HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	等熱収支温の検討
Author(s)	射場本, 勘市郎; 石井, 克己; 花村, 真一
Citation	衛生工学, 17, 27-32
Issue Date	1970-03
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/36200
Type	departmental bulletin paper
File Information	17_27-32.pdf

Hokkaido University Collection of Scholarly and Academic Papers : HUSCAP

等熱収支温の検討

射場本　勘市郎 *
石　井　克　已 **
花　松　真　一 **

Analysis of "Equicalorimetric Temperature"

Kan-ichiro IBAMOTO
Katsumi ISHII
Shin-ichi HANAMATSU

ABSTRACT

For last fifty years or so, many engineers and physiologists have attempted to establish the thermal sensasion index in terms of simple factors.

On the basis of the new method which has been constructed with heat balance equation and nervous system for human being in steady state, the authors have analysed "Equicalorimetric Temperature."

As the results of the discussion, the authors come to acknolege its phylosophy to be available but its method to be vague, i.e. decision of respiratory temperature and conception of wettedness and so on.

1．緒　　言

人間が日常生活を営む上に，不可欠な要素として「衣・食・住」をあげることがある。"食"は，生命活動にとって最も必要な要素であるが，それと並び称される"衣・住"は，結局，厳しい自然環境から生命を守るためのもので，言わば第2の環境を創り出すことで人間は生活圏を拡げてきた。

このように人類の進歩と不可欠の関係にある環境も，高度の科学の発達した現在，今だ十分な理論に裏付けされた設計がなされていない。環境を温熱要素だけに限定すれば，過去約50年に渡り種々の試みがなされて来たがそれらの多くは理論的な取扱いが十分とは言えなかった。しかし，筆者らは人間の生理現象を考慮しつつ，工学的な手法により，定常状態のみを対象とした新しい温感理論を構成した。この理論に基礎を置き"等熱収支温"を検討した結果，首肯できない点がいくつかあることが判明した。ここでは，それらの点の考察を述べる。

2．等熱収支温[1]（Equicalorimetric Temperature）

等熱収支温（以下ECTと称す）は標準条件として，環境側では風速$v=0.1$[m/s]，気湿$\varphi=1$（R.H＝100%），周壁温T_r＝気温T_aとし，人体側では単位皮面積当りの代謝産熱$M=47$[Kcal/m²hr]，かつ裸体を採用している。その拡張として任意の温熱環境，ならびに着衣，作業強度における熱交換を，それと等価な標準条件でもって代表しようとする試みである。

熱交換量Z［Kcal/m²hr］の基本式は，原著者によると，

$$Z=(C+R+E)+(B+P) \quad \cdots\cdots\cdots(1)$$

C；体表面における対流失熱
R；体表面におけるふく射失熱
E；体表面における蒸発に伴なう失熱
B；呼吸による対流失熱
P；呼吸による蒸発に伴なう失熱

また，代謝による産熱をM，人体の蒸熱をSとすると，

$$Z=M+S \quad \cdots\cdots\cdots(2)$$

これらの各式は，

$$C=10.524\sqrt{v}\,(T_s-T_a) \quad \cdots\cdots\cdots(3)$$

T_s；平均皮温　［℃］
T_a；気　　温　［℃］

＊産業環境工学講座　教授
＊＊同大学院修士課程　学生

1) 環境衛生工学　p. 186　朝倉書店

$$R=(0.021T_r+3.578)(T_s-T_r) \quad \cdots\cdots(4)$$

T_r ; 周囲壁温　〔℃〕

$$E=10.167v^{0.37}w_{so}(f_s-\varphi f_a) \quad \cdots\cdots(5)$$

w_{so}; 湿潤面積率と称するが，詳しくは，既称ヌレ率である。

f ; 各温度における飽和水蒸気圧とする。〔mmHg〕

$$B=0.0744(T_n-T_a) \quad \cdots\cdots(6)$$

T_n; 呼気温　〔℃〕

$$P=0.1296(f_n-\varphi f_a) \quad \cdots\cdots(7)$$

以上の基本式を展開して，任意の環境における熱交換量と等価な熱交換量を与える標準条件での気温 T_a を算出し，これをもってECTと定義している。

基本式を展開するに当って，いくつかの仮定を置いている。

第1には，周壁温T_r＝気温T_aとし，いわゆるニュートン環境を対象

第2には，一般にB，Pは小さいとし，呼気温T_n＝平均皮温 T_s

第3には，

$$\delta\equiv\frac{f_s-f_a}{T_s-T_a} \quad \cdots\cdots(8)$$

なるδを定義し，T_sを固定して，T_aのある範囲内では，$\delta=aT_a+b$, $(a,b$ 定数)なる直線式で近似が可能であると言う。しかし，実際にδを算出するためにはf_a, f_sを求める必要があるので，実際に計算を行なう上では実用性に乏しい。またT_sが他の値をとると，そのT_sについてのδを算出しなければならず，むしろ f_s, f_a をある温度範囲において，各々の温度の直線式で近似した方が有効である。

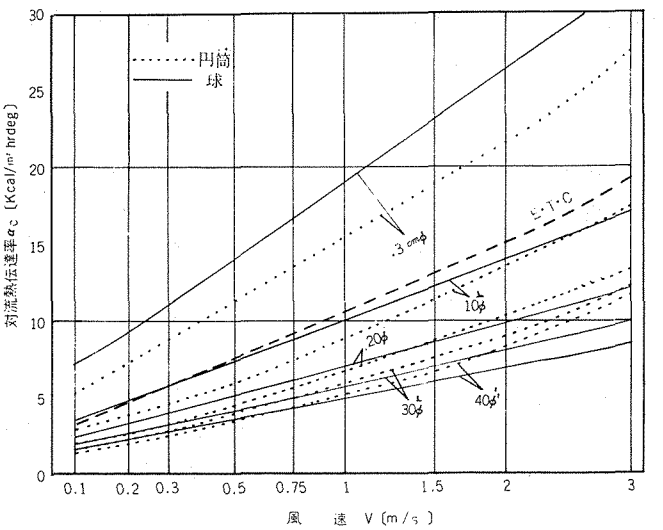
3．各式の検討

3・1　$Z=M+S$

人体の放熱特性を考えると，ある環境から他の環境へ移行する時，そこには当然ながら過渡現象がみられる。それは人体が熱容量を持つからである。上式で蓄熱Sを考慮しているのは，非定常問題を意図してのことと思われ，いまだ人体の過渡的な放熱理論が確立していない現在，非常に興味がある。しかし，残念ながら以後の理論展開では，代謝産熱が全放熱に等しい定常状態のみを扱っている。序でながら，このように定常と非定常とを明確に区別していない研究者の論文が散見される。

3・2　$C=10.524\sqrt{v}(T_s-T_a)$

人体の対流熱伝達率$\alpha_c=10.524\sqrt{v}$として風速で表わしている。このα_cを，Hilpert[2]の流れに直交する長い円筒外面のα_cおよびRanz & Marshall[3]の球外面におけるα_cと風速との関係を，円筒または球の直径をパメラータとして表わした図－1にプロットしてみると，ほぼ8cmϕの円筒及び10cmϕの球に相当する。いずれにしても，人体をこのように小さなモデルで取扱うのは，対流熱伝達率を，過大に評価しているものと思われる。



図－1　対流熱伝達率の比較

2)　日本機械学会編；伝熱工学資料　p. 41　(1962)

3)　McAdams, W.H.; Heat Transmission　p. 260　(1962)　Mcgraw-Hill Kogakusha

3・3　$R=(0.021\ T_r+3.578((T_s-T_r)$

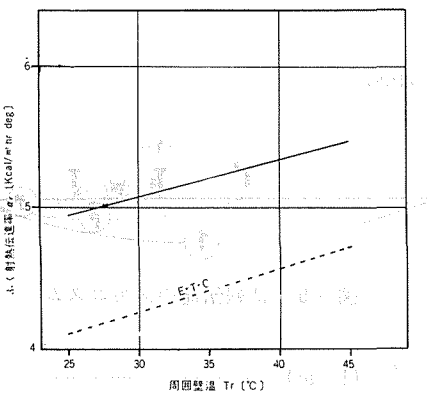
上式において，$T_s=35$[℃]，$T_r=25\sim45$[℃]の範囲では0.1%以下の誤差で近似できると言う。しかし，周壁温が一様な室内でかつ裸である人体にふく射式を適用すると，

$$R=1\cdot C\left[\left(\frac{\theta_s}{100}\right)^4-\left(\frac{\theta_r}{100}\right)^4\right]$$
$$=\alpha_r(T_s-T_r)\quad\cdots\cdots(9)$$

ここで，　θ；絶対温度表現の各温度

$$\alpha_r=\frac{1\times4.95\times0.9}{100}\times\left[\left(\frac{\theta_s}{100}\right)^2+\left(\frac{\theta_r}{100}\right)^2\right]$$
$$\left[\left(\frac{\theta_s}{100}\right)+\left(\frac{\theta_r}{100}\right)\right]\quad\cdots\cdots[10]$$

両者の比較を，図－2に示す。これによるとECT式はふく射による熱伝達率α_rを小さく評価している。



図－2　ふく射熱伝達率の比較

3・4　$E=10.167v^{0.37}w_{so}(f_s-\varphi f_a)$

蒸発に伴なう熱伝達は，湿分の濃度差に比例し，風速に影響されるという原則は受入れられるが，その駆動力が水蒸気圧差に基づくのか，絶対湿度であるのか，あるいは他の表現となるのかは，今だ明確でない。筆者らは蒸発に伴う失熱Eを次式で表現する。

$$E=k\cdot\alpha_c\cdot w(x'-x_a)\quad\cdots\cdots(11)$$

ただし，　k；2.6（水蒸気圧の表現では，2.2となる）〔deg/(gr/kg)〕

α_c；対流熱伝達率〔Kcal/m²hr deg〕

x'；ぬれた皮面における飽和絶対湿度〔gr/kg〕

x_a；気温T_aでの絶対湿度〔gr/kg〕

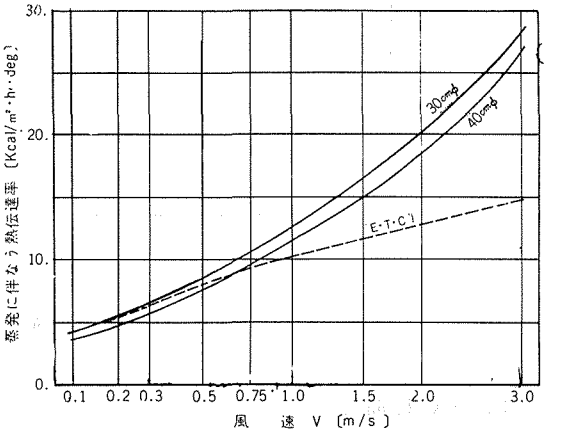
ECT式でw_{so}を用いているのは，熱交換式を展開する上での数学的な手法にすぎず，ぬれた皮面積の温度と乾いた皮面の温度が等しいのはうなづけない。

図－3では，両者の蒸発に伴なう熱伝達率を各風速ごとにプロットした。その結果，$v=1$ m/s以下で両者の値はほぼ等しいが，他の条件でも一致するとは必らずしも言えないであろう。

3・5　呼吸放熱式

$B=0.0744\,(T_n-T_a)$

$P=0.1296\,(f_n-\varphi f_a)$



図－3　蒸汗に伴なう熱伝達率の比較

呼吸による放熱を，ある系と外界との換気問題として扱い，呼気と吸気のエンタルピー差でなされていると考えるのが最も適当である。次にこの方法で求めてみると，

$$i_a=c_aT_a+x_ac_wT_a+x_a\cdot l\quad\cdots\cdots(12)$$
$$i_n=c_nT_n+x_nc_wT_n+x_n\cdot l\quad\cdots\cdots(13)$$

ただし，

i；エンタルピー〔Kcal/kg〕　添点a；吸気

c；比熱〔Kcal/kg deg〕　n；呼気

l；蒸発潜熱〔Kcal/gr〕　w；水蒸気

呼吸失熱Qは，呼吸量を乾燥空気でG〔kg/m² hr〕とすると，

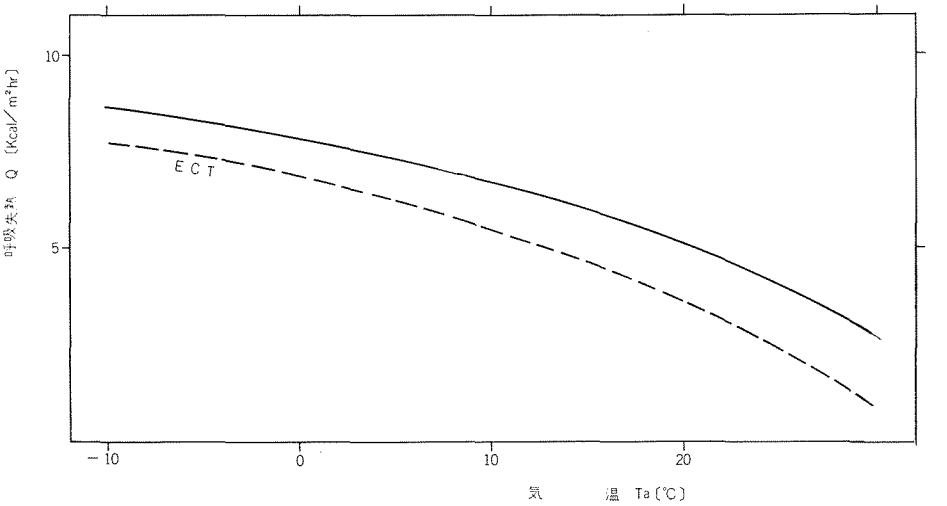
$$Q=G(i_n-i_a)\quad\cdots\cdots(14)$$

筆者らの行なった実験[4]の結果，作業強度をNとしM_{et}単位で表現すると，$G=0.35N$，$C_n=0.236$，$T_n=38-(Q/N)$を得た。また，式(12)，(13)の第二項は微小であるので省略し，更に呼気は飽和しているので湿り空気（キャリヤ）線図の上で，$x_n=m(T_n-A)$と線型化でき，式(14)は，

$$Q=N(8.292-0.057\ T_a-0.142\ x_a)\cdots(15)$$

4)　射場本 勘市郎，「温感機構の工学的解析」，労働衛生工学 1969-10　p. 25.

$T_s=33$[℃], $N=1$[Met], $R.H=100$[%], の条件の下に, 両者を比較したのが図－4である。これによると, 両者は似た傾向を示すが, ECT式は理論的に不十分である。



図－4　呼吸失熱の比較

4．E.C.T. 曲線

筆者らは, 人体皮面のモデルとして, 完全乾き及び完全ぬれの熱的に独立な微小片から構成される等価円筒を想定した。この多数の完全乾き及びぬれ面からの情報伝達のメカニズムは, 図－5に示すような関係で表現できよう。すなわち,

$$T_0-T=r(T_0-T_f) \quad \cdots\cdots (16)$$

$$T_0-T'=r'(T_0-T_f) \quad \cdots\cdots (17)$$

したがって

$$T_0-T_s\{(1-w)r+wr'\}(T_0-T_f) \quad \cdots\cdots (18)$$

$$\therefore \quad T-T_s=w(T-T') \quad \cdots\cdots (19)$$

ここに T ; 乾き面における皮面温

T'; ぬれ面における皮面温

T_s; 総合皮面温

T_f 想定した最低の皮面温

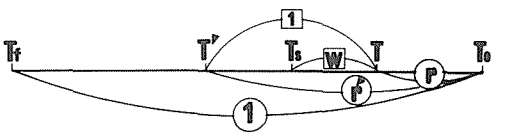
T_0; 生物学的基準温（温熱感覚の種々の分析から$T_0=38$℃と推定）

r ; 乾き面からの刺激量

r' ; ぬれ面からの刺激量

w ; ヌレ面積率

更に筆者らは, 人体の温熱に関する神経系の考察と実験値の分析から, 皮面温による刺激に対する人体側の制御が, 次の法則のもとになされていると仮にみなす。[5]



図－5　情報伝達のメカニズム

$$\frac{r}{r'}=(1-w)^2 \quad \cdots\cdots (20)$$

蒸発に伴なう失熱Eは, 総合皮温 T_s に対応する総合絶対湿度 x_s で表現するなら,

$$E=k\cdot a_c(x_s-x_a)=k\cdot a_c\, w(x'=x_a) \quad \cdots\cdots (21)$$

式(11)と比較することから, x_s は,

$$x_s=(1-w)x_a+wx' \quad \cdots\cdots (22)$$

更に, 式(5)および式(21)とから, 既称ヌレ率 w_{so} とヌレ面積率wとの関係は,

$$w_{so}=w\frac{x'-x_a}{x_{ss}-x_a} \quad \cdots\cdots (23)$$

ここで, x_s; 総合皮面温における絶対湿度

x_{ss} ; 総合皮面温における飽和絶対湿度

以上の理論的な背景をもとに熱平衡式を立て, 等温感曲線群を求めるわけであるが, そのためには, Equical-orimetric である事は当然として, 拘束条件が必要である。原著者は, 等温感ではT_sおよびw_{so}が標準状態の値に保持されるとしているが, 筆者らは, 情報伝達のメカニ

5) K. IBAMOTO, "Analysis of Steady Heat Exchange between Human-Body and Environment" Proc. 16th Intern. congr. Occup. Health, 1969.

ズムから，T_sおよびwが保存されると信じる。wが一定であるなら，式(23)から解るように，w_{so}は当然ながら変動する。

5．あとがき

人体の感覚を工学的に解析するためには，生理工学を基礎としたモデル化が最も重要であり，そのためには，現象を直視すると共に，それを科学的に把握すべきである。筆者らの方法は，現段階では有効なものと思われるが，更に人体との対応の精巧なモデルを考えていきたい。

ECT思想は，あくまでも等温感であって快適度の評価とは何ら関連していない点に，有効性が失なわれている。快適度の評価は，皮面温等で表現されて来たが，作業量，着衣などの変動に対して十分に対応できるものとは言えない。詳しくは別報に譲るとして，著者らは，普遍性のある表現法を創出すべく，式(20)に示すような制御法則を見いだし，更に検討をつづけている。