

H-061 28°Cオフィスにおける生産性・着衣・省エネルギー・室内環境に関する研究
(2) 衣服の影響に関する研究

独立行政法人 産業技術総合研究所

人間福祉医工学研究部門 環境適応研究グループ 都築和代

<研究協力者> 産業技術総合研究所 環境適応研究グループ 佐古井智紀

平成18～20年度合計予算額 10,056千円
(うち、平成20年度予算額 2,821千円)

※上記の合計予算額には、間接経費2,322千円を含む

[要旨] 多様な着衣、気流、不均一熱環境下での温熱生理状態を予測し、その上で温熱環境が適切か否かを判断する手法が得られれば、着衣、気流、熱環境の不均一性を有効に活用することが可能になり、28°Cのオフィスで在室者を満足させる調整手段が得られると期待される。平成18年度は、夏服、椅座姿勢を対象として、静穏気流、均一温度の実験室で、部位分割、表面発熱のサーマルマネキンを用いて夏服(单品:49、組合せ97)の部位有効熱抵抗を算出し、胸部、背部、腹部、臀部、上腕部、前腕部、大腿部、下腿部、足部の9部位について取りまとめた。平成19年度は、0.26～2.6m/sの風を吹かせた風洞内に立位サーマルマネキンを設置し、気流方向3条件(前方、後方、仰角30度の前方)での部位の対流熱伝達率、着衣の部位有効熱抵抗を実測した。対流熱伝達率、部位有効熱抵抗は気流の方向によらず、風速に依存した。部位によって風に伴う着衣の部位有効熱抵抗の減少比率は異なり、代表径の大きな部位では減少比率が大きくなる傾向があった。上躯幹、腰、上腕、前腕、大腿、下腿、足に共通な着衣の部位有効熱抵抗の減少比率(静穏基準) $C_{corr.Rcle,i}$ を表すモデル式を提案した。平成20年度は衣服の透湿性に関して発汗サーマルマネキンを用いて男性用アンサンブル着衣について計測し、部位の有効乾性・湿性熱抵抗値を算出した。また、人体の部位毎の発汗特性を計測し、COOL BIZの室温緩和を推奨するための要件を検討した。

[キーワード] COOL BIZ、体感温度、着衣、分布、熱抵抗

1. はじめに

着衣が人体と環境との間の熱のやり取りに及ぼす影響は、これまで、全身の着衣の熱抵抗値として表されてきた。この全身の着衣の熱抵抗は、重ね着の多い場所、少ない場所などの分布を伴う実着衣の熱抵抗を、全身からの熱移動と皮膚と環境間の平均温度差に着目して、全身を均一に覆う着衣の熱抵抗に換算して表した値である¹⁾。しかし、環境の不均一さ、着衣条件の不均一さは不快感を惹き起こすことが知られており、パーソナル空調など環境の不均一さを活用していくには、その負の影響の考慮も重要となる。人体と環境との間の熱のやり取りに関する不均一さは、全身に均一な熱抵抗に換算した既往の全身の着衣熱抵抗からは推定できない。そこで、着衣の熱抵抗の分布を知ることが必要である。また、着衣、風、不均一条件下に応じて局所温度を予測す

るためには、それぞれの条件での衣服外表面の熱伝達特性を知ると同時に、着衣の熱特性を知る必要がある。さらに、衣服着用時には、衣服と人体との間に衣服内気候が形成される。人体はある閾値以上の暑熱環境においては発汗という強力な放熱機構を作動させ、体温調節を行う。日本の夏は高温多湿であり、衣服内気候は衣服の断熱性と周囲環境の温度・湿度、そして人体からの放熱経路によって影響される。既往研究において皮膚ぬれ率と快不快感に相関性があることが示されていることから、衣服の透湿性や人体の発汗機能からみた衣服の特性について検討する。

2. 研究目的

これまで、着衣が人体と環境との間の熱のやり取りに及ぼす影響は、全身の着衣の熱抵抗値として表されてきた。この全身の着衣の熱抵抗は、これまで公表されている²⁾。しかし、実際には重ね着の多い場所、少ない場所などの分布を伴う実着衣の熱抵抗を、全身からの熱移動と皮膚と環境間の平均温度差に着目して、全身を均一に覆う着衣の熱抵抗に換算して表した値であり¹⁾、シミュレーション等で誤差を生む原因の一つとして挙げられている。他方、部位の熱抵抗については、個々の着衣において、部位の熱抵抗の実測データが提示^{3), 4), 5), 6)}されているものの、様々な着衣のデータをまとめた研究は見られない。また、着衣によって不均一温熱環境を作ることは可能であるが、着衣時の熱抵抗に及ぼす風の影響^{7)~12)}に関しては、有効熱抵抗には影響がないという研究や基礎熱抵抗が減少する結果など不一致である。日常のワークウェア（通気性有り、防水、粉じん防護服）の範囲では、着衣時の全熱抵抗に及ぼす風や活動の影響が通気性に余り依存しないものの^{8), 9), 13)}、防寒服では、特に風速が早くなるほど、通気性への依存が強くなる^{7), 9), 13)}。また、人体局所に対する着衣の熱特性が気流によってどのように変化するかを示した研究も実施されているが結果は不一致である。さらに、人が着るという観点から衣服を鑑みると、快適性という観点を抜きにすることはできず、不快感は皮膚濡れ面積率と相関があることが知られている¹⁴⁾。そこで、人体の発汗特性と、その汗を効率よく環境へ蒸発させるための衣服の透湿性について検討する必要がある。そこで、COOL BIZ仕様の男性用アンサンブル上下の乾性・湿性熱抵抗を求め、温熱快適性を客観的に評価するとともに、裸体人体を中性温度から高温環境に曝露して、人体局所の発汗量を測定し、発汗特性を把握し、衣服設計の一助とする。

3. 研究方法

(1) 部位の有効熱抵抗値の測定

全身の着衣熱抵抗の表し方として、全熱抵抗 I_T 、衣服自体の熱抵抗 I_{cl} 、有効熱抵抗 I_{cle} の3通りがある。全熱抵抗 I_T は、放熱量 Q と、皮膚温 T_{sk} と環境の気温 T_a の温度差 $(T_{sk} - T_a)$ の比として式(2-1)で定義され、着衣に加えて空気の影響も含んでいる。衣服自体の熱抵抗 I_{cl} は、放熱量 Q と衣服内側の皮膚温 T_{sk} と衣服外表面の温度 T_{cl} の差 $(T_{cl} - T_{sk})$ の比として式(2-2)で定義される。有効熱抵抗 I_{cle} は、衣服の着脱の効果を表す仮想熱抵抗であり、着衣時の全熱抵抗 I_T と裸体時の全熱抵抗 I_a の差として式(2-3)で定義される。3つのうち、衣服自体の熱抵抗である基礎熱抵抗の使用が推奨されている²⁾。

$$I_T = \frac{Q}{0.155(T_{sk} - T_a)} \quad (2-1)$$

$$I_{cl} = \frac{Q}{0.155(T_{sk} - T_{cl})} \quad (2-2)$$

$$\begin{aligned}
 I_{cle} &= I_{T.dress} - I_{T.nude} \\
 &= \frac{Q_{dress}}{0.155(T_{sk.dress} - T_{a.dress})} - \frac{Q_{nude}}{0.155(T_{sk.nude} - T_{a.nude})}
 \end{aligned} \tag{2-3}$$

ここに、 I_T ：全熱抵抗[clo]（1 clo = 0.155 m²°C/W）、 Q ：放熱量[W/m²]、 T_{sk} ：皮膚温[°C]、 T_a ：気温[°C]、 I_{cl} ：衣服自体の熱抵抗[clo]、 T_{cl} ：衣服外表面温度[°C]、 I_{cle} ：衣服の有効熱抵抗[clo]、 $I_{T.dress}$ ：着衣時の全熱抵抗[clo]、 $I_{T.nude}$ ：裸体時の全熱抵抗[clo]、 Q_{dress} ：着衣時の放熱量[W/m²]、 $T_{sk.dress}$ ：着衣時の皮膚温[°C]、 $T_{a.dress}$ ：着衣時の計測がなされた環境の気温[°C]、 Q_{nude} ：裸体時の放熱量[W/m²]、 $T_{sk.nude}$ ：裸体時の皮膚温[°C]、 $T_{a.nude}$ ：裸体時の計測がなされた環境の気温[°C]。

他方、部位の熱特性を表す場合に、以下の2点を考慮すると基礎熱抵抗値を用いるメリットは小さいと言える。1) 基礎熱抵抗を用いて熱のやり取りを把握する上で部位ごとの衣服外表面の熱伝達特性を把握する必要があるが、現状では困難であること、2) 気流や活動の条件によって基礎熱抵抗値が変わることである。そこでここでは、部位ごとの着衣の熱特性を、部位有効熱抵抗 R_{clei} （式(2-4)）を用いてまとめ、統一を取るために全身の熱抵抗も有効熱抵抗 I_{cle} でまとめるものとした。

$$\begin{aligned}
 R_{clei} &= R_{dressi} - R_{nudei} \\
 &= \frac{Q_{dressi}}{T_{sk.dressi} - T_{a.dress}} - \frac{Q_{nudei}}{T_{sk.nudei} - T_{a.nude}}
 \end{aligned} \tag{2-4}$$

ここに、 R_{clei} ：着衣の部位有効熱抵抗[m²°C/W]、 R_{dressi} ：着衣時の部位の全熱抵抗[clo]、 R_{nudei} ：裸体時の部位の全熱抵抗[clo]、 Q_{dressi} ：着衣時の部位の放熱量[W/m²]、 $T_{sk.dressi}$ ：着衣時の部位皮膚温[°C]、 Q_{nudei} ：裸体時の部位放熱量[W/m²]、 $T_{sk.nudei}$ ：裸体時の部位皮膚温[°C]。

静穏気流（風速0.15m/s以下）の人工気候室で、夏服の単品および組合せについて、部位の有効熱抵抗 R_{clei} を測定した。測定に用いたサーマルマネキンの仕様を表2-1に示す。測定に用いた単品衣服の例を表2-2に、組合せ衣服の例を表2-3に示す。測定には、椅座姿勢、20部位分割、表面発熱の女性型サーマルマネキンを用いた（図2-1）。均一環境、椅座姿勢、熱的にほぼ中立状態にある人体の皮膚温分布（表2-4）を、サーマルマネキンの設定表面温度分布に与えてPI制御した。人工気候室の気温は、椅座、中立状態での乾性放熱量に近い放熱量となるように、裸のサーマルマネキンでは27°C、単品衣服を着用したサーマルマネキンでは25°C、組合せ衣服を着用したサーマルマネキンでは24°Cに設定した。相対湿度は40±20%であった。定常状態に至ったデータを用いて、式(2-4)により胸部、背部、腹部、臀部、上腕部、前腕部、大腿部、下腿部、足部、計9部位の有効熱抵抗 R_{clei} を計算した。なお、実測した着衣に頭や顔、手を被うものは見られなかった。全身の着衣の有効熱抵抗 I_{cle} は、式(2-3)の Q_{dress} 、 $T_{sk.dress}$ 、 Q_{nude} 、 $T_{sk.nude}$ を全身の面積平均値として与えて計算した。再現性を考慮して1条件につき2～3度の測定を行い、その中から全9部位について、有効熱抵抗 R_{clei} の差が0.031 m²°C/W (= 0.2 clo)以下を満たす2測定を誤差やばらつきの少ない有効な計測として採用し、 R_{clei} の平均値から算出した。

表2-1 サーマルマネキンの仕様

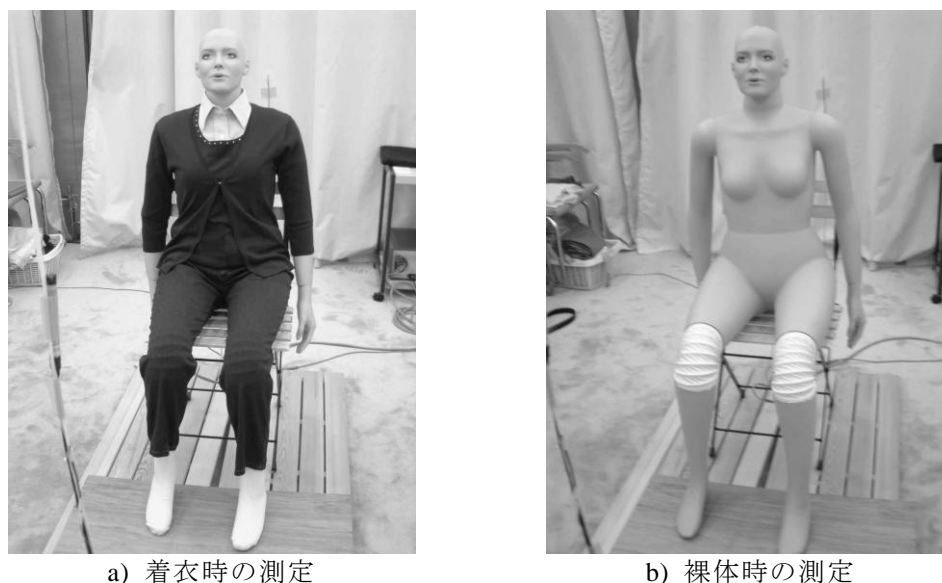
項目	仕様
材質	グラスファイバー
形状	女子立位・座位共用20分割。身長168cm、体重25kg、体表面積1.483㎡。
塗装色	肌色つや消し（5YR6/4）塗装。
部位数	顔、頭部、胸、背中、腹、腰、左・右上腕部、左・右前腕部、左・右手、左右大腿前・後、左・右下腿、左・右足の計20部位。
発熱機能	方法：各部位表面に巻きつけたニクロム線により加熱。PCによるPID制御。20部位を独立して3方式（表面一定温度、表面一定放熱量、コンフォート：温度と放熱量の相関）により制御可能。表面温度は18°C～38°C。温度測定精度±0.2°C。表面熱量は0 W m ⁻² ～230 W m ⁻² 。
温度計測	マネキン各表面に巻きつけたニッケル線の抵抗値より各部位表面下の平均温度を計測。

表2-2 単品衣服の概要（抜粋して掲載）

記号	品名	重量 [g]	材質	色
UW1	トランクス	79	綿100%	青
UW2	パンティ	29	綿100%	肌
UW3	ブラジヤ	37	綿100%	肌
UW6	靴下(普通)	61	綿100%	白
SU3	キャミソール	98	綿100%	水
SU4	半袖Tシャツ	185	綿100%	白地に青のプリント
SU12	半袖シャツ	201	綿60%、ポリエステル40%	水・チェック
SU16	七分袖シャツ	179	ポリエステル84%、ポリウレタン16%	ウグイス
SU17	長袖ブラウス	190	ポリエステル59%、綿34%、ポリウレタン7%	白
SU18	アンサンブルサマーセータ(内)	113	アクリル100%	茶
SU19	アンサンブルサマーセータ(外)	172	アクリル100%	茶
SU25	ワンピース	201	綿95%、ポリウレタン5%	グレー
SU30	作業着上(夏・長袖)	234	ポリエステル60%、綿40%	グレー
SD6	2タックパンツ	449	綿60%、ポリエステル40%	グレー
SD7	ウォーキングパンツ	440	綿55%、レーヨン40%、ポリウレタン5%	青
SD8	スカート	262	綿68%、ポリエステル28%、ポリウレタン4%	黒
SD17	作業着下(夏)	327	ポリエステル60%、綿40%	グレー
SU26	半袖Tシャツ上	170	綿69%、ポリエステル31%	グレー
SD12	半ズボン下	187	綿69%、ポリエステル31%	グレー
SU27	寝巻上	159	綿100%	ピンク
SD14	寝巻ズボン	111	綿100%	ピンク

表2-3 組合せ衣服の概要（抜粋して掲載）

No.	組合せ	重量 [g]
19	トランクス(UW1)+靴下(UW6)+半ズボン(SD12)+半袖Tシャツ(SU26)	497
26	トランクス(UW1)+2タックパンツ(SD6)+半袖シャツ(SU4)+作業着上(長袖)(SU30)	947
36	トランクス(UW1)+寝巻ズボン(SD14)+寝巻上(SU27)	349
91	パンティ(UW2)+ウォーキングパンツ(SD7)+ブラジヤ(UW3)+七分袖シャツ(SU16)	685
102	パンティ(UW2)+靴下(UW6)+ウォーキングパンツ(SD7)+ブラジヤ(UW3)+キャミソール(SU3)+七分袖シャツ(SU16)+アンサンブルセータ(内)(SU18)+アンサンブルセータ(外)(SU19)	1129
116	パンティ(UW2)+靴下(UW6)+スカート(SD8)+ブラジヤ(UW3)+キャミソール(SU3)	487
151	パンティ(UW2)+靴下(UW6)+作業着下(SD17)+ブラジヤ(UW3)+キャミソール(SU3)+長袖ブラウス(SU17)+作業着上(夏・長袖)(SU30)	976
167	パンティ(UW2)+ワンピース(SU25)	431



a) 着衣時の測定

b) 裸体時の測定

図2-1 実験風景

表2-4 サーマルマネキンの設定表面温度

部位	頭	胸	腹	右上腕	右前腕	右手	右大腿(前)	右大腿(後)	右下腿	右足
設定温度 [°C]	35.5	34.5	34.7	33.4	34.0	34.5	33.3	33.5	32.2	33.7
部位	顔	背	腰	左上腕	左前腕	左手	左大腿(前)	左大腿(後)	左下腿	左足
設定温度 [°C]	35.5	34.6	34.1	33.4	34.1	34.7	33.3	33.2	32.2	33.6

(2) 気流が夏季の組み合わせ着衣の部位有効熱抵抗値に及ぼす影響

産業技術総合研究所の温度成層風洞(測定部分:長さ20m×幅3m×高さ2m)において実験を行った。サーマルマネキンを気流の流入口から7mの断面に設置し、着衣の部位有効熱抵抗、部位の対流熱伝達率を測定する実験を実施した。環境条件を表2-5に示す。

女性サーマルマネキン¹⁵⁾の全20部位の表面温度を32°C一定に維持して温度成層風洞内に設置した。各風速における気温は、裸体のサーマルマネキンの全表面温度を32°Cに維持できる範囲で、極力低い温度とした。なお、風速は風洞のファンの回転数を一定に維持することにより制御した。着衣の組み合わせを表2-6に、測定項目を表2-7に示す。スーツや作業着などのワークウェア、カジュアルウェア、通気性の低いスポーツウェアや雨合羽など、7組み合わせとした。気流方向による違いを見るため、基準着衣(No.1)、および裸体条件では、図2-2に示す3通りのサーマルマネキン設置方法において測定を行った。それ以外の着衣の組み合わせ条件では、風がサーマルマネキン前方設置断面上に腰部の中心が位置するよう、サーマルマネキンを置いた。

表2-5 風速と気温の設定

風速	0.2(0.26)	0.35(0.35)	0.65(0.75)	1.0(1.05)	2.5(2.60)
気温	19(19.5)	19(19.3)	21(21.1)	23(23.0)	25(25.0)

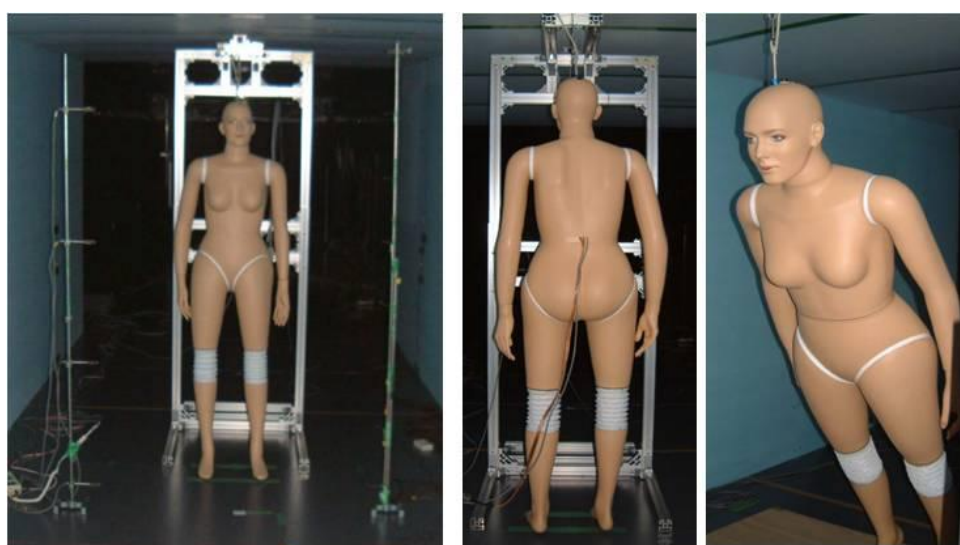
注 ()内はサーマルマネキン設置位置の平均実測値

表2-6 測定する着衣の組合せ

No.	構成衣服
1	夏物スーツ上下(スカート)、半袖ブラウス、パンティ、ブラジャー、キャミソール、靴(女)
2	夏物スーツスカート、半袖ブラウス、パンティ、ブラジャー、靴(女)
3	夏物作業着上下、半袖シャツ、タンクトップ、トランクス、靴下、運動靴、ベルト
4	冬物スーツ上下(スカート)、長袖ブラウス、キャミソール(厚手)、パンティ、ブラジャー(厚手)、ペチコート、パンスト、靴(女)
5	Tシャツ(女)、ウォーキングパンツ、パンティ、ブラジャー、靴下、運動靴、ベルト
6	雨合羽上下、Tシャツ(女)、ウォーキングパンツ、パンティ、ブラジャー、靴下、運動靴、ベルト
7	ウインドブレーカ上下、半袖シャツ、タンクトップ、トランクス、靴下、運動靴

表2-7 サーマルマネキン実験の測定項目

項目	機器	測定間隔	備考
部位の表面温度と放熱量	サーマルマネキン (Nimatic社、TM 03/16)		
気温、壁温	T-CC熱電対(0.3mmφ)、JISクラス1、 データロガー(江藤電気、CADAC21)	1分間	定点計測(図2-1a)
気温、相対湿度	温度・湿度センサ(江藤電気、2119A)、 データロガー(江藤電気、CADAC21)	1分間	
風速	多点風速計(Kanomax社、SYSTEM6243)、 プローブ(0963-00)	10Hz	定点計測(図2-1a)、 10秒間



(a)

(b)

(c)

図2-2 3通りのサーマルマネキン設置方法：(a)風が前より吹く条件、(b)風が後より吹く条件、(c)風が前方上30°より吹く条件(※サーマルマネキンを30°前傾)

データの再現性を確認するため、基準着衣(No.1)、および裸体条件については、風がサーマルマネキン前方から吹く条件で測定を二回行った。他の条件では、測定は一回のみとした。裸体条件での測定データ、着衣条件での測定データを用い、7部位(上躯幹部、下躯幹部、上腕、前腕、大腿、下腿、足)の面積重み平均放熱量を計算、式(2-3)に代入して、表2-5の5代表風速に対する7部位の着衣の有効熱抵抗を計算した。式(2-3)に代入する裸体時の全熱抵抗 R_a は、着衣時の全熱抵抗 $R_{T.dress}$ を測定した時期に近い方の R_a を用いた。表2-6の組合せ着衣では、頭、手を被う条件が無かったこ

とから、頭、手については、着衣の有効熱抵抗を計算しなかった。

風が直接あたる部分と、風が回り込んでからあたる部分で、風が着衣の有効熱抵抗に及ぼす影響の違いを検討する目的から、上躯幹部を胸と背に、下躯幹部を腹と背に、大腿を大腿(前)と大腿(後)に分割し、それぞれの部位の有効熱抵抗も算出した。同様のサーマルマネキンで得られたOguroら¹⁶⁾の部位の有効放射面積率を適用し、式(2-6)により9部位(頭、上躯幹部、下躯幹部、上腕、前腕、手、大腿、下腿、足)の平均放射放熱量 R_{ad} を計算した。式(2-7)により、部位の対流放熱量 C を得、式(2-8)により、部位の対流熱伝達率 h_c を得た。

$$R_{ad} = \sigma \cdot \varepsilon \cdot F_r \cdot \left((T_{sk} + 273.15)^4 - (MRT + 273.15)^4 \right) \quad (2-6)$$

$$C = Q - R_{ad} \quad (2-7)$$

$$h_c = \frac{C}{T_{sk} - T_a} \quad (2-8)$$

ここに、 R_{ad} : 放射放熱量[W/m²]、 σ : ステファンボルツマン係数(= $5.67 \cdot 10^{-8}$)[W/(m²·K⁴)]、 ε : 放射率(=1.0) [N.D.]、 F_r : 有効放射面積率[N.D.]、 MRT : 平均放射温度[°C]、 C : 対流放熱量[W/m²]、 h_c : 対流熱伝達率[W/(m²·°C)]

風が直接あたる部分と、風が回り込んでからあたる部分で、風が対流熱伝達率に及ぼす影響の違いを検討する目的から、着衣の部位有効熱抵抗と同様に胸と背、腹と背、大腿(前)と大腿(後)の対流熱伝達率も算出した。

(3) 衣服透湿性の測定—発汗サーマルマネキンによる温熱性評価

発汗サーマルマネキンJUN¹⁷⁾を用い、被験衣服として、各部位寸法に合ったサイズのアンサンブル(スーツ上下、半袖シャツ、ランニング、ネクタイ、トランクス、靴下)を使用した(アンサンブル1)。またジャケットなしの測定(アンサンブル2)も行った。アンサンブル衣服を構成する単品衣服の概要を表2-8、ならびに、実験に用いた衣服の着用画像を図2-3に示す。また、発汗サーマルマネキンの仕様を表2-9に示す。



a) アンサンブル1



b) アンサンブル2

図2-3 被験衣服

表2-8 単品衣服の概要

No.	アイテム	素材	重量 [g]	アンサンブル1	アンサンブル2
1	トランクス	綿88%、ポリエステル12%	72	○	○
2	靴下	綿、ナイロン	33	○	○
3	夏のスーツズボン	表：毛55%、ポリエステル45%、裏：ポリエステル、キュブラ	315	○	○
4	タンクトップ	綿100%	124	○	○
5	半袖シャツ	ポリエステル55%、綿45%	150	○	○
6	ネクタイ		51	○	
7	夏のスーツ上	表：毛55%、ポリエステル45%、裏：胴裏：ポリエステル、キュブラ、袖裏：キュブラ	565	○	

表2-9 発汗サーマルマネキン (JUN)¹⁷⁾の仕様

項目	仕様
材質	FRP樹脂
形状	男子立位座位共用17分轄 KEM型番を改造
塗装色	肌色つや消し
部位数	頭部、胸部前後、腰部前後、左右上腕部、左右前腕部、左右手先、左右大腿部、左右下腿部、左右足先の計17部位。
発熱機能	方法：各部位表面に巻きつけたヒータ線によりマネキン表面各部位を独立して発熱制御。 能力：0met～5met以上/部位。（但し、胸部は内蔵回路の発熱が加算される） コア産熱：頭部、胸部、腰部はコア産熱を模擬するためマネキン内部にも表面と同程度のコアヒータを設ける（胴・腰部のコアヒータは前後別制御可能）。
温度計測	マネキン各表面に巻きつけたニッケル線により、各部位表面下の平均温度を計測する。
発汗機能	発汗点：マネキン表面約100cm ² 当たり1点の割合で、マネキン内壁から表面に向かって発汗用の管を設置する。 注入方法：チューブポンプ（ISMATEC製）により送液する。発汗量はポンプの送液精度に依存。 発汗量：20g/m ² h～約900 g/m ² h。発汗線毎に0.002g/min～0.15g/min。発汗量の制御はチューブポンプ単位で可能。
頭部	発熱、発汗機能を持つ頭部を別途作成

(3-1) 乾性熱抵抗値の測定

環境温 $20 \pm 0.5^{\circ}\text{C}$ 、相対湿度 $50 \pm 0.1\% \text{RH}$ の人工気候B室内で実施した。マネキンの制御は定電力制御とし、衣服をマネキンに着用させた後に通電し、マネキンの体表面温度が定常状態に達したのをモニターで確認した後、30分間マネキン各部位の表面温度、および熱供給量、環境温を30分間測定した。マネキンに投入された供給熱量は裸体マネキンが 28°C の環境下でヒトの皮膚温分布が一番近い値を示した熱量を選択したものである。全ての衣服において、測定を2回繰り返し行い、有効クロー値を算出した。またジャケットを脱いだ状態を想定し、上着無しの被験衣服の測定も2回繰り返し行った。

(3-2) 湿性熱抵抗値の測定

人工気候室Bを環境温度 $33 \pm 0.5^{\circ}\text{C}$ 、相対湿度 $30 \pm 0.1\% \text{RH}$ に設定して実施した。サーマルマネキンは、定温度制御を使用し、マネキンの体表面温度を環境温度と同じ 33°C 近くになるまで加温する。アンサンブルは予め人工気候室内に24時間以上放置する。次に、 36.5°C に制御された温水を吐

水開始し、マネキンの模擬皮膚表面から水が滴れない程度に、霧吹きを用いてマネキンの体表面全体を湿らせる。マネキンの体表面温度が安定してきた段階で衣服を着せ、マネキンの体表面温度設定が全体で平均33°Cになるように制御する。着衣を行ってから、30分以内に体表面温度を安定させ、温度変化が小さくなった段階で、マネキン温度、体表面積温度、供給熱量の項目について、30分間測定をした。測定開始前、測定終了後に電子天秤を用いて、体重減少量を記録した。測定は二回繰り返し行い、平均湿性熱抵抗値、有効値を算出した。測定中は、乾性評価と同様に、マネキンに対する横向き気流の影響を最小限に抑えるために、綿素材の大判の布をマネキンの後ろに吊るした。一回の測定を終了後は衣服を完全に乾かすために約2日間のインターバルを置き、再実験を行った。

(4) 人体の局所発汗特性

自然状態における皮膚からの水分蒸散量を測定する方法として、エバポリメータ (Servo Med社) が1970年代SwedenのNilsson¹⁸⁾により提案され、データが発表されている。これは開放系の局所発汗測定法であり、測定誤差を小さくするためのいくつかの測定条件上の制限が当初要求されていた。エバポリメータは図2-4に示すように2対のサーミスタ測温体の温度センサと静電容量式薄膜ポリマの湿度センサで構成され、空気に接触している表面から空中への拡散による水分移動量を測定する。測定部は通風による乱れを防ぐために円筒形のテフロン・カプセルにより狭小な面積に限定されている。

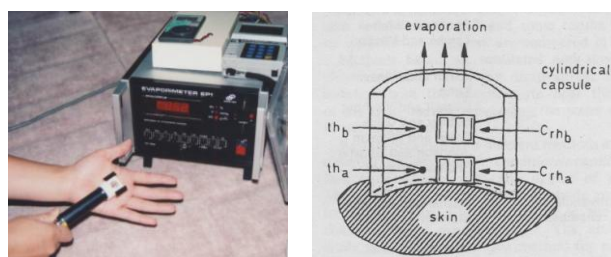


図2-4 エバポリメータの構成

実験は2室の人工気候室を使用し、一方をコントロール室として気温28°Cに、もう一方を暑熱暴露室として、日を変えて31°C、34°C、37°Cの3条件に設定した。相対湿度は35%、不感気流に設定した。

被験者はコントロール室に入室後、実験準備を含めて少なくとも30分間滞在し、その後、30分間ずつ部屋を移動して暑熱暴露と28°Cでの回復を繰り返した。被験者は藤で編んだ椅子に座り安静状態を保った。

測定項目は、直腸温、皮膚温、総発汗量、局所水分蒸発量である。総発汗量は、暑熱暴露前後の体重差を体表面積で除した。局所蒸発量は、エバポリメータを用い、各環境暴露後20分から測定を始め、2秒間隔で1カ所につき30秒間の蒸発量を測定した。測定部位は、図2-5の●に示す前額、胸、背中、上腹、下腹、腰、上腕、前腕、手掌、手背、大腿、下腿前、下腿後、足背の14点であった。また、直腸温と皮膚温 (図2-5の○) は、サーミスタ温度計を用い、30秒間隔で連続的に測定した。そして平均皮膚温は、Hardy&DuBois提案の7点法で算出した。

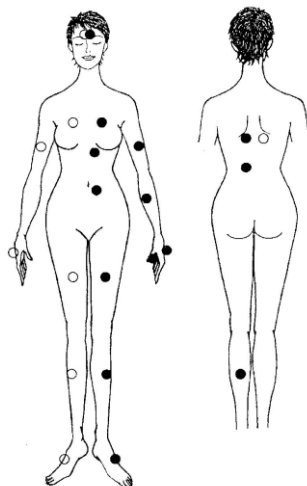


図2-5 局所蒸発量黒(●)と皮膚温(○)の測定部位

4. 結果・考察

(1) 部位の有効熱抵抗値測定

49の単品衣服、97の組合せ衣服について、全9部位の有効熱抵抗 R_{clei} の測定データが得られた。有効熱抵抗 R_{clei} 計測の再現性は、特に腹部、大腿部で悪かった。データ範囲を表2-10に、単品衣服、組合せ衣服の計測結果の例を表2-11、表2-12に示す。再現性を満たすとして採用したデータでも、例えばパンストで下腿を覆っているにもかかわらず、下腿の有効熱抵抗値がマイナスとなるデータも見られた。測定は、パンストの有無を評価できるほどの精度ではなかったと考えられる。

図2-6に単品衣服の重量 W_{gr} と単品衣服の有効熱抵抗 $I_{cle.gr}$ の対応を、図2-7に組合せ衣服の重量と組合せ衣服の有効熱抵抗 $I_{cle.en}$ の対応を、図2-8に組合せ衣服の有効熱抵抗 $I_{cle.en}$ とそれを構成する単品衣服の有効熱抵抗の総和 $\Sigma I_{cle.gr}$ の対応を示す。図2-6の単品衣服の重量 W_{gr} と $I_{cle.gr}$ の対応にはばらつきが大きい。 W_{gr} と $I_{cle.gr}$ の対応は良くないとした既往研究^{7),8)}に一致する。組合せ衣服における $I_{cle.en}$ と重量 ΣW_{gr} の対応(図2-7)と、構成する単品衣服の有効熱抵抗の総和 $\Sigma I_{cle.gr}$ と $I_{cle.en}$ と対応(図2-8)を比較すると、McCulloughらの報告⁷⁾通り $\Sigma I_{cle.gr}$ に対して良い対応が見られた。ただし、 $I_{cle.en}$ の ΣW_{gr} または $\Sigma I_{cle.gr}$ に対する回帰式の傾きはいずれもMcCulloughらの報告¹⁹⁾($I_{cle.en} = 4.3 \times 10^{-4} \Sigma W_{gr} + 0.25$, $I_{cle.en} = 6.2 \times 10^{-4} \Sigma W_{gr}$, $I_{cle.en} = 0.76 \Sigma I_{cle.gr} + 0.079$, $I_{cle.en} = 0.84 \Sigma I_{cle.gr}$)より小さい。McCulloughらの測定は立位で行っており、ここでの測定と姿勢が異なる。この変化率の違いが姿勢によるものか、実験に用いた着衣条件(McCulloughらは四季の服を測定しているが、ここでは夏服に限定)によるものかを知るには、立位のサーマルマネキンで同じ着衣の有効熱抵抗値を実測する必要があると考えられる。

表2-10 データ範囲

		全身	胸部	背部	腹部	臀部	上腕部	前腕部	大腿部	下腿部	足部
		[clo]	[m ² °C/W]								
単品	Min	0.02	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Max	0.24	0.162	0.137	0.150	0.092	0.144	0.085	0.075	0.084	0.034
組合せ	Min	0.13	0.082	0.042	0.127	0.075	0.000	-0.001	0.019	-0.005	0
	Max	0.60	0.315	0.303	0.405	0.216	0.181	0.153	0.133	0.098	0.037

表2-11 単品衣服における R_{clei} と I_{cle} (抜粋)

単品	胸部	背部	腹部	臀部	上腕部	前腕部	大腿部	下腿部	足部	全身
	R_{clei} [m ² °C/W]									I_{cle} [clo]
UW1	0	0	0.113	0.065	0	0	0.021	0	0	0.06
UW2	0	0	0.030	0.042	0	0	0	0	0	0.03
UW3	0.042	0.014	0	0	0	0	0	0	0	0.03
UW6	0	0	0	0	0	0	0	0.021	0.031	0.04
SU3	0.068	0.048	0.064	0.028	0	0	0	0	0	0.09
SU4	0.113	0.121	0.123	0.059	0.076	0	0	0	0	0.19
SU12	0.134	0.137	0.106	0.068	0.144	0	0.028	0	0	0.24
SU16	0.117	0.132	0.088	0.053	0.086	0.040	0.002	0	0	0.18
SU17	0.116	0.124	0.105	0.059	0.075	0.085	0.001	0	0	0.21
SU18	0.086	0.091	0.088	0.030	0	0	0	0	0	0.08
SU19	0.074	0.103	0.046	0.036	0.068	0.023	0	0	0	0.14
SU25	0.099	0.028	0.119	0.058	0	0	0.066	0	0	0.15
SU30	0.156	0.132	0.090	0.053	0.130	0.073	0.011	0	0	0.24
SD6	0	0	0.143	0.092	0	0	0.043	0.084	0	0.12
SD7	0	0	0.121	0.055	0	0	0.032	0.050	0	0.09
SD8	0	0	0.110	0.064	0	0	0.075	0.020	0	0.10
SD17	0	0	0.129	0.077	0	0	0.061	0.079	0	0.13
SU26	0.113	0.118	0.120	0.046	0.075	0	0	0	0	0.14
SD12	0	0	0.143	0.047	0	0	0.037	0	0	0.06
SU27	0.133	0.131	0.110	0.055	0.104	0	0.004	0	0	0.18
SD14	0	0	0.118	0.059	0	0	0.045	0	0	0.07

表2-12 組合せ衣服における R_{clei} と I_{cle} (抜粋)

組合せ	胸部	背部	腹部	臀部	上腕部	前腕部	大腿部	下腿部	足部	全身
	R_{clei} [m ² °C/W]									I_{cle} [clo]
19	0.094	0.107	0.402	0.130	0.063	0	0.045	0.010	0.024	0.25
26	0.215	0.185	0.332	0.156	0.181	0.072	0.072	0.098	0	0.50
36	0.110	0.105	0.308	0.156	0.089	0	0.063	0	0	0.24
91	0.135	0.123	0.175	0.085	0.068	0.031	0.028	0.040	0	0.27
102	0.262	0.273	0.316	0.161	0.144	0.042	0.056	0.065	0.026	0.47
116	0.094	0.060	0.218	0.122	0	0	0.094	0.042	0.034	0.27
151	0.294	0.259	0.323	0.163	0.172	0.153	0.082	0.080	0.025	0.60
167	0.100	0.044	0.127	0.096	0	0	0.083	0	0	0.19

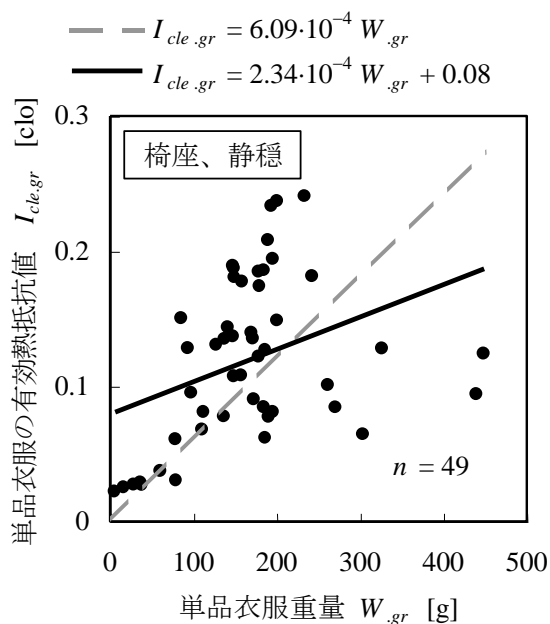


図2-6 单品衣服の有効熱抵抗と单品衣服重量

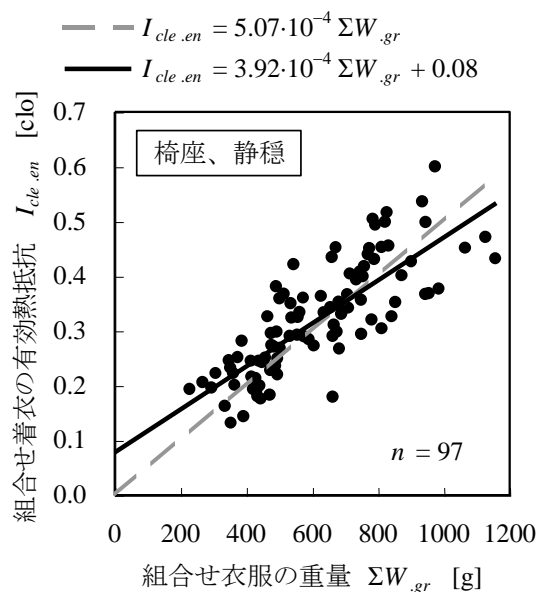


図2-7 組合せ衣服の有効熱抵抗と組合せ衣服重量

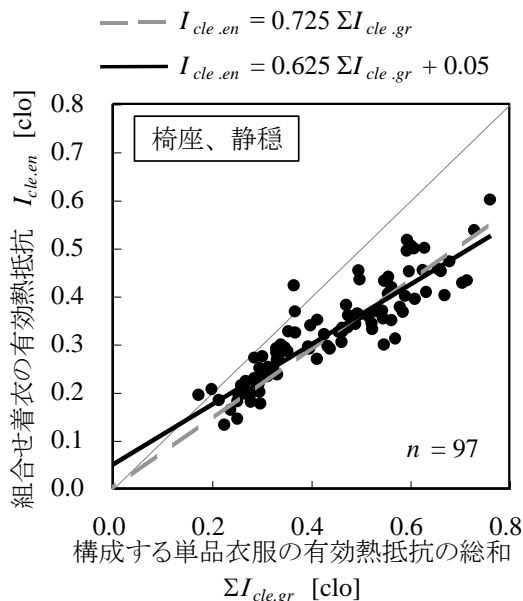


図2-8 組合せ衣服の有効熱抵抗と組合せを構成する单品衣服の有効熱抵抗の総和

(2) 気流が夏季の組み合わせ着衣の部位有効熱抵抗値に及ぼす影響

(2-1) 対流熱伝達率

図2-9に、各風速における全身の対流熱伝達率を示す。前方から風が来る場合の2回の計測結果について、いずれの部位でもほぼ同一で実測に再現性があることが確認された。直接風があたる部分、回り込んであたる部分の両方を含んでいる分割について、対流熱伝達率はほぼ部位と風速によって定まり、風向の影響は小さかった。直接風があたる場合と回り込んでからあたる場合の対流熱伝達率として、風向ごとの胸、背、腹、腰、大腿(前)、大腿(後)の対流熱伝達率を検討したと

ころ、直接風があたる場合の対流熱伝達率が回り込んであたる場合より大きかった。同様に対流熱伝達率を測定した研究として、市原ら²⁰⁾、deDearら²¹⁾、桑原ら²²⁾、小野ら²³⁾の研究などがある。風速と対流熱伝達率の対応が、研究によって大きく異なる。小野らは対流熱伝達率の推定には風速だけではなく乱流強度も用いるべきことを報告している²³⁾。

(2-2) 着衣の部位有効熱抵抗の再現性

図2-10に各風速におけるNo.1着衣の部位、または全身の有効熱抵抗を示す。2回の計測結果を比較すると、いずれの部位でもほぼ同一であり、実測に再現性があることが確認された。

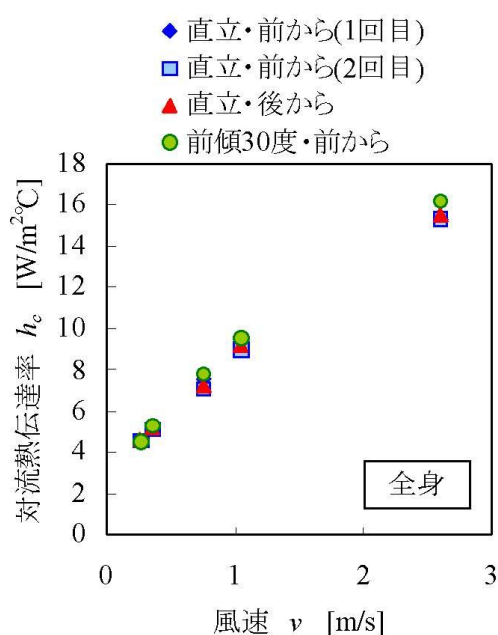


図2-9 全身の対流熱伝達率と風速

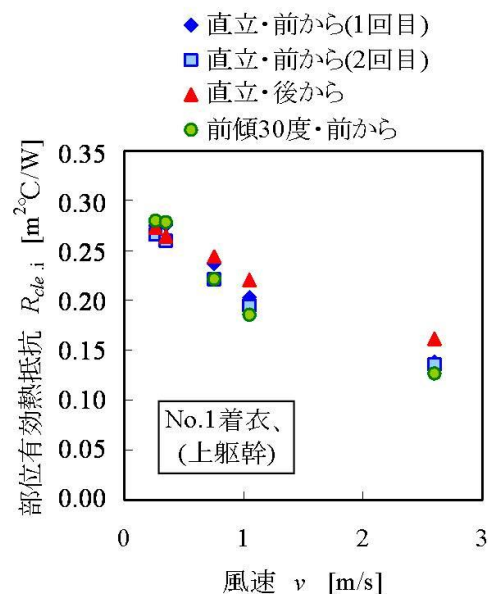


図2-10 上躯幹の $R_{cle,i}$ (No.1)と風速

(2-3) 着衣の部位有効熱抵抗に及ぼす風向の影響

各風向における代表風速 v とNo.1着衣の部位有効熱抵抗 $R_{cle,i}$ の対応をとったところ、いずれの分割においても、静穏気流時($v = 0.26\text{m/s}$)の着衣の部位有効熱抵抗はほぼ一致した。花田らが、部位の有効熱抵抗が風によって減少せず、逆に増加する傾向にあることを報告²⁴⁾している。しかし、本研究では、全身の熱抵抗に関する既往研究^{10), 11), 25)}と同様に、部位の有効熱抵抗が風によって減少する結果となった。直接風があたる部分、回り込んであたる部分の両方を含んでいる分割について検討すると、着衣の部位有効熱抵抗はほぼ部位と風速によって定まり、風向の影響は小さかった。全身について、既往研究で、前後、左右などの水平風向の場合、風向が着衣の熱抵抗に及ぼす影響は微少であることが示されている²⁴⁾。ただし、この研究のように斜め上側から風を吹かせた報告はない。全身についても、着衣の有効熱抵抗はほぼ風速によって定まっていた。斜め上 30° 程度の風向の傾きでは、水平風向の場合と着衣の有効熱抵抗に顕著な違いは生じなかった。上躯幹、下躯幹、大腿の、静穏気流基準に対する部位有効熱抵抗の比を、部位全体、直接風があたる部分、回り込んでからあたる部分に分けて検討すると、いずれの分割においても、直接風があたる場合の減少比が回り込んであたる場合の減少比より大きかった。直接当たる部分と、当たらない部分の差は上躯幹、下躯幹、大腿の順に大きかった。体の前方部分であっても、後方部分であっても、同じ部位内であれば、直接当たる部分の静穏基準の部位有効熱抵抗の減少率、回り

込んであたる部分の静穏基準の部位有効熱抵抗の減少率に顕著な差は見られなかった。

(2-4) 異なる組合せ着衣における気流の影響

それぞれの着衣における部位の有効熱抵抗 $R_{cle,i}$ の静穏基準比を、代表風速 v ごとに検討したところ、いずれの組合せ着衣においても、部位の有効熱抵抗が風によって減少した。全身に対する着衣の有効熱抵抗 $R_{cle,i}$ の静穏基準比は、いずれの着衣でも大きな違いはなかった。日常の衣服では、基礎熱抵抗や全熱抵抗には、風や活動が余り影響しないとする既往研究^{8), 9), 13)}に一致する結果となった。熱抵抗の定義を統一するため、衣服面積率 f_{cl} がISO-9920¹⁾に従うとして、 $f_{cl} = 1 + 0.28I_{cl}$ で与え、基礎熱抵抗を試算し、既往研究と比較する。Havenithら⁹⁾については、静穏裸体時の熱抵抗として0.7cloを与えた。ISO-9920に従い風が吹いた場合の裸体時の熱抵抗を計算し、衣服面積率で除して衣服表面の熱抵抗を得た。風が吹いた条件での全熱抵抗から衣服表面の熱抵抗を引くことにより、基礎熱抵抗を計算した。この研究の結果と比較できるように、0.26m/sの基礎熱抵抗値に対する比として記述する。図2-11にHavenith and Nilsson⁹⁾、Watanabeら¹⁰⁾、Havenithら¹⁾が示した着衣の基礎熱抵抗と気流の関係、および本研究の各組合せ着衣の基礎熱抵抗試算値を示す。本研究の基礎熱抵抗試算値の静穏基準比と代表風速の対応においても、組合せ着衣による大きな違いは見られなかった。わずかではあるものの、基礎熱抵抗試算値の静穏基準比の方が $R_{cle,i}$ の静穏基準比より小さくなった。いずれの着衣においても既往研究と比較して風の影響を強く受け、基礎熱抵抗の静穏基準比は小さくなった。

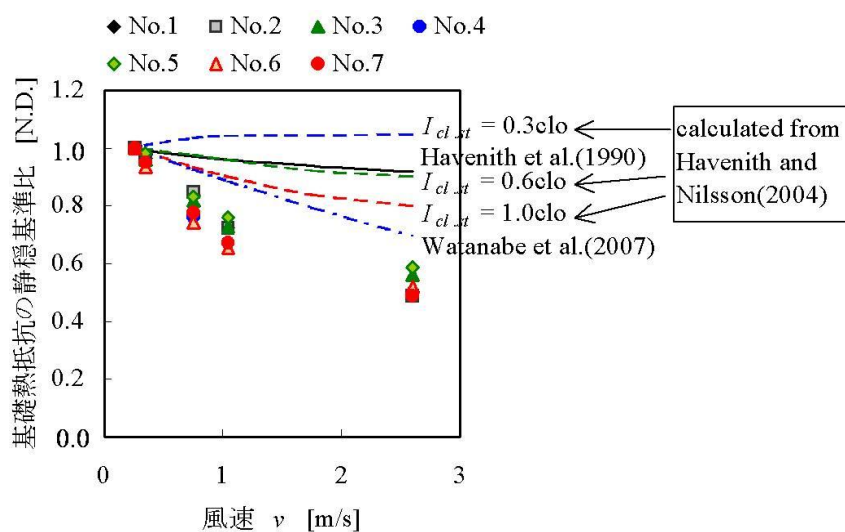


図2-11 組合せ着衣の基礎熱抵抗の静穏基準比と代表風速の対応と既往研究との比較

(2-5) 部位有効熱抵抗の推定法

風が直接あたる部分、回り込んでからあたる部分の両方を含んだ部位に対する代表風速を定義できる7分割の着衣の部位有効熱抵抗の推定法を示す。代表風速 v による $h_{c,i}$ の静穏基準比、 $R_{cle,i}$ の静穏基準比 $C_{orr.Rcle,i}$ の変化の部位特性を見るため、最小二乗に着目した探査法により、各部位の $h_{c,i}$ を式(2-9)により、 $R_{cle,i}$ の静穏基準比 $C_{orr.Rcle,i}$ を式(2-10)により近似した。 $h_{c,i}$ は裸体時の2回の測定データに対して、 $R_{cle,i}$ の静穏基準比 $C_{orr.Rcle,i}$ は全組合せのデータに対して近似式を作成した。式(2-9)の定数 b_1 、式(2-10)の定数 b_2 はそれぞれ全部位に共通の値を探査により設定した。他の $a_{1,i}$ 、 $a_{2,i}$ 、 $m_{1,i}$ 、

$m_{2,i}$ は部位*i*ごとに設定した。各部位ごとに設定される $m_{1,i}$ 、 $m_{2,i}$ の絶対値が大きい部位ほど、 $h_{c,i}$ の静穏基準比、 $R_{cle,i}$ の静穏基準比の変化が大きな部位と言える。

$$h_{c,i} = a_{1,i} (b_1 + v)^{m_{1,i}} \quad (2-9)$$

$$C_{orr.Rcle,i} = a_{2,i} (b_2 + v)^{m_{2,i}} \quad (2-10)$$

表2-13に3次元の探索によって設定された7部位の $a_{1,i}$ 、 $a_{2,i}$ 、 b_1 、 b_2 、 $m_{1,i}$ 、 $m_{2,i}$ を示す。得られた乗数 $m_{1,i}$ の絶対値の順から、 $h_{c,i}$ の静穏基準比は、前腕や下腿など、径の小さな部位で風の影響を受けにくく、逆に上躯幹や下躯幹など、径の大きい部位で風の影響を受けやすいと言える。同様に、乗数 $m_{2,i}$ の絶対値の順から、 $R_{cle,i}$ の静穏基準比も同様に、下腿や足など、径の小さな部位で風の影響を受けにくく、逆に上躯幹など、径の大きい部位で風の影響を受けやすい傾向が見て取れる。

$h_{c,i}$ の静穏基準比が風の影響を受けやすい部位では、 $R_{cle,i}$ の静穏基準比 $C_{orr.Rcle,i}$ も風の影響を受けやすい結果となった。変数として $h_{c,i}$ の静穏基準比を用いることにより、全部位に共通の $R_{cle,i}$ の静穏基準比 $C_{orr.Rcle,i}$ を推定する式が得られると予期される。全組合せ着衣に対する $R_{cle,i}$ の静穏基準比 $C_{orr.Rcle,i}$ と $h_{c,i}$ の静穏基準比の対応を、部位ごとに図2-12に示す。同一風速、同一対流熱伝達率であっても着衣によって $C_{orr.Rcle,i}$ が異なるため、データにばらつきがある。ただし、全部位のデータが一次式の周辺で分布している。全身を除く7部位に共通する、 $C_{orr.Rcle,i}$ と $h_{c,i}$ の静穏基準比($h_{c,i}/h_{c,i,cal}$)の回帰式として式(2-11)を得た。

$$C_{orr.Rcle,i} = -0.156 \left(\frac{h_{c,i}}{h_{c,i,cal}} \right) + 1.156 \quad (2-11)$$

式(2-11)を用いる上で必要となる、7部位の静穏気流下の対流熱伝達率 $h_{c,i,cal}$ を表2-14に示す。裸体条件での測定データ、着衣条件での測定データを用い、7部位(上躯幹部、下躯幹部、上腕、前腕、大腿、下腿、足)の面積重み平均放熱量を計算、式(2-3)に代入して、表2-14の5代表風速に対する7部位の着衣の有効熱抵抗を計算した。

表2-13 3次元探索により設定された式(2-9)、(2-10)の定数

	$a_{1,i}$	b_1	$m_{1,i}$	$a_{2,i}$	b_2	$m_{2,i}$
頭	6.85	0.1	0.8	----	----	----
上躯幹	6.65		0.73	0.95	0.64	-0.47
下躯幹	5.69		0.65	0.95		-0.38
上腕	8.41		0.63	0.98		-0.42
前腕	9.51		0.54	0.97	-0.31	
手	14.34		0.55	----	----	----
大腿	7.87		0.57	0.97	0.64	-0.33
下腿	10.22		0.54	0.99		-0.17
足	10.8		0.56	1.02		-0.29

表2-14 前方吹出し・静穏(0.26m/s)条件の各部位の対流熱伝達率

	$h_{c,i,cal} [W/m^2 \cdot ^\circ C]$
頭	2.23
上躯幹	3.14
腰	2.93
上腕	4.34
前腕	5.49
手	7.92
大腿	4.54
下腿	6.46
足	6.31

図2-13に全組合せ着衣平均の $R_{cle,i}$ の静穏基準比と代表風速*v*の対応、式(2-11)と表2-14による近似曲線を部位ごとに示す。同一の*v*における $R_{cle,i}$ の静穏基準比 $C_{orr.Rcle,i}$ は、下腿、足、前腕、大腿にお

いて大きく、上躯幹、下躯幹、上腕において小さい。部位によって、代表風速 v と全組合せ着衣平均の $R_{cle,i}$ の静穏基準比の対応が異なっており、部位ごとに風速による影響が異なった。全部位において、 $h_{c,i}$ の静穏基準比と $R_{cle,i}$ の静穏基準比 $C_{orr,Rcle,i}$ の対応が同一の式(2-11)の関係の近くに分布した。他方、全身においては、対流熱伝達率の静穏基準比に対して着衣の有効熱抵抗の静穏基準比は式(2-11)と比べて若干小さい値となった。

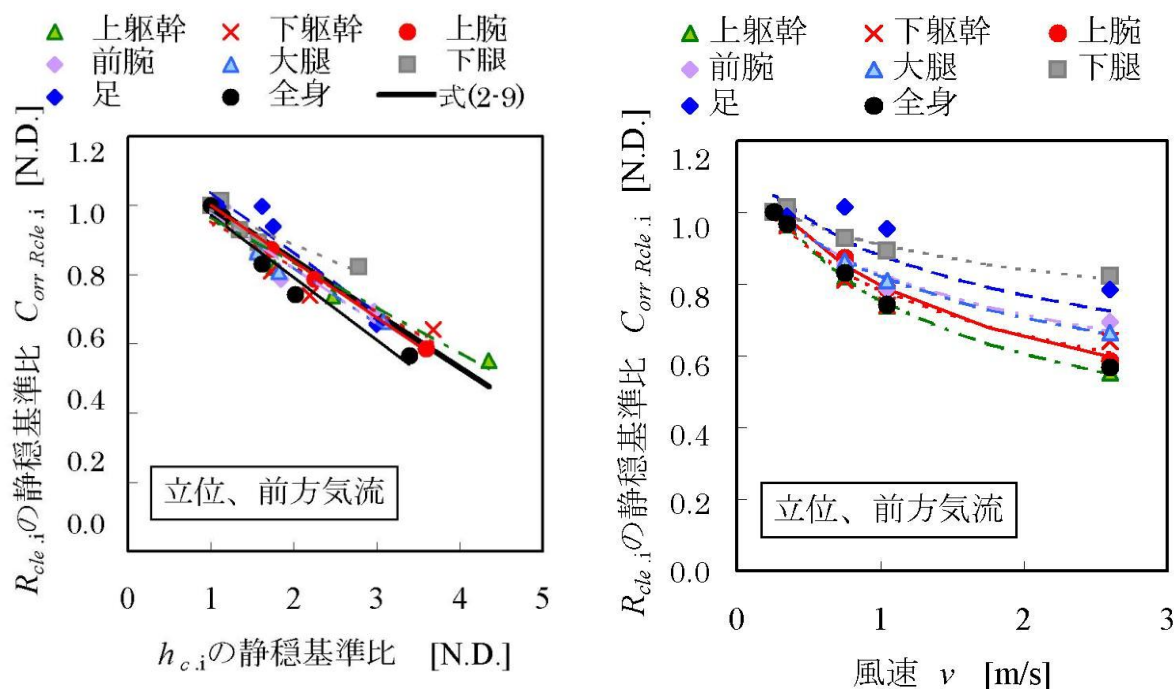


図2-12 全組合せ着衣平均の $R_{cle,i}$ の静穏基準比 $C_{orr,Rcle,i}$ と $h_{c,i}$ の静穏基準比の対応

図2-13 全組合せ着衣平均の $R_{cle,i}$ の静穏基準比 $C_{orr,Rcle,i}$ と代表風速 v の対応

(3) 衣服透湿性の測定—発汗サーマルマネキンによる温熱性評価

アンサンブル2の部位の乾性・湿性熱抵抗値の計測結果を図2-14に示す。アンサンブル1はアンサンブル2に上着とネクタイを足したものである。腹・臀部および右・左大腿において乾性熱抵抗値は高くなっている。腹や臀部はトランクス、ランニングシャツ、半袖シャツ、スーツズボンが重なるところなので、高くなっていると考えられる。湿性熱抵抗値は乾性熱抵抗値と同様の部位で特徴的に高い値を示し、湿性熱抵抗値は比例関係にあることが伺える。

図2-15および表2-15に有効乾性熱抵抗値と有効湿性熱抵抗値との関係を示す。アンサンブル1・2の両方においてほぼ同じ線上に回帰式を引くことができ、また、相関係数は有意であった。これまで衣服の有効乾性熱抵抗値から有効湿性熱抵抗値を推定しているが、今回の発汗サーマルマネキンによるアンサンブルの測定においてもその関係を支持するものであった。

図2-16に局所からの蒸発量を部位毎に気温条件別に示す。精神性発汗を生じる手掌での蒸発量は気温条件に関わらず高かった。気温28°Cでは、足背の蒸発量が最も高く、発汗閾値が低いと考えられる。しかし、足背を除くと20g/(m²h)以下であり、部位差はほとんど見られない。気温34°Cでは、部位差が観察され、前額が最も高く、体幹部では前面よりも背、腰の背面の方が、四肢部では上肢よりも下肢の方が蒸発量は多くなった。気温37°Cでは、気温34°Cの値に比例して蒸発量が

増加しており、なかでも背中、腰、手背、足背で蒸発量は高くなった。これらの部位毎の蒸発量は、汗腺密度²⁶⁾と高い相関関係を示したため、衣服を着用するときには、この部分の乾性熱抵抗値を減らすことは衣服によって工夫が可能であると考えられる。つまり、夏季には不感蒸泄域の気温28°Cで足からの蒸発量が多くなったので、足からの蒸発を妨げないような靴や靴下の工夫が有効であると考えられる。また、背中・腰など背面や下半身に透湿性・通気性が高い衣服素材を選び、また、着衣のみならず椅子の座面や背もたれ等よりも断熱が高まりやすいと考えられるので、それらの断熱性を減らし、透湿性・通気性を高める工夫が有効であると考えられる。

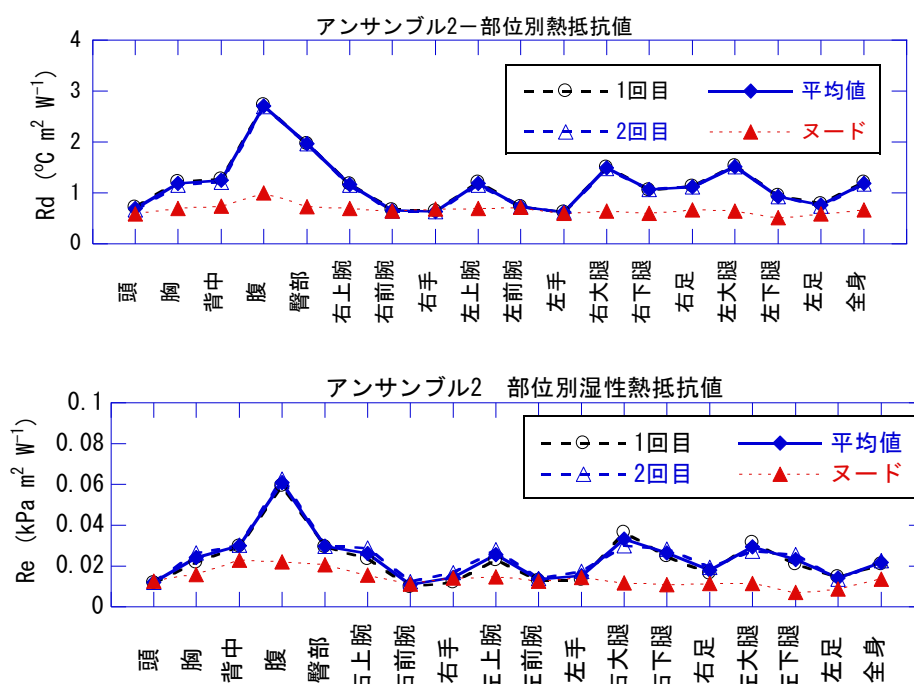


図2-14 アンサンブル2の部位別乾性熱抵抗値

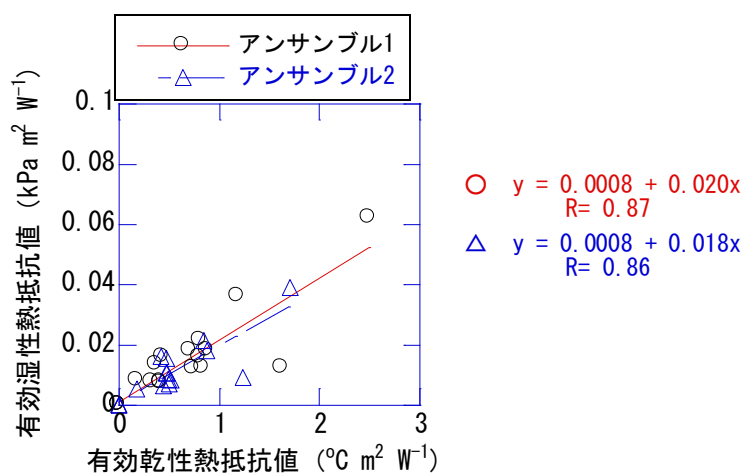


図2-15 有効乾性熱抵抗値と有効湿性熱抵抗値との関係

表2-15 アンサンブル1と2における部位別の乾性・湿性有効熱抵抗値

部位の有効熱抵抗値	胸	背中	腹	臀部	上腕	前腕	大腿	下腿	足	全身
アンサンブル1 乾性($^{\circ}\text{C}\cdot\text{m}^2\text{W}^{-1}$)	1.19	0.84	2.5	1.63	0.76	0.38	0.85	0.41	0.3	0.74
アンサンブル1 湿性($\text{kPa}\cdot\text{m}^2\text{W}^{-1}$)	0.036	0.012	0.062	0.012	0.018	0.008	0.022	0.013	0.007	0.012
アンサンブル2 乾性($^{\circ}\text{C}\cdot\text{m}^2\text{W}^{-1}$)	0.49	0.5	1.71	1.24	0.47		0.86	0.45	0.31	0.52
アンサンブル2 湿性($\text{kPa}\cdot\text{m}^2\text{W}^{-1}$)	0.008	0.007	0.039	0.009	0.011		0.020	0.016	0.006	0.008

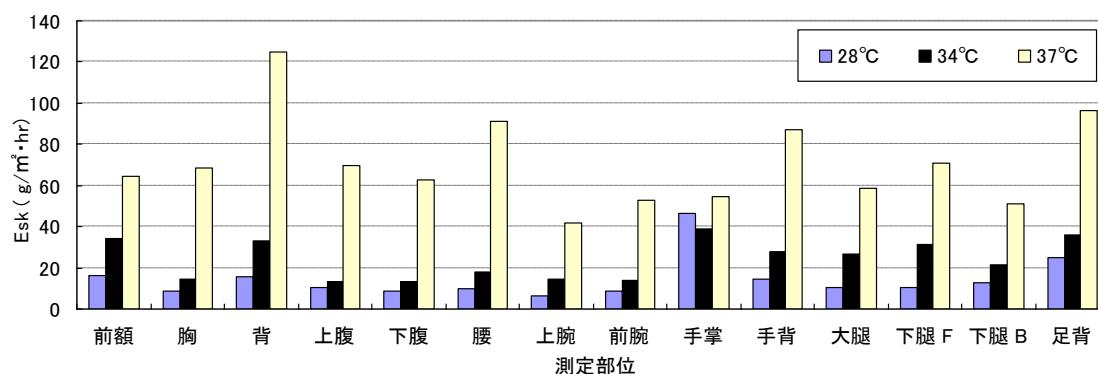


図2-16 各部位からの局所蒸発量

5. 本研究により得られた成果

(1) 科学的意義

夏服（单品49通り、組合せ97通り）を対象に、部位分割のサーマルマネキンを用いて、胸部、背部、腹部、臀部、上腕部、前腕部、大腿部、下腿部、足部の9部位の有効熱抵抗を測定した。また、組合せ衣服を構成する单品衣服の部位有効熱抵抗の総和 $\Sigma R_{clei.gr}$ から、組合せ衣服の9部位それぞれの部位有効熱抵抗 $R_{clei.en}$ を推定する式 ($R_{clei.en} = 0.784\Sigma R_{clei.gr}$) を提案した。さらに、着衣有効熱抵抗の平均的分布を踏まえて、組合せ衣服の全身の有効熱抵抗値 $I_{cle.en}$ から組合せ衣服の9部位それぞれの部位有効熱抵抗 $R_{clei.en}$ を推定する手法を提案した。0.26~2.6m/sの風を吹かせた風洞内に立位サーマルマネキンを設置し、気流方向3条件（前方、後方、仰角30度の前方）での部位の対流熱伝達率、着衣の部位有効熱抵抗を実測した。対流熱伝達率、部位有効熱抵抗は気流の方向によらず、風速に異存した。部位によって風に伴う着衣の部位有効熱抵抗の減少比率は異なり、代表径の大きな部位では減少比率が大きくなる傾向があった。上躯幹、腰、上腕、前腕、大腿、下腿、足の共通する、着衣の部位有効熱抵抗の減少比率（静穏基準） $C_{orr.Rcle.i}$ を表すモデル式を提案した。発汗サーマルマネキンを使い、男性用衣服アンサンブルについて、COOL BIZと上着・ネクタイ有りCOOL BIZの乾性・湿性熱抵抗値を計測し、部位毎の有効乾性・湿性熱抵抗値を算出した。また、人の部位の発汗特性をエバポリメータにより計測し、衣服や着装との関連について検討した。

(2) 地球環境政策への貢献

成果の波及効果として、部位分割の人体熱モデルへの入力として得られた部位別の有効熱抵抗を用いることにより、多様な着衣条件での温熱生理状態の分布予測が可能となり、着衣、気流、熱環境の不均一性の活用を通じて、エネルギー消費やCO₂発生などの環境負荷を低減する暖冷房、空調システムの開発へと繋がること、さらには、状況ごとに適切な体感温度の調節手段の提言へ

と繋がることを想定している。

また、COOL BIZを推進するうえで、一般的な着用形態が、熱抵抗値からみると衣服の重なり部分が熱負荷になっている可能性を示していた。また、発汗との関係においても衣服の透湿性や形態・素材の特性などにおいて、さらに改善の余地が導き出され、室温緩和を推奨するための着衣要件として整理し、情報提供が可能になると考えられる。

6. 引用文献

- 1) ISO: ISO 9920- Ergonomics of the thermal environment—Estimation of thermal insulation and water vapour resistance of a clothing ensemble (FDIS), 2007
- 2) ISO: ISO 9920 Ergonomics of the thermal environment—estimation of the thermal insulation and evaporative resistance of a clothing ensemble, 1995
- 3) B.W. Olesen, Y. Hasebe, R.J. de Dear: Clothing insulation asymmetry and thermal comfort, ASHRAE Transactions, Vol.94-I, pp.32–51, 1988
- 4) 佐古井智紀、持田徹他: 衣服の熱抵抗に関する基礎的研究、空気調和・衛生工学会論文集、No.77、pp.95–107、2000
- 5) M. Oguro, E. Arens, R.J. de Dear et al.: Evaluation of the effect of air flow on clothing insulation and on dry heat transfer coefficients for each part of the clothed human body, 日本建築学会計画系論文集, No.549, pp.13–21, 2001
- 6) S. Yokoyama, N. Yamamoto, H. Baba et al.: Prediction computer program of whole body temperatures and heat fluxes and its application to evaluate human thermal responses, Proceedings of the 11th International Conference, pp.226–229, 2005
- 7) Nilsson H. O., Anttonen H., Holmér I.: New algorithms for prediction of wind effects on cold protective clothing, Proceedings of nokobetef 6 and 1st European Conference on Protective Clothing (Sweden), 17-20, 2000
- 8) Havenith G., Holmér I., Parsons K.: Personal factors in thermal comfort assessment: clothing property and metabolic heat production, Energy and Buildings 34, 581-591, 2002
- 9) Havenith G., Nilsson H. O.: Correction of clothing insulation for movement and wind effects, a meta-analysis, European Journal of Applied Physiology 92, 636–640, 2004
- 10) 渡邊慎一、堀越哲美、兼子朋也、宇野勇治、石井 仁、富田明美：サーマルマネキンを用いた風速と風向が着衣熱抵抗に及ぼす影響に関する研究、日本建築学会環境系論文集、No. 621、23-28、2007
- 11) Havenith G., Heus R., Lotens W. A. : Resultant clothing insulation: a function of body movement, posture, wind, clothing fit and ensemble thickness, Ergonomics, Vol.33, No.1, 67-84, 1990
- 12) Qian X., Fan J.: Prediction of clothing thermal insulation and vapor moisture resistance of the clothed body walking in wind., Annals of Occupational Hygiene Vol.50(8), 833-842, 2006.
- 13) Qian X., Fan J.: Validation and comparison of prediction model for dynamic clothing thermal insulation and moisture vapour resistance, Thermal manikins and modeling, 119-128, 2007
- 14) Gagge AP, Stolwijk JAJ, Nishi Y., The prediction of thermal comfort when thermal equilibrium is maintained by sweating, ASHRAE Trans 75(2), 108-125, 1969

- 15) Tanabe S., Arsen E. A., Bauman F. S., Zhang H., Madsen T. L.: Evaluating thermal environments by using a thermal manikin with controlled skin surface temperature, ASHRAE Transactions, Vol.100(I), 39-48, 1994
- 16) Oguro M., Arens E., Zhang H., Tsuzuki K., Katayama T.: Measurement of projected area factors for thermal radiation analysis on each part of the human body, Journal of architecture and planning (Transactions of AIJ), No.547, 17-25, 2001
- 17) 田村照子, 2層モデル可動型発汗サーマルマネキンの開発と応用 ―省エネルギー環境対応のための日本人着衣のデータベース構築に向けて、平成15年～平成17年度 科学研究費補助金(基盤研究(A)) 研究成果報告書、2006
- 18) Nilsson G.E. Measurement of water exchange through skin Med.Biol.Engl.Comput. 15: 209-218, 1977
- 19) E.A. McCullough, B.W. Jones and J. Huck: A comprehensive database for estimating clothing insulation, ASHRAE Transactions, Vol.91(2A), pp.29-47, 1985
- 20) 市原真希、斎藤正文、西村美加、田辺新一: サーマルマネキンを用いた立位・座位人体各部位の放射・対流熱伝達率の測定、日本建築学会計画系論文集(501)、45-51、1997
- 21) deDear, R. J. Arens E., Zhang H., Oguro M.: Convective and radiative heat transfer coefficients for individual human body segments, International Journal of Biometeorology No. 40, 141-156, 1997
- 22) 桑原浩平、持田徹、近藤基、松永和彦: サーマルマネキンを用いた中風速域における人体対流熱伝達率の測定、人間と生活環境、8(1/2)、27-32、2001
- 23) 小野剛司、村上周三、大岡龍三、高橋岳生、大森敏明、早乙女強: 屋外空間における人体表面の平均対流熱伝達率の予測式の開発: 風洞実験とCFD解析による人体表面の平均対流熱伝達率の予測式の提案、日本建築学会環境系論文集(601)、9-14、2006
- 24) 花田嘉代子、三平和雄: 着衣の局所別熱抵抗に関する研究(第7報)―微風時の着衣について―、織消誌、Vol. 22、No. 2、66-71、1981
- 25) Oguro M., Arens E., deDear R., Zhang H., Katayama T.: Convective heat transfer coefficients and clothing insulations for parts of the clothed human body under airflow conditions, Journal of architecture and planning (Transactions of AIJ), No.561, 21-29, 2002
- 26) Kuno Y.: Human perspiration, Charles C Thomas Publisher, 67, 1956

7. 国際共同研究等の状況

特に記載すべき事項はない

8. 研究成果の発表状況

(1) 誌上発表

特に記載すべき事項はない

(2) 口頭発表(学会)

- 1) Tomonori Sakoi, Kazuyo Tsuzuki: "Effective Thermal Insulation of Body Segments by Summer Clothing", Proceeding of CLIMA2007, 2007.6 (査読付)

- 2) 佐古井智紀、都築和代:椅座のサーマルマネキンによる夏期着衣の部位有効熱抵抗の測定、日生氣誌(Jpn. J. Biometeor.) 44(3)、S41、2007.11
- 3) 佐古井智紀、都築和代:夏期衣服の部位有効熱抵抗推定法の提案、第31回 人間—生活環境系シンポジウム報告集、123-126、2007.11
- 4) Kazuyo Tsuzuki, Tomonori Sakoi, Hiroaki Kondo and Satoru Iizuka: Influence of air velocity on local effective thermal insulation provided by clothing, Proceedings of Indoor Air 2008, ID686, 2008.8 (査読付)
- 5) 佐古井智紀、都築和代:気流が夏季の組み合わせ着衣の部位有効熱抵抗値に及ぼす影響、日本建築学会大会学術講演梗概集、D-II、pp.373-374、2008.9
- 6) 都築和代: 室温緩和支援のための人体の局所発汗量に関する研究、日本建築学会大会学術講演梗概集、2009.9 (印刷中)

(3) 出願特許

特に記載すべき事項はない

(4) シンポジウム、セミナーの開催 (主催のもの)

特に記載すべき事項はない

(5) マスコミ等への公表・報道等

特に記載すべき事項はない

(6) その他

特に記載すべき事項はない