

# 人工気象室内における人体の温熱環境実験

EXPERIMENTAL STUDY ON MAN'S PHYSIOLOGICAL RESPONSE AND THERMAL COMFORT  
IN A CLIMATE SIMULATOR

神田 学<sup>\*</sup>、柳本 記一<sup>\*\*</sup>、宇梶 正明<sup>\*\*\*</sup>、鈴木 宏和<sup>\*\*\*</sup>

By Manabu KANDA, Norikazu YANAGIMOTO, Masaaki UKAJI, Hirokazu SUZUKI

Laboratory experiments were performed in a climate simulator, where temperature, relative humidity, wind velocity and artificial insolation can be controlled, to investigate man's physiological response and thermal comfort. The following results were obtained ; 1) skin temperature decreases with wettedness, 2) variation of metabolic ratio with meteorological conditions can be ignorable and 3) thermal sensation can not be explained by increase of skin temperature, which conflicts with the former physiological models. Keywords: climate simulator, physiological response, thermal comfort

## 1. はじめに

著者らは、屋外の気象要因が人体の温熱環境に及ぼす影響を、野外実測に基づく人体熱収支解析法によって検討してきた<sup>1)</sup>。しかしながら、熱収支解析において大きな仮定となっている生理学的知見の多くは、屋内空間を対象として得られたものであり、日射・風速の影響の大きい屋外に適用できるかは不明である。また、屋外の体感温度調査等を行った事例もいくつかあるが<sup>2), 3)</sup>、屋内の温熱指標をそのまま適用しているに過ぎず、多くの問題点が指摘されている<sup>4)</sup>。屋外における実用的な温熱環境指標を導出するには、単なる温感アンケートだけでなく、屋外における人体の生理反応の測定と気象要因との因果関係を明らかにしたうえで、人体熱収支モデルに反映させていく必要がある。本研究は、人工気象室を用いて、人体温熱環境実験を行い、日射・風速などの屋外気象要因が人体の生理反応や熱収支に及ぼす影響を検討した。

## 2. 実験および解析方法

### 2.1 実験概要

実験は、男女一人ずつの被験者について、計78セットを行っているが、その一部について報告する。  
(a) 測定項目 測定項目は表-1に、アンケート項目は表-2に示す。アンケートでは暑熱環境を考慮して、暑さの程度を細分化し、皮膚の湿り感を加えている点が特徴的である。

---

\*正会員 工博 山梨大学工学部講師 (〒400 山梨県甲府市武田 4-3-11)

\*\*学生会員 山梨大学工学部4年 (〒400 山梨県甲府市武田 4-3-11)

\*\*\* 熊谷組技術研究所 (〒300-22 茨城県つくば市大字鬼ヶ窪1043)

(b) 制御方法 使用した人工気象室は、熊谷組技術研究所所有のもので、水平10m x 6m、高さ7m のステンレス製である。制御できるのは、人工気象室に流入する空気の温度・湿度・風速・日射量である。ただし、壁面の熱輻射の影響で、実際の人工気象室内の気温・湿度は流入空気のものとは異なる（図－1 参照）。日射は、太陽光のスペクトル特性に極めて近いメタルハライドランプを使用している。

(c) 設定条件 実験の設定条件を表－3に示す。被験者は、快適温に保たれた控え室で1時間過ごした後、人工気象室内で、裸体（水着・ヘルメット着用）・椅座の状態、連続一時間の測定を行う。測定中、流入気温・湿度・日射は一定で、20min毎に風速が切り替わる。

(d) 被験者プロフィール 被験者のプロフィールを表－4に示す。人体の表面積 $A_D(m^2)$ は、身長 $H(m)$ および体重 $W(kg)$ から、以下の Dubois の式(1)より求められる<sup>5)</sup>。

$$A_D = 0.202 \times W^{0.425} \times H^{0.725}$$

..... (1)

表－1 測定項目

| 測定項目               | 間隔  | 測定原理          |
|--------------------|-----|---------------|
| 生理要因               |     |               |
| 体重変化               | 20秒 | 精密電子台秤        |
| O <sub>2</sub> 消費量 | 10秒 | ジルコニア・赤外線吸収方式 |
| 皮膚表面温度             | 5分  | サーモグラフィー      |
| 体温                 | 1分  | サーミスタ温度計      |
| 温熱・快適感             |     | 被験者アンケート      |
| 皮膚の湿り感             | 5分  | (表2参照)        |
| 気象要因               |     |               |
| 気温                 | 10秒 | 白金温度計         |
| 湿度                 | 10秒 | 高分子誘電率式       |
| 風速                 | 10秒 | ホットワイヤー       |
| 白球温度               | 10秒 | 白球+白金温度計      |
| 黒球温度               | 10秒 | 黒球+白金温度計      |

表－2 アンケート内容

| (a) 温冷感    | (b) 快適感 | (c) 皮膚の湿り感 |
|------------|---------|------------|
| 1 寒い       | 1 非常に不快 | 1 発汗なし     |
| 2 涼しい      | 2 不快    | 2 うっすらと汗ばむ |
| 3 やや涼しい    | 3 やや不快  | 3 普通に汗ばむ   |
| 4 暑くも寒くもない | 4 やや快適  | 4 体表面が濡れてる |
| 5 やや暖かい    | 5 快適    | 5 汗が滴り落ちる  |
| 6 暖かい      |         |            |
| 7 暑い       |         |            |
| 8 すごく暑い    |         |            |
| 9 耐え難いほど暑い |         |            |

表－4 被験者  
プロフィール

表－3 実験の設定条件

|       |                                                        |       |       |        |      |
|-------|--------------------------------------------------------|-------|-------|--------|------|
|       | 流入空気 30℃、70％<br>日射量 800(W/m <sup>2</sup> )             |       |       | 性別     | 男    |
| 控え室   | 人工気象室<br>風速大 → 風速中 → 風速小<br>(1.6m/s) (1.2m/s) (0.2m/s) |       |       | 年齢     | 25   |
| 60min | 20min                                                  | 20min | 20min | 身長(m)  | 1.71 |
|       |                                                        |       |       | 体重(kg) | 56   |

## 2. 2 人体熱フラックスの算定法

### (a) 代謝量の算定

代謝による産熱量 $M(W/m^2)$ は、各栄養素の分解熱から理論的に算出可能であり、酸素消費量 $V_{O_2}(l/min)$ と二酸化炭素産生量 $V_{CO_2}(l/min)$ の計測値より、以下の式(2)によって算定される<sup>5)</sup>。

$$M = (0.23 \times V_{CO_2} / V_{O_2} + 0.77) \times 351.82 \times V_{O_2} / A_D$$

..... (2)

### (b) 皮膚からの蒸発熱量の算定

体重の減少量 $\Delta W(g/min)$ からガス交換による減少分 $Q_{loss}(g/min)$ をさし引いた量が、発汗蒸発 $E_{sk}(W/m^2)$ 、不感蒸泄 $E_{diff}(W/m^2)$ 、呼吸による蒸発 $E_{res}(W/m^2)$ の和に等しい(式(3))。

$$E_{sk} + E_{diff} + E_{res} = 1/60 \times 4.18 \times 583 \times (\Delta W - Q_{loss}) / A_D$$

..... (3)

$$E_{res} = 29.46 \times M \times (0.0359 - q_a/1200)$$

..... (4)

$$Q_{loss} = 0.00155 \times M \times A_D$$

..... (5)

式(3)のうち、 $\Delta W$ は実測から、 $E_{res}$ 、 $Q_{loss}$ は代謝量と大気比湿( $q_a:g/g$ )を用いて式(4)、(5)より理論的に算定されるので、皮膚からの蒸発量 $E(=E_{sk} + E_{diff})$ が見積もられる。

### (c) 受熱放射量の算定 ～黒・白2つのグローブ球を用いた新しい算定法

グローブ球温度から人体への受熱放射量を見積もる場合、両者のアルベドの違いが大きな誤差要因となる。そこで、アルベドの異なる2つのグローブ温度を用いて、任意物体の受ける受熱放射量を推定する方法を考案した。一般に、任意物体の受ける正味の受熱放射量 $R_1(W/m^2)$ は、式(6)で表せる<sup>1)</sup>。

$$R_1 = (1 - \alpha_1) \times (\text{短波成分の寄与}) + \varepsilon_1 \times (\text{長波成分の寄与}) - \varepsilon_1 \sigma T_1^4 \quad \dots\dots (6)$$

ここで、 $\alpha_1$ 、 $\varepsilon_1$ 、 $T_1$ はそれぞれ、受熱体 $i$ のアルベド、射出率、表面温度、 $\sigma$ はステファンボルツマン定数を表す。神田の方法<sup>1)</sup>によれば、グローブ球温度と風速・気温の計測値から熱収支的に左辺の $R_1$ が算定される。従って、 $\alpha_1$ 、 $\varepsilon_1$ が既知である2つのグローブ球を用いれば、式(6)で表せる2つの方程式から(短波成分の寄与)および(長波成分の寄与)が算定できる。再び、式(6)を用いれば、表面温度・アルベド・射出率のわかっている任意の受熱体の受熱放射量が算定できる。今回は、黒グローブ( $\alpha=0.0$ )と白グローブ( $\alpha=0.45$ )を用いて、人体( $\alpha=0.3$ )の受熱放射量を算定した。

#### (d) 顕熱量の算定

気温 $T_a$  (K)・皮膚温 $T_s$  (K)・風速 $U$  (m/s)の実測値を用いて以下の式(7)から算定可能である<sup>1)</sup>。

$$C = 88.73 (U)^{-0.531} (T_s - T_a) \quad \dots\dots (7)$$

(e) 蓄熱量の算定 蓄熱項 $F$  (W/m<sup>2</sup>)は、各熱収支項の和の残差から求める。

$$F = M + R_1 - E - C \quad \dots\dots (8)$$

### 3. 実験結果および考察

3. 1 気象要因 人工気象室内における気温・湿度・風速・グローブ温度の時間変化を図-1に示す。

#### 3. 2 体温および皮膚温

体温・皮膚温の変化を図-2に示す。体温は、10分程で平衡となり、36.5℃前後で恒温性が保たれている。ただし、無風時には、恒温性が保てなくなり、上昇傾向にある。皮膚温は時間経過と共に急激に低下している。これは、後述する皮膚の湿り度(図-4参照)と密接に対応しており、湿り度の増加に伴って皮膚温は低下している。この結果は、皮膚温の上昇によって湿り度や発汗量の促進を説明しようとする従来の生理学的知見と大きく異なる。部位別で見ると、額および手足等の末梢部が胸・背などの中心部に比して高温となっている。額・胸・背で皮膚温の低下する割合が大きくなっているが、これらの部位で盛んに発汗が起こる(被験者談)ためである。

#### 3. 3 人体熱収支

人体熱収支の内訳を図-3に示す。代謝量は、50(W/m<sup>2</sup>)前後でほぼ一定の値を示している。この値は、快適な状態で計測した被験者の代謝量(図は割愛)と全く同じであり、かなりの暑熱環境下でも、気象因子や発汗による代謝量の変化を実質上無視し得ることを示している。顕熱は負になっているが、これは気温が体温を越えているためである。しかし、その寄与は日射・輻射熱等による受熱放射量に比較して小さい。発汗蒸発量は、ほぼ150(W/m<sup>2</sup>)前後の値を取っており、1時間当たり380(g)の重量損失に相当する。風速の影響を見ている。風速の低下に伴い、発汗放熱量はわずかに増加している。皮膚の湿り度が増しているためである。その一方、皮膚温の低下により受熱放射量は増加し、また蓄熱項も増加している。

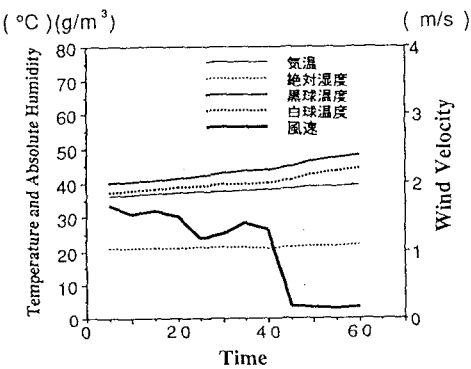
#### 3. 4 温冷感・快適感・湿り度

アンケート調査の結果を図-4に示す。風速の低下に対し、皮膚の湿り度は次第に増加していく。これによって、先に述べたようにほぼ一定の発汗量を保持していると考えられる。温冷感と快適感は密接に関連しており、特に風速停止後(40min)、耐え難いほど暑い、非常に不快、となっている。この不快感の増加を説明し得る物理的要因としては、先に述べた、熱収支項の受熱放射量の増加および蓄熱項の増加が有力である。いずれにしても、風速停止後、皮膚温は低下しているから、等皮膚温線に基礎を置く $E T^*$ などの屋内温熱指標をそのまま適用することはできない。むしろ、著者が提案している熱負荷量的な考え方<sup>1)</sup>が有望であろう。

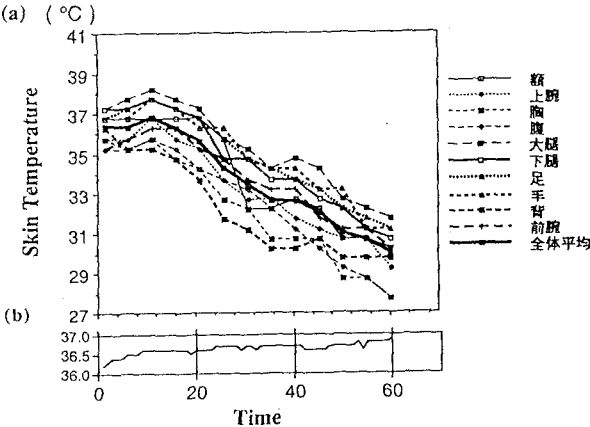
### 4. 結論 本実験より、以上の結論が得られた。

- 1) 皮膚表面温度は、皮膚の湿り度の増加に伴って低下する。この結果は、皮膚温の上昇によって湿り度や発汗量の促進を説明しようとする従来の生理学的知見と大きく異なる。
- 2) 代謝量に対する気象因子の影響は、実質上無視し得る。

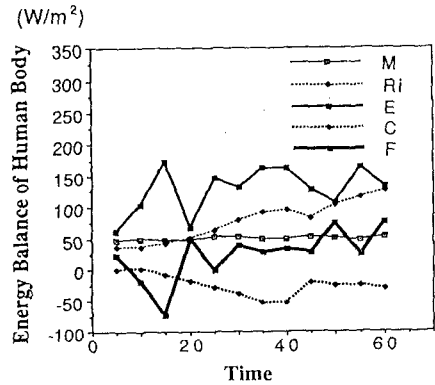
3) 暑熱環境の温熱感・不快感の増加は、皮膚温上昇とは対応していない。熱収支項の変化と対応づけていく必要がある。



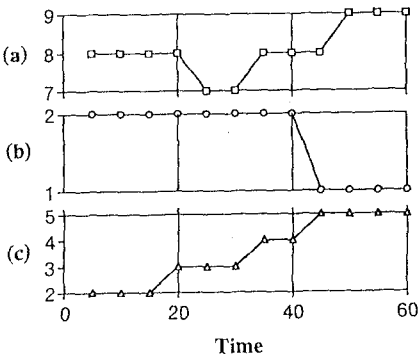
図－1 気象要因の時間変化



図－2 皮膚温及び体温の時間変化  
(a) 皮膚温 (b) 体温



図－3 人体の熱収支の内訳



図－4 被験者アンケートの結果  
(表－2 参照)  
(a) 温冷感 (b) 快適感  
(c) 皮膚の湿り感

謝辞 本研究は、不能育英会平成6年度の研究助成金の援助を受けた。代謝量測定装置は、マコト医科精機の五味直氏・ミナト医科学の山内忠行氏の好意により拝借した。また、山梨大土木環境工学科の五十嵐勝氏・切石史子氏には、過酷な実験の被験者を快く引き受けて頂いた。これらの方々に深く謝意を表します。

参考文献

- 1) 神田学・土屋信夫：微気象観測に基づいた屋外における人体の熱環境解析、土木学会文集、印刷中。
- 2) 石井昭夫・片山忠久・塩月義隆・吉水久雄・安部嘉孝：屋外気候環境における快適感に関する実験的研究、日本建築学会計画系論文報告集，386，pp.28～37，1988。
- 3) 宇多孝明・小俣篤・浅対淳：海岸の温熱環境と快適性の関係及び海岸の空間規模の評価法に関する研究，土木研究所資料，2939，1991。
- 4) 持田徹：新有効温度（ET\*）の成果と問題点、日本生気象学会誌，29，p.133，1993。
- 5) 温熱生理学：中山昭雄、理工学社、1981。