

等価温度の分析と検討

松永 和彦¹⁾
(いすゞ自動車(株))持田 徹²⁾
(北海道大学)

Analysis and Examination of Equivalent Temperature

Kazuhiko Matsunaga
(Isuzu Motors Ltd.)Tohru Mochida
(Hokkaido University)

Equivalent temperatures of Bedford and Madsen assume the amount of heat radiation according to the insensible perspiration and perspiration to be a constant value because equivalent temperatures of Bedford and Madsen aims at the evaluation of the heating environment. Therefore, neither realities nor a big difference is seen in the low temperature environment with few influences on the bodily sensation temperature of humidity. However, because the paragraph which changes because of the human body and the environment is a constant, an internal structure of the constant paragraph is actually uncertain.

A sincere heat movement of the body to the surface of the skin was systematically considered, a physical element of the constant paragraph was proposed, and an equivalent temperature which clarified was proposed in this report. It was confirmed to be able to evaluate the heating environment by using equivalent temperature T_{eq} of Madsen if the range of use was limited as a result of the verification.

1. はじめに

本論文では、車室内の温熱環境の評価指標として多用されている、Bedfordの等価温度、Madsenの等価温度を分析して、温熱工学的な検討を行ない、さらに、日常の室内環境や人体条件を考慮した、修正等価温度の導出を試みる。人体と環境との間の熱平衡式を基に、BedfordやMadsenの式の不備を正し、より合理的な修正等価温度の導出と考察を行う。

2. 従来の等価温度

Equivalent Temperatureは、Bedfordが1936年に提案した温熱指標である。等価温度という名称は、1932年にDuftonが開発したEupatheoscopeという計器で測定された値に対してつけられた。これはMadsenのサーマルコンフォート計の原理に近い特別なセンサーを有した温感計測器である。Eupatheoscopeで測定した等価温度に対して、Bedfordが数式化を試みたのがBedfordの等価温度である。等価温度とは、実際の環境下での熱損失と、等量の熱損失を生じる均一温熱環境の温度と定義されている。均一温熱環境とは、気温と平均放射温が等しく、静穏気流、上下温度分布のない温熱環境 (Uniform Enclosure) である。

1940年にGaggeにより提案された標準作用温度は、人体からの放熱を物理的に評価することを目的とした最初の環境評価尺度である。人体が現実の環境下で、対流と放射により熱交換を行っているのと同じ熱量を交換する仮定の均一温度を作用温度といい、気温と平均放射温に対流熱伝達率と線形放射熱伝達率の重み付け平均で表される。静穏気流下の通常室内ではほぼ気温と平均放射温の相加平均となる。標準作用温度(T_{so})は、実際の任意の環境を標準状態における等価な温度に換算したものである。標準作用温度は対流および放射熱伝達に関して、熱的に等価な環境を判断する為に提案された。標準作用温度(T_{so})を用いて、現実の任意の環境を標準状態における等価温度に換算することができる。

Madsenの等価温度 T_{eq}' は、実環境下で人の乾性熱損失と同じ熱損失を生じる、均一な温熱環境での温度(気流速度0、放射と対流による乾性熱損失が気温と同じ環境)と定義されている。Madsenの等価温度は1978年に発表され、着衣量を考慮した式(1)で示されており、風速0.1m/s以上の環境で成り立つ式である。^{1), 2), 3), 4), 5)}式(1)の36.5℃は、体内温を表わす。

$$T_{eq}' = 0.55 \times T_a + 0.45 \times T_r + \frac{0.24 - 0.75\sqrt{V}}{1 + I_{cl}} (36.5 - T_a) \quad (1)$$

ただし、

T_a : 気温 (℃)

T_r : 平均放射温 (℃)

V : 平均風速 (m/s)

I_{cl} : クロ値 (clo)

3. 修正等価温度

3.1 概要

前章で従来の温熱評価指標である等価温度について述べた。本章では、Bedfordの等価温度 T_{eq} 、Madsenの等価温度 T_{eq}' の不合理な点を修正すべく、体心から環境までの熱流を考慮して、修正等価温度 T_{eq}^* を導きBedfordの等価温度 T_{eq} 、Madsenの等価温度 T_{eq}' との関係を検証する。

3.2 体心から環境までの熱の流れ

図1にマクロにみた体心から環境までの熱移動を模式的に示す。体心から皮膚表面、皮膚表面から着衣、着衣表面から環境へと熱が移動する各経路にある抵抗のうち、 R_1 は体心と皮膚表面間をブラックボックス的に見た相当熱抵抗を示し、 R_2 はクロ値表現による着衣の熱抵抗、 R_3 は着衣面外の熱抵抗を表す。

ただし、

T_b : 体内温

T_{sk} : 平均皮膚温

T_{cl} : 着衣外面面温

T_o : 作用温度

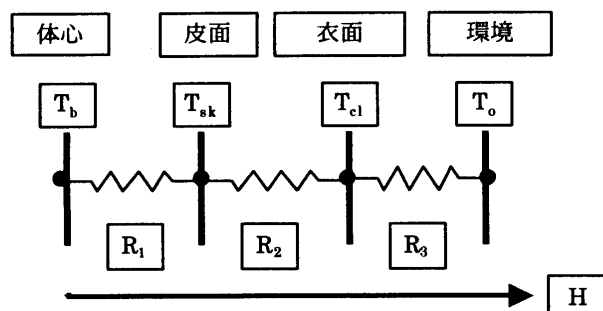


Fig.1 Heat transfer from body core to environment

R_1 : 体心から皮面までをマクロにとらえた相当熱抵抗

R_2 : 着衣の熱抵抗 = clo値

R_3 : 着衣外表面と環境との間の熱抵抗

H: 放熱量

Table1 Thermal properties at each region⁶⁾

組織・血液の熱物性モデル値

	熱伝達率 λ W/mK	密度 ρ kg/m ³	比熱 c J/kgK	産熱量 M W/m ²	血流量 f ml/(100ml·min)
骨	2.208	1418	2092	545	0.32
筋肉	0.465	1239	3724	629	0.12
脂肪	0.203	917	2510	449	0.45
皮膚	1.580	1200	3390	493	3.50
血液	0.518	1056	3850	—	—

横山らは、⁶⁾ 表1に示す各組織の熱物性値を求め、体心から皮膚表面までの部位別特性を考慮した生体内温度予測プログラムを開発している。本研究で用いる R_1 は内臓、筋肉、骨、血液をマクロにみた、体心と皮膚表面間の相当熱抵抗として、式(2)で表す。

$$M - \text{Cres} - \text{Eres} = \frac{T_b - T_{sk}}{R_1} \quad (2)$$

ただし、

M : 熱生産 (W/m²)

Cres : 呼吸気道からの乾性熱放散 (W/m²)

Eres : 呼吸気道からの湿性熱放散 (W/m²)

着衣の熱抵抗 R_2 は皮膚から衣服表面までの熱抵抗であり、式(3)で表すことができる。

$$R_2 = \frac{T_{sk} - T_o}{0.155 \cdot Q_t} - \frac{R_3}{f_{cl}} \quad (3)$$

ただし、

Q_t : 皮膚の面積 1 m² 当りの顕熱 (W/m²)

T_o : 作用温度 (°C)

f_{cl} : 着衣面積率 (—)

R_3 は着衣と環境間の熱抵抗であり式(4)で表すことができる。

$$R_3 = \frac{1}{h_c + h_r} \quad (4)$$

ただし、

h_c : 対流熱伝達率 (W/m²°C)

h_r : 放射熱伝達率 (W/m²°C)

3.3 修正等価温度とその検証

対流熱伝達率と放射熱交換量は、式(5)、式(6)で表すことができる。

$$C = h_c (T_s - T_a) \quad (5)$$

$$R = h_r (T_s - T_r) \quad (6)$$

ただし、

R : 放射熱交換量 (W/m²)

C : 対流熱伝達率 (W/m²)

T_r : 放射温度 (°C)

T_s : 着衣外面温または皮膚表面温 (°C)

皮膚表面から着衣までの移動熱量は、着衣表面から環境への放熱量と等しい。ここで、着衣の熱抵抗とclo値の定義を考慮し、人体表面からの対流と放射による乾性放熱に着目して式(7)で表す。着衣外表面の熱抵抗は、式(8)で示す通り対流熱伝達率と放射熱伝達率の関数である。

$$H_d = (T_s - T_a) / (R_{cl} + R_a) \quad (7)$$

$$R_a = 1 / (h_c + h_r) \quad (8)$$

ただし、

H_d : 乾性放熱量 (W/m²)

R_{cl} : 着衣の熱抵抗 (m²°C/W)

R_a : 着衣外表面の熱抵抗 (m²°C/W)

作用温度は、気温と平均放射温度が異なる環境において、熱量的に等しい環境の温度に換算して表示する仮想温度であり、式(9)に示すように対流 (C) と放射 (R) による放熱量から求めることができる。

$$C + R = h (T_{sk} - T_o) \quad (9)$$

ただし、

h : 総合熱伝達率 (W/m²°C)

式(9)を基準状態で表すと式(10)となる。

$$C_s + R_s = h_s (T_{sk_s} - T_{eq}) \quad (10)$$

添え字 s は、基準を示す。

拘束条件として顕熱放熱量が等しいと仮定すると、式(9)と式(10)が等しいことより

$$T_{eq} = T_{sk} \left(1 - \frac{h}{h_s} \right) + \frac{h}{h_s} T_o \quad (11)$$

一方、発汗のない環境での湿性放熱量は、不感蒸泄を考慮すればよい。快適域から寒い状態における不感蒸泄は、全放熱量の20~25%程度とほぼ一定と扱うことが可能であるので、体心から皮膚までの熱移動と皮膚表面から環境までの熱移動は、左辺の全放熱量の項に顕熱放熱量分の比率として係数 β を乗ずれば、式(12)で表すことができる。

$$\beta \left(\frac{T_b - T_{sk}}{R_1} \right) = \frac{T_{sk} - T_o}{\frac{1}{h_{clo}} + \frac{1}{h}} \quad (12)$$

式(12)より T_{sk} は、

$$T_{sk} = \frac{\beta T_b + \left(\frac{R_1}{\frac{1}{h_{clo}} + \frac{1}{h}} \right) T_o}{\beta + \frac{R_1}{\frac{1}{h_{clo}} + \frac{1}{h}}} \quad (13)$$

式(13)を式(12)に代入して T_{eq} を求めると、 R_1 を体心と皮膚表面間の相当熱抵抗とあつかうと、式(14)で表すことができる。

$$Teq = \left[\frac{h}{hs} + \left(1 - \frac{h}{hs} \right) \left(\frac{\frac{R_i}{Icl + \frac{1}{h}}}{\beta + \frac{R_i}{Icl + \frac{1}{h}}} \right) \right] \frac{hc}{h} + \left(1 - \frac{h}{hs} \right) \left(\frac{\beta}{\beta + \frac{R_i}{Icl + \frac{1}{h}}} \right) \left\{ Ta + \left[\frac{h}{hs} + \left(1 - \frac{h}{hs} \right) \left(\frac{\frac{R_i}{Icl + \frac{1}{h}}}{\beta + \frac{R_i}{Icl + \frac{1}{h}}} \right) \right] \frac{hr}{h} Tr + \left(1 - \frac{h}{hs} \right) \left(\frac{\beta}{\beta + \frac{R_i}{Icl + \frac{1}{h}}} \right) (Tb - Ta) \right\} \quad (14)$$

$$R_i = \frac{Tb - Tsk}{M - Cres - Eres} \quad (15)$$

ただし、

β : 顕熱放熱量比率 (-)

式(14)とMadsenの式(1)を比較すると、左辺の第一項は Ta 、第二項は Tr 、第三項は $(Tb - Ta)$ にかかる係数が、熱伝達率と熱抵抗など構成されていることがわかる。ここで、式(14)で導いた Teq を、修正等価温度 Teq^* と呼称する。

3. 4 等価温度の検証結果

3. 4. 1 気温別比較

室内での標準的な状態を想定し、着衣量 $Icl=0.75clo$ 、 $R_i=0.18m^2C/W$ 、湿度50%、体内温 $Tb=36.5^{\circ}C$ として、気温を $Ta=15.0, 20.0, 25.0, 30.0, 35.0^{\circ}C$ の5条件で計算した結果を図2～図6に示す。

気温 $15.0^{\circ}C$ のとき風速 $0.5m/s$ 以下、気温 $35.0^{\circ}C$ のとき風速 $0.15m/s$ 以下の低風速域において傾向が異なるが、前述以上の風速域では、各気温条件に関わらず、Madsenの Teq' と Teq^* は、同様の傾向を示している。特に気温 $Ta=35.0^{\circ}C$ の環境では、Madsenの Teq' 、修正等価温度 Teq^* 共に、風速によらずほぼ一定の値を示す。

式(14)全体の傾向を検証する為に行った着衣量 $0.75clo$ 、気温 $15.0^{\circ}C$ から $35.0^{\circ}C$ 、相対湿度50%程度の環境では、Madsenの Teq' と修正等価温度 Teq^* の値は数値的にはほぼ同じ結果を示した。

3. 4. 2 着衣量別比較

次に着衣量の違いによる Teq の検証を、気温 $Ta=20^{\circ}C$ の環境について行った。まず、低着衣量として裸体状態の $Icl=0clo$ で計算した結果を図7に示す。風速 $0.4m/s$ 以下では、 Teq^* の方が大きな値を示すが、風速が増加するに従って、Madsenの Teq' と一致する。通常、車に乗る状態での着衣量 $1.0clo$ での計算結果を図8に示す。風速 $0.3 \sim 0.8m/s$ でよい一致を示すが、 $0.8m/s$ 以上の風速でMadsenの Teq' の方がやや高くなる傾向が読み取れる。高着衣量として冬期の外出着相当の $Icl=2.0clo$ として計算した結果を図9に示す。

図9の結果より、Madsenの Teq' と Teq^* は、よく一致していることが読み取れる。以上の検証結果より、体内の相当熱抵抗と体心温を考慮した式(14)で示した修正等価温度 Teq^* と、Madsenの等価温度 Teq' は、屋外を想定した低い気温で高着衣量を除けば、通常の車内環境に対して

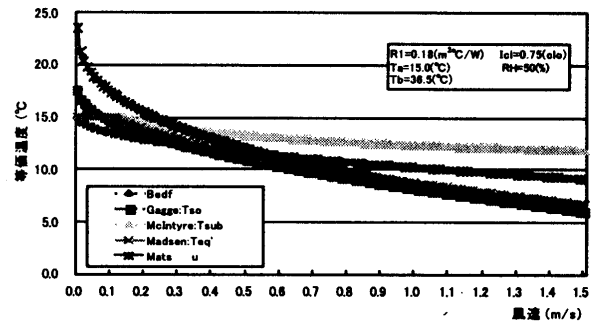


Fig.2 Relation between air velocity and equivalent temperature($Ta=15^{\circ}C$)

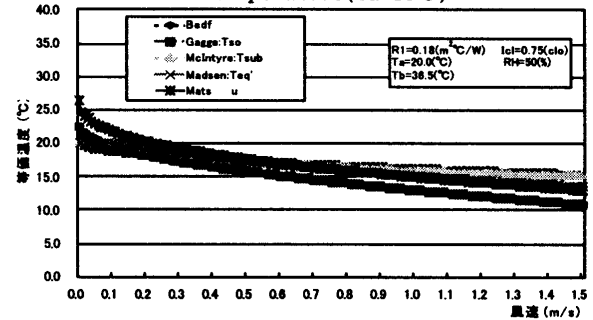


Fig.3 Relation between air velocity and equivalent temperature($Ta=20^{\circ}C$)

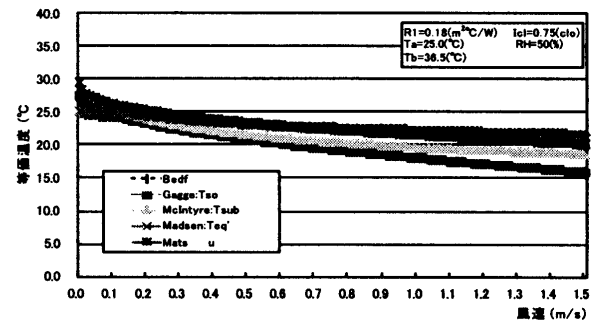


Fig.4 Relation between air velocity and equivalent temperature($Ta=25^{\circ}C$)

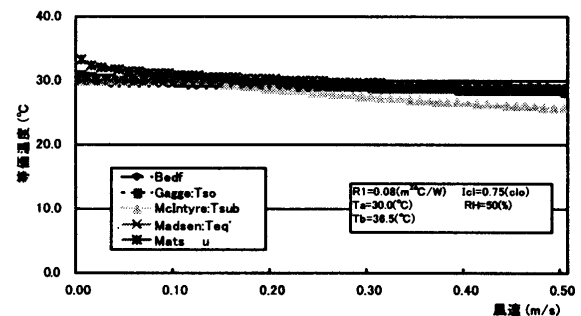


Fig.5 Relation between air velocity and equivalent temperature($Ta=30^{\circ}C$)

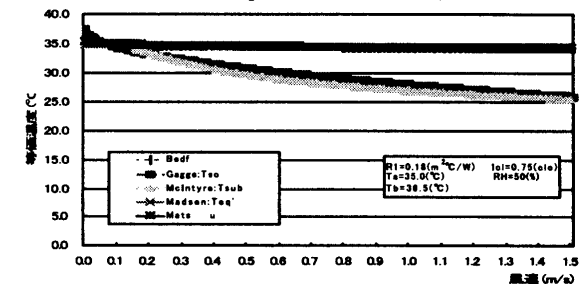


Fig.6 Relation between air velocity and equivalent temperature($Ta=35^{\circ}C$)

は、ほぼ同じ傾向を示すことが確認できた。従って、Madsenの Teq' を評価環境、使用範囲を限れば、評価尺度として便宜的には使用できることが分った。

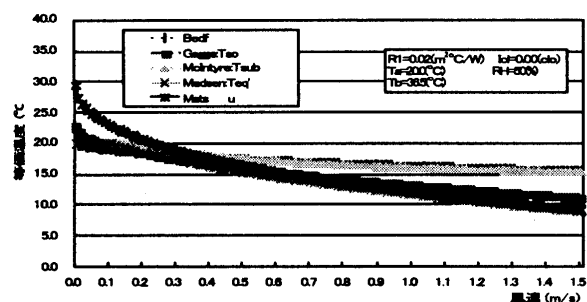


Fig.7 Relation between air velocity and equivalent temperature (Icl=0clo)

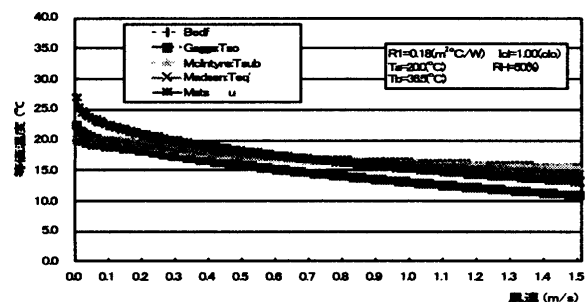


Fig.8 Relation between air velocity and equivalent temperature (Icl=1clo)

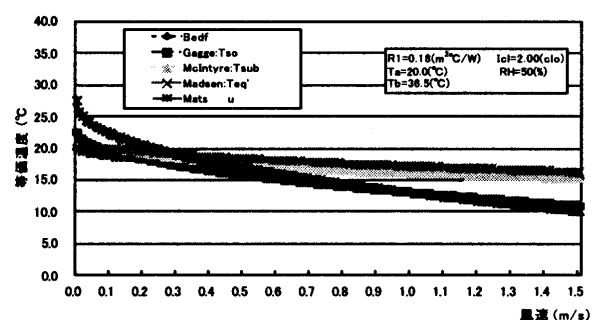


Fig.9 Relation between air velocity and equivalent temperature (Icl=2clo)

4. まとめ

Bedford, Madsenらの等価温度は、本来人体側や環境側の状態値の影響を受け変化するべき項が定数となっており、定数項の内部構造が不明であった。筆者らの修正等価温度 Teq^* は、体心から皮膚表面までの熱移動を系統的に考察することにより定数項の物理的構成要素を明らかにした。

1) 気温 $15^{\circ}\text{C}\sim 35^{\circ}\text{C}$ の範囲でかつ、 $R_1=0.18\text{m}^2\text{C/W}$ 、 $I_{cl}=0.75\text{clo}$ の条件において低風速以外で、よく一致している。

2) 気温 $T_a=20^{\circ}\text{C}$ での着衣量の違いによる検証の結果、裸体時の $I_{cl}=0\text{clo}$ において風速が増加するに従って、Madsenの Teq' と修正等価温度 Teq^* は一致する傾向を見せるが、高着衣量の $I_{cl}=2.0\text{clo}$ では、Madsenの等価温度 Teq' と修正等価温度 Teq^* は、異なる傾向を示す。これは、

FangerのPMVを基に立てられたMadsenの式は、高着衣・低風速ほど敏感になる傾向をもつためと考えられる。

3) 冬期、通常車に乗る時の標準的な着衣量 $I_{cl}=1.0\text{clo}$ 、気温 $T_a=20^{\circ}\text{C}$ で計算を行った。風速 $0.3\sim 0.8\text{m/s}$ で一致しているが、風速が 0.8m/s 以上になるとMadsenの Teq' の値の方がやや高めになってくる。このことは、Madsenの式では、高速ほど鈍感になる傾向があるためと考えられる。

本研究では、暖房車室内環境を対象としているので発汗がない、快適あるいはやや寒い状態が中心になり、その時の R_1 を $0.18\text{m}^2\text{C/W}$ として与えた。式(14)で示した修正等価温度 Teq^* にも不感蒸泄 E_{sk} を具体的に示す式は、入っておらず発汗を伴う暑熱環境では、発汗の程度により使用に際して注意を要する。

以上、検証した結果、発汗の影響の無い温熱環境下で、Madsenの等価温度 Teq' と修正等価温度 Teq^* とは結果的に大きな差は見られなかったが、正しい答えは、正しい式からのみ出るはずであり、Madsenの等価温度は限られた条件で偶々、類似の値を示したに過ぎない。より厳密な物理的基礎の上に立った評価指標が望まれる。

<参考・引用文献>

- 1) Bedford T. : Equivalent Temperature What It Is ? How It's Measured, Heating, Piping & Air Conditioning, pp. 87-91, 1951
- 2) Dufton A.F. : The Equivalent Temperature of a Warmed Room, JIHVE, Vol.4, pp.227-229, 1936
- 3) Gagge, A.P.: American J. Physiology , 131, pp.93, 1940
- 4) Madsen T.L. : Measurement of thermal comfort and discomfort., Indoor Climate Danish Building Research Institute, Copenhagen. , pp. 591-613, 1979
- 5) Madsen T.L., Olesen B.W., Kristensen N.K. : Comparison between Operative and Equivalent Temperature under Typical Indoor Conditions, ASHRAE Trans. Vol.90, I, pp.1077-1090, 1984
- 6) 横山真太郎、角田直人、富樫貴子、濱田靖弘、中村真人、落藤澄:部位別特性を考慮した生体内温度予測プログラムの開発 第1報-生体内熱移動方程式とその解法、空気調和・衛生工学会論文集、No77, pp.1-12, 2000
- 7) 持田 徹、長野 克則、嶋倉 一實、桑原 浩平、中谷 貴弘、松永 和彦:前面吹き出し気流暴露時のサーマルマネキン対流熱伝達特性、人間と生活環境、pp.98-103、第6巻第2号、1999
- 8) 持田 徹、嶋倉 一實、津田 紘、堀越 哲美、稗田 哲也:冬期寒冷地における乗用車室内の温熱性状と熱的快適性に関する実験的研究、空気調和・衛生工学会論文集、No.49 pp.35、1992
- 9) 持田 徹:新有効温度 ET^* の成果・特徴と問題点、日本生気象学会誌29(特別号) pp.135-139、1992