} = 1.4 \text{ clo}$  のとき  $10.7^\circ\text{C}$ ,  $AF_{i, p}^{**}$  は  $I_{cl, st} = 0.2 \text{ clo}$  のとき  $-2.3^\circ\text{C}$ ,  $I_{cl, st} = 1.2 \text{ clo}$  のとき  $3.2^\circ\text{C}$ )。このことは、 $I$  の方が輻射熱が小さくなることを示している。このことから、 $imper$  による蒸発能力の低下が蒸発熱調整能力を低下させ、結果として  $AF_i^{**}$  の  $I_{cl, st}$  に対する依存性が増加したことが示唆された。また、sunny WBGT<sub>eff</sub>\* の AF でも同様の傾向が観察された。

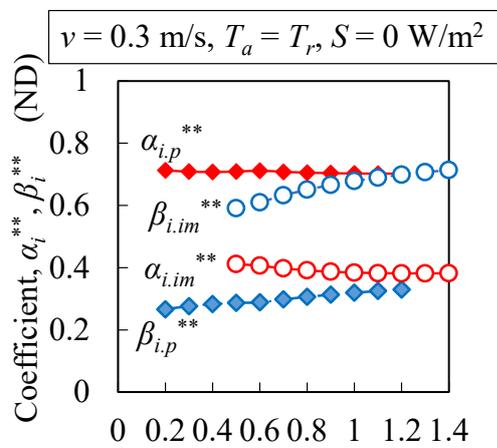


Figure 2: Coefficient,  $\alpha_i^{**}$ ,  $\beta_i^{**}$  (ND) versus Static clothing thermal insulation,  $I_{cl, st}$  (clo)

図 2 日常の着衣と防護服時の静穏での基礎着衣熱抵抗ごとの湿球の係数  $\alpha_i^{**}$  と黒球の係数  $\beta_i^{**}$  (日射の無い環境)

Fig.2  $\alpha_i^{**}$  and  $\beta_i^{**}$  for vapor impermeable protective clothing ( $im$ ) and vapor permeable clothing ensembles ( $p$ ) at several levels of  $I_{cl, st}$ ; ND: non-dimensional; S: heat storage rate of the human body;  $T_a$ : air temperature;  $T_r$ : mean radiant temperature;  $v$ : air velocity

#### Dependency of AF on clothing thermal insulation

Figure 3 compares  $AF_i^{**}$  of  $imper$  ( $AF_{i, im}^{**}$ ) to that of  $perm$  ( $AF_{i, p}^{**}$ ) at several levels of  $I_{cl, st}$ , and both increased

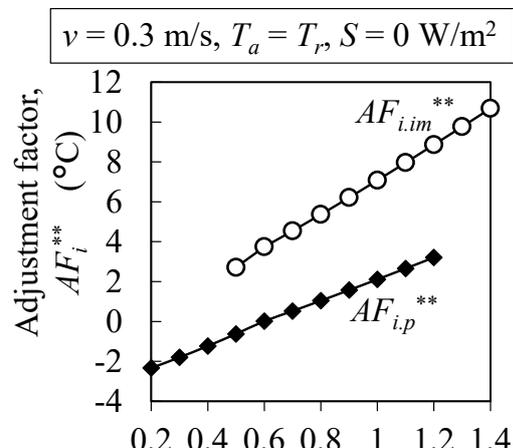


Figure 3: Adjustment factor,  $AF_i^{**}$  ( $^\circ\text{C}$ ) versus Static clothing thermal insulation,  $I_{cl, st}$  (clo)

図 3 日常の着衣と防護服着衣時の基礎着衣熱抵抗ごとの補正量  $AF^{**}$  (日射の無い環境)

Fig.3  $AF_i^{**}$  for vapor impermeable protective clothing ( $im$ ) and vapor permeable clothing ensembles ( $p$ ) at several levels of  $I_{cl, st}$ ; ND: non-dimensional; S: heat storage rate of the human body;  $T_a$ : air temperature;  $T_r$ : mean radiant temperature;  $v$ : air velocity

linearly against  $I_{cl,st}$ . However, the slope of  $AF_{im}^{**}$  was 1.6 times larger than that of  $AF_{ip}^{**}$

( $AF_{im}^{**}$  was  $2.7^\circ\text{C}$  when  $I_{cl,st} = 0.5$  clo and  $10.7^\circ\text{C}$  when  $I_{cl,st} = 1.4$  clo;  $AF_{ip}^{**}$  was  $-2.3^\circ\text{C}$  when  $I_{cl,st} = 0.2$  clo and  $3.2^\circ\text{C}$  when  $I_{cl,st} = 1.2$  clo). This suggested that the reduction of the evaporation capacity by *imper* reduced the evaporative thermal regulation capacity and resulted in an increase in the dependency of  $AF_i^{**}$  on  $I_{cl,st}$ . The same tendency was observed for  $AF_o^{**}$  of sunny  $WBGT_{eff}^*$ .

以後、着衣の透湿係数  $i_{cl}$  として日常の着衣に 0.34 を、不透湿性の防護服に 0.1 を与えたときの結果を示す。日射を無視できる環境を対象に、 $WBGT_{eff}^*$  の  $T_w$ ,  $T_g$  にかかる係数(日常の着衣の係数をそれぞれ  $\alpha_{ip}^{**}$ ,  $\beta_{ip}^{**}$ , 不透湿性防護服の係数をそれぞれ  $\alpha_{im}^{**}$ ,  $\beta_{im}^{**}$ )を図 3 に比較する。静穏気流下での着衣の基礎熱抵抗  $I_{cl,st}$  の変化に対して日常の着衣の  $\alpha_{ip}^{**}$ ,  $\beta_{ip}^{**}$  はほとんど変化せず、それぞれ 0.7, 0.3 付近の値となり既存  $WBGT$  の係数とよく一致した。他方、不透湿性防護服の  $\alpha_{im}^{**}$  はおよそ 0.4 となった。  $\beta_{im}^{**}$  は  $I_{cl,st}$  の増加に伴い上昇し、0.5 clo から 1.4 clo の間で 0.6 から 0.7 まで増えた。  $T_w$ ,  $T_g$  にかかる係数の大小関係が入れ替わった理由として、不透湿性防護服着用時には蒸発し難くなったことから、日常の着衣の時と比べて湿度の影響が相対的に小さくなったことが挙げられる。

日射を無視できる環境における  $WBGT_{eff}^*$  の補正量(前述の人体熱収支式の切片)の  $I_{cl,st}$  による変化を図 4 に示す。  $AF_{ip}^{**}$ ,  $AF_{im}^{**}$  はそれぞれ日常の着衣と不透湿性防護服の補正量である。日透湿性防護服の  $AF_{im}^{**}$  の方が日常着衣の  $AF_{ip}^{**}$  より  $I_{cl,st}$  によって大きく変化した。不透湿性防護服着用時に蒸発による体温調節をし難くなったため、  $I_{cl,st}$  に対する熱ストレスの補正量の変化が大きくなったと考えられる。

$WBGT_{eff}^*$  における  $T_g$  と  $T_a$  の加重比

図 4 は、*imper* ( $\beta_{o,im}^*$ ,  $\gamma_{o,im}^*$ ) と *perm* ( $\beta_{o,p}^*$ ,  $\gamma_{o,p}^*$ ) について、いくつかのレベルの  $\varepsilon$  における  $\beta_o^{**}/(\beta_o^{**} + \gamma_o^{**})$  と  $\gamma_o^{**}/(\beta_o^{**} + \gamma_o^{**})$  の比を示したものである。  $I_{cl,st}$  は、両衣服とも 1.0 clo とした。  $\varepsilon$  の増加ともなう  $\beta_{o,im}^*$  の増加は、  $\beta_{o,p}^*$  の増加より小さかった。これは、*imper* を着用した場合、  $P_a$  の影響が小さくなるためと考えられる。式(16)と式(18)より、  $P_a$  は式(20)で表すことができる。

$$P_a = \frac{\left\{ \begin{aligned} & \left( h_c' + h_r' + LRh_c' \kappa' \right) T_w - \frac{h_r'}{h_r''} (h_c'' + h_r'') \theta' T_g - \left[ (h_c' + h_r') - \frac{h_r'}{h_r''} (h_c'' + h_r'') \theta' \right] T_a \\ & + \left( \frac{h_r'}{h_r''} \theta' - \frac{h_r'}{h_r''} \right) (h_c'' + h_r'') \Delta T' + LRh_c' \zeta' \end{aligned} \right\}}{LRh_c'} \quad (20)$$

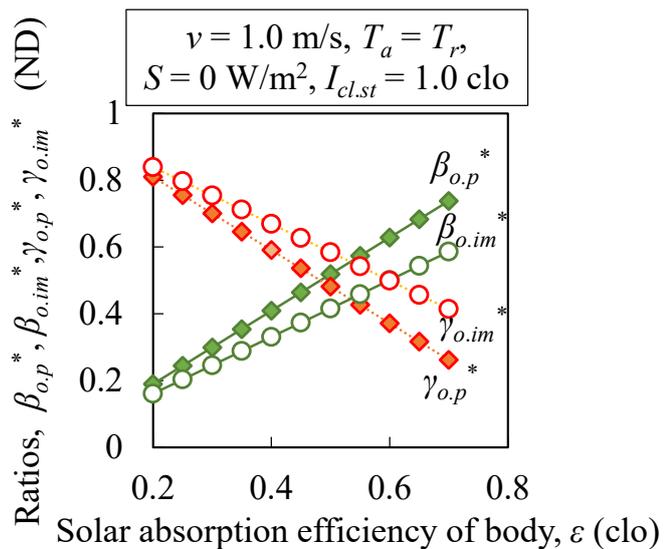


図 4.不透湿性防護服(*im*) と透湿性衣服アンサンブル(*Tg*)の黒球温度と気温( $T_a$ )の重み付け比の  $\varepsilon$  による変化;  $I_{cl,st}$  : 静穏での基礎着衣熱抵抗; ND: 無次元;  $S$ : 人体の蓄熱率;  $T_r$ : 平均放射温度;  $v$ : 気流速

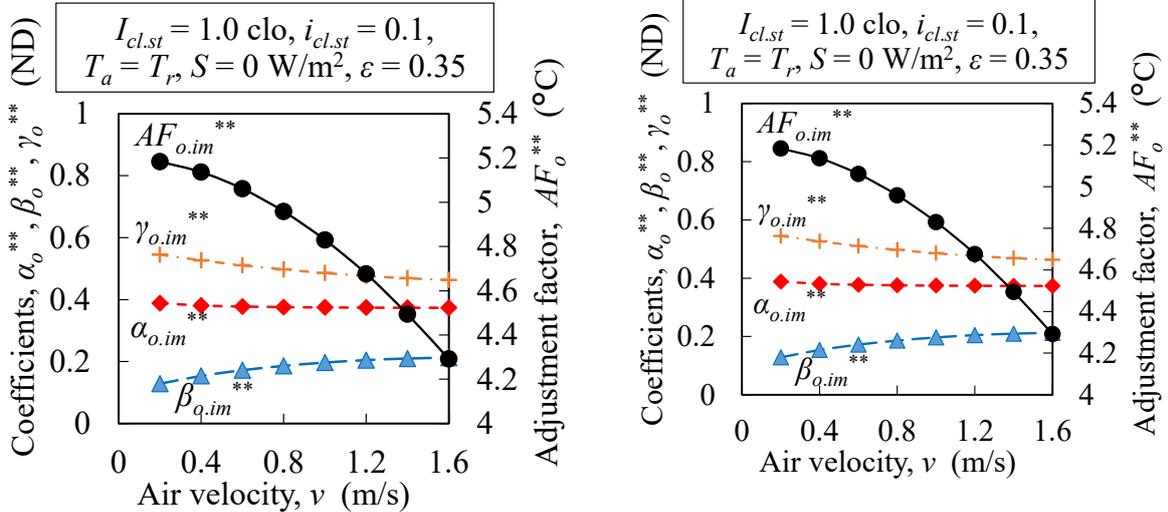
$\varepsilon_w'$  は  $\varepsilon_B''$  よりもはるかに小さいため、 $\theta'$  は小さくなり、 $T_a$  を乗じた値は負になった。そのため、 $P_a$  の上昇は  $T_a$  の低下に対応する。*imper*m による蒸発能力の低下は  $P_a$  の影響を減少させ、 $P_a$  の影響を表す  $T_a$  を乗じた値の負を減少させた。その結果、*imper*m の方が  $\theta$  に関する因子以外の因子の相対的影響力が大きくなった。そのため、 $\beta_{o,im}^*$  の  $\varepsilon$  による変化は、 $\beta_{o,p}^*$  のそれよりも小さくなった。

Ratio of weights of  $T_g$  and  $T_a$  in  $WBGT_{eff}^*$

Figure 4 indicates the ratios of  $\beta_o^{**}/(\beta_o^{**}+\gamma_o^{**})$  and  $\gamma_o^{**}/(\beta_o^{**}+\gamma_o^{**})$  at several levels of  $\varepsilon$  for *imper*m ( $\beta_{o,im}^*$  and  $\gamma_{o,im}^*$ ) and *perm* ( $\beta_{o,p}^*$  and  $\gamma_{o,p}^*$ ).  $I_{cl,st}$  was set at 1.0 clo for both clothing types. The increase  $\beta_{o,im}^*$  accompanied by the increase in  $\varepsilon$  was smaller than that of  $\beta_{o,p}^*$ . This can be explained by the reduced influence of  $P_a$  when occupants wore *imper*m. From Eqs. (16) and (18),  $P_a$  can be expressed by Eq. (20).

$$P_a = \frac{\left\{ \begin{aligned} & \left( h_c' + h_r' + LRh_c' \kappa' \right) T_w - \frac{h_r'}{h_r''} (h_c'' + h_r'') \theta' T_g - \left[ (h_c' + h_r') - \frac{h_r'}{h_r''} (h_c'' + h_r'') \theta' \right] T_a \\ & + \left( \frac{h_r'}{h_r''} \theta' - \frac{h_r'}{h_r''} \right) (h_c'' + h_r'') \Delta T' + LRh_c' \zeta' \end{aligned} \right\}}{LRh_c'} \quad (20)$$

Because  $\varepsilon_w'$  was much less than that of  $\varepsilon_B''$ ,  $\theta'$  was small, and the value multiplied by  $T_a$  became negative. Therefore, the rise in  $P_a$  corresponded to the drop in  $T_a$ . The reduced evaporation capacity by *imper*m decreased the influence of  $P_a$  and reduced the negative value multiplied by  $T_a$  that expresses the influence of  $P_a$ . As a result, the relative influence of factors other than the factor related to  $\theta$  for *imper*m increased more than that for *perm*. Therefore, the change in  $\beta_{o,im}^*$  with  $\varepsilon$  was less than that in  $\beta_{o,p}^*$ .



a) for permeable

b) for impermeable

図5.(a) 透湿性着衣 (*perm*) と (b) 不透湿衣服防護服 (*imper*m) のいくつかの気流速度 ( $v$ ) における  $\alpha_o^{**}$ ,  $\beta_o^{**}$ ,  $\gamma_o^{**}$ , および  $AF_o^{**}$ ;  $i_{cl,st}$ : 静的蒸気透過効率;  $I_{cl,st}$ : 静穏での基礎着衣熱抵抗; ND: 無次元;  $T_a$ : 気温;  $T_r$ : 平均輻射温

Fig.5  $\alpha_o^{**}$ ,  $\beta_o^{**}$ ,  $\gamma_o^{**}$ , and  $AF_o^{**}$  at several air velocities ( $v$ ) for (a) vapor permeable protective clothing (*perm*) and (b) vapor impermeable clothing ensembles (*imper*m);  $i_{cl,st}$ : static vapor permeation efficiency;  $I_{cl,st}$ : static clothing insulation; ND: non-dimensional;  $T_a$ : air temperature;  $T_r$ : mean radiant temperature

WBGT<sub>eff</sub>\*に及ぼす気流速度  $v$  の影響

図5(a)(b)は、透湿性着衣 *perm* ( $\alpha_{o,p}^{**}$ ,  $\beta_{o,p}^{**}$ ,  $\gamma_{o,p}^{**}$ ) と  $AF_{o,p}^{**}$  についての  $\alpha_o^{**}$ ,  $\beta_o^{**}$ ,  $\gamma_o^{**}$  と、不透湿性防護服 *imper*m

( $\alpha_{oim}^{**}, \beta_{oim}^{**}, \gamma_{oim}^{**}$ ) と  $AF_{oim}^{**}$  についての  $\alpha_o^{**}, \beta_o^{**}, \gamma_o^{**}$  を数レベルの気流速度  $v$  で、晴天下において示したものである。これらの図は、静穏での基礎着衣熱抵抗  $I_{cl,st}$  が 1.0 clo,  $\varepsilon$  が 0.35 の場合に描かれたものである。後者はグレーの色布に相当する (Watanabe et al., 2008)。いずれの図においても、 $\alpha_{op}^{**}$  と  $\alpha_{oim}^{**}$  はほぼ一定であったが、 $\beta_{op}^{**}$  と  $\beta_{oim}^{**}$  は 気流速度  $v$  に伴って増加し、 $\gamma_{op}^{**}$  と  $\gamma_{oim}^{**}$  は減少した。 $\beta_{op}^{**}$  と  $\gamma_{op}^{**}$  あるいは  $\beta_{oim}^{**}$  と  $\gamma_{oim}^{**}$  の変化は、 $H$  の評価方法に起因する。 $WBGT_{eff}^{**}$  は  $T_g$  と  $T_a$  の差から  $H$  量の評価するものである。 $H$  が一定であっても、 $v$  が増加すると  $T_g$  は  $T_a$  に近づくため、 $WBGT_{eff}^{**}$  は  $v$  が増加すると  $T_g$  の重みを増やし、 $T_a$  の重みを減らして  $H$  の影響を評価する必要がある。平均放射温度評価においても  $T_g$  と  $T_a$  の重みが  $v$  に対して同様に依存する (ISO, 1998)。 $AF$  に関しては、 $AF_{oim}^{**}$  の方が  $AF_{op}^{**}$  よりも変化が大きかった。これは、*imperperm* の蒸発熱調節能力の低下により、 $v$  による顕熱交換が熱ストレスに与える影響が大きくなったためと考えられる。しかし、日陰の条件 (図は省略) では、 $\beta_{ip}^{**}$  と  $\beta_{iim}^{**}$  は  $v$  の変化に対して安定していた。 $\beta_{ip}^{**}$  と  $\beta_{iim}^{**}$  はそれぞれ  $\beta_{op}^{**}$  と  $\gamma_{op}^{**}$  および  $\beta_{oim}^{**}$  と  $\gamma_{oim}^{**}$  の和であることから、 $v$  に伴う  $\beta_{op}^{**}$  と  $\beta_{oim}^{**}$  の増加は  $\gamma_{op}^{**}$  と  $\gamma_{oim}^{**}$  の減少により埋め合わせされることになった。その結果、 $\beta_{ip}^{**}$  と  $\beta_{iim}^{**}$  は、 $v$  の変化にもかかわらず一定となった。 $AF_i^{**}$  については、 $AF_o^{**}$  と同様に、 $v$  の変化に対して  $AF_{iim}^{**}$  の方が  $AF_{ip}^{**}$  よりも大きく変化している。

#### Influence of $v$ on the $WBGT_{eff}^{**}$

Figures 5(a) and (b) show  $\alpha_o^{**}, \beta_o^{**}$ , and  $\gamma_o^{**}$  for *perm* ( $\alpha_{op}^{**}, \beta_{op}^{**}, \gamma_{op}^{**}$ ) and  $AF_{op}^{**}$  as well as  $\alpha_o^{**}, \beta_o^{**}$ , and  $\gamma_o^{**}$  for *imperperm* ( $\alpha_{oim}^{**}, \beta_{oim}^{**}, \gamma_{oim}^{**}$ ) and  $AF_{oim}^{**}$  at several levels of  $v$  for sunny conditions. These figures were drawn for  $I_{cl,st}$  of 1.0 clo and  $\varepsilon$  of 0.35. The latter corresponds to the gray color fabrics (Watanabe et al., 2008). On both figures,  $\alpha_{op}^{**}$  and  $\alpha_{oim}^{**}$  remained almost constant, whereas  $\beta_{op}^{**}$  and  $\beta_{oim}^{**}$  increased and  $\gamma_{op}^{**}$  and  $\gamma_{oim}^{**}$  decreased with  $v$ . The changes of  $\beta_{op}^{**}$  and  $\gamma_{op}^{**}$  or  $\beta_{oim}^{**}$  and  $\gamma_{oim}^{**}$  were attributed to the evaluation method of  $H$ .  $WBGT_{eff}^{**}$  evaluates the amount of  $H$  based on the difference between  $T_g$  and  $T_a$ . Even if  $H$  were constant,  $T_g$  would move closer to  $T_a$  with an increase in  $v$ . Therefore,  $WBGT_{eff}^{**}$  needs to increase the weight of  $T_g$  and decrease the weight of  $T_a$  with an increase in  $v$  to evaluate the influence of  $H$ . A similar dependency of the weights for  $T_g$  and  $T_a$  on  $v$  were observed for the evaluation of mean radiant temperature (ISO, 1998). With regard to the  $AF$ ,  $AF_{oim}^{**}$  changed more than  $AF_{op}^{**}$  did. This was attributed to the increased influence of sensible heat exchange by  $v$  on heat stress caused by the reduced evaporative thermal regulation capacity of *imperperm*. However, for shady conditions (figures were omitted),  $\beta_{ip}^{**}$  and  $\beta_{iim}^{**}$  were stable against the change in  $v$ . Given that  $\beta_{ip}^{**}$  and  $\beta_{iim}^{**}$  are the sum of  $\beta_{op}^{**}$  and  $\gamma_{op}^{**}$  and of  $\beta_{oim}^{**}$  and  $\gamma_{oim}^{**}$ , respectively, the increase in  $\beta_{op}^{**}$  and  $\beta_{oim}^{**}$  accompanied by  $v$  was compensated for by the decrease in  $\gamma_{op}^{**}$  and  $\gamma_{oim}^{**}$ . As a result,  $\beta_{ip}^{**}$  and  $\beta_{iim}^{**}$  remained constant despite the change in  $v$ . With regard to  $AF_i^{**}$ , similar to  $AF_o^{**}$ ,  $AF_{iim}^{**}$  changed more than  $AF_{ip}^{**}$  did with the changes in  $v$ .

#### $AF$ に及ぼす放射線の影響

図 6 は、日射の影響を除いたいくつかのレベルの輻射場における  $AF_{ip}^{**}, AF_{iim}^{**}, AF_{op}^{**}, AF_{oim}^{**}$  を示している ( $T_r - T_a$ )。これらはすべて、 $v$  が 1.0 m/s で、 $I_{cl,st}$  が 1.0 clo のときに計算されたものである。図 5 と同様、 $AF_{op}^{**}$  と  $AF_{oim}^{**}$  の計算では、 $\varepsilon$  を 0.35 とした。 $AF_{iim}^{**}$  と  $AF_{oim}^{**}$  は、 $T_r - T_a$  の変化により、 $AF_{ip}^{**}$  と  $AF_{op}^{**}$  よりも大きく変化した。これは、*imperperm* による蒸発熱調節能力の低下により、環境温度変化による熱ストレスへの影響が大きくなったためと考えられる。 $AF_{ip}^{**}$  と  $AF_{iim}^{**}$  は  $T_r - T_a$  の増加とともに減少したが、 $AF_{op}^{**}$  と  $AF_{oim}^{**}$  は増加した。 $AF_{op}^{**}$  と  $AF_{oim}^{**}$  の変化については、佐古井ら (2018) が報告しているように、 $T_r - T_a$  の増加により人体

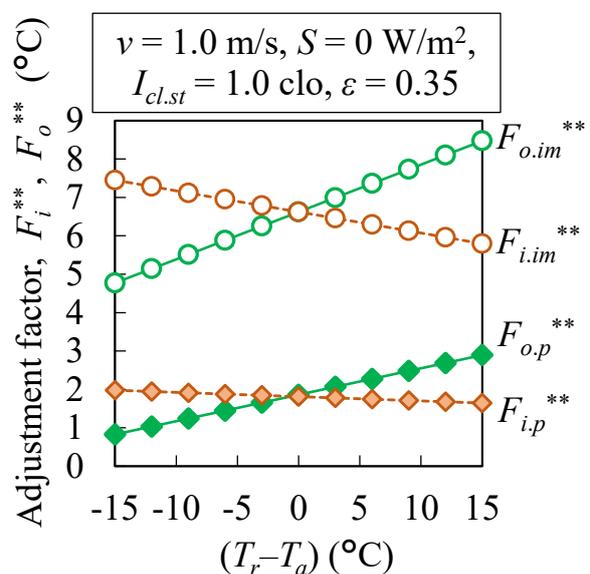


Fig.6 Changes of  $AF_o^{**}$  and  $AF_i^{**}$  depending on mean radiant temperature ( $T_r$ ) – air temperature ( $T_a$ ) for vapor impermeable protective clothing (*im*) and vapor permeable clothing ensembles (*p*);  $\varepsilon$ : solar absorption efficiency of the human body's outer surface;  $I_{cl,st}$ : static clothing insulation;  $S$ : heat storage rate of the human body's outer surface;  $v$ : air velocity

の動作温度が上昇し、熱ストレスが増加した。

#### Influence of the radiant field on AF

Figure 6 shows  $AF_{ip}^{**}$ ,  $AF_{im}^{**}$ ,  $AF_{op}^{**}$ , and  $AF_{oim}^{**}$  at several levels of the radiant field except for the influence of solar radiation ( $T_r - T_a$ ). All of these were calculated for  $v$  at 1.0 m/s and  $I_{cl.st}$  at 1.0 clo. Similar to Fig. 5,  $\varepsilon$  was set to 0.35 for calculating  $AF_{op}^{**}$  and  $AF_{oim}^{**}$ .  $AF_{im}^{**}$  and  $AF_{oim}^{**}$  changed more than  $AF_{ip}^{**}$  and  $AF_{op}^{**}$  did with the change in  $T_r - T_a$ . This could be explained by the increased influence of the environmental temperature change on heat stress that was caused by the reduction of evaporative thermal regulation capacity by *imperm*.  $AF_{ip}^{**}$  and  $AF_{im}^{**}$  decreased with the increase in  $T_r - T_a$ , whereas  $AF_{op}^{**}$  and  $AF_{oim}^{**}$  increased. With regard to the change of  $AF_{op}^{**}$  and  $AF_{oim}^{**}$ , as was reported by Sakoi et al. (2018), the increase in  $T_r - T_a$  caused a rise in operative temperature for the human body and resulted in increased heat stress.

#### WBGT<sub>eff</sub><sup>\*</sup>の近似式

前の小項目で示したように、WBGT<sub>eff</sub><sup>\*</sup>は複雑に変化する。つまり、WBGT<sub>eff</sub>と同じ変数で表される熱ストレスの計算式は、衣服や周囲の環境因子によって変化する。WBGT<sub>eff</sub><sup>\*</sup>は、変化する公式の傾向を合理的に明らかにしたものである。簡単のため、WBGT<sub>eff</sub><sup>\*</sup>の近似式を日陰と日向の *perm* についてそれぞれ式 (21)、(22) に、日陰と日向の *imperm* についてそれぞれ式 (23)、(24) にて提案した。これらの近似式は、 $v$  が 0.2~2.0 m/s,  $I_{cl.st}$  が *perm* で 0.3~1.5 clo, *imperm* で 0.5~1.3 clo,  $\varepsilon$  が 0.3~0.7,  $T_r - T_a$  が -15~15°C の範囲で決定されている。

#### Approximation formulas of WBGT<sub>eff</sub><sup>\*</sup>

As was indicated in the previous subsections, WBGT<sub>eff</sub><sup>\*</sup> varies in complex ways. This means that the heat stress formulas expressed using the same variables as WBGT<sub>eff</sub> change depending on clothing and surrounding environmental factors. WBGT<sub>eff</sub><sup>\*</sup> provided reasonable clarification on the changing trends of the formulas. For simplicity, we proposed approximation formulas of WBGT<sub>eff</sub><sup>\*</sup> for *perm* in *shady* and *sunny* conditions as shown in Eqs. (21) and (22), respectively; those for *imperm* in *shady* and *sunny* conditions are shown in Eqs. (23) and (24), respectively. These approximation formulas were determined for  $v$  values ranging from 0.2 to 2.0 m/s,  $I_{cl.st}$  values ranging from 0.3 to 1.5 clo for *perm* and from 0.5 to 1.3 clo for *imperm*,  $\varepsilon$  values ranging from 0.3 to 0.7, and  $T_r - T_a$  values ranging from -15 to 15 °C.

$$\begin{aligned} \text{WBGT}_{\text{eff}}^* &= 0.69T_w + (0.051I_{cl.st} + 0.27)T_g \\ &+ [-0.62v + 5.2I_{cl.st} + (0.04v - 0.087I_{cl.st} - 0.052)(T_r - T_a) - 2.9] \end{aligned} \quad (21)$$

$$\begin{aligned} \text{WBGT}_{\text{eff}}^* &= 0.69T_w + (0.051I_{cl.st} + 0.27) \left\{ \begin{aligned} &(1.1\varepsilon + 0.3v - 0.08v^2 - 0.24)T_g \\ &+ [1 - (1.1\varepsilon + 0.3v - 0.08v^2 - 0.24)]T_a \end{aligned} \right\} \\ &+ [-0.62v + 5.2I_{cl.st} + 0.11(T_r - T_a) - 0.13\varepsilon(T_r - T_a) - 2.9] \end{aligned} \quad (22)$$

$$\begin{aligned} \text{WBGT}_{\text{eff}}^* &= 0.38T_w + (0.14I_{cl.st} + 0.53)T_g \\ &+ [-0.93v + 8.2I_{cl.st} + (0.077v - 0.022I_{cl.st} - 0.13)(T_r - T_a) - 0.73] \end{aligned} \quad (23)$$

$$\begin{aligned} \text{WBGT}_{\text{eff}}^* &= 0.38T_w + (0.14I_{cl.st} + 0.53) \left\{ \begin{aligned} &(0.84\varepsilon + 0.25v - 0.07v^2 - 0.18)T_g \\ &+ [1 - (0.84\varepsilon + 0.25v - 0.07v^2 - 0.18)]T_a \end{aligned} \right\} \\ &+ [-0.93v + 8.2I_{cl.st} + 0.19(T_r - T_a) - 0.2\varepsilon(T_r - T_a) - 0.73] \end{aligned} \quad (24)$$

$T_{gw}$  の重みの和,  $T_g$  と  $T_a$  の重みの和,  $T_g$  と  $T_a$  の重みの和の比, 式 (21) ~ (24) の AF に相当する値の回帰値の最大・最小と最大誤差を表 1 (a), (b) に示す。式(21)-(24)は,  $I_{cl.st}$ ,  $v$ ,  $\varepsilon$  が異なっても作業着を着た居住者の熱ストレス尺度に大まかに換算することができるが, 正確な熱ストレス評価のためには, 式 (4) または (5) を解いて WBGT<sub>eff</sub><sup>\*</sup> を求めることが望ましい。

The maximum/minimum of the regressed values and the maximum errors of the weight of  $T_w$ , the sum of the weights of  $T_g$  and  $T_a$ , the ratio of the weight of  $T_g$  to the sum of the weights of  $T_g$  and  $T_a$ , and the value corresponding to the AF in Eqs. (21)–(24) are shown in Table 1(a) and (b). While Eqs. (21)–(24) enable the rough conversion of heat stress into

the heat stress scale for occupants dressed in work clothes even if  $I_{cl,st}$ ,  $v$ , and  $\varepsilon$  are different, it is desirable to determine  $WBGT_{eff}^*$  by solving Eq. (4) or (5) for precise heat stress evaluations.

**Table 1(a). Maximum and minimum data for regressions and the maximum error of Eqs. (21) and (22)**

	Maximum value	Minimum value	Absolute maximum error
Weight of $T_w$ (ND)	0.72	0.68	0.026
Sum of weights of $T_g$ and $T_a$ (ND)	0.35	0.27	0.024
Ratio of $T_g$ weight to sum of weights of $T_g$ and $T_a$ (ND) <sup>a</sup>	0.85	0.19	0.096
Adjustment factor (°C)	6.3 <sup>b</sup> , 6.0 <sup>a</sup>	-2.8 <sup>b</sup> , -3.5 <sup>a</sup>	0.68 <sup>b</sup> , 0.59 <sup>a</sup>

<sup>a</sup> Values for Eq. (22), <sup>b</sup> Values for Eq. (21), ND: Non-dimensional,  $T_a$ : Air temperature,  $T_g$ : Globe temperature  
 $T_w$ : Natural wet bulb temperature

**Table 1(b). Maximum and minimum data for regressions and the maximum error of Eqs. (23) and (24)**

	Maximum value	Minimum value	Absolute maximum error
Weight of $T_w$ (ND)	0.42	0.37	0.034
Sum of weights of $T_g$ and $T_a$ (ND)	0.71	0.59	0.015
Ratio of $T_g$ weight to sum of weights of $T_g$ and $T_a$ (ND) <sup>a</sup>	0.67	0.16	0.066
Adjustment factor (°C)	12.9 <sup>b</sup> , 11.8 <sup>a</sup>	-0.2 <sup>b</sup> , 0.0 <sup>a</sup>	1.08 <sup>b</sup> , 0.71 <sup>a</sup>

<sup>a</sup> Values for Eq. (24), <sup>b</sup> Values for Eq. (23), ND: Non-dimensional,  $T_a$ : Air temperature,  $T_g$ : Globe temperature  
 $T_w$ : Natural wet bulb temperature

## 結論

本研究では、代謝熱生産値が  $174 \text{ W/m}^2$  程度の中強度作業に従事する居住者の透湿性着衣  $perm$  と不透湿性防護服  $imperp$  について、 $WBGT_{eff}^*$  を提案した<sup>2</sup>。  $WBGT_{eff}^*$  は、人体の熱平衡方程式に基づき、基本的な衣服(作業服)を着用した居住者が受ける熱ストレスのレベルに変換することが可能である。  $WBGT_{eff}^*$  は、衣服(透湿度の違いを含む)、環境温度、湿度の組み合わせを変えて行った人体実験による規定域の上限値と  $WBGT_{eff}^*$  を比較し、不完全燃焼の規定域の熱環境を表現するのに有効であることを確認した。  $WBGT_{eff}^*$  をもとに、 $T_w$ 、 $T_g$ 、 $T_a$  と切片の加重和で熱ストレスを表現する場合、熱・水分移動、日射吸収、周辺環境因子に関する衣服特性によって  $T_w$ 、 $T_g$ 、 $T_a$  の重み、切片がどう変わるかを明らかにすることができた。  $imperp$  の  $WBGT_{eff}^*$  は  $perm$  の  $WBGT_{eff}^*$  との比較から、次のような特徴があることがわかった。(1)  $imperp$  では乾球温度( $T_g$  と  $T_a$ )が  $WBGT_{eff}^*$  に与える影響が大きく、湿球  $T_w$  の影響は逆である。(2)  $WBGT_{eff}^*$  を晴天時に適用すると、 $perm$ 、 $imperp$  ともに気流速度  $v$  が増加すると  $T_g$  の加重比が大きく、 $T_a$  は減少する。(3)  $imperp$  では日射負荷の影響を除く衣服断熱性、 $v$  および放射場が  $WBGT_{eff}^*$  に大きな影響を与える、という特徴がある。これら3点を考慮し、 $WBGT_{eff}^*$ 、基本的な衣服である作業着を着用した居住者の熱ストレス尺度に大まかに換算できる近似式を示した。  $WBGT_{eff}^*$  は、人体と周辺環境との熱移動に基づき、日射と風速の影響を評価する。しかし、 $WBGT_{eff}^*$ 、人体実験による日射と風速の影響の検証は行われていない。  $WBGT_{eff}^*$  を日射や風速の変化を含む条件に広く適用するためには、人体実験による検証データが必要である。

不透湿性防護服を着用したときと日常の衣服を着用したとき人体の熱収支式の比較から、着衣の透湿特性の大きく異なる不透湿性防護服着用時を対象とする補正  $WBGT$  を得た。不透湿性防護服着用時の湿球の重みはおおよそ 0.4、黒球の重みは 0.6~0.7 となり、日常の着衣の重みと大小が逆転した。着衣や長波長放射場に対する  $WBGT$  の補正量は、不透湿性防護服を着用した場合の方が日常の衣服を着用した場合と比べて大きく、これまで補正の対象とされていなかった日射の有る屋外において長波長放射場による補正が必要であることが示された。

## Conclusions

In this study, we proposed  $WBGT_{eff}^*$  for  $perm$  and  $imperp$  for occupants engaged in moderate intensity work with a metabolic heat production value of around  $174 \text{ W/m}^2$ .  $WBGT_{eff}^*$  enables the conversion of heat stress into the scale experienced by an occupant dressed in a basic clothing ensemble (work clothes) based on the heat balance equations for

the human body. We confirmed that  $WBGT_{eff}^*$  was effective for expressing the critical thermal environments for the prescriptive zone for *imperm* through the comparisons of  $WBGT_{eff}^*$  with the upper limit of the prescriptive zone determined by human subject experiments conducted under different combinations of clothing (including the difference in vapor permeability), environmental temperature, and humidity. Based on  $WBGT_{eff}^*$ , we succeeded in clarifying how the weights for  $T_w$ ,  $T_g$ , and  $T_a$ , and the intercept changed depending on clothing properties related to heat and vapor transfers, solar absorption, and the surrounding environmental factors when the heat stress is expressed by the weighted sum of  $T_w$ ,  $T_g$ , and  $T_a$  and the intercept.  $WBGT_{eff}^*$  for *imperm* was characterized as follows from the comparison to  $WBGT_{eff}^*$  for *perm*: (1) the influence of dry temperatures ( $T_g$  and  $T_a$ ) on  $WBGT_{eff}^*$  was greater for *imperm*, whereas the influence of  $T_w$  was the opposite; (2) with  $WBGT_{eff}^*$  applied to *sunny* conditions, the weighting ratio of  $T_g$  increased and that of  $T_a$  decreased with an increase in  $v$  for both *perm* and *imperm*; (3) clothing thermal insulation,  $v$ , and radiant field, excluding the effects of the solar load, had a greater impact on  $WBGT_{eff}^*$  for *imperm*. Considering these three points, we indicated approximation formulas for  $WBGT_{eff}^*$  that enable rough heat stress conversions into the heat stress scale for occupants wearing the basic clothing ensemble, i.e., work clothes.  $WBGT_{eff}^*$  evaluates the effects of solar radiation and air velocity based on the heat transfer between the human body and surrounding environment. However,  $WBGT_{eff}^*$  has not been validated for the effects of solar radiation and air velocity by human subject experiments. Validation data from human subject experiments are needed for the wide application of  $WBGT_{eff}^*$  to conditions involving variations in solar radiation and air velocity.

謝辞 この研究は、科学研究費補助金(No.15H02888、プロジェクトリーダー：横浜国立大学 薩本弥生教授)の一部助成を受けて実施されたものです。横浜国立大学の薩本弥生教授、本研究にご協力いただいた南フロリダ大学公衆衛生学部 Thomas E. Bernard 教授、ラフボロー大学 George Havenith 教授に感謝いたします。

#### Acknowledgments

This study was supported in part by the Grants-in-Aid for Scientific Research (KAKENHI) Program (No. 15H02888, Project leader: Professor Yayoi Satsumoto, Yokohama National University). We would like to express our gratitude to Professor Thomas E. Bernard of the College of Public Health, University of South Florida, and Professor George Havenith of Loughborough University for their cooperation in this study.

#### 文献

- 1) Sakoi et al.: Expansion of effective wet bulb globe temperature for vapor impermeable protective clothing, J. Therm. Biol. 71, 10/16, 2018.
- 2) Sakoi et al.: Heat balance model for a human body in the form of wet bulb globe temperature indices, J. Therm. Biol. 71, 1/9, 2017.
- 3) Bernard et al.: WBGT clothing adjustments for four clothing ensembles under three relative humidity levels. J. Occup. Environ. Hyg. 2(5), 251/256.

#### References

- ACGIH, 2009. Heat Stress and Strain: TLV(R) Physical Agents, 7th Edition. American Conference of Governmental Industrial Hygienists, Cincinnati, Ohio.
- ACGIH, 2015. Documentation of the Threshold Limit Values for Chemical Substances and Physical Agents and Biological Exposure Indices, 7th Edition—2015 Supplement. American Conference of Governmental Industrial Hygienists, Cincinnati, Ohio. ISBN: 978-1-607260-82-0.
- Bernard, T.E., Ashley, C.D., 2009. Short-term heat stress exposure limits based on wet bulb globe temperature adjusted for clothing and metabolic rate. J. Occup. Environ. Hyg. 6(10), 632–638.
- Bernard, T.E., Caravello, V., Shwartz, S.W., Ashley, C.D., 2008. WBGT clothing adjustment factors for four clothing ensembles and the effect of metabolic demands. J. Occup. Environ. Hyg. 5(1), 1–5.
- Bernard, T.E., Luecke, C.L., Schwartz, S.W., Kirkland, K.S., Ashley, C.D., 2005. WBGT clothing adjustments for four clothing ensembles under three relative humidity levels. J. Occup. Environ. Hyg. 2(5), 251–256.
- Caravello, V., McCullough E.A., Ashley, C.D., Bernard, T.E., 2008. Apparent evaporative resistance at critical conditions for five clothing ensembles. Eur. J. Appl. Physiol. 104, 361–367.
- ISO, 1998. Instruments for Measuring Physical Quantities, 2nd Edition. International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland; ISO 7726:1998.

- ISO, 2004. Analytical Determination and Interpretation of Heat Stress Using Calculation of the Predicted Heat Strain, International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland; ISO 7933:2004.
- ISO, 2005. Analytical Determination and Interpretation of Thermal Comfort Using Calculation of the PMV and PPD Indices and Local Thermal Comfort Criteria, 2nd Edition. International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland; ISO 7730:2005.
- ISO, 2007. Ergonomics of the Thermal Environment—Estimation of Thermal Insulation and Water Vapor Resistance of a Clothing Ensemble. International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland; ISO 9920:2007.
- ISO, 2017. Assessment of Heat Stress Using the WBGT (Wet Bulb Globe Temperature) Index. International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland; ISO 7243:2017.
- Kenney, W.L., 1987. WBGT adjustments for protective clothing. *Am. Ind. Hyg. Assoc. J.* 48, 576–577.
- NIOSH, 2016. Criteria for a Recommended Standard: Occupational Exposure to Heat and Hot Environments. By Jacklitsch, B., Williams, W.J., Musolin, K., Coca, A., Kim, J.-H., Turner, N.; Cincinnati, OH: U.S. Department of Health and Human Services, Centers for Disease Control and Prevention, National Institute for Occupational Safety and Health, DHHS (NIOSH); Publication 2016-106.
- Ramsey, J.D., 1978. Abbreviated guidelines for heat stress exposure. *Am. Ind. Hyg. Assoc. J.* 39(6), 491–495.
- Sakoi, T., Mochida, T., 2013. Concept of the equivalent wet bulb globe temperature index for indicating safe thermal occupational environments. *Build. Environ.* 67, 167–178.
- Sakoi, T., Mochida, T., Kurazumi, Y., Kuwabara, K., Horiba, Y., Sawada, S., 2018. Heat balance model for human body in the form of wet bulb globe temperature indices. *J. Therm. Biol.* (accepted.)
- Watanabe, S., Koganezawa, S., Horikoshi, T., Tomita, A., 2008. Measurement of solar radiation absorptance of different clothing fabric for outdoor thermal comfort study. *Jpn. J. Biometeorol.* 45(4), 121–129 (in Japanese with English abstract).
- Yaglou, C.P., Minard, D., 1957. Control of heat casualties at military training centers. *Am. Med. Assoc. Arch. Ind. Health* 16(4), 302–316.

#### 4-3 着衣モデルによる着衣の素材およびデザインの熱移動および換気への効果

島崎康弘 (豊橋技術科学大学 工学研究科)

##### (1) 実験概況

着衣は人体の温熱快適性に大きく影響することが知られており、衣服と人体の間の微小空間における気候形成について検討を行った。衣服内気候は微小空間であるため、実際にセンサを用いた温度、湿度、気流の計測が困難である。そこで、本研究では、円筒型ヒーターとアクリルフィルムによる模擬人体着衣モデルを作成し、人体モデルの空隙内の気流及び空気性状を実測、観察することで衣服内気流形成メカニズムの基礎的解明を試みた。衣服内での気流の流れを把握する実験のために、着衣模擬人体を作成し、それを用いてPIV計測を行った。人体は簡単な形状で表すと円筒型として扱うことができ、図-1に示すように着衣模擬人体を人体-衣服の二層同心円筒にモデル化した。模擬人体としては円筒型ヒーター(半径 $r=80$  mm, 高さ $H=150$  mm), 模擬衣服として円筒型透明アクリルフィルム(高さ $l=160$  mm, 厚さ $t=0.5$  mm)で人体胴体部の着衣人体を再現した。このとき、衣服と人体の空隙の大きさを $d=4$  mm,  $6$  mm,  $8$  mmと変化させた。活動状況を表す代謝発熱量の影響を観測する目的で、 $d=8$  mmの時のみ、生理発熱のない $q=0$  W/m<sup>2</sup>における実験も行った。

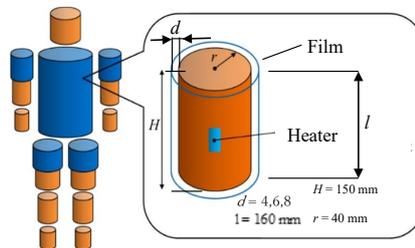
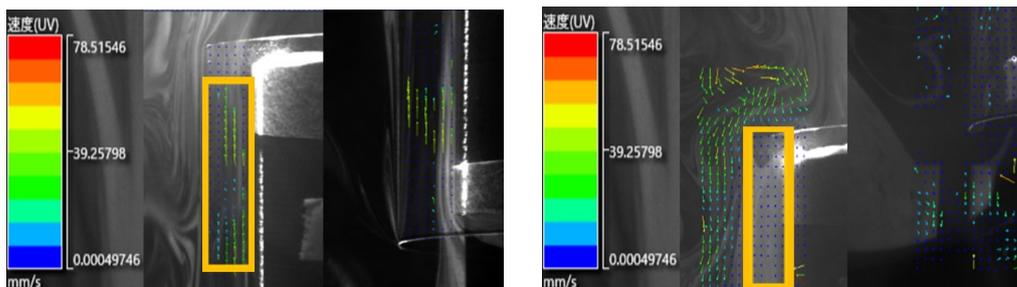


図-1 実験に用いた人体モデル

##### (2) 実験結果

実験は日射のない室内実験室で実施し、周囲空気の初期条件は常温(温度 $25.7 \sim 28.2$  °C, 湿度 $51.9 \sim 73.7$  %)とし、人体を模擬したヒーター表面温度は $40.4 \sim 43.8$  °C, 衣服を模擬したフィルム表面温度は $31.7 \sim 34.1$  °Cであった。例として、人体発熱量 $q=80$  W/m<sup>2</sup>時のPIV画像を図-2に示す。



(a) Gap= 8 mm,  $q=80$  W/m<sup>2</sup>

(b) Gap= 8 mm,  $q=80$  W/m<sup>2</sup>

図-2 PIV測定結果例

$q=80$  W/m<sup>2</sup>における全体的な傾向としては、いずれの空隙条件においても、模擬人体の発熱に伴い自然対流が生じるため、下部開口部からほぼ垂直に気流が流入し、上部開口部に向かって流れていき、さらに上部開口部より拡散する。また、空隙内において、人体側の局所流速が衣服側より大きくなる傾向を示す。発熱量 $0$  W/m<sup>2</sup>のとき上部開口部での平均流速は $q=80$  W/m<sup>2</sup>のときの値より小さくなっており、人体の発熱により衣服内気候の流れ生じることがわかった。

4-4 靴の換気計測用模擬歩行装置を用いた着靴時足部の温熱評価および改善策の検討  
 -透湿防水性ナノファイバー膜を使用したシューズの換気性能および透湿性能評価-

薩本弥生<sup>1)</sup>, 池田文美<sup>1)</sup>, 渡邊圭<sup>2)</sup>, 大澤道<sup>2)</sup>  
<sup>1)</sup> 横浜国立大学教育学部, <sup>2)</sup> 株式会社ナフィアス

目的: アウトドア靴の温熱的快適性を維持するためには透湿防水性能が要求される。従来の透湿防水膜としてはGore-texが主流であるが、発汗が激しい活動時には熱水分移動が十分とは言えず、さらなる機能をもった透湿防水膜の開発が期待される。一方、ナノファイバーの開発が進み、応用用途についての研究が検討されている。

そこで、本研究では株式会社ナフィアスが開発したNafiaSの透湿防水膜を使ったアウトドア活動用の靴を試作し、著者らが開発した装置を用いて靴の透湿性能と模擬歩行時の換気性能評価を行い、従来のゴアテックス膜の同形状の運動靴と比較検討することを目的とする。

方法: 実験靴: 筆者らは靴生地構成の異なる3種類①Gore-tex, ②NafiaS/CORDURA, ③NafiaS/44G Tricotのシューズを作製し、それぞれの換気性能および透湿性能を評価した。

靴の透湿性能評価: 靴の透湿性能を評価するために著者らが開発した模擬足装置を用いて靴形状のままナノファイバー試作靴とゴアテックス靴の透湿性能を評価した(図1)。

歩行時の換気性能評価: 換気装置・模擬歩行装置を組み合わせることで模擬歩行時の換気性能を評価した(図2)。

実験結果: 換気計測および模擬足による靴形状での透湿速度計測を行い、3種の靴を比較したところ、NafiaS/44G TricotおよびNafiaS/CORDURAはGore-tex靴よりも透湿性能が50%および31%増加し(図3)、換気性能で各々128%および117%増加した(図4)。

結論: NafiaSを使用した靴はGore-texを使用した靴に比べ換気性能および透湿性能ともに高い結果を示した。

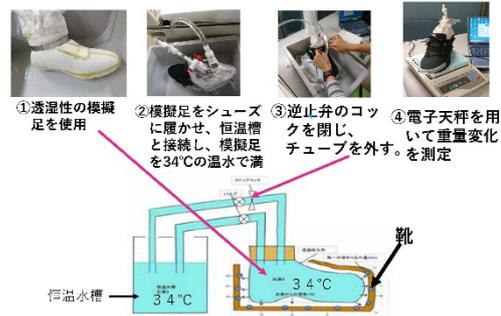
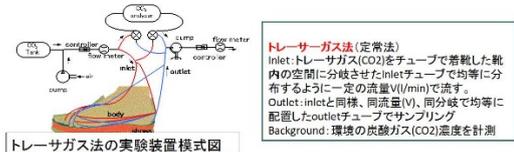


図1 模擬足を用いた透湿速度計測装置

トレーサガス法



トレーサガス法の実験装置模式図

$$VENT = V \cdot \frac{CO_{2in} - CO_{2out}}{CO_{2out} - CO_{2e}}$$

CO<sub>2in</sub>: inlet CO<sub>2</sub>濃度(ppm),  
 CO<sub>2out</sub>: outlet CO<sub>2</sub>濃度(ppm),  
 CO<sub>2e</sub>: 環境のCO<sub>2</sub>濃度(ppm),  
 V: inlet&outletの流速(l/min.)



装置の制御部の写真



図2 換気計測装置と模擬歩行装置

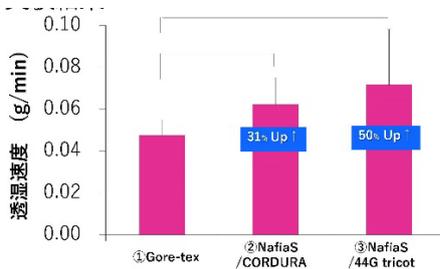


図3 換気計測結果

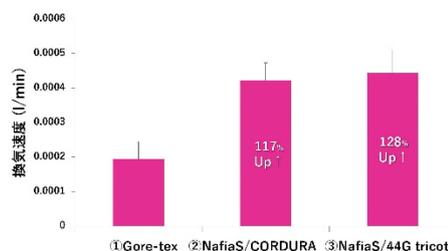


図4 換気計測結果

## 5. 居住環境デザインの最適化

### 5-1 夏季における高齢者の日常生活における温熱環境および心拍の計測

聖心女子大学 西原 直枝

要旨：

夏季の高齢者の日常生活や睡眠時における、温熱環境物理量および、皮膚温 2 点（胸部、大腿部）、衣内温湿度 1 点（胸部）、心拍を携帯可能なセンサを用いて測定した。また、アンケートおよび観察により、日常生活および睡眠時における温熱環境に関わる行動や生活時間の記録を行った。

被験者（65 歳以上の健康な女性 1 名）の日常生活のうち、冷房のない 2 階において、洗濯物を干す作業を行うことが習慣となっていたことに着目した測定では、冷房のない 2 階での作業時の、床上 1.1m における環境測定値は、空気温度 34.8℃、放射温度 35.1℃、気流 0.05m/s、相対湿度 58%RH であり暑い環境であった。この環境において、洗濯物を干す作業を行うと、被験者の皮膚温、衣服内温湿度は上昇し、心拍数も急激な上昇が認められた。

また、夏季の高齢者の睡眠時における、温熱環境物理量および、皮膚温 2 点（胸、大腿）、衣内温湿度 1 点（胸）、心拍を携帯可能なセンサを用いて 8 日間測定した。65 歳以上の男性 1 名の睡眠時の生理量の結果について報告した。日常生活の実態に関するデータを測定するため、冷房の使用方法は居住者に任されていたが、測定期間を通じて睡眠前に 28℃設定で冷房運転を行い、23～24 時頃にタイマー設定で電源が OFF となるように運用していた。測定期間における、床上 1.1m 高さの寝室の空気温度は平均 27.8℃、相対湿度は 56%であった。寝室の空気温度は冷房の停止とともに 1-1.5℃程度上昇し 28.9℃程度を維持していた。胸および大腿の皮膚温は 36℃まで上昇した。心拍数は、寝室内空気温度の変化の直接的な影響は認められなかったが、70-80bpm で推移しており、90 や 100bpm などの高い値となる場所があった。

用いたセンサは、腕時計式で被験者への負担も少ないが、心拍を時系列で把握するのにとどまり、詳細な睡眠深度や自律神経活動の特徴を分析することはできなかった。

**キーワード：**温熱環境、心拍数、高齢者、睡眠環境、夏季、熱中症予防、日常生活

#### 1. はじめに

65 歳以上の高齢者は、男女とも住宅における熱中症の発生が多く、日常生活の実態に関するデータの蓄積およびモニタリングできるシステムの開発が求められている。本研究では、夏季の高齢者の日常生活における、人体—着衣—環境に関わる温熱環境物理量を測定し、高齢者の夏季の住まい方や着方などの実態に関するデータを蓄積することを目的とした。

#### 2. 研究方法

被験者は 65 歳以上の男女各 1 名、合計 2 名とした。埼玉県内の被験者自宅において、各センサを貼付、装着し、室内環境の温熱環境を計測できる環境の元で測定を行った。被験者は通常通りに生活を送ってもらい夏季の日常生活における状況を把握した。測定期間は、2017 年 8 月 21 日夜から 29 日朝までの 8 日間である。被験者には通常通りの生活をしていただき、夏季の日常生活における状況を把握した。

なお、2016 年度は開発中の無線型の温度計を用いた測定を行ったが、設定の煩雑さやデータ受信の不安定さが残っており、特に高齢者の測定には、設置に時間がかかり、データが不安定で連続的に取れないこともあり被験者への負担が大きかった。無線式のセンサが、使いやすくなり、より日常生活に適し安定してデータを記録できるものとなれば、被験者の負担少なく、生体信号をモニタリングすることができると考えられるが、2017 年度は、無線を用いていないものの安定してデータを取ることができるセンサを用いて測定を行うこととした。また、2016 年度は胸部に濡れベルトで設置するタイプの心拍系を用いたが、ぬれたものを日常的に設置することとなり不快感がともなうため、2017 年度は、腕時計

型の心拍計を用いることとした。2017 年度夏季に測定を行い、2017、2018 年度に分析、まとめを行った。

2017 年度の温熱生理計測の評価項目とし、物理的測定として、皮膚温を胸部および大腿部の 2 点、衣服内温湿度を胸部 1 点、腕時計型の心拍計のセンサ（6LED 光学式手首型心拍計）を用い、測定を行った。被験者への負担が最小となるように、小型のセンサを用いた。

被験者の普段通りの生活を行っている中での計測となるため、日常生活範囲での暑熱環境における測定であるが、万一、室内環境物理量の測定値から、日本生気象学会「日常生活における熱中症予防指針」Ver.3 に示される危険温度基準である WBGT31℃を超えることが判断されるときには、居住者に危険であることを知らせ、室内温度を低下させることを促した。熱中症予防の観点および安全性の確保のため、本研究は、ISO 7933, 2004 に規定されている暑熱負荷での許容上限値に基づき、被験者が、体温 39.0℃、心拍数 180 回/分のいずれかを越えた場合、または被験者の要請があったときは、直ちに測定を中止することとした。本研究は、聖心女子大学研究倫理委員会で承認された。

### 3. 日常活動時の測定方法・結果

#### 1) 測定概要

健康な 65 歳以上の女性被験者 1 名（以下、被験者 A）の夏季の日常生活（家事時）における心拍の経時変化と温熱環境との関係について報告する。

被験者 A の測定時の室内における日常活動内容を表 1 に示す。着衣量は約 0.5clo であった。対象測定時間は、外出時の測定を除いた 2017 年 8 月 23 日（水）11：30～14：30 の間を本報告の対象とした。

表 1 室内における日常活動内容

時間	11:30	12:00	12:30	13:00	13:30	14:00
場所	1Fキッチン	1Fキッチン	1Fリビング		2F和室/ 1Fリビング	1Fキッチン
行動	昼食準備	昼食・片付け (~12:40)	くつろぎ・昼寝 (12:40~13:30)		洗濯干し (13:37~ 13:50)/ 片付け (13:55~ 14:04)	アンケート 記入

(被験者：A 2017 年 8 月 23 日)

#### 2) 環境測定

測定日は、快晴であり、降雨量は 0mm だった。11：30 から 14：30 の測定時間における、測定地点に最も近い地域のアメダスデータの気温の平均は 32.0℃、標準偏差は 0.55℃であった。最高気温は 32.7℃（13：00 時点）だった。対象の住宅は埼玉県にあり、築 36 年、木造 2 階建ての一戸建である。窓ガラスは単板 1 枚であり、省エネルギーのために改修工事を行ったことは特にない。図 1 に床上 1.1 m 高さにおける室内の温湿度の測定値を示す。

1階のリビングは家庭用のエアコンにより、冷房を行っており約28.3℃に保たれていた。リビングのとなりのキッチンには冷房がないが、リビングとの間のドアを開けているため、リビングで使用している冷房の効果があり、約29.2℃を保っていた。2階は窓を締め切っており冷房は使用していなかったため、屋外の気温上昇にともない空気温度が高くなっており、37.1℃まで上昇していたが、被験者Aが13:37に洗濯物を干すために2階に上がった際に、窓を開放したため、温湿度ともに急激に低下し、空気温度35.5℃、42%rhとなった。なお、洗濯を干す際の、被験者の作業位置に近い場所として、2階和室の窓際における環境を、アメニティメータAM-101にて、床上1.1m高さで別途、測定した。その結果、空気温度34.8℃、放射温度35.1℃、気流0.05m/s、相対湿度58%RHだった。

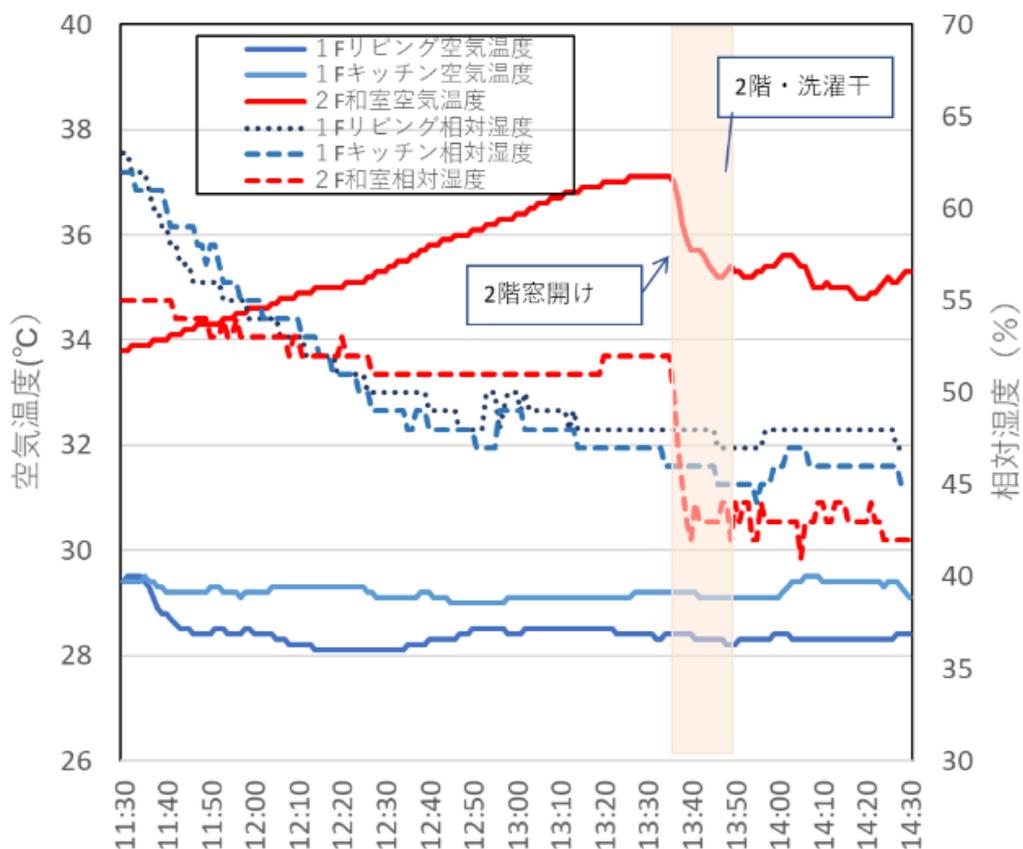


図1 測定時間の気温

### 3) 皮膚温および衣服内温湿度

図2に胸および大腿の皮膚温、図3に胸における衣服内温湿度を示す。図内に2階にて洗濯干しを行っていた時間帯を網かけで示した。2階にて洗濯干しを開始すると、皮膚温が急激に上昇し、その後、冷房のきいた1階に移動すると低下していることがわかる。衣内温度も同様の傾向があるが、衣内湿度については、発汗にともない、2階の洗濯干し時に衣内の相対湿度が上昇し、高い状態を維持していた。発汗の影響とともに、急激に衣内温度が低下することにより相対的に湿度が高くなるためであると考えられる。

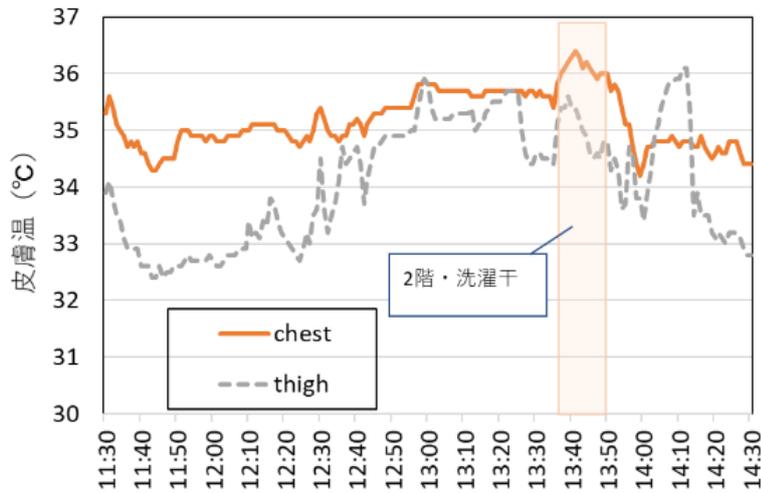


図2 胸および大腿の皮膚温

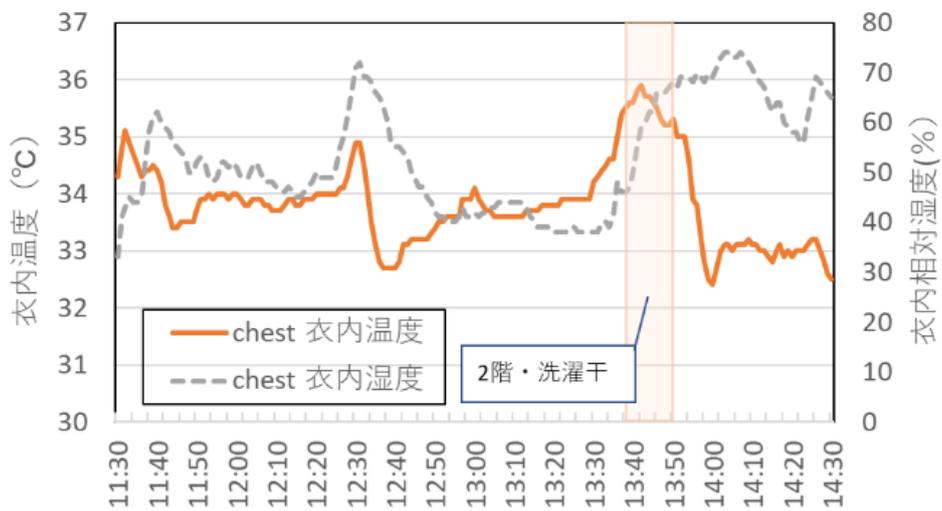


図3 胸部衣服内温湿度

#### 4) 心拍数

図4に光学式手首型心拍計で測定した心拍数を示す。冷房されたリビングでくつろいでいる状態から、2階に移動し洗濯干し作業を行うことで、心拍数は急激に上昇し110~120bpmの比較的高い心拍数となっていた。

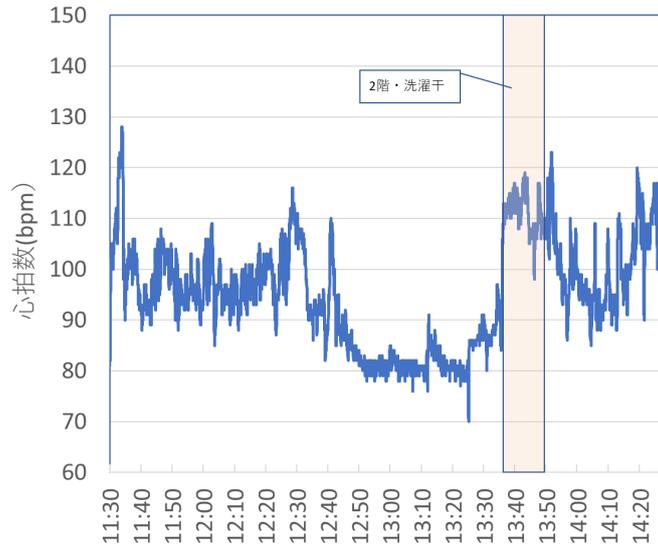


図4 心拍数

#### 4. 夏季睡眠時の測定方法・結果

##### 1) 測定概要

8日間にわたって測定した睡眠時の室内環境測定結果および、健康な65歳以上の男性被験者1名の夏季の睡眠時における温熱環境の実態測定および、心拍等の経時変化について報告する。温熱生理計測の評価項目とし、皮膚温を胸部および大腿部の2点(ESPEC RT13)、衣服内温湿度を胸部(ESPEC RSW20S)、腕時計型の心拍計のセンサ(6LED光学式手首型心拍計)を用い測定を行った。被験者への負担が最小となるように、小型のセンサを用いた。環境物理量については、寝室の床上0.1、0.6、1.1、1.7m高さの空気温度および相対湿度を、温湿度測定器(ESPEC RS12)で、1分間隔で測定した。

##### 2) 寝室内空気温度

測定期間における、22時から翌朝6時までの寝室の空気温度を表2に示す。リビングと寝室は1階にあり、隣り合った連続した間取りである。リビングのみに家庭用エアコンがあるが寝室にはないため、就寝時にはリビングと寝室の間の障子戸を開けており、冷気が寝室に届くようにしていた。エアコンの温度設定やON/OFFは居住者に任されていたが、測定期間を通じて、入眠時に28℃設定で冷房運転を行い、23～24時頃にタイマー設定で電源がOFFとなるように運用していた。測定期間における、床上1.1m高さの寝室の空気温度は平均27.8℃、相対湿度は56%であった。

表2 測定期間中の寝室空気温度(22時～翌6時)

測定高さ	空気温度(℃)			
	床上 0.1m	床上 0.6m	床上 1.1m	床上 1.7m
8/21	27.3(0.17) 26.8/27.5	27.5(0.19) 27.0/27.8	27.5(0.22) 27.0/27.8	27.5(0.23) 26.9/27.8
8/22	27.1(0.46) 26.1/27.5	27.3(0.45) 26.3/27.7	27.4(0.38) 26.5/27.8	27.5(0.33) 26.6/27.8
8/23	26.9(0.62) 25.7/27.6	27.3(0.55) 26.2/27.9	27.6(0.39) 26.6/28.0	27.9(0.27) 27.3/28.5
8/24	28.0(0.49) 26.8/28.4	28.3(0.52) 27.1/28.7	28.4(0.45) 27.4/28.9	28.6(0.29) 27.9/29.0

8/25	28.2(0.32) 27.2/28.5	28.4(0.29) 27.4/28.7	28.6(0.22) 27.6/28.8	28.6(0.17) 27.8/28.8
8/26	27.9(0.18) 27.5/28.1	28.1(0.21) 27.6/28.4	28.2(0.20) 27.8/28.5	28.2(0.18) 27.8/28.4
8/27	26.7(0.77) 25.4/28.0	26.9(0.80) 25.5/28.2	26.9(0.81) 25.5/28.2	26.8(0.81) 25.4/28.1
8/28	27.6(0.35) 26.2/27.9	28.0(0.32) 26.5/28.3	28.1(0.26) 26.8/28.4	28.1(0.22) 27.2/28.4

上段：平均（標準偏差） 下段：最小 / 最大

### 3) 空気温度および生理量の経時変化

測定日のうち比較的室内温度が高かった、8月24日の睡眠時データの経時変化を示す。

屋外の空気温度は22時には29℃程度であったが、夜間に徐々に低下し朝5時には25.3℃であった。冷房を24時前後にタイマーによって止めた影響で、寝室内の空気温度は27.5℃から28.9℃程度まで上昇するが、外気温低下の影響でそれ以上は上昇せずに維持していた（図5）。胸および大腿の皮膚温は室内空気温度の影響を受け36℃まで上昇した（図6）。寝返り等の影響で皮膚温が上下している。衣内湿度は、測定開始時から汗をかいていたことにより、非常に高かった。寝具のかけ方や寝返りの様子、体動などを今回の測定では把握できなかったため、考察ができないが、睡眠の多くの時間帯にわたって、発汗をとめないながら眠っていた可能性がある。心拍数は、寝室内の温度変化による変化を直接的には受けているとはいえないが、70-80bpmで推移しており、時折、90や100などの高い心拍数となるところがあった。

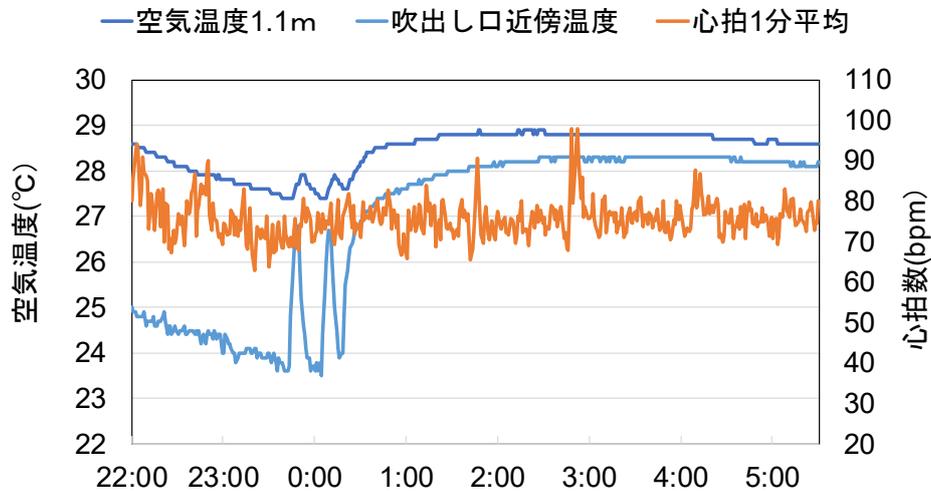


図5 8/24 寝室温度と心拍数（被験者B）

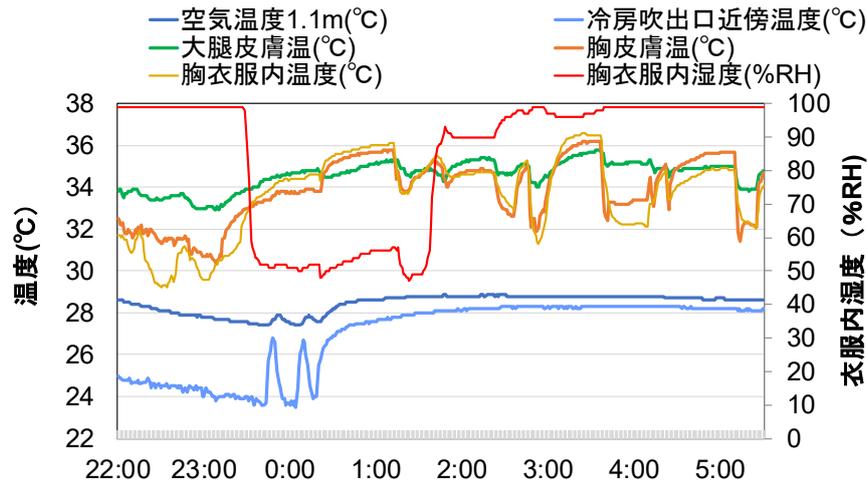


図6 8/24 皮膚温・衣服内温湿度 (被験者B)

## 5. まとめ

夏季の高齢者の日常生活および睡眠時室内環境を評価することを目的として、温熱環境物理量および、皮膚温2点（胸、大腿）、衣内温湿度1点（胸）、心拍を携帯可能なセンサを用いて8日間測定し、その結果について分析、考察を行った。

被験者（65歳以上の健康な女性1名）の日常生活のうち、冷房のない2階において、洗濯物を干す作業を行うことが習慣となっていたことに着目した測定では、冷房のない2階での作業時の、床上1.1mにおける環境測定値は、空気温度34.8°C、放射温度35.1°C、気流0.05m/s、相対湿度58%RHであり暑い環境であった。この環境において、洗濯物を干す作業を行うと、被験者の皮膚温、衣服内温湿度は上昇し、心拍数も急激な上昇が認められた。

また、夏季の高齢者の睡眠時における、温熱環境物理量および、皮膚温2点（胸、大腿）、衣内温湿度1点（胸）、心拍を携帯可能なセンサを用いて8日間測定した。65歳以上の男性1名の睡眠時の生理量の結果について報告した。日常生活の実態に関するデータを測定するため、冷房の使用方法は居住者に任されていたが、測定期間を通じて睡眠前に28°C設定で冷房運転を行い、23~24時頃にタイマー設定で電源がOFFとなるように運用していた。測定期間における、床上1.1m高さの寝室の空気温度は平均27.8°C、相対湿度は56%であった。寝室の空気温度は冷房の停止とともに1~1.5°C程度上昇し28.9°C程度を維持していた。胸および大腿の皮膚温は36°Cまで上昇した。心拍数は、寝室内空気温度の変化の直接的な影響は認められなかったが、70~80bpmで推移しており、90や100bpmなどの高い値となる場所があった。

温熱環境や心拍、皮膚温等の計測により、日常生活や睡眠時の熱環境の特徴やリスクなどをとらえ、フィードバックすることが可能であるといえるが、日常的に被験者の負担なく測定できるようなセンサ開発が望まれる。また無線式等で、随時、急激な気温上昇、心拍や皮膚温の上昇が認められる際にアラートとなるようなシステムも重要であるといえる。今回、心拍系は、腕時計式で被験者への負担も少なかったものの、心拍を時系列で把握するのにとどまり、詳細な睡眠深度や自律神経活動の特徴を分析することはできなかった。使用用途・目的および測定精度と測定時の被験者の負担とのバランスを考えていく必要がある。

**謝辞** 被験者各位に感謝申し上げます。

**参考文献**

日本生気象学会 2016. 日常生活における熱中症予防指針 Ver.3, <http://seikishou.jp/pdf/news/shishin.pdf>

ISO 7933: 2004. Ergonomics of the thermal environment – Analytical determination and interpretation of heat stress using calculation of the predicted heat strain

## (1) 実験概況

実際の屋外フィールドにてにおいてシステム検証を兼ねた人体温熱環境評価を実施した結果を報告する。

屋外環境は多種多様な要素により構成されており、環境形成にさまざまな影響を及ぼす。2018年(H30年)の猛暑は記憶に新しく、例えば東京近郊の埼玉県熊谷市では国内の観測史上最高となる41.1℃を記録した。屋外空間における熱中症リスクを検討するにあたり、気候の温暖化もさることながら都市化によるヒートアイランドの影響が大きい。とりわけ舗装面は日中に高温となり蓄熱し夜間に放熱すること、その敷設面積の大きさから都市気候と決定する重要な要素と考えられている。従って、舗装材料を改質することは都市気候そのものの改善やそこで生活するヒトの熱中症抑制など安全確保に寄与することが期待される。

舗装材の改質例として、日射反射率を高めることで大気への正味放射量を減らすことを目的とした高反射性材料、地表面からの気化熱を活かして潜熱化することで顕熱輸送低減を目的とした保水性材料などが開発されている。例えば、世界的なヒートアイランド都市である大阪では、官・民・学・NPOが一体となり、「大阪ヒートアイランド対策技術コンソーシアム(大阪HITEC)」を立ち上げて、ヒートアイランド対策の推進に取り組んでいる。その中で高反射性材料や保水性材料などの性能認証を行う取り組みも行われている。さらには、素材単体での評価に加えて滞在者への影響をも含めた詳細な影響評価の重要性は一層増している。そこで、本研究プロジェクトにて考案される評価手法をヒートアイランド現象の緩和や生活者の温熱環境対策のために適用を試みた。

舗装面が敷設される実環境における性能評価の目的から、屋外オープンスペース(岡山県立大学構内)における実験をおこなった。実験で用いた舗装体は、密粒度アスファルト舗装(AS)および保水性舗装(WR)であり、各々縦7m×横7mであった(図5-2-1)。なお、保水性舗装への散水は実験開始前に行い、均一な湿潤状態を保持したのち実験開始とした。

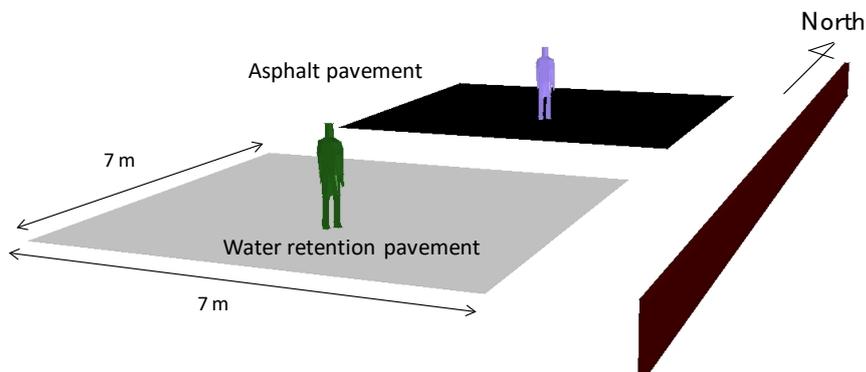


図 5-2-1 実験舗装の状況

人体温熱環境には、六大要素と呼ばれる、気温、湿度、放射量、気流、代謝量、着衣量の影響が大きく、これらの影響を考慮した形で人体熱収支を検討することが多い。これは、人体から熱が十分に放散

されなければ暑く感じ、反対に過度に放散されると寒く感じることに符合する。温冷感が中立でないと人体に温冷の負荷がかかることになり、この負荷量を人体熱負荷量  $F_{load}$  とし、式(5-2-1)により定義する。

$$F_{load} = M - W + R_{net} - C - E \quad (5-2-1)$$

ここで、 $M$ は代謝量 [W/m<sup>2</sup>]、 $W$ は機械的仕事量 [W/m<sup>2</sup>]、 $R_{net}$ は正味ふく射量[W/m<sup>2</sup>]、 $C$ は対流熱損失量 [W/m<sup>2</sup>]、 $E$ は潜熱損失量 [W/m<sup>2</sup>]である。なお、人体が受熱する際を正と定義している。

人体温熱環境に関する環境物理量として、短波放射量及び長波放射量(EKO MR60)、気温および相対湿度(T&D TR-73U, Shinyei Technology THP-728)、風速(3D distribution: Young CYG-81000)、地表面温度(J型熱電対)、グローブ温度(J型熱電対)を1分毎に測定した。空間滞在者の評価の目的から人的要素として、人体皮膚温度7点(前額、上腕、手甲、腹、大腿、下腿、足甲;サーミスタ)、直腸温度(サーミスタ)、発汗量7点(皮膚温と同点; Syscom SHTDL-3)、心拍(POLAR RS800CK)を1分毎に、また、発汗量の推察に用いるために、実験前後に体重、衣服重量を測定した。心理量として、温冷感、快適感、湿潤感を2分毎に測定した。なお、心理量測定には、横幅12cmのアナログスケールを用い、被験者自身が現在感じる温冷感(-3: 寒い~暑い :+3)、湿潤感(-2: 乾いている~湿っている :+2)、1快適感(-2: 不快~ 快適 :+2)に当たる箇所に縦線で記入してもらい、線型スケールに変換した。

上述では環境構成素材について検討しているが、本プロジェクトでメインターゲットとする着衣素材のふく射特性の影響評価も合わせて試みた。体感温度の評価に用いられる作用温度  $T_o$  に関して、日射や反射日射など短波の影響と、舗装面を含む物体温度など長波の影響度を検討し、総合的により良い環境創造を目指す試みである。屋外空間における作用温度の変化量  $\Delta T_o$  は、長波成分の平均放射温度変動  $\Delta T_{MRT}$  および人体への入射日射変動  $\Delta S$  を用いて以下となる。

$$\Delta T_o = \frac{h_r \Delta T_{MRT} + \alpha_{cl} \Delta S}{h_c + h_r} \quad (5-2-2)$$

ここで、 $h_c$ は対流熱伝達率 [W/(m<sup>2</sup>K)]、 $h_r$ はふく射熱伝達率 [W/(m<sup>2</sup>K)]、 $\alpha_{cl}$ は着衣の日射吸収率 [N.D.]である。

被験者を用いた評価実験は30分間で行われた。着衣は予め熱物性を測定した白黒2色を用い(Mizuno BioGear, 上述における  $\alpha_{cl}$ の値違い)、帽子、サングラス、シューズも同じものを使用した。実験前に水分補給のためスポーツドリンクを200ml摂取したのち、被験者は立位静止状態を保つ。インフォームド・コンセントを行い同意した者のみが参加しており、また、本実験は当該リン入り員会の承認を経て、ヘルシンキ宣言に基づく倫理規定を満たしている。被験者はのべ56名の健康な成人男性であり(各路面28名ずつ)、平均身長172.2cm、平均体重62.8kg、平均年齢22.4Yrであった。

## (2) 実験結果

屋外環境における人体温熱状態への影響で最も大きいのが日射である。実験は8月の連続した5日間で行われ、それぞれの日の日射環境を表5-2-1に記す。舗装の性能は日射反射率とそれに付随する路面温度さらには長波放射などの相互作用により判断される。今回用いた保水性材料は日射率が約25%と高い一方で、アスファルト舗装は日射反射率は約9%である。そのため日射量の大きな環境下では反射日射による照り返しによる悪影響と、保水することで得られる地表面温度の低下、下方向からの赤外放射量の低下の影響を分けて議論する必要がある。そこで、図5-2-2には下方向からの赤外放射量、反射日射量の両舗装上での違いと全天日射量を合わせて全被験者実験試行分を描いた。黒塗りの棒グラフは、

AS 舗装上での赤外放射量が WR 舗装上よりどれだけ多いかを示し、白塗りの棒グラフは、AS 舗装上での反射日射量が WR 舗装上よりどれだけ多いかを示している。白塗り棒グラフが下向きに伸びているのは、WR 舗装上での反射日射による受熱量が AS 舗装上よりも大きいことを意味する。この両者の相対的な関係性で赤外放射量が支配的か、反射日射量が支配的か判断できる。総じて、全天日射量が減少すると、反射日射量の両舗装上での差異は小さくなり、赤外放射量の両舗装上での差異は大きくなる。

表 5-2-1 日射状況

	Day 1	Day 2	Day 3	Day 4	Day 5
No. of Subject E5-2periment trial	3	4	3	3	1
Mean global solar radiation [ $W/m^2$ ]	326	617	580	693	891
Range of global solar radiation [ $W/m^2$ ]	139— 1067	148— 1049	278— 1163	294— 1126	696— 968

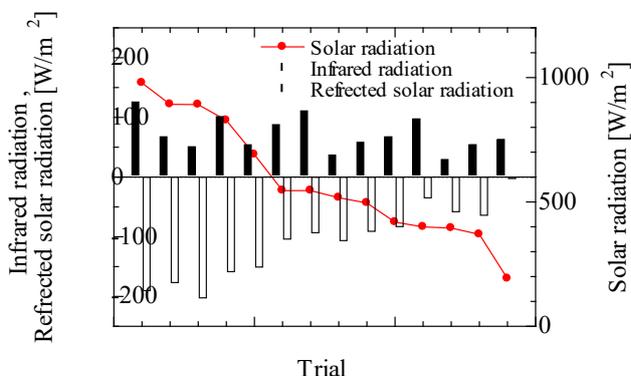


図 5-2-2 日射量別にみるふく射環境の違い

AS 舗装と WR 舗装上の空気温度差は 1.0 m ではなくなり、ともに平均気温 33.5℃、平均湿度 54.0% R.H で同等であった。一方でグローブ温度は、ふく射環境の影響をうけ高さ 0.5 m において最大温度差 3.5 °C となった。反射日射量が支配的となると、逆にグローブ温度は WR 舗装上で高くなりやすい。高さが高くなると相対的に路面より上空からくる放射量の影響が強くなる。

このような環境において、式 5-2-1 に基づく人体熱収支の比較を行ったものが図 5-2-3 である。ここでは全て環境条件を含めて時間平均する。各舗装での人体熱負荷量は、AS 舗装上が 237  $W/m^2$ 、WR 舗装上が 215  $W/m^2$  である。WR 舗装上で有意に低い値となり ( $p < 0.05$ )、滞在者の温熱状態としては WR 舗装上で平均かつ相対的に良好に保たれたとすることができる。その内訳は表 5-2-2 に示すとおりである。環境要素の変動に伴う各量に変動が生じる可能性があるが、比較のため単純に時間平均処理を施してある。

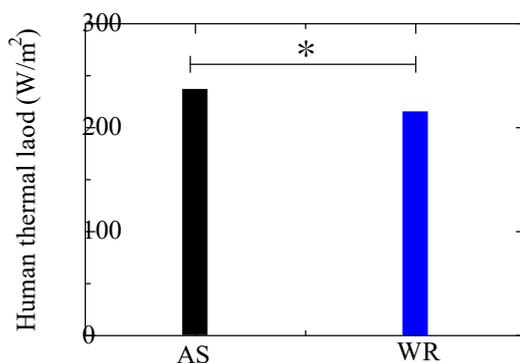


図 5-2-3 人体熱負荷量の比較

表 5-2-2 人体熱負荷量の内訳

	AS 舗装	WR 舗装
代謝量	87	87
正味ふく射量	193	181
顕熱損失量	15	18
潜熱損失量	29	35
人体熱負荷量 (総量)	237	215

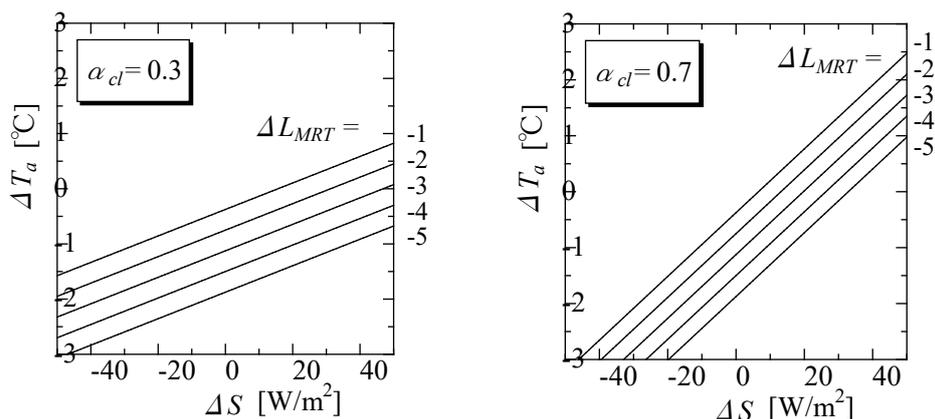
本気象条件では、正味ふく射量は WR 舗装上にて、AS 舗装上よりも低い値を示した。路面方向からの反射日射による人体受熱と長波放射受熱は一般にトレードオフの関係にあり、本条件では WR 舗装上で良好な環境維持できるポイントに物性値設定ができていた。

更に、心理量との関係について調べたものが表 5-2-3 である。全体を通して、若干暑く、それにより不快感を覚えている。WR 舗装上の値は AS 舗装上の値に比べて、温冷感で冷涼、湿潤感で湿潤、快適感で快適に感じる傾向は認められるが、有意差を示すことはなかった。環境変動や個体差の影響度の方が大きかったという結果となった。

表 5-2-3 心理申告結果

	AS 舗装	WR 舗装
温冷感	0.69	0.48
湿潤感	0.04	-0.02
快適感	-0.33	-0.14

式(5-2-2)に基づき体感温度変動を白黒着衣に関して検討したものが図 5-2-4 となる。横軸は  $\Delta S$  であり、環境条件が同じ場合には路面の日射反射率の大小に拠り左右される。着衣の日射吸収率の違いを見ると、 $\alpha_{cl}=0.7$  において短波吸収が大きくなり、体感温度に対する勾配がきつくなる。



(a) 白色着衣相当

(b) 黒色着衣相当

図 5-2-4 体感温度における長短波の寄与度

先に正味ふく射量における長波成分と短波成分について簡単に述べたが、改質された WR 舗装の表面温度は AS 舗装に比べて平均で 6.8 °C 低減されており、これによる  $\Delta T_{MRT}$  は平均 2.4 °C と算出された。反射日射に関しては、WR 舗装は AS 舗装に比べて平均 50 W/m<sup>2</sup> 大きかった。図 5-2-4 では、着衣のふく射特性より環境に対する感受性が異なることを示しており、複雑なふく射環境となる屋外空間では、これまで着衣評価の主流である clo 値などに加えてふく射特性の重要性を示す基礎データとなった。

### (3) まとめ

周囲の環境構成材料が滞在者に及ぼす影響は大きいため、都市構成材の代表格である舗装材料、また身近な環境構成材料である着衣に関して物性値の違いが人体温熱環境に及ぼす影響を検討した。その際、人体熱負荷量を定義し、人体熱収支を把握することを通して温熱環境評価を行った。舗装材として保水性、密粒アスファルトの 2 種、着衣物性として白、黒 2 色を用いた被験者実験において一定精度で温熱環境評価法の確立は達成された。

## 6 研究概要

### 6.1 研究開始当初の背景

夏季には熱中症が毎年多数、報告されている。若年者では暑熱環境下の屋外でのスポーツや肉体作業時に多い一方で、高齢者では住宅内部での熱中症が多数報告されている。高齢者、幼児、暑熱順化していない人、持久力のない人、肥満傾向の人は、体温調節機構が機能不全になりやすく、死亡事故につながる危険があり。対策が必要である。温熱環境における人の快適性状態や熱ストレス状態を正しく評価するためには、単に環境情報のみで判断するのではなく、個々人の生理状態を考慮する必要がある。日常生活において人の生理状態を計測するために出来るだけ無拘束で低侵襲な方法としてウェアラブル無線 BAN システムが有用であると考えられる。

暑熱環境での衣服の役割は大きい。身体からの放熱量や水分蒸発、外部からの輻射熱の 3 観点から人体周りの熱収支の調節が出来る。着衣の温熱的快適性には衣服の熱水分移動性能、特に蒸発放熱が支配的で、暑熱環境時の熱中症予防のため、暑熱時に温熱的に快適にするための条件として着衣素材の種類のみでなく着衣のデザインや、人の動作、環境の風速等の寄与は大きい。そこで、被験者の個別の状況に応じて病的状態にならないうちに運動を中断するために、熱中症への移行状態の早期把握と、その予防システムの構築が必要である。

### 6.2 研究の目的

本研究では人-着衣-環境に関わる温熱環境物理量を計測し無線で集積し、同期して人の温熱的快適性の指標となる温熱生理計測(耳型体温、心拍、活動量、皮膚温、衣服内気候等)および心理申告データの蓄積ができ、着衣の素材の種類やデザインの影響を考慮し、さらに、被験者に装着負荷が少なく、常時モニタリング可能な無線機能付きのウェアラブルシステムを開発・改良し、着装時の環境状態および人間状態の計測・分析をし、着装時の環境状態計測評価を試みる。手足の揺動による着衣のふいご作用による換気は、人体からの熱水分移動性を促進させるため環境の風の効果以上に着衣の温熱快適性向上に重要であるが、しかし、現状では、きちんとした定量法が規定されていない状況である。そこで、本研究では、熱中症予防に効果的な着衣の条件を検討するため発汗・歩行動作マネキンとトレーサガス法を用いて温熱的に快適な着衣のデザインを検討する評価法を構築する。さらに換気の生じやすい着衣デザインを考案し、サーマルマネキンを用いて評価を行い、熱中症予防に効果的な着衣デザインをデータエビデンスに基づいて提案したい。

### 6.3 研究の方法

#### 6.3.1 ウェアラブル無線 BAN システム構築・改良

ウェアラブル無線 BAN システムにより生体データを取得し、環境センサシステムの環境データと統合することで、熱中症予防支援システムを構築する。ウェアラブル無線 BAN システムは、①耳孔内温度センサ、②皮膚温センサ・衣服内気候センサ、③活動量センサ(心拍・温度・加速度センサ)から構成される。環境センサシステムは、環境中に配置した WBGT センサ、温湿度センサで構成する。これらのセンサによって取得されたデータはネットワークを介しクラウドサーバに蓄積されるとともに、時々刻々の生体状態を評価してフィードバックを行うことが可能である。

#### 6.3.2 暑熱環境時の温熱環境・生理応答の実測と実測データを用いたモデルの検証

スポーツ用ウェアの背部にコインを入れて換気速度、熱水分移動性、被験者の主観へおよぼす効果を検証することを目的としてふいご作用を増幅するコイン入り T シャツとコイン無の T シャツ着用時の 2 条件でトレーサガス法による換気計測実験と、トレッドミル歩行による温熱負荷の被験者実験を行った。上記実験データをもとに WBAN 熱中症予防モデルを用いて暑熱環境での環境・人体生理・心理の評価とモデルの精度検証を行った。

#### 6.3.3 防護服着用時の WBGT 補正式の検討

本稿では、非透湿性防護服を着用したときと日常の衣服を着用したとき人体の熱収支式の比較から、着衣の透湿特性の大きく異なる非透湿性防護服着用時を対象とする補正 WBGT ( Wet Bulb Globe Temperature (WBGT) ) を得た。

#### 6.3.4 被服環境デザインの評価法確立

歩行による着衣のふいご作用の換気は人体からの熱移動性を促進させるため環境の風の効果以上に着衣の温熱快適性向上に重要であるが、現状ではきちんとした定量法が規定されていない状況である。そこで歩行サーマルマネキンとトレーサガス法による換気計測と発汗マネキンや被験者実験(図 1)と同期計測によって着衣デザインと風・動作が着衣の換気・熱移動性能におよぼす影響を定量的に評価した。また、暑熱に効果的な着衣の条件を検討するため、発汗サーマルマネキン、トレーサガ

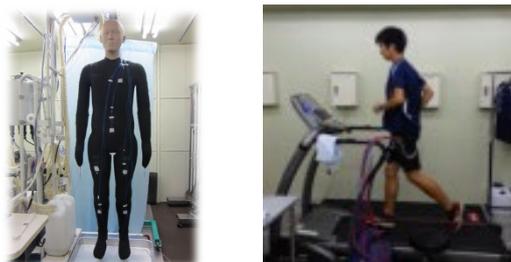


図 1 発汗サーマルマネキン被験者実験とトレーサガス法による最適被服環境デザイン評価システム

手法を用いた実験によりアウトドア用のパーカ装着時の蒸発熱伝達率や換気速度にパーカの特性、発汗、環境がどのように影響するかを明らかにすることを目的とした。さらに、蒸発熱伝達率と換気速度評価を同期して行い、両者を比較することで、着衣の熱移動性の評価法として換気速度からの間接的評価法の妥当性を検証することを第2の目的とした。

### 6.3.5 着衣の素材・デザインが放熱に及ぼす効果

着衣は人体の温熱快適性に大きく影響することが知られており、衣服と人体間の微小空間における気候形成について検討を行った。センサを用いた温度、湿度、気流の計測が困難である。そこで、本研究では、円筒型ヒータとアクリルフィルムによる模擬人体着衣モデルを作成し、人体モデルの空隙内の気流及び空気性状を実測、観察することで衣服内気流形成メカニズムの基礎的解明を試みた。衣服内での気流を可視化する実験のために、着衣模擬人体を作成し、PIV計測を行った。人体を円筒型として扱い、図2に示すように着衣模擬人体を人体-衣服の二層同心円筒にモデル化した。模擬人体として円筒型ヒータ、模擬衣服として円筒型透明アクリルフィルムで人体胴体部の着衣人体を再現した。

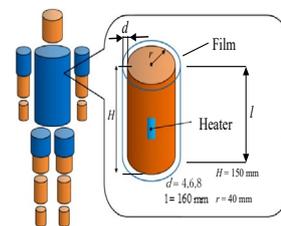


図2 人体モデル

### 6.3.6 舗装路素材が暑熱環境で及ぼす影響

路面舗装素材の熱中症発症リスクへの影響評価：人体温熱環境の形成に人体周囲の素材の影響は大きい。特に舗装など人工被覆は日中の温度上昇やその蓄熱のため熱中症発症リスクの一つである。路面温度低減策として保水性舗装や遮熱性舗装等の様々な舗装技術が提案されており、素材単体での評価に加え、空間滞在者への影響も含めた総合的な温熱環境評価を実施した(図3)。

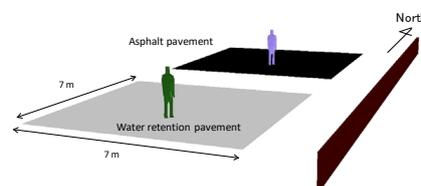


図3 実験舗装の状況

### 6.3.7 温熱負荷環境時の温熱環境・生理応答の実測・解析

夏季の高齢者の日常生活における温熱環境物理量および、人体の皮膚温、衣内温湿度、心拍を携帯可能なセンサを用いて測定し、アンケートおよび観察により、日常生活における温熱環境に関わる行動や生活時間の記録を行い、高齢の被験者の暑熱環境時の実態把握を試みた。夏季の高齢者の日常生活における睡眠時室内環境を評価することを目的として、温熱環境物理量および、皮膚温2点(胸、大腿)、衣内温湿度1点(胸)、心拍を携帯可能なセンサを用いて8日間測定し、その結果について分析、考察を行った。これらにより高齢者の暑熱環境時の実態把握を試みた。

## 6.4 研究成果

### 6.4.1 WBAN と温熱環境評価システムのデータ統合による熱中症予防支援システムの構築

WBAN センサのデータをスマートフォンで取得し、ネットワーク接続してサーバにリアルタイムにデータ送信し、サーバに収集された温熱環境情報や属性情報をもとに時々刻々の個別の生体情報から状態を判別するためのアルゴリズムを開発して、サーバシステムを構築した。ユーザーの装着・測定負担が低く、スマートフォン等のモバイル端末でリアルタイムにデータをモニタリングできるように、上記の熱中症予防支援システム構築に必要なセンサやアルゴリズムの開発および改良を行った(図4)

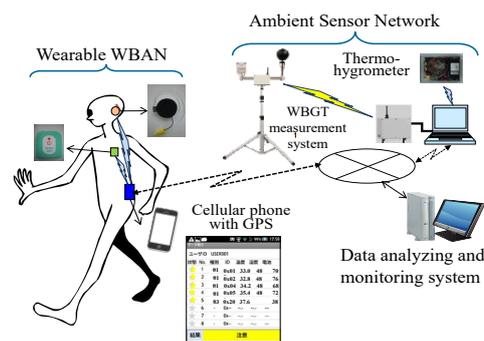


図4 WBAN 熱中症予防システムの構築

### 6.4.2 暑熱環境時の温熱環境・生理応答の実測と実測データを用いたモデルの検証

熱中症予防の指標として、修正TNM(Two Node Model)、等価標準有効温度SET\*の有用性と限界、および改善にむけての方向性について検討を行った。その結果、深部温に関しては十分対応できていなかったが、皮膚温に関しては精度良く予測できていた(図5)。

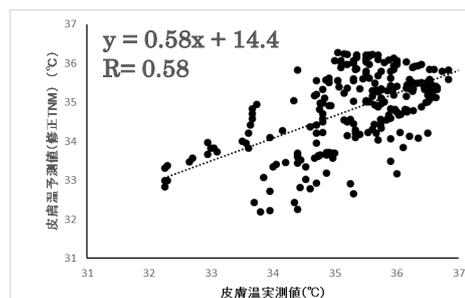


図5 皮膚温の予測と実測値の関係

修正TNMおよび等価SET\*は環境要因に加え、活動量と着衣量の人体要因も考慮されているため様々な状況に対応できると考える。今後モデルの改善にあたりデザインの差異による着衣の低減率の違いを組み込むことで予測の精度を上げることができると考える。そのためには様々な着衣のデザインの差による低減率を算出しデータを蓄積していくことが必要であると考えます。

#### 6.4.3 防護服着用時の WBGT 補正式の検討

熱ストレスは自然湿球温度、黒球温、気温、切片の係数の重みづけ積算から評価できた。透湿性防護服着用時の環境温(気温と黒球)の重みは日常の着衣よりも増加し、湿球の重みは減少した。日射のあるアウトドア環境では黒球の割合が増加し、気温の割合は気流の増加により減少した(図 6)。WBGT<sub>eff</sub>\*の予測式が透湿性のある着衣向けと不透湿の防護服向けに提案された。

#### 6.4.4 発汗サーマルマネキンとトレーサガス法による被服環境デザインの評価法確立

素材の透湿性および換気口は立位安静で無風環境でも蒸発熱伝達率向上に有効であった。換気速度と蒸発熱伝達率には MP を除いて相関係数 0.68 で相関関係があることが明らかになった。着衣の蒸発熱移動性の評価法として換気速度からの間接的に評価できる可能性が確かめられた。(図 7)。

#### 6.4.5 着衣の素材・デザインが放熱に及ぼす効果

日射のない室内実験室で実験を実施した。例として、人体発熱量  $q = 80 \text{ W/m}^2$  時の PIV 画像を図 8 に示す。模擬人体の発熱に伴い自然対流が生じるため、下部開口部からはほぼ垂直に気流が流入し、上部開口部に向かって流れ、上部開口部より流出する。また、空隙内において、人体側の局所流速が衣服側より大きくなる傾向を示した。

#### 6.4.6 舗装路素材が暑熱環境で及ぼす影響

屋外環境における人体暑熱状態への影響で最も大きいのが日射である。実験は 8 月の連続した 5 日間に行われた。今回用いた保水性材料(WR)は日射率が約 25%と高い一方で、アスファルト(AS)舗装の日射反射率は約 9%である。そのため日射量の大きな環境下では反射日射による照り返しによる悪影響と、保水することで得られる地表面温の低下、下方向からの赤外放射量の低下の影響を分けて議論する必要がある。図 9 には下方向からの赤外放射量、反射日射量の両舗装上での違いと全天日射量を合わせて全被験者実験試行分を描いた。黒塗りの棒グラフは、AS 舗装上での赤外放射量が WR 舗装上より多い量を示し、白塗りの棒グラフは、AS 舗装上での反射日射量が WR 舗装上より多い量を示している。白塗り棒グラフが下向きに伸びているのは、WR 舗装上での反射日射による受熱量が AS 舗装上よりも大きいことを意味する。この両者の相対的な関係性で赤外放射量が支配的か、反射日射量が支配的か判断できる。総じて全天日射量が減少すると、反射日射量の両舗装上での差異は小さくなり、赤外放射量の両舗装上での差異は大きくなる。

#### 6.4.7 温熱負荷環境時の温熱環境・生理応答の実測・解析

被験者(65 歳以上の健康な女性 1 名)の日常生活のうち、冷房のない 2 階において、洗濯物を干す作業を行うことが習慣となっていたことに着目した。暑熱環境において洗濯物を干す作業を行うと、被験者の皮膚温、衣服内温湿度は上昇し、心拍数も急激な上昇が認められた。また、夏季の高齢者の睡眠時における、温熱環境物理量、皮膚温、衣内温湿

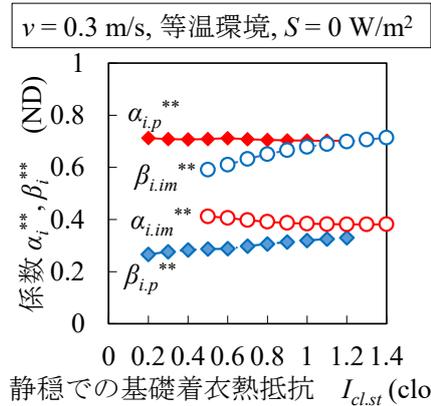


図6 日常の着衣と防護服時の着衣の基礎熱抵抗ごとの湿球の係数 $\alpha_i^{**}$ と黒球の係数 $\beta_i^{**}$  (日射の無い環境)

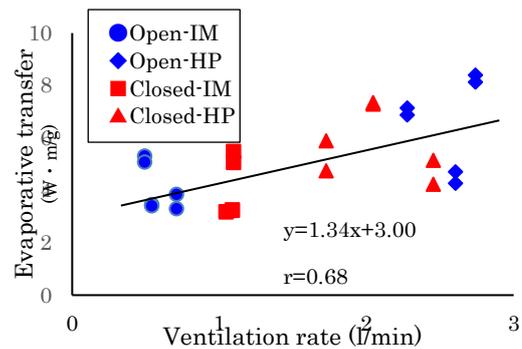


図7 換気速度と熱通過率の関係

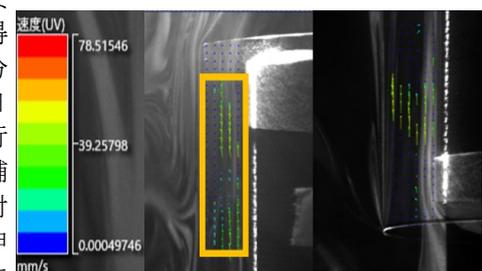


図8 PIV 測定結果例

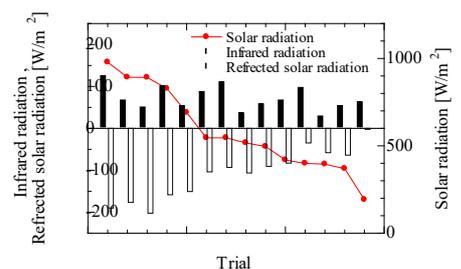


図9 日射量別にみるふく射環境の違い

度、心拍を携帯可能なセンサを用いて 8 日間測定した。65 歳以上の男性 1 名の睡眠時の生理量の結果について報告した。温熱環境や心拍、皮膚温等の計測により、日常生活や睡眠時の熱環境の特徴やリスクをとらえ、フィードバックすることが可能であるが、日常的に被験者の負担なく測定できるようなセンサ開発が望まれる。また無線式等で、随時、急激な気温上昇、心拍や皮膚温の上昇が認められる際にアラートがなるようなシステムも重要である。今回、心拍系は、腕時計式で被験者への負担も少なかったものの、心拍を時系列で把握するのに留まり、詳細な睡眠深度や自律神経活動の特徴を分析することはできなかった。使用用途・目的・測定精度と測定時の被験者の負担とのバランスを考える必要がある。

## 6.5 まとめ

本研究では電子情報学、生理学、伝熱工学、人間工学、建築学、被服学の専門の研究者が集結して熱中症予防に関わる研究を実施した。人の温熱的快適性の指標となる温熱生理計測（耳型体温、心拍、活動量、皮膚温、衣服内気候等）および心理申告データの蓄積ができ、ユーザーの装着・測定負担が低く、スマートフォン等のモバイル端末でリアルタイムにデータをモニタリングできるように、上記の熱中症予防支援システム構築に必要なセンサやアルゴリズムの開発および改良を行った。本研究において、熱中症予防支援システムのフレームワーク構築を行った。

熱中症予防の指標として、修正 TNM (Two Node Model)、等価標準有効温度 SET\* の有用性と限界、および改善にむけての方向性について検討を行った。その結果、深部温に関しては十分対応できていなかったが、皮膚温に関しては精度良く予測できていた。このシステムを熱中症予防支援に真に役立つシステムとするためには、暑熱温熱環境下での長期にわたるデータを取得し、生体状態をより正確に評価できるモデルを作成することが望まれる。したがって今後も熱中症予防評価指標の更なる改良を重ねる必要がある。

手足の揺動による着衣のふいご作用による換気は、人体からの熱水分移動性を促進させるため環境の風の効果以上に着衣の温熱快適性向上に重要である。本研究では熱中症予防に効果的な着衣の条件を検討するため発汗・歩行動作マネキンとトレーサガス法を用いて温熱的に快適な着衣のデザインを検討する評価を行い、換気性能と熱水分移動性の関係性を明らかにした。

着衣の熱負荷を評価する WBGTeff\* の予測式を透湿性のある着衣向けと不透湿の防護服向けに提案した。実際の被験者実験で精度検証が望まれる。さらに換気の生じやすい着衣デザインを考案し、サーマルマネキンを用いて評価を行い、熱中症予防に効果的な着衣デザインを考案し、効果を被験者実験により検証した。

日常生活上での熱中症予防のために高齢者を対象にモニタリングを試みた。今回、心拍計は、腕時計式で被験者への負担も少なかったものの、心拍を時系列で把握するのに留まり、詳細な睡眠深度や自律神経活動の特徴を分析することはできなかった。使用用途・目的・測定精度と測定時の被験者の負担とのバランスを考える必要がある。今後、さらに日常的に被験者の負担なく測定できるようなセンサ開発が望まれる。

研究発表（2015年度の研究成果）

〔雑誌論文〕 計（3）件    うち査読付論文 計（3）件

著者名		論文標題			
田中英登, 江口潤, 斉藤武比斗, 蔡桜蘭		子どもの熱中症予防のための夏休み時の外遊び及びびスポーツ活動時刻に関する調査研究：小学生及びスポーツ指導者の調査から			
雑誌名	査読の有無	巻	発行年	最初と最後の頁	
体育研究	有	48	2015	21-28	
掲載論文の DOI（デジタルオブジェクト識別子）					

著者名		論文標題			
Y. Shimazaki, M. Murata		Effect of gait on formation of thermal environment inside footwear			
雑誌名	査読の有無	巻	発行年	最初と最後の頁	
Applied Ergonomics	有	49	2015	55-62	
掲載論文の DOI（デジタルオブジェクト識別子）					
DOI:10.1016/j.apergo.					

著者名		論文標題			
田中英登, 江口潤, 斉藤武比斗, 蔡桜蘭		子どもの熱中症予防のための夏休み時の外遊び及びびスポーツ活動時刻に関する調査研究：小学生及びスポーツ指導者の調査から			
雑誌名	査読の有無	巻	発行年	最初と最後の頁	
体育研究	有	48	2015	21-28	
掲載論文の DOI（デジタルオブジェクト識別子）					

〔学会発表〕 計（6）件    うち招待講演 計（0）件

発表者名		発表標題	
中田いずみ, 薩本弥生		夏季の熱中症予防のための環境温熱評価システムとアンケート調査	
学会等名	発表年月日	発表場所	
日本家政学会	2015年5月24日	盛岡	

発表者名		発表標題	
薩本弥生, 丸田直美, 斉藤秀子, 諸岡晴美		動作時におけるブラジャーの快適性に年齢、身体特性、ブラジャーの種類がおよぼす効果	
学会等名	発表年月日	発表場所	
日本家政学会	2015年5月24日	盛岡	

発表者名		発表標題	
薩本弥生, 島崎康弘, 香川利春, 高山清隆, 竹内正顯		空気圧を用いた靴の換気計測用模擬歩行装置	
学会等名	発表年月日	発表場所	
日本繊維製品消費科学会	2015年6月28日	長野	

発表者名	発表標題		
Naomi Maruta, Hideko Saito, Yayoi Satsumoto, Harumi Morooka	Differences by Body Part and Age in Compressive Deformation of Body Surface and Fat Thickness in Adult Females		
学会等名	発表年月日	発表場所	
The 12th International Congress of Physiological Anthropology ICPA2015	2015, Oct.29	Chiba	

発表者名	発表標題		
青柳卓也, 薩本弥生	アウトドア用パーカ前部に設置した換気口が温熱的快適性に及ぼす効果		
学会等名	発表年月日	発表場所	
第39回人間生活環境系学会シンポジウム(HES)	2015年11月21日	東京	

発表者名	発表標題		
1. 佐古井智紀,	WBGTは人体の皮膚温と蓄熱量のどちらを表すか?		
学会等名	発表年月日	発表場所	
2015年度日本建築学会大会(関東)学術講演会	2015年	東京	

[図書] 計(2)件

著者名	出版社		
間瀬清美・薩本弥生編著	アイ・ケイコーポレーション		
	発行年	総ページ数	
新版 衣生活の科学—テキスタイルから流通マーケットへ—	2015	225	

著者名	出版社		
一般社団法人日本家政学会	丸善株式会社		
	書名	発行年	総ページ数
衣服の百科事典		2015	623

研究発表(2016年度の研究成果)

[雑誌論文] 計(4)件 うち査読付論文 計(4)件

著者名	論文標題			
Satsumoto Y., Piao S. and Takeuchi M.	Effects of Shoe Fit and Moisture Permeability of a Leather Shoe on Shoe Microclimate and Air E5-2change			
雑誌名	査読の有無	巻	発行年	最初と最後の頁
Journal of Ergonomics	有	64	2016	1-7
掲載論文の DOI (デジタルオブジェクト識別子)				
doi:10.4172/2165-7556.1000171				

著者名	論文標題			
Shimazaki, Y, Matsutani, T and Satsumoto, Y	Evaluation of thermal formation and air ventilation inside footwear during gait: The role of gait and fitting			
雑誌名	査読の有無	巻	発行年	最初と最後の頁
Applied Ergonomics	有	55	2016	234-240
掲載論文の DOI (デジタルオブジェクト識別子)				
doi:10.1016/j.apergo.2015.11.002				

著者名	論文標題				
薩本弥生	おむつ内で生じる熱水分移動現象と温熱的快適性向上				
雑誌名	査読の有無	巻	発行年	最初と最後の頁	
㈱技術情報協会、衛生製品とその材料開発事例集	有	7章3節,	2016	pp.230-242	
掲載論文の DOI (デジタルオブジェクト識別子)					

著者名	論文標題				
Yasuhiro SHIMAZAKI, Shojiro GOT O, Atsumasa YOSHIDA, and Takanori YAMAMOTO	The effect of solar radiation on temperature distribution in outdoor human-clothing-environment systems				
雑誌名	査読の有無	巻	発行年	最初と最後の頁	
International Journal of Heat and Mass Transfer	有	104	2017	pp. 1-6	
掲載論文の DOI (デジタルオブジェクト識別子)					
doi:10.1016/j.ijheatmasstransfer.2016.08.022.					

[学会発表] 計 (10) 件    うち招待講演 計 (0) 件

発表者名	発表標題		
Yayoi Satsumoto, Izumi Kikuchi	Evaluation of bellows effect of conins -inserted design of track t-shirt to prevent heat stroke in hot environment		
学会等名	発表年月日	発表場所	
IFHE Wordld Congress 2016 (国際学会)	3 Aug. 2016	Daejeon Convention Center, Korea	

発表者名	発表標題		
Yayoi Satsumoto, Yuni Tanaka, Izumi Kikuchi, and Yasuhiro Shimazaki	Study of the CGS material most suitable for heatstroke prevention during exercise in summer heat and solar radiation environment		
学会等名	発表年月日	発表場所	
The Fifth International Conference on Human-environment System	2 Nov 2016	Nagoya.	

発表者名	発表標題		
島崎康弘, 吉田篤正	人体要素を考慮した屋外温熱環境解析		
学会等名	発表年月日	発表場所	
第53回日本伝熱シンポジウム	2016. 5月24日	大阪	

発表者名	発表標題		
Yasuhiro SHIMAZAKI, Atsumasa YOSHIDA, and Takanori YAMAMOTO	Evaluating combined effects of radiation and metabolism on pedestrian comfort		
学会等名	発表年月日	発表場所	
The Fourth International Conference on Countermeasures to Urban Heat Islands	30 May 2016	Singapore	

発表者名	発表標題
------	------

Shoko HASHIDA, Atsumasa YOSHIDA, Shinichi KINOSHITA, and Yasuhiro SHIMAZAKI	Evaluation of thermal sensation and thermal design using measurement data of thermal environment of premises woods		
学会等名	発表年月日	発表場所	
The Fourth International Conference on Countermeasures to Urban Heat Islands	30 May 2016	Singapore	

発表者名	発表標題		
Atsumasa YOSHIDA, Shinichi KINOSHITA, Yasuhiro SHIMAZAKI, and Shoko HASHIDA	Field investigation on thermal environment for several types of greenery and evaluation of thermal sensation		
学会等名	発表年月日	発表場所	
The Fourth International Conference on Countermeasures to Urban Heat Islands	30 May 2016	Singapore	

発表者名	発表標題		
Yasuhiro SHIMAZAKI, Kengo KURASHIMA, Jumpei NITTA, Sayako FUJIMOTO, and Yayoi SATSUMOTO	Prediction of Shoed-foot comfort		
学会等名	発表年月日	発表場所	
The Fifth International Conference on Human-environment System(国際学会)	1 Nov 2016	Nagoya.	

発表者名	発表標題		
Shunpei Katsuta, Yasuhiro Shimazaki, Shigeru Nozu, and Takanori Yamamoto	Measurement of sweat evaporation at body regions under distinct wind conditions		
学会等名	発表年月日	発表場所	
8th Japanese-German Meeting on urban Climatology	1 Nov 2016	Nagoya.	

発表者名	発表標題		
Jumpei Nitta, Yasuhiro Shimazaki, Masashige Aoki, Kenta Kamidouzono, Tomonori Sakoi, and Yayoi Satsumoto	E5-2perimental evaluation of cooling effects of water retaining pavement on human		
学会等名	発表年月日	発表場所	
The Fifth International Conference on Human-environment System(国際学会)	27 Mar 2017	Osaka	

発表者名	発表標題		
Yasuhiro Shimazaki, Shunpei Katsuta, Atsumasa Yoshida, and Takanori Yamamoto	Modeling for clothed human thermal load		
学会等名	発表年月日	発表場所	
The Asian Conference on Thermal Sciences 2017	29 Mar 2017	Jeju	

[図書] 計(2)件

著者名	出版社		
間瀬清美・薩本弥生編著	アイ・ケイコーポレーション		
	発行年	総ページ数	

新版 衣生活の科学—テキスタイルから流通マーケットへ—第2版	2	0	1	7	225
--------------------------------	---	---	---	---	-----

著者名	出版社				
間瀬清美・薩本弥生編著	朝倉書店				
	発行年			総ページ数	
被服学事典	2	0	1	6	504

研究発表（2017年度の研究成果）

〔雑誌論文〕 計（3）件    うち査読付論文 計（2）件

著者名	論文標題						
薩本弥生	暑熱環境時の着衣の熱水分移動と温熱的快適性						
雑誌名	査読の有無	巻	発行年		最初と最後の頁		
繊維製品消費科学	有	58	2	0	1	7	pp.26-33
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子）							

著者名	論文標題						
薩本弥生, 丸田直美, 斉藤秀子, 諸岡晴美	年齢・身体特性・ブラの種類が動作時の胸部動態・着装感に及ぼす影響						
雑誌名	査読の有無	巻	発行年		最初と最後の頁		
繊維製品消費科学	有	58	2	0	1	7	pp.80-89
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子）							

〔学会発表〕 計（12）件    うち招待講演 計（5）件

発表者名	発表標題		
薩本弥生, 青柳卓也, 小柴朋子, 田村照子	アウトドアパーカの蒸発熱伝達および換気性能に素材の透湿性と換気口がおよぼす効果—発汗サーマルマネキンと換気装置を用いた実験—		
学会等名	発表年月日	発表場所	
日本家政学会	2017.5	奈良	

発表者名	発表標題		
薩本弥生, 青柳卓也	WBGTによる熱中症予防指針の有効性および限界に関する検討		
学会等名	発表年月日	発表場所	
繊維学会	2017.6	東京	

発表者名	発表標題		
薩本弥生, 青柳卓也, 佐古井智紀	熱中症予防指針作成のための修正TNM, 等価SET*の有用性についての検討		
学会等名	発表年月日	発表場所	
日本繊維製品消費科学会年次大会	2017.6	京都	

発表者名	発表標題		
Yayoi Satsumoto, Takuya Aoyagi, Ayano Dempoya, Tomoko Koshiba, Teruko Tamura	Effect of vapor permeability and opening design of outdoor parka on its water vapor transfer and ventilation rate		

学 会 等 名	発表年月日	発 表 場 所
アジア地区国際家政学会ARAHE2017	2017.8	東京

研究発表（2018 度の研究成果）

〔雑誌論文〕 計（4）件    うち査読付論文 計（3）件

著 者 名	論 文 標 題				
薩本弥生	被服の温熱的快適性研究から家庭科における着方学習への提案				
雑 誌 名	査読の有無	巻	発行年	最初と最後の頁	
文部科学省初等教育資料	有	969	2   0   1   8	pp.72-75	
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子）					
<a href="http://id.ndl.go.jp/bib/029139202">http://id.ndl.go.jp/bib/029139202</a>					

著 者 名	論 文 標 題				
城所哲宏, 田中英登	子どもの生活習慣病リスクと身体活動の重要性				
雑 誌 名	査読の有無	巻	発行年	最初と最後の頁	
女子体育	有	60-6・7	2   0   1   8	pp. 69-71	
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子）					

著 者 名	論 文 標 題				
薩本弥生, 井上真彰	『衣服の着方の工夫で冬を快適に』の授業提案				
雑 誌 名	査読の有無	巻	発行年	最初と最後の頁	
横浜国立大学教育人間科学部紀要 I 教育科学	無	19	2   0   1   8	pp. 76-94	
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子）					

著 者 名	論 文 標 題				
島崎康弘	（解説記事） 屋外快適性を創る一人と身のまわりの素材との関わりー				
雑 誌 名	査読の有無	巻	発行年	最初と最後の頁	
繊維製品消費科学会誌	無し	59(8)	2   0   1   8	pp. 613-616	
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子）					

〔学会発表〕 計（9）件    うち招待講演 計（1）件

発表者名	発 表 標 題		
薩本弥生, 林静紅	スポーツウェアの熱水移動性能に背部の立体的な換気口がおよぼす効果		
学 会 等 名	発表年月日	発 表 場 所	
日本繊維製品消費科学会年次大会	2018.6.24	金城学院大学・名古屋	

発表者名	発 表 標 題
------	---------

Yayoi Satsumoto, Takuya Aoyagi, Ayano Dempoya, Tomoko Koshiba, Teruko Tamura	Effect of Vapor Permeability and Aperture of Outdoor Parka and Environmental Velocity on Evaporative Heat Transfer and Ventilation rate -Using sweating thermal manikin and tracer gas methods-	
学会等名	発表年月日	発表場所
The Fiber Society's Spring 2018 Conference	2018.6.13	東京, 船堀

発表者名	発表標 題	
薩本 弥生, 池田 文美, 渡邊 圭, 大澤 道	透湿防水性ナノファイバー膜を使用したシューズの換気性能および透湿性能評価	
学会等名	発表年月日	発表場所
一般社団法人日本家政学会研究発表要旨集	2018.5.26	東京, 日本女子大学

発表者名	発表標 題	
Tanaka H.	Performance and Environment. -Prevention of decline in e5-2ercise performance in a hot environment-	
学会等名	発表年月日	発表場所
International Conference on Athletes Care & Performance. (国際学会)	2018November 16-17	Kaohsiung Taiwan

発表者名	発表標 題	
薩本弥生、池田文美、櫻井大樹	スポーツ用パーカの換気効率化	
学会等名	発表年月日	発表場所
第42回人間-生活環境系学会シンポジウム	2018.12.8	大阪府寝屋川市(摂南大学)

発表者名	発表標 題	
西原直枝, 薩本弥生	夏季における高齢者の日常生活における温熱環境および心拍の計測	
学会等名	発表年月日	発表場所
第42回人間-生活環境系学会シンポジウム	2018.12.8	大阪府寝屋川市(摂南大学)

発表者名	発表標 題	
佐古井智紀	防護服着用を想定したWet Bulb Globe Temperatureの補正	
学会等名	発表年月日	発表場所
日本建築学会大会	2018.9.4	東北大学

発表者名	発表標 題	
神崎勇人, 島崎康弘, 春木直,	模擬人体を用いた衣服内の空気性状計測	
学会等名	発表年月日	発表場所
日本機械学会 シンポジウム:スポーツ工学・ヒューマンダイ ナミクス 2018	2018.11.22	京都