

サーマルマネキンによる人体の熱的快適性評価法に関する研究

Evaluation of Thermal Comfort with a Heated Thermal Manikin

研究代表者 お茶の水女子大学生活科学部助教授 田辺 新一
Associate Professor, Department of Human Environmental Engineering,
Ochanomizu University, Shin-ichi TANABE

Nearly all of the commonly used comfort predictors assume that the occupant is in a homogeneous environment, and are not fully effective in situations where this is not the case. The purpose of this study is to describe a method for measuring non-uniform thermal environments using a new thermal manikin with controlled skin surface temperature. The manikin and its control logic are described, and an equivalent temperature based on the thermal manikin (*teq*) is proposed and discussed. To calibrate these methods, fundamental data were collected. Moreover, subjective database was established for Japanese and American subjects from previous studies. The manikin-based equivalent temperature (*teq*) is shown to be effective at accounting for the effects of asymmetrical environmental conditions.

研究目的

本研究の目的はサーマルマネキンを用い室内環境の熱的快適性の評価法を開発することである。これらの評価手法を用いることにより人間の感覚に近い空調機器、室内熱環境の設計・開発が可能となると思われる。

現実の温熱環境は、人工気候室のように均一ではない。暖房室内では、暖房方式により分布を生じる。また、車室内などのパーソナル空間では人体は、一部のみに気流に暴露されることが多い。人体形状は複雑であり、空間の各点の温熱環境要素を測定したのみでは実際の人体よりの熱損失、温熱感覚を正確に計算することは難しい。従来温熱環境指標は均一空間を評価するために研究されたものであった。

サーマルマネキンは人体形状をした発熱体である。全身が部位に分割されており人体の皮膚温を模擬するように作られている。サーマルマネキンを様々な温熱環境下に暴露し各部位の熱損失量を測定する。人体の温熱感覚は各部位からの放熱量と良い関係があることが知られており、本研究では測定された熱損失に基づく等価温度と感覚量との関係を研究する。加えて日本、米国で行われた基本的な被験者実験データの整理を行いこれをデータベース化する。今後、インターネットなどを通じこれらのデータを公開する予定である。

研究経過

1) サーマルマネキンによる温熱環境の測定
4mm厚のグラスファイバーで補強されたポリエステル製である。0.3mmφのニッケルワイヤーが全身に巻かれている。図1にサーマルマネキンを、表1にサーマルマネキンの分割部位、表面積を示す。制御計測用コンピュータからのシグナルにより各部位へ必要な電力量がパルスの形で供給されている。分割は左右の不均一な環境を評価できるように16分割とした。表面積は測定値である。実際の人体に比較して個々の部分の形状が人体よりは多少簡易なので体表面積は実際の人体より小さくなっている。

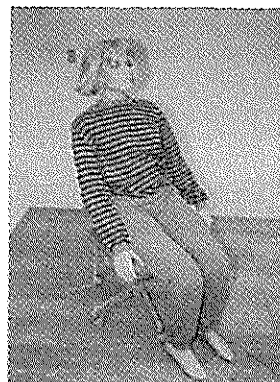


図1 サーマルマネキン

表1 サーマルマネキンの分割部位、表面積

	Name of Part	Area(m ²)
1	Left Foot	0.0446
2	Right Foot	0.0437
3	Left Leg	0.0892
4	Right Leg	0.0879
5	Left Thigh	0.1630
6	Right Thigh	0.1670
7	Crotch	0.1740
8	Head	0.1100
9	Left Hand	0.0397
10	Right Hand	0.0394
11	Left Arm	0.0490
12	Right Arm	0.0500
13	Left Shoulder	0.0736
14	Right Shoulder	0.0778
15	Chest	0.1380
16	Back	0.1270
	Total	1.4739

このサーマルマネキンで用いられている制御は環境と人間との熱交換を基礎としている。人体の熱平衡は式(1)で示される。また、皮膚表面よりの熱損失は式(2)に示されるように顕熱項と潜熱項に分けられる。顕熱損失は式(3)のように放射熱損失と対流熱損失に分けられる。

機械的仕事量が0でかつ定常状態では人体の代謝量(M)と全熱損失量(Qm)は等しいとみなせる。

$$Q_m = M = Q_s + Q_{res} \quad \dots(1)$$

$$Q_s = Q_t + E_s \quad \dots(2)$$

$$Q_t = R + C \quad \dots(3)$$

皮膚表面よりの顕熱損失量(Qt)は、全熱損失量(Qm)より呼吸による熱損失量(Qres)と皮膚表面よりの蒸発熱損失量(Es)を差し引くことで得られる。

$$Q_t = Q_m - Q_{res} - E_s \quad \dots(4)$$

ASHRAE, Fangerによると呼吸による熱損失量、皮膚表面よりの蒸発熱損失量は以下のように表される。なお、機械的仕事量は0と仮定した。

$$Q_{res} = 1.7 \times 10^{-5} M (5867 - Pa) + 0.0014M(34 - ta) \quad \dots(5)$$

$$E_s = 3.05 \times 10^{-3} (5733 - 6.99M - Pa) + 0.42(M - 58.15) \quad \dots(6)$$

式(5)中に空気温度が含まれているが、このままではサーマルマネキンの制御時に空気温度を知る必要がある。このため本研究では空気温度を20℃に固定した。この仮定は呼吸による顕熱損失量のみしか影響を与えないため、空気温度が10℃から30℃の範囲で全熱損失量に対して最大1.6%の誤差しか生じない。

Fangerによれば熱的中立状態にある人体の代謝量と平均皮膚温の関係は式(7)のようになる。

$$ts = 35.7 - 0.028Q_m \quad \dots(7)$$

本サーマルマネキンは発汗しないため、潜熱損失が取り扱えない。そこで全熱損失量と皮膚表面よりの顕熱損失量の関係として水蒸気圧1.5kPa時の関係を用いることとした。すなわち、水蒸気圧1.5kPaを代入した式(5)と式(6)を式(4)に代入し式(8)を得た。従って、発汗を生じるような環境でのサーマルマネキンの皮膚温は実際の人体の平均皮膚温とは同様にならない可能性がある。皮膚温一定型のサーマルマネキンの皮膚温は設定値であるのに対して、本サーマルマネキンでは環境との熱交換との収束値として皮膚温が定まる。

$$Q_m = 1.96Q_t - 21.56 \quad \dots(8)$$

式(8)を式(7)に代入すると以下のようになる。

$$ts = 36.4 - 0.054Q_t \quad \dots(9)$$

サーマルマネキンの各部位皮膚温は、式(9)を基礎として制御されている。この式を満足させるために各部位皮膚温制御系に強制的に0.054m²℃/Wのロードエラーを生じさせた。

図3に皮膚温、熱損失、熱抵抗の関係を示す。例えば、ヒータに電力を供給しない状態では皮膚温は作用温度と等しくなる。破線のようにヒータ温度が作用温度と等しいとすると式(9)の皮膚温と熱損失の関係式を満たさない。そこでヒータ供給電力量が増加され実線で示したように各部位の皮膚温は式(9)を満たすように環境との熱交換の結果収束的に定まる。

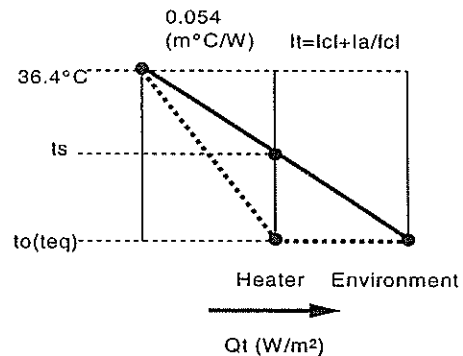


図3 皮膚温、熱損失、熱抵抗の関係
2) サーマルマネキンの等価温度に基づく人体の部分温冷感予測モデル

皮膚表面熱抵抗値をある値に固定し、実際のサーマルマネキンの熱損失を代入すれば、熱損失に基づく環境温度が求められる。この環境温度をサーマルマネキンによる等価温度(teq)と呼ぶこととする。Wyonによって提案されているEHTと区別するために本論文ではteqと表す。teqは、実際の環境下でのサーマルマネキンの熱損

失と等量の熱損失を生じる均一温熱環境時の作用温度と定義される。ここで均一環境とは、空気温度と平均放射温度が等しく、静穏気流、相対湿度50%、上下温度分布のない温熱環境 (Uniform Enclosure) を意味する。

等価温度は、式(9)に基づくので、等価温度が36.4℃を越えた場合は、等価温度としては意味を持たなくなるが、放熱量が0となったときでもマネキンの皮膚表面温度は計測を行える。この皮膚温は、空気温度と放射温度の相加平均である作用温度となる。

全身に関して：

$$\begin{aligned} teq &= ts - 0.155(I_{cl} + I_a / f_{cl}) Q_t \\ &= ts - 0.155 I_t Q_t \quad \dots(10) \end{aligned}$$

身体各部位に関して：

$$\begin{aligned} teq_i &= t_{si} - 0.155(I_{cli} + I_{ai} / f_{cli}) Q_{ti} \\ &= ts - 0.155 I_{ti} Q_{ti} \quad \dots(11) \end{aligned}$$

図4に示した熱抵抗値と測定によって求められた熱損失、皮膚温を式(10)、(11)に代入することによってある着衣基準の teq が求められる。図4は、バンテニー、ブラジャー、スエット長袖シャツ、スエットパンツ、くつの組み合わせ衣服の値である(図1)。各部位の温冷感を等価温度を用いて評価する可能性を示した。

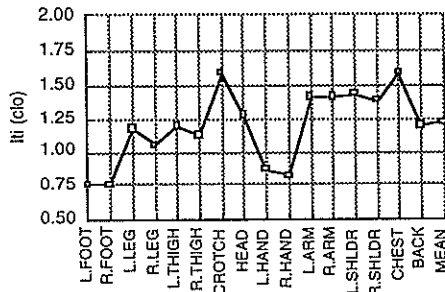


図4 マネキン各部位の熱抵抗値

3) 全身温冷感の予測

実際の環境において測定されたサーマルマネキンの全身熱損失よりPMVを算出する方法に関して述べる。測定されたサーマルマネキンの着衣状態で人工気候室などの標準状態で皮膚表面熱抵抗を求めれば teq を算出することができる。本研究で用いられた人工気候室は平均気流速度が0.1m/sであったのでPMV算出プログラムに着衣量、代謝量、気流速度0.1m/s、相対湿度50%、気温と平均放射温度の項に teq を代入することで計算される。図5に夏期を想定した着衣量0.5clo、活動量1.1met及び1.4met時の teq とPMVの関係を示す。着衣条件により気流など人体影響が異なる

ためPMV計算時に代入する着衣量に関しては実際のサーマルマネキンの着衣条件と同じであることが必要である。

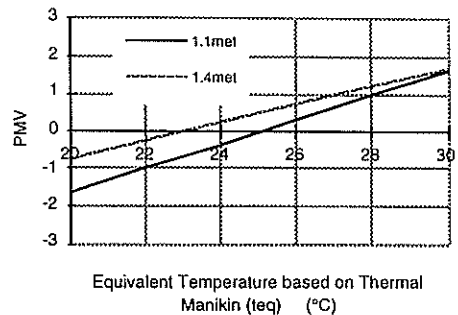


図5 全身等価温度とPMVの関係

4) 被験者実験結果のデータベース化

研究経過の項で示したように、カンサス州立大学で1600人の被験者実験、著者らによって行われた250人の被験者実験データを今後の研究に利用しやすいようにデータベース化した。フォーマット形式はマイクロソフトエクセルで読むことが可能なようにした。現在はクローズなデータベースであるが、今後、インターネットなどを通じて公開を考えている。また、シンガポールのデータを含めSET* (新標準有効温度) と温冷感の回帰直線を示した。以下概要を示す。

これまで快適温度に関する基準値は主として欧米人を対象とした被験者実験結果に基づくものであった。これらの基準値、推奨値が日本人にも当てはまるのかという疑問が生じる。カンサス州立大学で行われた米国人に対する被験者実験と全く同一の実験方法、同一ASHRAE温冷感申告尺度、同一衣服、活動量で行われた被験者実験結果として得られた、温冷感申告とSET*の関係を表2に示す。日本人、米国人、デンマーク人、シンガポール人の被験者実験結果より算出した中立温度(温冷感申告が中立時の温度)も示す。熱的中立温度に関しては、同一衣服、活動量、同一温冷感申告尺度を用いた実験では、国別の相違はほとんどないと考えて良いようである。栃原らによっても同様の報告がなされている。SET*の変化量に対する温冷感申告値の変化にも大きな差異はない。

しかし、人体が生理学的調節を強いられる熱的中立から離れた環境下や、環境物理要素の個々の影響を考えると、例えば発汗のように民族、気候順化等によって反応が異なることもあるであろう。今後日本人に関する幅広い被験者実験が必要となるであろう。これらのオリジナルデ

ータをこの分野の研究者に利用可能なように考えデータベース化を行った。

表2 様々な国の被験者による温冷感申告

	回帰式	中立温度 (°C)
日本人夏期 ^{a)}	$TSV = -8.882 + 0.339SET^*$	26.2
日本人冬期 ^{b)}	$TSV = -6.883 + 0.271SET^*$	25.4
アメリカ人 ^{c)}	$TSV = -8.010 + 0.290SET^*$	25.8
デンマーク人 ^{d)}	$TSV = -7.420 + 0.310SET^*$	25.6
シンガポール人 ^{e)}	$TSV = -9.388 + 0.367SET^*$	25.6

- a) 原著のデータよりSET*を算出し回帰式を算出した。
 b) 原著のデータよりSET*を算出し回帰式を算出した。
 c) カンサス州立大学の報告書より回帰式を作成した。申告値は3時間曝露後の値を用いた。
 d) 原著で実験は30%rhと70%rh条件で実験が行われている。2つの相対湿度をプールして統計処理を行った。
 e) 原著のデータよりSET*を算出し回帰式を算出した。

研究成果

研究経過で述べたように個々の項目に関して以下の研究成果が得られた。

1) サーマルマネキンによる温熱環境の測定

サーマルマネキンの各部温度を一定に保つよう個別制御し、人工気候室内で、作用温度と標準着衣したサーマルマネキンの全身よりの熱損失の関係を測定した。サーマルマネキンの制御方法に関する理論的考察を行った。気流曝露時の実験結果に関しても、熱損失、皮膚温、熱伝達率の関係が得られた。これらの詳しい内容に関しては、発表論文リストで示している学術論文において発表を行った。

2) サーマルマネキンの等価温度に基づく人体の部分温冷感予測モデル

サーマルマネキンの等価温度算出に関する理論的提案を行った。サーマルマネキンによる等価温度をもとに人体の各部位の温冷感、快不快感を予測することが可能となった。

3) 全身温冷感の予測

開発されたモデルをもとに実際の環境下での予測計算を行った。これは、サーマルマネキンの全身等価温度に基づきPMV（予想平均温冷感申告）を用いることによった。

4) 被験者実験結果のデータベース化

研究経過の項で示したように、カンサス州立大学で1600人の被験者実験、著者らによって行われた250人の被験者実験データを今後の研究に利用しやすいようにデータベース化した。現在はクローズなデータベースであるが、今後、インターネットなどを通じて公開を考え

ている。また、シンガポール人のデータを含めSET*（新標準有効温度）と温冷感の回帰直線を示した。

今後の課題と発展

本研究は、室内空間における人体の熱的快適性を測定・評価する技術の開発である。本研究成果によりこれまで、空気温度のみに頼ってきた空調設計を人間の感覚量を基準に評価を行っていく基礎が出来たと考える。また、その結果は建築空間だけではなく、自動車内など温熱環境評価、カーエアコンの設計などに役立つと期待される。国内ではこのような人体に関する研究はこれまで軽視されていたが、今後の機械には人体感覚を考慮した設計が必要と思われる。

今後は、さらに被験者実験結果との比較を行う必要があるとともに、人体からの潜熱移動をどのように扱うかが課題となるであろう。

発表論文リスト

- ・ S.Tanabe, Y.Hasebe, T.Tanaka, Reduction of Clo Value with Increased Air Velocity, The Journal of Human and Living Environment, Vol.1, No.1, 1994, pp.64-67 (査読学術論文)
- ・ 田辺、人間-環境系の放射・対流熱伝達特性、CFD・放射シミュレーションによる環境-人間系の解析、複雑乱流場の熱輸送シンポジウム、日本建築学会（発表予定）

謝辞

本研究の機会を与えていただいた、日産学術振興財団に心より感謝申し上げます。

【記号表】

- C: 着衣外表面よりの対流熱損失量(裸体時皮膚表面) (W/m²)
 Es: 皮膚表面よりの蒸発熱損失量 (W/m²)
 Ia: 裸体時体表面積基準、着衣外表面-環境間の熱抵抗 (clo)
 Icl: クロ値(Basic Clothing Insulation)、基礎着衣熱抵抗 (clo)
 It: 皮膚表面から環境までの着衣の全熱抵抗 (clo)
 M: 人体の代謝量 (W/m²)
 Pa: 水蒸気圧 (Pa)
 Qa: 裸体時の皮膚表面よりの顕熱熱損失量 (W/m²)
 Qm: 人体よりの全熱損失量 (W/m²)
 Qre: 呼吸による熱損失量 (W/m²)
 Qs: 皮膚表面よりの全熱損失量 (W/m²)
 Qr: 着衣時の皮膚表面よりの顕熱熱損失量 (W/m²)
 R: 着衣外表面よりの放射熱損失量 (W/m²)
 fcl: 着衣面積比(被服着用時の全表面積/体表面積) (-)
 hc: 人体の対流熱伝達率 (W/m²°C)
 hr: 人体の線型放射熱伝達率 (W/m²°C)
 tcl: 着衣外表面温度 (°C)
 teq: サーマルマネキンによる等価温度 (°C)
 to: 作用温度 (°C)
 ts: 平均皮膚温 (°C)
 (添え字のnは裸体時、cl着衣時を表す。iは各部位を表す)