



Title	皮膚温分布・顕熱授受量分布による快・不快感の表現法の提案
Author(s)	佐古井, 智紀; 都築, 和代; 加藤, 信介 他
Description	第12回衛生工学シンポジウム (平成16年11月4日 (木) -5日 (金) 北海道大学クラーク会館) . 一般セッション . 6 建築 都市環境とエネルギー有効利用 . 6-9
Citation	衛生工学シンポジウム論文集, 12, 201-204
Issue Date	2004-10-31
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/1265
Type	departmental bulletin paper
File Information	6-9_p201-204.pdf



6-9 皮膚温分布・顕熱授受量分布による快・不快感の表現法の提案

○佐古井智紀（産業技術総合研究所）、都築和代（産業技術総合研究所）、
加藤信介（東京大学生産技術研究所）、大岡龍三（東京大学生産技術研究所）、
宋斗三（成均館大学）、朱晟偉（東京大学）

1. 目的

気温や熱放射などの環境因子は、人の温感と密接に関連する体温の形成に熱授受を通じて作用する。従って、気温や放射等の環境因子やその分布に代わって熱授受とその分布を用いて熱的快・不快感を表現できれば、異なる着衣・暖冷房システム条件下でも適用可能な普遍性の高い表現法が得られる。このような表現法として、全身温感に関しては SET^{*1)} や PMV²⁾ など、熱環境表示尺度と皮膚温などの体の熱状態、熱授受が大よそ対応する指標が開発されて定着した。他方、不均一熱環境を対象とする場合、部位の熱授受に着目した表現法は現存するものの、その表示値が部位の熱状態と熱授受の双方に対応することを背景として明示しているものは、著者らの知るところ開発されていない³⁾。本稿では不均一熱環境を対象とする暖冷房設計のための熱環境尺度作成のために、熱授受とその分布による、椅座時の熱的快・不快感の表現式を提案し、検証を行う。

2. 快・不快感の表現式

在室時の主な活動である椅座に対する不均一熱環境の設計に主眼を置く。従って、主体は全身としては中庸に近い熱環境である。椅座・中庸付近であることを考慮すると、潜熱による熱授受量及びその影響は顕熱授受に比較して少ない²⁾。このことを踏まえて、不均一熱環境を対象とする椅座時の熱的快・不快感の表現式を、体の熱状態のうち中庸付近での変化巾が大きくかつ顕熱に関わる量である皮膚温と、顕熱授受量、両者の分布によって表す。

まず、全身快適感について。部位 i 自体の温感に応じる変数 F_i' を部位温感関数と名づけ、部位 i 自体の皮膚温 T_{ski} 、顕熱授受量 Q_{ski} を変数として式 (1) により与える。なお、以下の式 (1)、(2)、(5)、(6) を用いる上で必要となる諸定数、符号は 3 章の実験を通じて設定する。

$$F_i' = \frac{T_{ski} - B}{\Delta \pm Q_{ski}} \quad (1)$$

ここに、 F_i' : 部位 i 自体の温感関数[°C]、 T_{ski} : 部位 i の皮膚温[°C]、 Q_{ski} : 部位 i の顕熱授受量[W/m²]、
 B : 定数[°C]、 Δ : 定数[W/m²]

式 (1) について。顕熱授受量 Q_{ski} と比較して皮膚温 T_{ski} が大きく温感に影響する場合には Δ が大きくなり、逆に皮膚温 T_{ski} の影響が小さい場合には Δ は小さく設定される。部位自体の温感と皮膚温 T_{ski} の間には正比例の関係が想定される一方、温感と顕熱交換量に関しては、その関係が正比例の場合に Q_{sk} の符号「-」が、逆に反比例の場合に「+」が設定される。

全身に着目した快適感割合 RCS の式として F_i' を変数とした式 (2) を採用する。

$$RCS = \left[\alpha_\beta \cdot \frac{F_T'^{nT} \cdot (\delta' - F_T')^{nT}}{\left(\frac{\delta'}{2}\right)^{nT}} \right] \cdot \left[\alpha_\gamma \cdot \left(\frac{F_1'}{F_T'}\right)^{m1} \cdot \left(\frac{F_2'}{F_T'}\right)^{m2} \cdot \left(\frac{F_3'}{F_T'}\right)^{m3} \cdots \left(\frac{F_p'}{F_T'}\right)^{mp} \right] \quad (2)$$

ただし、 $nT > 0$ 、 $mi > 0$

$$F_T' = \sum_i F_i' \cdot W_i \quad (3)$$

ここに、 RCS : 快適感割合、 $\alpha, \beta, \delta, n_T, \alpha_z', m_i$: 定数[N.D.]、 W_i : 部位 i の重み係数⁴⁾ [N.D.] 式 (2) について。右辺第一番目の角括弧内の項は、変数を F_i' の全身平均値 F_T' のみとしており、この項により全身としての寒暑が快適性に及ぼす影響を表現する。右辺第二番目の角括弧内の項は、 F_i'/F_T' のみを変数とし、 $F_1:F_2:F_3:\dots:F_i$ がある比 ($(W_1 \cdot F_1 : W_2 \cdot F_2 : \dots : W_i \cdot F_i = m_1 : m_2 : \dots : m_i)$ となる比) において最大値となる特徴をもち、この項により、体の熱状態の分布が快適性に及ぼす影響を表現する。

次に、全身快適感を補うものとしての部位を考慮した不快感について記述する。式 (1) の部位温感関数 F_i' と同様、部位 i 自体の温感に応じる変数 F_i''' を部位不快感関数と名づけ、部位 i 自体の皮膚温 T_{ski} 、顕熱交換量 Q_{ski} を変数として式 (4) により与える。

$$F_i''' = \frac{T_{ski} - B'}{\Delta' \pm Q_{ski}} \quad (4)$$

ここに、 F_i''' : 部位 i 自体の不快感関数[°C]、 B' : 定数[°C]、 Δ' : 定数[W/m²]。

F_i''' を変数とし、部位 i を考慮した不快感割合 RDS_i の式として式 (5) を採用する。

$$RDS_i = \alpha \cdot F_i'''^{mi'} \cdot (W_i \cdot F_i''' + W_{T-i} \cdot F_{T-i}''')^{n_T'} - \varepsilon \quad (5)$$

ここに、 RDS_i : 部位 i を考慮した不快感割合[N.D.]、 α : 定数[W^{mi'n_T'}/(m²C)^{mi'n_T'}]、 ε : 定数[N.D.]。

式 (5) について。乗数 m_i' によるべき項 $F_i'''^{mi'}$ は部位 i 自体の状態が不快感に及ぼす影響を、また、 n_T' によるべき項 $(W_i \cdot F_i''' + W_{T-i} \cdot F_{T-i}''')^{n_T'}$ は全身の熱状態による装飾を表す。 ε は閾値に応じる。

3. 基礎実験

式 (1)、(2)、(4)、(5) の諸定数、符号設定のための実験を、前後、左右、上下に不均一な温熱環境 (静穏) において行った。温冷水の通水による放射パネルにより不均一温熱環境を作成した。実験条件と着衣のクロ値を表-1 に掲載する。上下不均一実験ではビーチサンダルを使用した。のべ 36 名の青年被験者のうち、各環境条件に男女 6 名ずつの計 12 名 (1 条件のみ女性 1 名欠測) が参加した。なお男性と女性では着衣が異なることから、別々の実験条件として整理する。

被験者実験では、各環境に暴露された時の被験者の全身快適感、部位不快感、皮膚温分布を把握する。概要は文献³⁾ を参照のこと。サーマルマネキン実験では、被験者実験において得られた被験者 6 名の平均皮膚温分布を表面温度条件として用い、各環境における顕熱授受量の分布を把握する。顕熱授受量の計測法として、点としての計測ではあるものの直接被験者に貼付けて測定可能な熱流計による手法も有る。しかし本研究では、見え隠れや面方向などの位置によって変化する放射の不均一性を考慮して面的計測手法であるサーマルマネキンによる計測法を採用した。

結果の分析対象として定常状態に近い暴露開始後 50-60 分の平均値を用いる。快適感 RCS として、全身快適感申告 (「快適」、「どちらでもない」、「不快」の 3 択) を「どちらでもない」を原点とした式 (6) により数値化した。部位 i を考慮した不快感割合 RDS_i は、着目部位 i の申告または全身の申告の、いずれかまたは両方に不快を申告した割合として、式 (7) により数値化した。

$$RCS = 1.0 \times \text{「快適の人の比率」} + 0.5 \times \text{「どちらでもないの人の比率」} \quad (6)$$

$$RDS_i = \text{「『部位 } i \text{ が不快』の比率」} + \text{「『全身が不快』の比率」} \\ - \text{「『全身が不快』かつ『部位 } i \text{ が不快』の比率」} \quad (7)$$

表-1 実験条件

	気温 T_a [°C]	パネル温[°C]	RH [%]	クロ値 [clo]
前後	28 ±0, 2.5	$T_a \pm 0, 7, 14$	40 ~ 50	男: 0.07、 女: 0.25
左右				男: 0.07、 女: 0.25
上下		上加熱・下冷却: $T_a \pm 0, 4, 8$ 上冷却・下加熱: $T_a \pm 0, 7, 14$	男: 0.07、 女: 0.29	

3.1 全身に関する快適感割合 RCS

実験で得た全身快適感割合、皮膚温と顕熱授受量およびそれらの分布を用い、探査法と対数をとった上での単回帰、重回帰により諸定数を設定した。人体の部位分割に、7分割(1:頭、2:胴(前)、3:胴(後)、4:左腕、5:右腕、6:左腿、7:右腿)を採用した。結果を表-2に示す。

表-2 式(1)、(2)の諸定数

$\alpha\beta$	δ	B	Δ	Q_{ski} の符号	nT	α_z
0.757	0.0591	25.0	246.6	+	12.77	0.814
mi						
頭	胴(前)	胴(後)	腕(右)	腕(左)	腿(右)	腿(左)
4.95	4.64	6.37	2.78	2.95	5.81	5.58

表-3a 式(4)、(5)の諸定数(頭(熱))

	α	ε	B'	Δ'	Q_{ski} の符号	mi	nT'
頭(熱)	197.4	0.015	28.0	11.9	+	2.19	1.60

表-3b 式(8)の諸定数(片下腿・片足(冷))

	α	ε	B	mi	nT
片下腿・片足(冷)	9.66×10^{10}	0.018	15.7	-9.42	-0.26

3.2 部位 i を考慮した不快感割合 RDS_i

部位不快感が特に大きかった頭の熱さまたは片下腿・片足の冷たさに関して不快感割合 RDS_i の式を作成した。片下腿・片足の不快感は、一方のみの下腿と足に着目し、下腿(前)、下腿(後)、足背、いずれか1点でも冷たくて不快と感じれば片下腿・片足が冷たくて不快とした。実験で得られた RDS_i を、部位の顕熱授受量 Q_{ski} ごとに部位皮膚温 T_{ski} に対してプロットして図-2に示す。変数である全身の皮膚温、顕熱授受量ごとにも分けて表示するべきであるが、まずは最大の要因を部位の熱状態と見なしたプロットから大きな傾向を捉えてみる。頭の熱さを考慮した RDS_i では、皮膚温に応じて RDS_i が増加する傾向が見て取れると同時に、顕熱授受量のプロットごとに RDS_i の分布が集まった傾向も見て取れる(図-2a)。他方、片下腿・片足の冷たさを考慮した RDS_i については、皮膚温 T_{ski} に応じて RDS_i が変化しており、その変化傾向は顕熱授受量 Q_{ski} によっていない傾向が見て取れる(図-2b)。

熱さに対する頭を考慮した不快感に関して表-3aの諸定数値を得た。他方、冷たさに対する片足・片下腿を考慮した不快感に関しては、 Q_{ski} の符号を「+」、「-」とした双方の探査過程で Δ が増加しつづけ、1000を超える結果となった。部位 i の不快(冷)に関する不快関数 $F_i^{''}$ への顕熱授受量 Q_{ski} の影響は小さく、皮膚温が支配的であったことに応じた結果と言える。そこで式(4)の $F_i^{''}$ が皮膚温 T_{ski} のみに依存、顕熱授受 Q_{ski} の傾きをゼロとした式(8)により冷たさに対する片足・片下腿を考慮した不快感割合を表した。表-3bに設定された諸定数を載せる。表-3の諸定数と式(4)、(5)または式(8)による計算値を実測値と比較して図-3に示す。

$$RDS_i = \alpha \cdot (T_{ski} - B')^{mi} \cdot (W_i \cdot (T_{ski} - B') + W_{T-i} \cdot (T_{skT-i} - B'))^{nT'} - \varepsilon \quad (8)$$

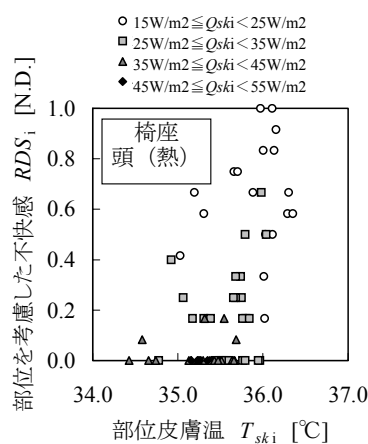


図-2a 部位顕熱授受量 Q_{ski} ごとの頭を考慮した熱さに対する RDS_i の部位皮膚温 T_{ski} に対する変化傾向

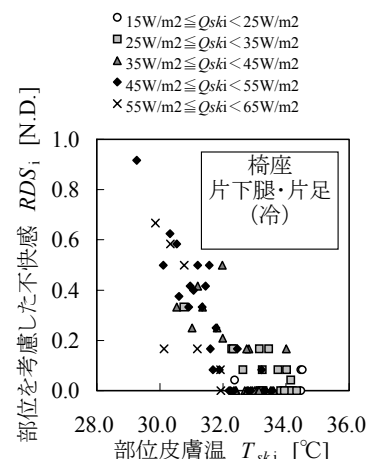


図-2b 部位顕熱授受量 Q_{ski} ごとの片下腿・片足を考慮した冷たさに対する RDS_i の部位皮膚温 T_{ski} に対する変化傾向

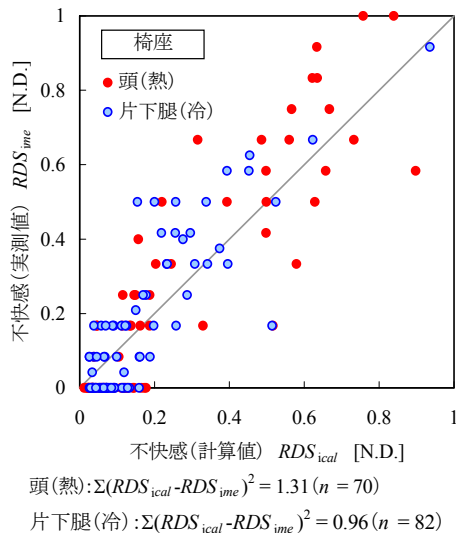


図-3 計算値 RDS_{ical} と実測値 RDS_{ime} の対応 (不快感)

表-4 検証実験の条件

	気温 T_a [°C]	RH [%]	上パネル 温 T_U [°C]	下パネル 温 T_D [°C]	クロ値 [clo]
①	20.0	50	21.0	28.0	男 : 0.44、 女 : 0.46
②	22.0		23.0		
③	28.0	40	14.0		
④	26.0	50	36.0		

4. 検証実験

ここまでで得た、椅座・不均一熱環境における快・不快感の表現式が、3章の基礎実験と異なる不均一熱環境条件でも有効かを検証する。不均一熱環境は上下に放射パネルを設置することにより作成、実験の環境条件、着衣条件を表-4に示す。男性6名、女性6名の計12名が、それぞれ4条件に参加した。実験は3章の基礎実験と同様、被験者実験とサーマルマネキン実験からなる。

まず、全身快適感について記述する。実験で得られた皮膚温分布と頭熱授受量分布を用いて計算された快適感割合 RCS_{cal} と、実測された被験者6名の快適感割合 RCS_{me} の対応を図-4に示す。男性の予測値が実測値と比べて大きく、女性では逆に小さくなったが、1:1の線の周りに分布、かつ変動傾向も一致し、概ね全身快適感の変化が再現された。

次に、頭を考慮した熱さに対する不快感、または下腿・足を考慮した冷たさに対する不快感について記述する。 RDS の計算値 RDS_{ical} と、被験者6名による実測不快感割合 RDS_{ime} の対応を図-4に示す。今回の実験条件では、頭が不快となる申告はほとんど見られず予測値もそれを再現した。片下腿・片足の冷たさに対する不快感では、男性の予測値が実測値と比べて小さく、逆に女性では大きくなったものの、1:1の線の周囲に分布し、かつ変動の傾向も再現された。

謝辞

本研究は新エネルギー産業技術総合開発機構 (NEDO) の助成によったことを記します。

文献

- 1) Gagge et al. : A Standard Predictive Index of Human Response to the Thermal Environment, ASHRAE Transactions, Vol. 92(2B), pp.709-731 (1986)
- 2) P. O. Fanger : Thermal Comfort—Analysis and Applications in Environmental Engineering, McGraw-Hill Book Company (1972)
- 3) 佐古井他:不均一熱環境における快・不快感の表現法に関する研究、空気調和・衛生工学会大会梗概集, pp.641-644 (2004)
- 4) 藏澄ら:日本人の体表面積に関する研究、日生気誌 31 (1)、pp.5-29 (1994)

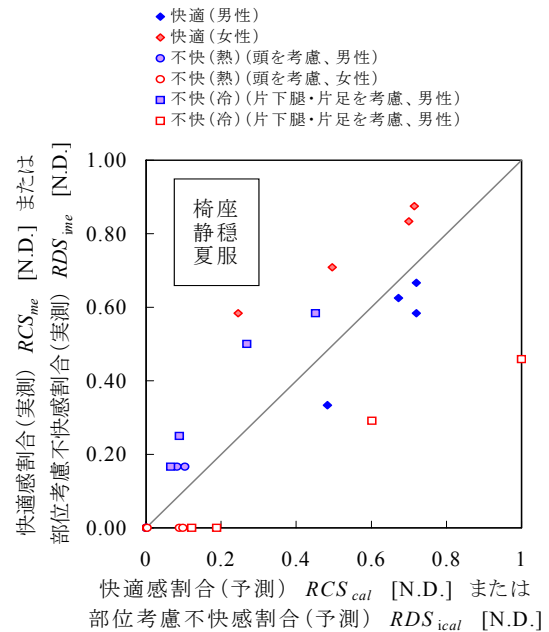


図-4 快適感割合、部位を考慮した不快感割合の予測値と実測値の比較 (検証実験)