Japan Society of Physiological Anthropology

Ann. Physiol. Anthrop.
13(4): 197-203, 1994.

1 clo 着衣状態におけるぬれ面積率の実測値と等平均皮膚温線

持田　徹，嶋倉　一實

北海道大学工学部

Values of Wettedness Observed in Clothed Subject and the Theoretical Equal Line of Average Skin Temperature

Tohru MOCHIDA and Kazumi SHIMAKURA
Faculty of Engineering, Hokkaido University

In order to obtain the characteristics of the change of wettedness under constant average skin temperature 36℃, the experiments were carried out using two young male subjects in a test chamber.

From the basic measurements of both environmental parameters and human physiological responses, the authors found the wettedness value changeable even though the average skin temperature was constant. The following results were obtained under the conditions of resting-sitting, summer clothing worn, still air movement and constant average skin temperature 36℃;

1. there is a positive correlation between wettedness and the environmental vapor pressure.
2. there is a nagative correlation between wettedness and the air temperature.
3. there is a positive correlation between the evaporative heat loss from skin surface and the air temperature.
4. there is a negative correlation between the evaporative heat loss and the vapor pressure.
5. there is a negative correlation between wettedness and the evaporative heat loss.
6. both maximum and minimum values of wettedness correspond to the average skin temperature.

Considering the afore-mentioned results, the equal line of the average skin temperature does not form a straight line, but a curved line on the psychrometric chart.

(Ann. Physiol. Anthrop. 13(4): 197-203, 1994)

Key words: Thermal Comfort, Wettedness, Clothing, Equal Line of Average Skin Temperature, ET*

研究の背景

気温や放射温が人体の表面温より高い場合には，対流や放射温によって周囲環境から熱が体内に入ってくることになり，このような状況では，汗の蒸発に伴う放熱が唯一の放熱経路となる．一方，快適環境や寒い環境においても，人は不感蒸泄によって皮膚表面から絶え間なく水分を放出しており，この不感蒸泄に伴う放熱量も代謝量の20%前後を占め，発汗と共に体温調節の点で重要な役割を演じている．皮膚表面を境界と考えれば，発汗および不感蒸泄に伴う放熱量は，皮膚

NII-Electronic Library Service

Japan Society of Physiological Anthropology

表面における水蒸気圧と環境との水蒸気圧の差を位差量として表示できる．しかし，一般には皮膚表面の水蒸気圧が飽和状態にないため，その値を予測することが難しいので，蒸汗に伴う放熱量を考える場合の実用的な便法の一つとして，ぬれ面積率（wettedness）を用いる方法がある(Gagge, 1937)．このぬれ面積率はGaggeによって提案された一種の係数で，最大蒸汗放熱量に対する実際の蒸汗放熱量の比，あるいは全体表面積に対する仮想のぬれている部分の面積比率と定義されており(西安信, 1985)，人の汗の状態をよく表現する生理的状態値とも言われている．ぬれ面積率の特徴や有効性は，人体と環境との間の熱平衡式を基に，温感のレベルごとに等温感線あるいは等平均皮膚温線を湿り空気線図上に描いて比較すると，さらによくわかる（持田, 1993)．

以上のような特性を持つぬれ面積率は，現在，温感指標として広く使われている新有効温度ET*（New Effective Temperature)の中に組み込まれ，ET*を特徴づける量の一つとして用いられている．ET*では，ぬれ面積率と平均皮膚温が対をなしており，等温感すなわち等ET*を一定の平均皮膚温と，それに対応する唯一のぬれ面積率を平均皮膚温ごとに与えて，等ET*線を湿り空気線図上に描き指標化している（Gagge et al, 1971)．

ET*の考えでは，寒い状態から暑い状態へ移行するにつれて，平均皮膚温は低温から高温に順次変化し，それに対応すべきぬれ面積率を小さな値から大きな値に一様に変化させ,かつそれぞれ一定値を与えている．しかし，平均皮膚温が高く，かつぬれ面積率の大きな値を示す暑熱環境，特に高気温で低湿環境では蒸汗放熱量が過大になり，過去の実測値や計算値との差が大きい(持田, 1992)．そこで筆者らは，一定の平均皮膚温のもとにおけるぬれ面積率の挙動を調べる為に，椅座・裸体状態で実験を行なったところ，平均皮膚温が一定でもぬれ面積率は環境の条件によって異なった値を示し，特に暑熱領域での高湿環境と低湿環境ではぬれ面積率の値が，それぞれ0.8と0.3程度になることを知った．さらに，このような特性を有するぬれ面積率を，人体の熱平衡式と連立して解くと，等平均皮膚温線が湿り空気線図上で曲線になり，ぬれ面積率の値が等平均皮膚温線の軌跡に大きな影響を及ぼすこともわかった．以上の点は，等SET*線あるいは等ET*線上では，平均皮膚温とぬれ面積率は一定値をとるとする新有効温度の定義とは異なる．また，裸体時のぬれ面積率に関する実験から，快適付近でのぬれ面積率の変動は小さいので，等平均皮膚温線に及ぼす影響は少ないが，暑熱環境では前述のように，高湿度でのぬれ面積率0.8，低湿度では0.3程度と変動が大きく，等平均皮膚温線に与える影響が大きい．このことは，暑熱領域における労働作業時の人体への熱ストレスを考える上で，非常に重要である．さらに，一定の平均皮膚温のもとにおけるぬれ面積率の値をみる実験や，その等平均皮膚温線に及ぼす影響についての研究は，著者らの研究以外にはほとんど見当たらず，ET*指標が日本人に適合するか否かや，等SET*線の成り立ちについての深井らの一連の研究（深井ら，1990）があるに過ぎない．

このような背景のもとに，筆者らは今回，着衣状態におけるぬれ面積率の挙動を探る実験を試み，その結果が等平均皮膚温線に与える影響について検討した．

実　験

1）実験計画および方法

一定の平均皮膚温のもとにおける，着衣時のぬれ面積率の変化特性を観察する為に，気温・湿度・風速・放射温を調整した，2.5m×2.5m×2.5mの試験室で被験者実験を試みた．設定気温，湿度の組み合わせは表1の値を目標とし，風速は静穏状態の0.15m/sとした.平均放射温は周壁,天井など室内側表面を布でカーテン状に覆ったので，気温と等しい値であった．各実験ごとの気温と湿度は，実験期間中はほぼ一定値を保っていた.

表1の気温と湿度によって形成される環境で，着衣下のぬれ面積率がどのような値をとるかを見る為に表2に示す健康な日本人青年男子2名を被験者として実験を行なった．衣服の重量は実験開始直前と直後に電

表1　設定条件

気温 Ta（℃）	37～35	35～33	33～31
湿度　（%）	20～30	50～60	70～80
風速 V（m/s）	0.15（静穏気流）		
作業状態	椅座・読書		
着衣量	1　clo（合衣）		

NII-Electronic Library Service

Japan Society of Physiological Anthropology

表2　身体データ

被験者	年齢	身長（cm）	体重（kg）	体表面積（m^2）
Y.A	21	172.5	61	1.67
M.K	21	173.5	62	1.69

表3　使用衣服

使用衣服	重量（kg）	材質
ジャージ（上下）	0.83	ポリエステル 100%
パーカー（フードなし）	0.66	綿 100%
スウェット（上）	0.59	綿 100%
Tシャツ	0.13	ポリエステル 65%＋綿 35%
パンツ（トランクス）	0.06	綿 100%
ソックス	0.03	綿 50%＋ナイロン 50%

子上皿天秤を用いて測定した．着用した衣服は，表3に示すジャージ上下・パーカー（フードなし）・セーター・Tシャツ・ソックス・トランクスであり，このclo値は衣服重量から1.06 cloと算出された(日本建築学会編，1978)．なお，実験直前と直後の衣服の重量差はほとんどなかった．被験者は食後1時間以上経過したのち試験室に入り，椅座状態で60分間滞在し，皮膚温や舌下温などの生理量を1時間連続記録した．皮膚温はHardy-DuBoisの7点平均化式の部位における個所で，舌下温とともにサーミスタ温度データ集録装置を用いて，1分間隔で自動測定した．体重減少量は実験の直前直後に脱衣状態でディジタル台秤を用いて測定した．観測中の温熱感覚と快適感覚は10分ごとに申告記録した．なお，1回の実験に被験者は1人を入室させた．

2）実験結果および考察

実験開始から約30分経過以後，舌下温はいずれの実験においても一定値で推移し，ASHRAEのスケール：－3（寒い）～＋3（暑い）に従った温感申告で，ほとんどが＋3（暑い）であり，同様に1（快適）～4（非常に不快）の快適感申告で，3（不快）と申告した．各温度の経時変化の代表例を図1に示す．得られたデータを整理して，図2～図6に掲げる．なお，図2～図6のデータは，定常に達した50～60分後の値を用いた．また，図2および図4の上横軸の水蒸気圧は，実験データに対応する図7の曲線の等平均皮膚温線直線に対して目盛ったものである．図3と図5の上横軸の気温も同様である．

データに若干のばらつきが見られるが，この結果は下記の6項目にまとめることができる．すなわち，

椅座・合衣（1 clo）・静穏気流の条件で，平均皮膚温が36℃の一定の時，

(1)　蒸汗放熱量は気温と正の相関傾向を有する（図2）．

(2)　蒸汗放熱量は水蒸気圧と負の相関傾向を有する（図3）．

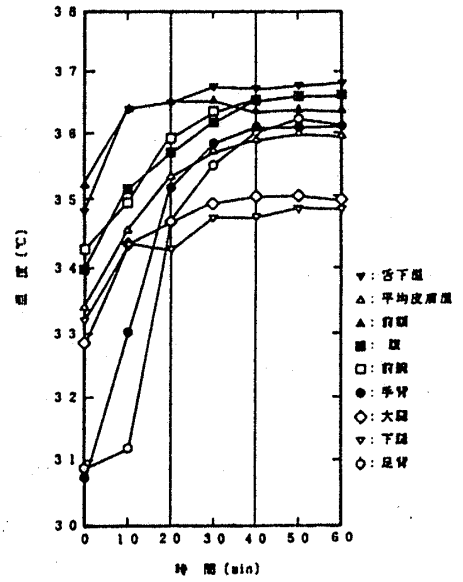

図1　舌下温，部位皮膚温，平均皮膚温の経時変化

NII-Electronic Library Service

Japan Society of Physiological Anthropology

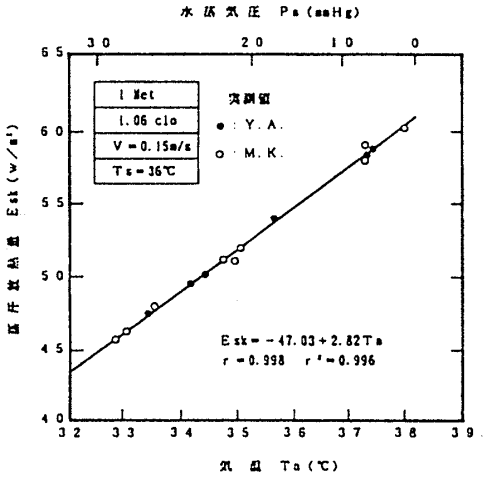

図2 蒸汗放熱量と気温の関係

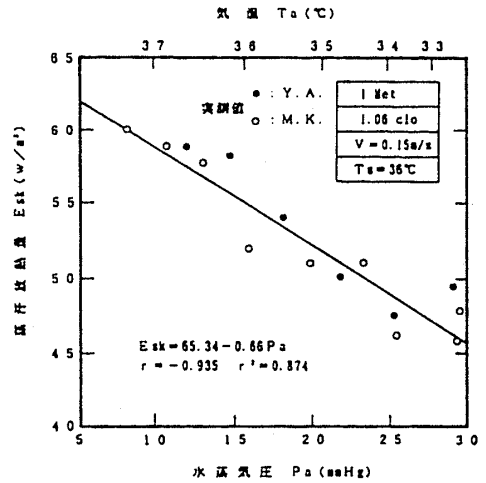

図3 蒸汗放熱量と水蒸気圧の関係

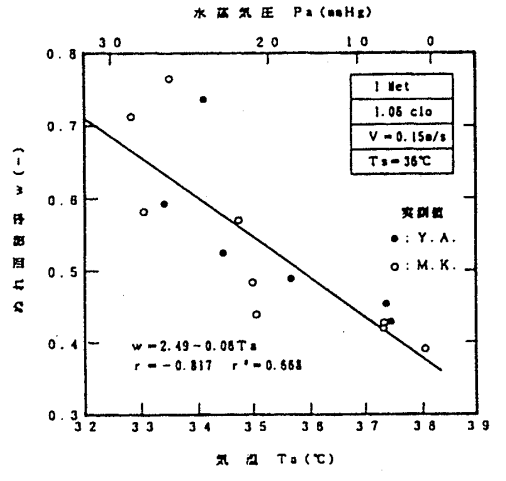

図4 ぬれ面積率と気温の関係

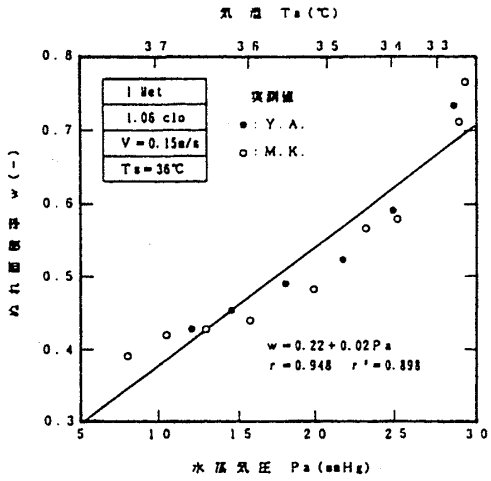

図5 ぬれ面積率と水蒸気圧の関係

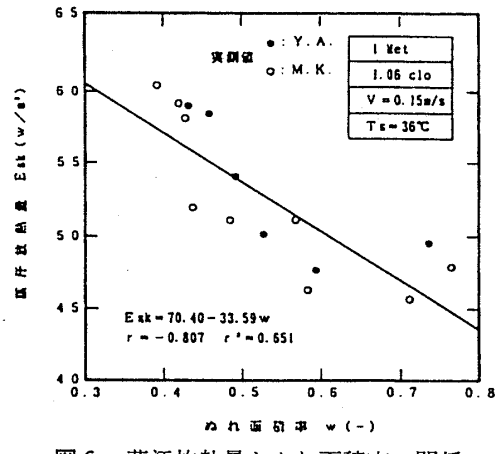

図6 蒸汗放熱量とぬれ面積率の関係

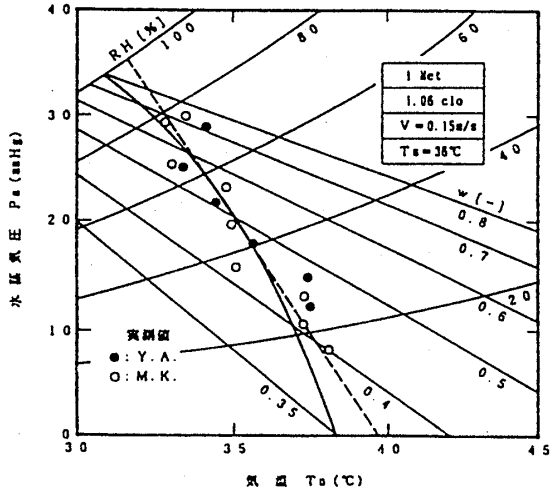

図7 等平均皮膚温線

(3) ぬれ面積率は気温と負の相関傾向を有する（図4）.

(4) ぬれ面積率は水蒸気圧と正の相関傾向を有する（図5）.

(5) ぬれ面積率は蒸汗放熱量と負の相関傾向を有する（図6）

(6) 一定の平均皮膚温に対して，ぬれ面積率の値は

NII-Electronic Library Service

Japan Society of Physiological Anthropology

唯一ではなく，一定の範囲を限って変化しており，取り得る最大ぬれ面積率と最小ぬれ面積率が存在する．

今回の実験のように，平均皮膚温が高い着衣時の場合にも，裸体時の実験結果（持田ら，1992）と同様に，一定の平均皮膚温に対するぬれ面積率の値は唯一ではなく，環境因子の影響を受けて，異なった値をとることが確認された．ただ，ぬれ面積率の絶対値や変化幅に，両者で多少差異がみられた．

平均皮膚温が一定値の時，ぬれ面積率が結果的に環境の気温や水蒸気圧によって異なった値をとるということは，この関係を人体の熱平衡式と連立して解けば，等平均皮膚温線が，湿り空気線図の上で曲線になることを意味し，直線の等SET*線や等ET*線とは，根本的に異なる．また，等平均皮膚温線でかつ等ぬれ面積率線である直線の等SET*線や等ET*線では，特に低湿環境における蒸汗放熱量の値が過大に算出され（久野，1971，持田ら，1991），本実験から得られた，ぬれ面積率が変化する等平均皮膚温線では，この欠点が改善され，より実際の人体の生理反応に近くなる．

検　討

1）着衣時のぬれ面積率

ぬれ面積率（wettedness）は，Gaggeにより提案された蒸汗放熱の特徴をよく表現する一種の係数であり（Gagge, 1937），人体がある熱環境に曝露された時に，全体表面が汗で完全にぬれていると仮定して算出される最大蒸汗放熱量に対する，その環境での実際の蒸汗放熱量との比率と定義されている．さらにこの熱量比が，ぬれて飽和状態で，かつその部分が平均皮膚温に相当していると仮定した部分のみから蒸発が起こるとした仮想の皮膚面積と，全体表面との比率に等しいと定義され（西安信，1985），式(1)で規定されている．

$$w = \frac{E\,sk}{E\,skmax} = \frac{A\,w}{A} \qquad (1)$$

ただし，w：ぬれ面積率（wettedness）

E sk：実際の蒸汗放熱量

E skmax：最大蒸汗放熱量

Aw：ぬれている仮想体表面積

A：全体表面積

最大蒸汗放熱量E skmaxは，ぬれ面積率w＝1の時と考えられるから，裸体時の実際の蒸汗放熱量E skは，式(1)より次式で与えられる．なお，E skは体重減少量に平均皮膚温に対する蒸発潜熱を乗じたものから，後述の呼吸放熱分（式(5)）を差し引くことによって求めることができる．

$$E\,sk = E\,skmax \cdot w = \varkappa\, hc(P^*s - Pa)w \qquad (2)$$

ただし，P*s：平均皮膚温Tsに対する飽和水蒸気圧

Pa：環境の水蒸気圧

$\varkappa$：ルイスの係数

hc：対流熱伝達率

一方，着衣時における蒸汗放熱量は，式(2)に着衣の透湿効率係数F pclを乗じて（Nishi et al, 1970），次式で求められる．

$$E\,sk = F\,pcl \cdot \varkappa\, hc(P^*s - Pa)w \qquad (3)$$

ただし，F pcl：着衣の透湿効率係数（permeation efficiency factor）〔－〕

本論文では，式(3)で定義されるぬれ面積率を，着衣時のぬれ面積率と取り扱う．図4～図6のぬれ面積率は式(3)より算出されたものである．

2）着衣時の熱平衡式

着衣時における実験より得られたぬれ面積率の変動特性が，等平均皮膚温線に及ぼす影響について検討する．

定常状態において，人は周囲環境との間で対流・放射・蒸汗・呼吸の4大経路を通して熱授受を行なっている．このほか，伝導（土肥ら，1987）・衣服下換気に伴なう放熱（Mochida, 1977）・外部仕事に要する熱量（Fanger, 1970）もみられるが，これらは微少とみて本論文では省略する．

気温Taと平均放射温Trが等しい環境では，人体表面からの対流＋放射，蒸汗の各放熱量と呼吸に伴う放熱量（Fanger, 1970）が，それぞれ式(4)，(3)，(5)で表わされ，産熱量との間で式(6)の熱平衡が成り立つ．

$$C + R = F\,clh(Ts - Ta) \qquad (4)$$

$$C\,res + E\,res = M(0.1488 - 0.0014Ta - 0.0023Pa) \qquad (5)$$

$$M = C + R + E\,sk + (C\,res + E\,res) \qquad (6)$$

ただし，C：対流放熱量〔W/m²〕

R：放射放熱量〔W/m²〕

E sk：蒸汗放熱量〔W/m²〕

C res：呼吸の顕熱放熱量〔W/m²〕

NII-Electronic Library Service

Japan Society of Physiological Anthropology

E res：呼吸の潜熱放熱量〔W/m²〕
F cl：Burtonの着衣の伝熱効率係数〔−〕(Nishi et al, 1970)
I clo：着衣の熱抵抗（クロ値）〔−〕
h：総合熱伝達率＝hc＋hr〔W/m²℃〕
hc：対流熱伝達率〔W/m²℃〕
hr：放射熱伝達率〔W/m²℃〕
Ts：平均皮膚温〔℃〕
T：気温〔℃〕
Tr：平均放射温〔℃〕
κ：ルイスの係数（＝2.2）〔℃/mmHg〕
P*s：平均皮膚温Tsに対する飽和水蒸気圧〔mmHg〕
Pa：環境の水蒸気圧〔mmHg〕
w：ぬれ面積率〔−〕
M：産熱量（代謝量）〔W/m²〕

作業状態と着衣量，風速と体感温が一定であれば，式(6)の変数のうち，産熱量M，着衣量I clo，対流熱伝達率hc，放射熱伝達率hr，平均皮膚温Tsとこれに対する飽和水蒸気圧P*sおよびぬれ面積率wが定まるので，式(6)は環境の水蒸気圧Paを縦軸とし，気温Ta（または作用温度Top）を横軸とする湿り空気線図の上で，一定の温感を与える無数の気温と湿度の組み合わせを示す直線，または曲線を表す．このようにして得られる直線または曲線の等平均皮膚温線は，両線とも等熱損失線（等熱収支線）であるが，前者（直線）はさらに等ぬれ面積率であるのに対して，後者(曲線)は非等ぬれ面積率線の相違がある．また，モデル的に考えれば，前者は人が無制限に汗をかくことができるとしているのに通じ，後者は人の発汗能力には限度があるとしたモデルと言える（持田ら，1991)．

3）ぬれ面積率の特性を組み入れた着衣時の等平均皮膚温線

人体に関する熱平衡式(6)と，実験から得られた着衣時におけるぬれ面積率の特性（図6）を連立して解き，湿り空気線図上にTs＝36℃の等平均皮膚温線をプロットすると，図7に示す上に凸の曲線が得られる．図7からもわかるように，曲線の等平均皮膚温線（等36℃線）は，この線上でぬれ面積率が一定ではなく，ほぼ0.35～0.8の間で変化して実験データともよい一致を示している．他方，負の勾配を持つ6本の直線群は，ぬれ面積率がそれぞれ0.35，0.4，0.5，0.6，0.7，0.8の一定値の等平均皮膚温線（等36℃線）を示し，これらの直線の等平均皮膚温線は，等ET*線（＝等平均皮膚温線かつ等ぬれ面積率線）の考え方に通じる．また，破直線は実験データを一次回帰した等平均皮膚温線（等36℃線）であるが，図の一定の等ぬれ面積率線5本を横断していることからもわかるように，この等平均皮膚温線（破直線）上でぬれ面積率の値は変化しており，同じ直線の等平均皮膚温線といえども，ぬれ面積率が一定な等ET*線とは内容が異なる．

結　言

椅子に座り，合衣相当（1 clo）の着衣状態で，気流が静穏な環境に人を配し，平均皮膚温が36℃を示した場合のぬれ面積率の値を実測によって求めた．実験データからは，裸体時の場合と同様に，平均皮膚温が一定であっても，結果的には環境条件の影響を受けて，ぬれ面積率は一定値とはならず，ある幅を持って変化していることがわかった．このことから，その平均皮膚温に対して，取り得る最大ぬれ面積率と最小ぬれ面積率が存在することが確認された．

実測より得られたこのようなぬれ面積率の特性を，人体と環境との間の熱平衡式に組み込み，等平均皮膚温線を算出したところ，縦軸を水蒸気圧，横軸を気温にとる湿り空気線図上で曲線を示し，直線の等平均皮膚温線である等ET*線とは異なる軌跡を描いた．これらの曲線や直線で表わされる等平均皮膚温線は，物理的には双方とも等熱収支線（等熱損失線）を意味するが，生理的な観点からは，前者（曲線の等平均皮膚温線）はこの線上でぬれ面積率が異なった値をとり，人の発汗量には限界があるとしたモデルであるのに対し，後者（直線の等平均皮膚温線）はぬれ面積率が一定で無制限に発汗が行なわれるとしたモデルと言えよう．

本実験を進めるに当たり，日立造船株式会社・金原正雄氏（当時北海道大学工学部衛生工学科卒論生）の協力を得た．記して謝意を表する．

付記　式(5)のBurtonの着衣の伝熱効率係数Fclは，次式で与えられている．

$$F\,cl = \frac{1}{1+0.155(hc+hr)I\,clo}$$

NII-Electronic Library Service

Japan Society of Physiological Anthropology

式(3)の Nishi らの着衣の透湿効率係数 F pcl は，次式で与えられている．

$$F\,pcl = \frac{1}{1+0.143hc\,I\,clo}$$

ただし，hc：対流熱伝達率〔W/m²℃〕

hr：放射熱伝達率〔W/m²℃〕

I clo：clo 値〔−〕

なお，F cl，F pcl とも，巻末の文献（Nishi & Gagge, 1970）に記載されている．

文　献

A.P. Gagge, 1937: A new physiological variable associated with sensible and insensible perspiration, Amer. J. of physiol. 120, 277

西安信，1985：人体と環境との熱交換，温熱生理学(中山昭雄編)，理工学社，45

持田徹，1993：一定の平均皮膚温のもとにおけるぬれ面積率の特性に関する基礎的考察，Ann. physiol. Anthrop. 12(2), 59

A.P. Gagge, J.A. J. Stolwijk & Y. Nishi, 1971: An effective temperature scale based on a simple model of human physiological regulatory response, ASHRAE Trans., 77, 247

日本建築学会編，1978：熱—人体のエネルギー代謝，建築設計資料集成 1　環境，106

持田徹・落藤澄・堀越哲美・嶋倉一實，1992：蒸汗放熱表示式の特徴とぬれ面積率の変化特性を考慮した等平均皮膚温線，空気調和・衛生工学会論文集，48，39

深井一夫・斎藤純司・伊藤宏・黒川玲子・小池武雄・山口仁士・後藤滋，1990：日本人の温冷感と SET*に関する研究　その 1 ～ 2，日本建築学会大会学術講演梗概集，849

Y. Nishi & A.P. Gagge, 1970: Moisture permeation of clothing —a factor governing thermal equilibrium and comfort, ASHRAE Trans., 76, 137

土肥まり子・辻知佳子・堀越哲美，1987：冷房空間における温熱環境条件の人体影響に関する実験的研究（その 1）接触伝導を考慮した気温の皮膚温・放熱への影響，日本建築学会学術講演梗概集，265

T. Mochida, 1977: Influence of heat loss by clothing ventilation on thermal sensation, Memoirs of Facul. of Engrg., Hokkaido Univ., 84, 45

P.O. Fanger, 1970: Thermal Comfort, Danish Tech. Press, 24, 28

久野寧，1971：汗の話，光生館，p.88

持田徹・嶋倉一實・森山敏彦・伊藤誠・今城忠宣，1991：暑熱環境におけるぬれ面積率の挙動に関する基礎的研究，空気調和・衛生工学会論文集，46，1

(1993年12月20日受付)
(1994年 4 月21日受理)

持　田　　徹
Tohru MOCHIDA

〒060　札幌市北区北13条西 8 丁目　北海道大学工学部衛生工学科
Dept. of Environmental and Sanitary Engineering, Faculty of Engineering, Hokkaido University, North-13 West-8, Kita-ku, Sapporo 060 Japan

NII-Electronic Library Service