

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 5 月 1 日現在

機関番号：13601

研究種目：若手研究（A）

研究期間：2010～2012

課題番号：22686055

研究課題名（和文） 環境への熱伝達特性および衣服内熱移動解明のための新規サーマルマネキンの開発

研究課題名（英文） Development of new thermal manikin for clarifying heat transfer characteristics between human to surrounding environment through clothing

研究代表者

佐古井 智紀（SAKOI TOMONORI）

信州大学・ファイバーナノテク国際若手研究者育成拠点・助教

研究者番号：70371044

研究成果の概要（和文）：温度分布のある環境下での温熱生理状態を推定するため、実サーマルマネキンを用いて必要な環境データを得る理論を示し、実サーマルマネキンを用い実証した。黒と銀の円筒型サーマルマネキンを開発し、近赤外熱源がある場合とない場合で比較計測を行った。近赤外熱源がない条件での放射率と近赤外熱源が有る場合の近赤外に対する吸収率は大きく異なることを確認した。CAD上と3Dプロッタでサーマルマネキンの基礎形状を出力し、左手と左前腕のサーマルマネキンを具体化した。

研究成果の概要（英文）：In this study, we indicated the theory to obtain essential environmental parameter to analyze local thermophysiological state of human body and validated the theory by use of experimental thermal manikin. We developed local body thermal manikin systems with shapes of black or silver cylinder and operated them in the environment with/without infrared radiation source. We confirmed that the absorptivity of silver to infrared radiation source was significantly different from the emissivity of silver determined in the environment with usually experienced temperature. We designed the basic shapes of local thermal manikin for left hand and left forearm on 3D CAD and by use of 3D plotter, we developed local thermal manikin for these body parts.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	6,100,000	1,830,000	7,930,000
2011年度	12,000,000	3,600,000	15,600,000
2012年度	1,100,000	330,000	1,430,000
年度			
年度			
総計	19,200,000	5,760,000	24,960,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：建築学・建築環境・設備

キーワード：熱環境、サーマルマネキン

1. 研究開始当初の背景

ヒトの体温、および温熱感覚は、産熱と放熱の結果として形成される。この産熱と放熱、温熱感覚に影響する代表的な要因として、気温や湿度、熱放射、気流、着衣、およびそれらの分布と活動が挙げられる。従って、人体

局所からの熱伝達特性と気温、湿度、熱放射、気流、着衣の関係は、今後の暖冷房システムの設計・計画上、重要な知見と言える。

人体からの熱移動および熱伝達特性を測定する道具としてサーマルマネキンがある。サーマルマネキンは発熱制御条件を計測者

が自由に設定できるため、再現性に優れた計測が可能である。また、環境温度が均一であれば、対流と放射に伴う局所の総合熱伝達率を決定できる。ただし、環境温度が不均一である場合、環境側の代表温度を定義できず、局所の総合熱伝達率も決定できない。また、サーマルマネキンそのものでは、対流成分と放射成分を分離した計測はできず、通常の測定に加えてマネキンをアルミ箔で覆う等、放射率を調整した再測定が必要と言う制約も伴う。

2. 研究の目的

背景に記したように、既存手法には温度分布のある日常空間における人体局所からの放熱の対流成分、放射成分、熱伝達特性、人体局所に対する環境の代表温度を計測する手法はない。本研究では、これらを実測する新しいサーマルマネキンを開発し、さらには人体熱モデルを統合することにより、温熱生理状態をも評価するシステムを開発する。

3. 研究の方法

3.1 熱伝達特性と環境温度の決定

人体から環境への対流および放射による熱移動は、式(1)のように熱 Q は皮膚と環境の温度差 $(T_s - T_o)$ に応じて流れ、その比例係数を総合熱伝達率 h と表される。

$$Q = h(T_s - T_o) \quad (1)$$

以下の理論により、温度分布のある環境下での温熱生理状態を推定するために必要な環境データを、実サーマルマネキンを用いて得る。ただし、この手法の適用には全計測を通じて熱環境を一定に維持できることが前提となる。

最初の計測として、サーマルマネキンに T_{s1} の表面温度を与えた計測を行い、放熱量 Q_1 を得る。続いての計測として、 T_{s2} の表面温度を与え、放熱量 Q_2 を得る。式(1)から、総合熱伝達係数 h は、放熱量におよぼす 1°C の皮膚温差の影響と言えるので、 h を式(2)で与える。

$$h = \frac{Q_1 - Q_2}{T_{s1} - T_{s2}} \quad (2)$$

また、局所に対する代表環境温度 T_o を、式(1)を用い、式(2)の h において皮膚温 T_{s1} の時に放熱量が Q_1 と、皮膚温 T_{s1} の時に放熱量が Q_2 をもたらす T_o (式(3)参照)として与える。

$$T_o = \frac{T_{s1} \cdot Q_2 - T_{s2} \cdot Q_1}{Q_2 - Q_1} \quad (3)$$

$$\left(= T_{s1} - \frac{Q_1}{h} = T_{s2} - \frac{Q_2}{h} \right)$$

局所の温熱生理状態推定に必要な環境データを得られるか、図1に例を示す数種のパーソナル空調を対象として、実サーマルマネキンを用いて実験を行った。



等温個人換気空調



放射冷房

図1 実験に用いたパーソナル空調の例

3.2 発熱・温度計測システムの開発

日常の環境では、環境が時間に応じて変動する。サーマルマネキンによる全計測を通じての長い時間、熱環境が一定に維持されることは稀である。ここでは表面温度設定を、図2に示すようにサイクルに制御し、このサイクルに応じる蓄熱量を考慮することで、短い測定時間において、 T_1 、 T_2 に応じる Q_1 、 Q_2 を得るシステムを開発する。

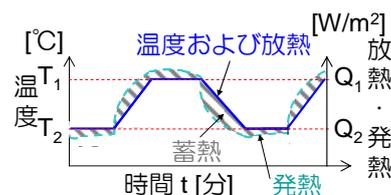


図2 サーマルマネキンの温度制御

既往の実験サーマルマネキンに上記のサイクル制御は実装されていない。任意の制御を組み込めるよう、新しいサーマルマネキンシステムを構築する。マネキンシステム本体の構造は、内側から構造材としてのプラスチック、発熱用のマンガニン線、薄い電気絶縁層、表面温度計測用のアルメル線、保護用の薄い電気絶縁層からなる。アルメル線の電気抵抗の温度依存性を利用し、表面の平均温度を面的に計測する。システムの計測・制御にはAD・DA変換ボードを用いた。アルメル線の電気抵抗の変化を、電圧としてAD変換

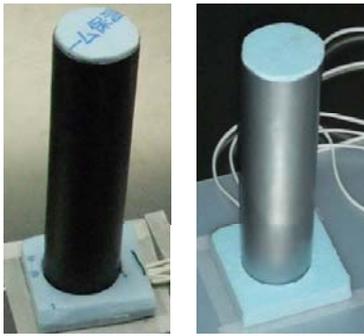


図3 試作した発熱円筒システム

ボードで検出する。マンガン線の加熱およびアルメル線への電圧印加には直流電源を用いた。マンガン線にかかる電圧はDA変換の出力により調整した。

試作品として、上部、中部、下部の3部位に分割され、それぞれを独立して温度・発熱制御する図3に示す黒と銀の発熱・温度計測システムを開発した。

3. 3 赤外熱源利用時の放熱評価

作成した黒と銀の発熱円筒システムを用い、黒と銀の放射率の違いを利用し、熱交換を対流と放射に分離できるか、検討した。

2つの色の異なる、ただし、同一形状の発熱体を想定する。環境の気流条件、そして発熱体の温度が同一であれば、両者の対流による放熱は一致する。他方、放射による放熱は放射率に依存する。この放射率の違いを利用すると、黒の発熱円筒からの放射放熱 R_B 、対流放熱 C は以下の式で表すことができる。

$$R_B = \varepsilon_B \frac{Q_B - Q_S}{\varepsilon_B - \varepsilon_S} \quad (4)$$

$$C = \frac{Q_S \cdot \varepsilon_B - Q_B \cdot \varepsilon_S}{\varepsilon_B - \varepsilon_S} \quad (5)$$

ここに、 ε_B 、 ε_S : 黒および銀の放射率 [N.D.]、 Q_B 、 Q_S : 黒および銀の円筒の放熱量 [W/m^2]。

対流と放射による放熱を分離する式(4)、(5)の妥当性を、図4に示す赤外線熱源(カーボンヒーター)のある環境下での実測を行い確認した。

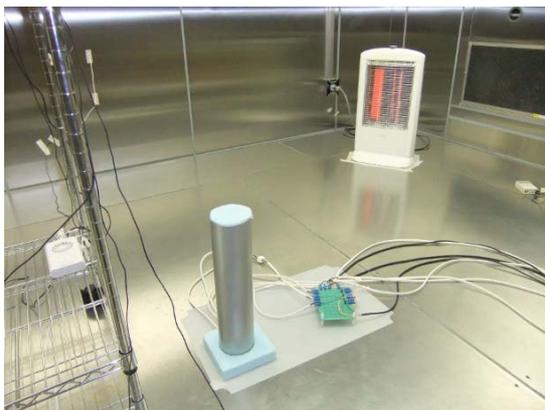


図4 対流と放射の分離実験の風景

4. 研究成果

4. 1 熱伝達特性と環境温度の決定

例として図5、図6に個人換気空調、放射冷房時に決定された人体局所に対する総合熱伝達率 h 、環境温度 T_o を示す。なお、図5の P_a は吹き出しの差圧、図6の $WS7$ 、 $WS8$ は放射冷房システムの個体名であり、 $WS7$ 、 $WS8$ は同一の温度制御を行った。

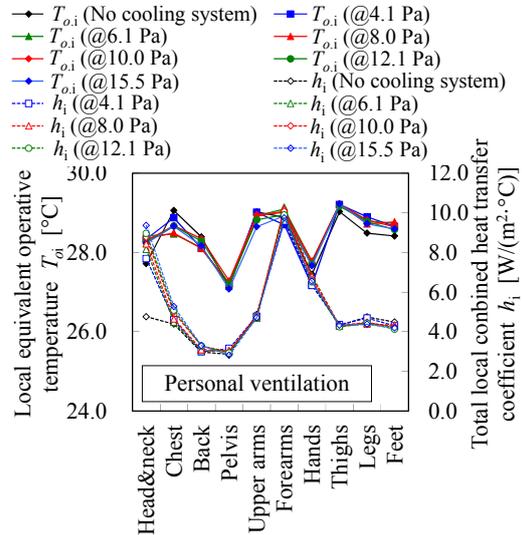


図5 個人換気空調時の局所の熱伝達特性

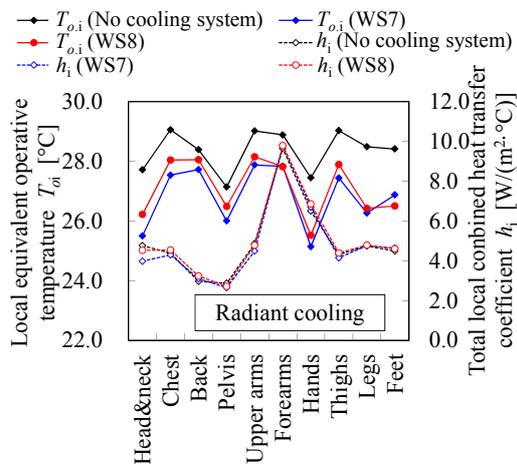


図6 放射冷房時の局所の熱伝達特性

環境と同じ温度の風が吹き出す個人換気空調(図5)では、 T_o は風量(差圧)によらない、そして、風の当たる頭のみ h が風量(差圧)によって変わる妥当な結果が得られた。風によらず放射により身体を冷やす放射冷房(図6)では、放射冷房動作時と比動作時で h は同一となり、 T_o のみが放射冷房動作時に低下する妥当な結果を得た。

得られた値を入力として予測された温熱生理状態の例を図7に示す。温度に分布のある不均一な環境を対象とした場合でも、ここで示した手法により、温熱生理状態の分布を

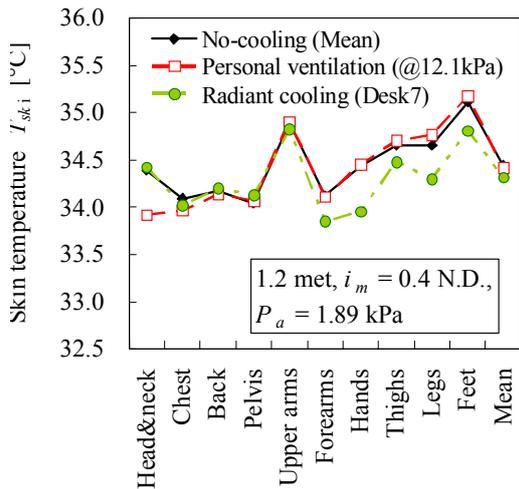


図7 パーソナル空調時の温熱生理状態

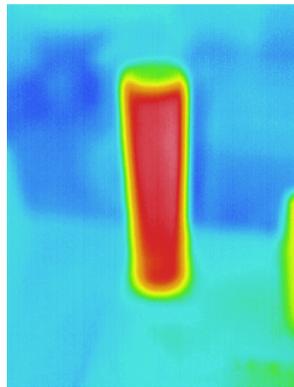


図8 発熱円筒システムの温度分布

評価するのに十分な環境データを得られ、温熱生理状態の評価法を確立できた。

4. 2 発熱・温度計測システムの開発

表面温度を 0.01°C の分解能で計測し、制御する発熱・温度計測システムを開発した。図8に動作時の温度分布例を示す。ほぼ、均一に発熱した様子が見て取れる。

有効な発熱・温度計測システムを構築できたので、これを人体形状をもつサーマルマネキンに発展させた。3DCAD を用い、左前腕と左手について基礎形状を設計、3D プロッタで出力(図9)、マンガニン線、アルメル線の

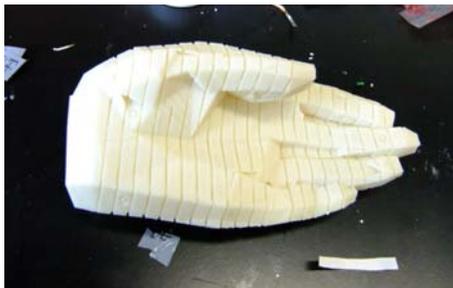


図9 出力した左手の基礎形状

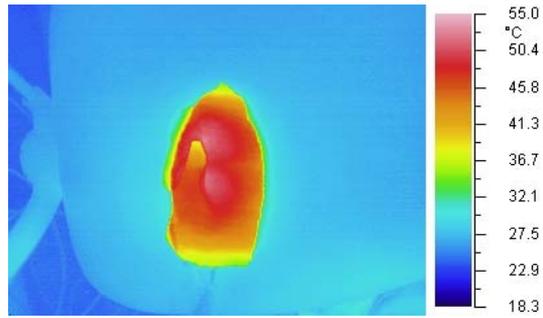


図10 左手サーマルマネキンからの発熱配線、電気絶縁性の材料で被覆を行い部位のサーマルマネキンとして具体化(図10)した。

4. 3 赤外熱源利用時の放熱評価

赤外熱源を使用しない一様の温度環境下で黒と銀の発熱円筒を発熱させ、両者の比較から日常環境下での銀の放射率 ϵ_s は約 0.82 と同定された。この ϵ_s と式(5)に基づき図4のカーボンヒータ使用時の対流熱交換量Cを計算したところ、無次元式から計算される値の3~4倍と理論値からは大きく乖離する結果となった。熱収支に基づく逆算により銀の円筒の吸収率 α_s を推定したところ0.5付近となり、常温環境下での銀の放射率 ϵ_s の値0.82と α_s が大きく異なると原因と分かった。人体からの対流、放射による放熱を評価する上で、赤外線熱源利用時に吸収率が日常の放射率と大きく異なる点の考慮が必須である。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計7件)

- 1) 佐古井智紀 (2013). 非等温環境および日射下での等価 WBGT 指標の計算法, 日本建築学会大会学術講演梗概集(環境系 D-2), 41176, 査読無
- 2) 岡田和徳, 佐古井智紀 (2012). 赤外線ヒータ使用時の熱交換における放射成分と対流成分の分離の試み, 第36回人間-生活環境系シンポジウム報告集, pp.157-160, 査読無
- 3) 岡田和徳, 佐古井智紀 (2012). 赤外線ヒータ使用時の熱交換における放射成分と対流成分の分離の試み, 日本生気象学会雑誌 49(3), P.S44, 査読無
- 4) K. Okada, T. Sakoi (2012). Estimation of radiative and convective heat exchanges in thermal environment with infrared heater, Proceedings of 9I3M, ref_43, 査読無
- 5) T. Sakoi, A. Melikov, B. Krejčíříková, M. Duszyk (2012). Local operative temperatures and local combined heat transfer coefficients to describe nonuniform thermal environments, Proceedings of 9I3M, ref_46, 査読無

- 6) T. Sakoi, A. Melikov, B. Krejčířiková, M. Duszyk (2011). Determination of heat transfer characteristics with various personal cooling systems using thermal manikin, Proceedings of ICHES2011, O12-5, 査読有
- 7) T. Sakoi, A. Melikov (2010). Method for determination of heat transfer coefficients between skin and clothing, International Conference of Future Textile 2010, pp. 167-168, 査読無

[学会発表] (計7件)

- 1) 佐古井智紀. 非等温環境および日射下での等価WBGT指標の計算法, 日本建築学会大会, 2013.8.31, 札幌
- 2) 岡田和徳, 佐古井智紀. 赤外線ヒータ使用時の熱交換における放射成分と対流成分の分離の試み, 第36回人間-生活環境系シンポジウム, 2012.12.2, 大同大学(名古屋市)
- 3) 岡田和徳, 佐古井智紀. 赤外線ヒータ使用時の熱交換における放射成分と対流成分の分離の試み, 第51回日本生気象学会大会, 2012.11.9, 松本
- 4) K. Okada, T. Sakoi. Estimation of radiative and convective heat exchanges in thermal environment with infrared heater, 9th International Meeting on Manikins and Modeling, 2012.8.23, Tokyo.
- 5) T. Sakoi, A. Melikov, B. Krejčířiková, M. Duszyk. Local operative temperatures and local combined heat transfer coefficients to describe nonuniform thermal environments, 9th International Meeting on Manikins and Modeling, 2012.8.23, Tokyo.
- 6) T. Sakoi, A. Melikov, B. Krejčířiková, M. Duszyk. Determination of heat transfer characteristics with various personal cooling systems using thermal manikin, 5th International Conference on Human-Environment System, 2011.10.6, Sapporo.
- 7) T. Sakoi, A. Melikov. Method for determination of heat transfer coefficients between skin and clothing, International Conference of Future Textile 2010, 2010.7.16, Ueda.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

佐古井 智紀 (SAKOI TOMONORI)

信州大学・ファイバーナノテク国際若手研究者育成拠点・助教

研究者番号: 70371044

(2) 研究協力者

岡田 和徳 (OKADA KAZUNORI)

信州大学・理工学系研究科・大学院生
研究者番号: なし

石井 亮太 (ISHII RYOTA)
信州大学・繊維学部・学部学生
研究者番号: なし

メリコフ アーセン (MELIKOV ARSEN)
デンマーク工科大学・教授
研究者番号: なし