



Title	皮膚面積と熱伝達率を考慮した平均皮膚温算出式
Author(s)	桑原, 浩平; 長野, 克則; 持田, 徹 他
Description	第7回衛生工学シンポジウム (平成11年11月11日 (木) -12日 (金) 北海道大学学術交流会館) . 4 室内環境・エネルギー利用 . 4-6
Citation	衛生工学シンポジウム論文集, 7, 134-137
Issue Date	1999-11-01
Doc URL	<a href="https://hdl.handle.net/2115/7279">https://hdl.handle.net/2115/7279</a>
Type	departmental bulletin paper
File Information	7-4-6_p134-137.pdf



## 4-6 皮膚面積と熱伝達率を考慮した平均皮膚温算出式

○桑原浩平（北海道大学） 長野克則（北海道大学）  
持田 徹（北海道大学） 嶋倉一實（北海道大学）

### 1. はじめに

暑さ寒さの程度や、熱的な快・不快性すなわち、体感温とよい相関を持つものとして平均皮膚温がある。身体各部位の皮膚温はその部位の血流などにより部位毎に異なり一様でないため、人体と環境との間の熱授受や全身の温度感覚について検討する場合には、部位毎に異なる皮膚温を、何らの方法により平均化する必要がある。この目的に対し、これまでに算術平均や皮膚面積の比率を重みとした種々の平均化式が多く提案されてきた。しかし、皮膚温は人と環境との間の熱授受の結果形成される温度であり、このことを考慮して平均化式を導けば、面積比と共に局所の総合熱伝達率も含まれてくる筈である。そこで本研究では、サーマルマネキン<sup>1)</sup>を用いて局所の熱伝達率を実測し、平均皮膚温算出式における加重係数の理論的検討と新たな係数値を提示した。

### 2. 記号

本研究で使用する記号とその内容を以下に一覧する。

A: 体表面積	[m <sup>2</sup> ]
C <sub>sk</sub> : 皮膚表面からの対流放熱量	[W]
C <sub>res</sub> : 呼吸に伴う対流放熱量	[W]
D <sub>sk</sub> : 伝導放熱量	[W]
E <sub>res</sub> : 呼吸に伴う蒸発放熱量	[W]
E <sub>sk</sub> : 蒸汗放熱量	[W]
F <sub>i</sub> : 重み係数	[N.D.]
LR(=16.5): ルイスの係数	[°C/kPa]
M: 代謝量	[W]
P <sub>sk</sub> : 皮膚表面での水蒸気分圧	[kPa]
P <sub>a</sub> : 空気中の水蒸気分圧	[kPa]
R <sub>sk</sub> : 皮膚表面からの放射放熱量	[W]
T <sub>a</sub> : 気温	[°C]
T <sub>r</sub> : 平均放射温度	[°C]
T <sub>sk</sub> : 平均皮膚温	[°C]

Wt: 外部仕事 [W]

h: 総合熱伝達率(=h<sub>c</sub>+h<sub>r</sub>) [W/m<sup>2</sup>°C]

h<sub>c</sub>: 対流熱伝達率 [W/m<sup>2</sup>°C]

h<sub>r</sub>: 放射熱伝達率 [W/m<sup>2</sup>°C]

なお、添字は sk=皮膚, i=人体各部位, res=呼吸, a=空気, r=放射を表す。

### 3. 過去の平均皮膚温算出式

平均皮膚温を算出する式として、主に面積比（部位表面積と全体表面積の比）に基づく平均化式が数多く提案されてきた。面積比加重による平均皮膚温は一般に次の形式で表現される。

$$T_{sk} = \sum F_i T_{ski} = \sum \frac{A_i}{A} T_{ski} \quad (1)$$

式(1)において、皮膚温の測定点数は提案者によって様々であるが、正確さを求めて多点測定するものや、簡便性を重視するために点数を少なくしたものが提案されている。

以下に代表的な平均皮膚温の算出式を示す。

Hardy-DuBois<sup>2)</sup>:

$$T_{sk} = 0.07T_1 + 0.14T_8 + 0.05T_9 + 0.35T_5 + 0.19T_{10} + 0.13T_{12} + 0.07T_{13} \quad (2)$$

Hardy-DuBois<sup>2)</sup>:

$$T_{sk} = 0.07T_1 + 0.14T_8 + 0.05T_9 + 0.35(T_4 + T_5 + T_{18} + T_{19})/4 + 0.19(T_{10} + T_{16})/2 + 0.13(T_{12} + T_{15})/2 + 0.07T_{13} \quad (3)$$

Ramanathan<sup>3)</sup>:

$$T_{sk} = 0.3(T_4 + T_8) + 0.2(T_{10} + T_{12}) \quad (4)$$

Mitchell-Wyndham<sup>4)</sup>:

$$T_{sk} = (T_1 + T_2 + T_4 + T_5 + T_7 + T_8 + T_{10} + T_{11} + T_{12} + T_{13} + T_{15} + T_{16} + T_{18} + T_{19} + T_{21} + T_{22})/15 \quad (5)$$

Nadel et al<sup>5)</sup>:

$$T_{sk} = 0.21T_1 + 0.12T_8 + 0.06T_9 + 0.21T_5 + 0.17T_{10} + 0.15T_{12} + 0.08T_{13} \quad (6)$$

Mochida(I)<sup>6)</sup>:

$$T_{sk} = 0.066T_1 + 0.149T_7 + 0.151T_8 + 0.153T_4 + 0.153T_5 + 0.163T_{10} + 0.183T_{12} \quad (7)$$

Mochida(II)<sup>6)</sup>:

$$T_{sk} = 0.198T_1 + 0.138T_7 + 0.076T_8 + 0.179T_4 + 0.145T_5 + 0.153T_{10} + 0.092T_{12} \quad (8)$$

各式における添字の1~22は図-1の番号に相当する。これらを整理すると、平均皮膚温の算出法は次の6つに分けられる。

- i) 測定個所1点 : 点11
- ii) 単純平均 : 式(5)
- iii) 面積加重平均 : 式(2)~(4)
- iv) 面積・皮膚温度感覚 : 式(6)
- v) 面積・熱伝達率 : 式(7)
- vi) 面積・熱伝達率・皮膚温度感覚 : 式(8)

本研究は、この内のv)に属するものである。この表現式をNishiら<sup>7)</sup>も提案しているが、導出過程が記されていないので、次章で、その導出を試みる。

#### 4. 熱平衡式より導かれる平均皮膚温

人体と環境との定常状態における熱交換は次式で表される。

$$M - Wt = D_{sk} + C_{sk} + R_{sk} + E_{sk} + C_{res} + E_{res} \quad (10)$$

ここで、 $D_{sk}$ ,  $C_{res}$ ,  $E_{res}$ ,  $Wt$  は微小項と見なして省略し、さらに気温と放射温が等しい環境では、式(10)の各量に具体式をあてはめ式(11)が得られる。

$$M \approx (C_{sk} + R_{sk}) + E_{sk} = (h_c + h_r)(T_{sk} - T_a)A + LRh_c(P_{sk} - P_a)A \quad (11)$$

次に、人体の部位について熱平衡をとると、局所からの放熱量の合計は代謝量に等しいので、以下の式が成り立つ。

$$M \approx (\sum C_{ski} + \sum R_{ski}) + \sum E_{ski} = \sum (h_{ci} + h_{ri})(T_{ski} - T_a)A_i + \sum LRh_{ci}(P_{ski} - P_a)A_i \quad (12)$$

式(11)と式(12)を等号で結ぶと、式(13)となる。

$$(h_c + h_r)(T_{sk} - T_a)A + LRh_c(P_{sk} - P_a)A = \sum (h_{ci} + h_{ri})(T_{ski} - T_a)A_i + \sum LRh_{ci}(P_{ski} - P_a)A_i \quad (13)$$

いま、式(13)両辺の各第一項に、すなわち、皮面からの乾性放熱項に着目してこれら同志が等しいと置くと、式(14)が得られる。

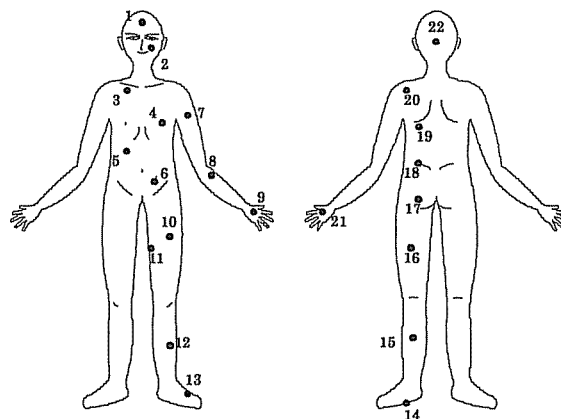


図-1 皮膚温の測定部位

$$(h_c + h_r)(T_{sk} - T_a)A = \sum (h_{ci} + h_{ri})(T_{ski} - T_a)A_i \quad (14)$$

式(14)を、 $T_{sk}$  についてまとめ、総合熱伝達率  $h$  を用いて表すと、式(15)へ変形される。

$$T_{sk} = \sum \left( \frac{h_i \cdot A_i}{h \cdot A} \right) T_{ski} + T_a \left\{ 1 - \sum \left( \frac{h_i \cdot A_i}{h \cdot A} \right) \right\} \quad (15)$$

式(15)の右辺第一項は各部位の面積比と熱伝達率比の積と各部位の皮膚表面温のみで表されているが、第二項には環境の変数である気温が含まれている。右辺第一項のみで平均皮膚温を考える場合、全身の平均総合熱伝達率をどの様にして求めるかという問題がある。

一般的に全身の平均総合熱伝達率は、式(14)を総合熱伝達率  $h$  について解くと、以下のような式(16)を用いて求めることができる。

$$h(A, T) = \frac{\sum h_i(T_{ski} - T_a)A_i}{(T_{sk} - T_a)A} \quad (16)$$

しかし、式(16)は平均皮膚温  $T_{sk}$  を含んでいるのでここでは使用することが出来ない。そこで、次の関係を導入する<sup>8)</sup>。

$$h(A) = \sum \left( h_i \cdot \frac{A_i}{A} \right) \quad (17)$$

式(17)を式(15)に代入すると、右辺第二項である  $T_a$  の項は消去されるので、平均皮膚温の算出式として式(18)を導くことができる。

$$T_{sk} = \sum \left( \frac{h_i \cdot A_i}{h \cdot A} \right) T_{ski} \quad (18)$$

平均皮膚温算出式として式(18)を適用する場合、全身の平均総合熱伝達率は式(17)を用いて求める必要がある。

## 5. 平均皮膚温の重み係数に関する実験

### (1) サーマルマネキンを用いた実験

局所熱伝達率から平均皮膚温の加重係数を得る目的で、人体の熱特性を内蔵したサーマルマネキンを用いて実験を行った。実験は北海道大学工学部環境工学科の環境試験室にて行った。環境試験室の様子を図-2に、実験条件を表-1に示す。また、サーマルマネキンを用いた対流熱伝達率に関する実験のデータ<sup>9)</sup>も参照して考察を進める。サーマルマネキンは、0.3mmφのニッケルワイヤーが2mm以下の間隔で全身に巻かれているため、供給電力と温度測定を同じ導線で行うことが出来る。

表-1 実験条件

気温(=放射温)	11~32°C
湿度	50%
風速	静穏状態
着衣状態	裸体
姿勢	立位・椅座

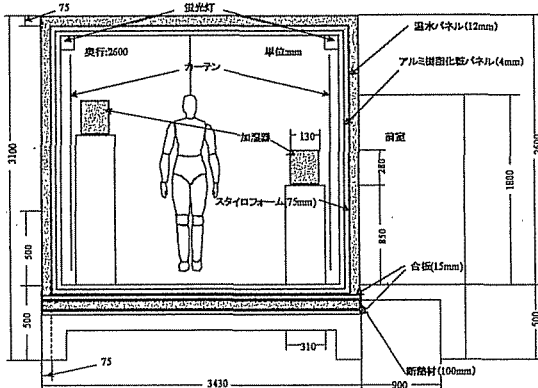


図-2 実験時の様子(立面図)

### (2) 実験結果と考察

図-3に気温と皮膚温の温度差に対する各熱伝達率の変化を示す。図から、総合熱伝達率は温度差に対して増加していることが確認された。

次に、得られた実験データから、加重係数の変化が気流速度によるのか、あるいは温度差によるのかを確認するため、図-4に面積比・熱伝達率比の加重係数の気流速度に対する変化を、図-5に、加重係数の気温と皮膚温の温度差に対する変化を図示した。図を見ると、気流速度

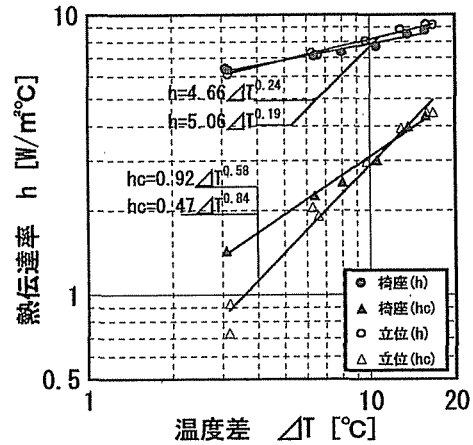


図-3 温度差と熱伝達率の関係

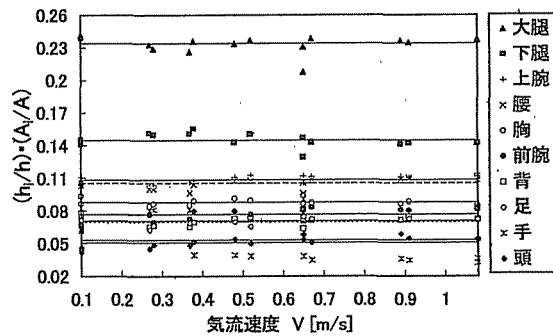


図-4 気流速度と加重係数の関係(立位)

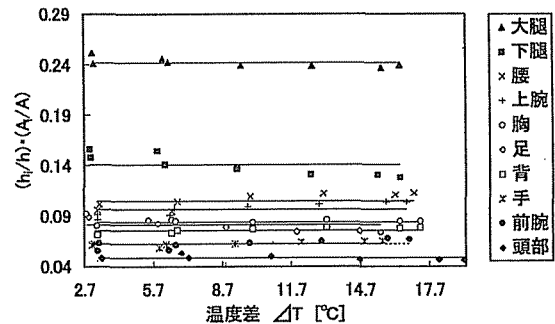


図-5 温度差と加重係数の関係(立位)

を変化させた時の加重係数、温度差を変化させたときの加重係数、共にほとんど変動しないことが読みとれる。このことは椅座時についても確認された。

次に、1998年と1999年の2つの実験によって導かれた加重係数値を平均し、表-2に示す。表-2には比較のために、サーマルマネキンの面積率も掲げている。係数の値は、大腿が最も大きく頭が最も小さくなった。これは、代表径の違いによる対流熱伝達率の特性が関係していると考えられる。代表径の小さい四肢の対流熱伝達率は、平均の対流熱伝達率に比べて大きくなるため、結果的に総合熱伝達率の割合が面積

に卓越して大きくなる。逆に頭は、代表径が大きいと判断され加重係数は小さく見積もられている。また、立位と椅座において加重係数が大

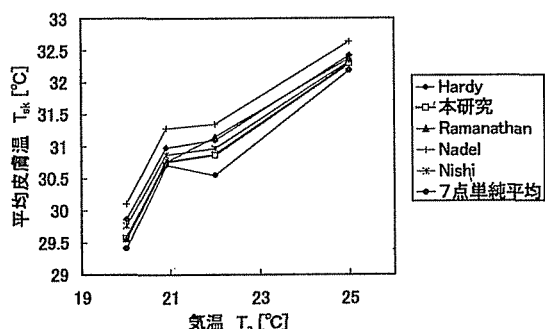
表一 2 加重係数値

部位	10点		
	椅座	立位	面積率
頭	0.055	0.050	0.075
上腕	0.113	0.103	0.103
前腕	0.076	0.069	0.067
手	0.068	0.058	0.054
胸	0.085	0.086	0.094
背	0.077	0.073	0.086
腰	0.097	0.105	0.118
大腿	0.205	0.238	0.224
下腿	0.145	0.143	0.120
足	0.080	0.076	0.060
合計	1.001	1.001	1.000

きく異なるのが、大腿・腰・腕などである。これは対流熱伝達率について気流に対する各部位の相対的な位置関係に起因するものと思われる。特に大腿において顕著に表れている。

## 6. 過去の平均化式との比較

図-6に、過去に本研究室で行われた被験者実験<sup>10)</sup>のデータを用いて計算された平均皮膚温の比較を示す。皮膚温の測定点数は Hardy-DuBois の7点と同じ測定点で、サーミスタを用いて測定を行った。比較の対象として選んだ平均化式は、Hardy-DuBois の7点、Ramanathan の4点法、感度を含めた Nadel らの式、本研究と同じ方法である Nishi らの式、さらに測定点7点を全て単純平均した値についても比較する。太い実線で示してあるのが本研究で求めた加重係数を含む平均皮膚温である。本研究で得られた平均皮膚温は、単純平均の式や Nishi らの式と近い値を示した。今回のデータは7点測定と比較的点数が少なかったためか、このような結果となったが、今後は多点数を測定する被験者実験を行って比較検討を行う必要がある。



図一 6 平均皮膚温の比較 (椅座)

## 7. まとめ

本研究で得られた結論を下記に示す。

平均皮膚温算出式として局所熱伝達率を含む次式を導いた。

$$T_{sk} = \sum \left( \frac{h_i \cdot A_i}{h \cdot A} \right) T_{ski}$$

本式を全身からの放熱量を算出するときに利用すれば、各部位の熱伝達率の不均一さを考慮することができる。

加重係数は気流速度及び温度差にかかわらず一定値となり、上式における係数 $[(h_i/h) \cdot (A_i/A)]$ を姿勢により、一定値と置くことが可能となった。

また、表一 2 に示す新たな平均皮膚温の加重係数値を提案した。

## 参考文献・引用文献

- 1) 田辺新一, 長谷部ヤエ: 皮膚温度可変型サーマルマネキンによる室内環境評価法に関する研究, 日本建築学会計画系論文報告集, 第 448 号, pp.1-8, 1993.
- 2) Hardy, J. D. and E. F. DuBois: The technique of measuring radiation and convection, J. Nutr., 15(5), pp.461-475, 1938.
- 3) Ramanathan, N. L.: A new weighting system for mean surface temperature of the human body, J. Appl. Physiol., 19(3), pp.531-533, 1964.
- 4) Mitchell, D. and C. H. Wyndham: Comparison of weighting formulas for calculating the mean skin temperature, J. Appl. Physiol., 26(5), pp.616-622, 1969.
- 5) Nadel, E. R. et al: Differential Thermal Sensitivity in the Human Skin, Pflügers Archiv., 340, pp.71-76, 1973.
- 6) Mochida, T.: Mean Skin Temperature Weighted by Skin Area, Heat Transfer Coefficients and Thermal Sensitivity, 北海道大学工学部研究報告, 第 115 号, pp.1-10, 1983.
- 7) Nishi, Y. and A. P. Gagge: Direct evaluation of convective heat transfer coefficient by naphthalene sublimation, J. Appl. Physiol., 29(6), pp.830-838, 1970.
- 8) 持田徹: 人体に関する対流およびふく射熱伝達率, 日本建築学会論文報告集, 第 258 号, pp.63-69, 1977.
- 9) 持田徹, 長野克則, 嶋倉一實, 桑原浩平, 中谷貴弘, 松永和彦: 前面吹き出し気流曝露時のサーマルマネキンの対流熱伝達特性, 人間と生活環境, 6(2), pp.28-33, 1999.
- 10) 持田徹, 長野克則, 嶋倉一實, 佐古井智紀, 相原利吏: 寒冷環境における温感実験, 空気調和・衛生工学会北海道支部第32回学術講演論文集, pp.187-190, 1998.