原 著

高温作業者の温熱ストレス発現予測 についての実験的研究

とくに作業衣服と作業強度および環境温度条件との関係

吉 野 賢 治*, 高 野 研 一*, 長 坂 彰 彦*
重 田 定 義**

AN EXPERIMENTAL STUDY ON THE PREDICTION OF HEAT STRESS OF WORKERS IN A HOT ENVIRONMENT

With Special Reference to the Relation between Wearing Suits,
Work Load and Environmental Temperature

Kenji YOSHINO,* Kenichi TAKANO,* Akihiko NAGASAKA*
and Sadayoshi SHIGETA**

Hardly any practical approaches have been made on prediction of appearance of heat-stress hazard, although basic studies have extensively been made, including various heat-stress indices. Hence, in the present paper, an applicational prediction equation is presented with regard to the permissible working time without heat-stress hazard on the basis of experimental results.

The purpose of this experiment was to examine the significant correlations between elevated rectal temperature, working conditions such as wearing suits, work load, and environmental temperature. The results obtained can be summarized as follows.

(1) A critical level of environmental temperature exists. When this level is exceeded, physiological indices such as rectal temperature rapidly increased. According to experimental results, the critical level was about 30°C and the heavier the work load, the lower was the critical level.

(2) Moreover, the heavier the wearing suit, the lower became the temperature level. This finding indicated that it was important to choose a suitable apparel under a hot environment in order to keep the workers safe from heat-stress hazard.

(3) A general prediction equation of raising the level of rectal temperature compared with that of initial condition was proposed by analysing each experimental condition (suit, work load, and environmental temperature) by use of second order multiple regression method. This equation showed that elevation of rectal temperature was assumed to be proportional to the logarithm of the working periods.

(4) The predicted values by this equation corresponded with the experimental values within $\pm 0.2-0.3^{\circ}\text{C}$, and the correlation coefficient was 0.96. This equation suggests that heavier suits elevated the rectal temperature about 2-3°C when the work load and environmental temperature were moderate.

(5) It is possible to predict the permissible working period by this equation. This may be applied to the working plan effectively. Appropriate working conditions can be chosen with regard to apparel, environmental temperature, and work load.

Key words : heat stress; work load; wearing suits

* 財団法人電力中央研究所ヒューマンファクター研究センター

** 東海大学医学部衛生学教室
昭和61年12月23日受付

* Human Factor Research Center, Central Research Institute of Electric Power Industry

** Department of Environmental Medicine and Occupational Health, School of Medicine, Tokai University
Received for publication, December 23, 1986

I. はじめに

日本産業衛生学会の高温基準¹⁾は、軽装備に近い衣服と必要に応じて飲水等を確保できる等が前提条件となっている。しかし、労作中に飲水の自由な確保や高温環境条件に応じて衣服装備の軽装備化等の対応を図ることが困難な職場において、同許容基準を遵守し現場で温熱ストレスの発現を可能な限り抑制するためには、事前に関連する負荷要因の特性を十分に考慮した上で管理する必要がある。

本論文は、衣服装備の熱的負担を考慮した温熱ストレスの発現防止対策の提案を目的として、作業衣服条件（3種類）、環境温度条件（4段階）、および労作負荷条件（3段階）の総計 36 負荷条件を設定し、直腸温および心拍数の経時的変動を測定対象にした被験者実験を行い、とくに直腸温の作業前後の上昇度から、温熱ストレス発現の可能性、およびストレス発現までの許容される作業時間を予測する実験予測式を作成し、その有効性と実用性について考察を行ったものである。

II. 実験方法

1. 被験者

被験者は、平均年齢 20.5 歳、身長 165.0 ± 4.0 cm、体重 75.0 ± 6.5 kg の成人男子 6 名を選定したが、いずれもボランティアであり本人の自発的な意志により実験を行った。なお、選定時に問診および負荷心電図等の臨床医学的検査で異常と認められた者は除外した。

2. 被験者に与えた温度条件、衣服装備条件および労作負荷条件

1) 環境の温度条件

実験の実施時期は、被験者を高温熱環境下作業に順化させることを目的として、夏期の比較的に暑い 7 月初めから 9 月末までの約 3 か月間を選定するとともに、完全無作為化法により、全期間に渡って、後述の 36 条件をランダムに組み合わせて実施した。また環境の温度条件は、人工気候室を利用し、 $20 \pm 1^\circ\text{C}$ （以下「 20°C 」という）を標準温度とし、 $25 \pm 1^\circ\text{C}$ （以下「 25°C 」という）、 $30 \pm 1.5^\circ\text{C}$ （以下「 30°C 」という）、および $35 \pm 1.5^\circ\text{C}$ （以下「 35°C 」という）の 4 段階を設定した。なお、相対湿度については、夏季の上述の期間での職場環境の測定データを基にして、すべての温度条件に共通の $65 \pm 5\%$ （以下「 65% 」という）の範囲に設定した。

2) 衣服装備条件

装備衣服については、一般社会で広く使用されている衣服生地の中より、シャツと股引を標準的な装備（以下

「S 装備」という）とし、その上に連ぎ服を 1 枚、2 枚と重ね着を経て、次に示すような特性を保有する合計 3 種類の衣服装備を供試衣服とした。

まず、熱伝達抵抗値 ($\text{m}^2 \cdot \text{K} / \text{W}$)、クロー値 (clo)、および水蒸気透過抵抗値 ($\text{m}^2 \cdot \text{mmHg} / \text{W}$) は、S 装備ではそれぞれ 0.021, 0.14, 0.210 である。

また S 装備に布製と紙製の連ぎ服を重ね着した装備（以下「T 装備」という）では、0.096, 0.62, および 0.264 である。

そして S 装備に布製と不浸透性のビニール製連ぎ服を重ね着した装備（以下「P 装備」という）では、0.062, 0.40, および 87.2 である。

3) 作業負荷条件

作業負荷としては、ステップ法に準拠した形式の作業負荷を採用した。すなわち一定の高さ (45 cm) および幅 (35 cm) をもつステップ台を、マイクロコンピュータで管理されたリズム速度で上下昇降することとし、標準的な負荷として、1 kg の重量物を背負い、ステップ速度 10 回/分（以下「軽労作」という）、3 kg で 15 回/分（以下「中労作」という）、および 5 kg で 20 回/分（以下「重労作」という）の 3 段階の負荷を被験者に与えた。

具体的な実験手順は、作業前安静 (30 分) — 負荷 (30 分) — 静止 (1 分) — 負荷 (30 分) — 静止 (1 分) — 負荷 (30 分) であり、測定はしないが作業後安静を 30 分とした。したがって、実験時間は 2 時間 32 分、測定時間は 2 時間 2 分であり、正味の負荷時間の合計は、1 時間 30 分とした。

3. 生理機能の測定

1) RMR の連続測定

著者らが開発した RMR の測定装置²⁾でステップ作業中の呼気ガス量および呼気ガス中酸素濃度を連続測定し、その両者の検出信号を被験者に携帯させた小型送信器にて、外部の受信器に伝送し、後述の著者らの算定式により $\dot{V}T$ を 60 秒に設定して、毎分当りの酸素消費量あるいは RMR を同システムのデータ処理・解析装置にて算出した。

2) 直腸温の連続測定

直腸温の測定方法は、作業開始前に灌腸によって直腸内の汚物を完全に除去した後、検定 1 級のサーミスタ温度センサ（宝工業製、0.1 型）を基にして、著者らが改造した小型センサ（平均直腸長の半分の約 7 cm、センサ周囲をシリコンゴムにて加工し、直径約 6 mm）を被験者自身によって直腸内へ挿入し、その後腹内圧や負荷作業動作によりセンサが外部へ押し出されるのを防止するため、各人に女性用のコルセット下着を着用させた。

Fig.1. Time sequential characteristics of heart rate with several wearing suits during three kinds of step-working tests in 20°C environment (Ave.±S.D.).

そして、連続的に検出された直腸温の情報を、上述のRMRと同様に送信・受信およびデータ処理装置を介して毎分当りの直腸内の温度を解析装置により時系列的に算出した。

3) 心拍数の連続測定

心拍数の測定方法は、被験者の心臓軸を挟むように、陰・陽2個の表面電極を装着し、両電極間に発生した心電図のR刺を検出し、上述のRMRと同様に送信・受信し、データ処理装置のカウンタで心電図のR刺パルスを計数し、解析装置により時系列な心拍数を算出した。

III. 結 果

1. 各種負担と心拍反応の変動特性

20°C環境中で、S装備およびP装備状態の、軽労作から重労作へと労作量を増大させた場合の心拍数の増加の様子を、Fig.1に示す。また、軽労作状態で、環境条件をしないで高温側にした場合の心拍数増加の結果

を、Fig.2に示すが、心拍数は、労作量の増大に応じた増加傾向を示し、また環境温度の上昇による影響を直接的に受けるが、衣服装備の軽重との関係は、環境温度が高く労作量が高いほど、大きく影響してくる傾向が顕著に認められた。

Table 1に、総計36条件下での被験者が作業を継続できた時間（以下「継続時間」という）と労働強度（以下「RMR」という）との関係を示すが、特徴的なことは、環境温度が高く、衣服が重装備化になるに従い、継続時間の短縮が発現し始め、また、労作負荷が重労作方向になるに従い、その短縮化の傾向が促進される関係が認められた。

Table 2に、作業終了直前の平均心拍数の結果を示すが、とくに継続時間の短縮が生じた条件下では、おおむね140回/分から最大170回/分前後の非常に高い心拍数が認められ、いずれも重ね着状態でのT装備やP装備条件下で発生している。

Fig. 2. Time sequential characteristics of heart rate with several types of suits during light step-working test in various environmental temperature (Ave.±S.D.).

ここで、労作の強さの指標である軽労作から重労作負荷条件下での酸素消費量 (X) と心拍数 (Y) との関係を、代表例として、30°C 環境中での衣服装備別にみた結果、おのおの $Y=0.03X+71.1$ (S 装備: $r=0.51$, $p<0.05$), $Y=0.05X+76.6$ (T 装備: $r=0.62$, $p<0.05$), および $Y=0.05X+86.4$ (P 装備: $r=0.61$, $p<0.05$) の関係式となる。

また、20°C から 35°C の温度条件下での酸素消費量 (X) と心拍数 (Y) との関係を、代表例として中労作時の衣服装備別にみた結果、おのおの $Y=0.07X+37.1$ (S 装備: $r=0.56$, $p<0.05$), $Y=0.05X+0.61$ (T 装備: $r=0.67$, $p<0.01$), および $Y=0.09X+0.34$

(P 装備: $r=0.67$, $p<0.05$) の関係式となり、両者の間にはおおむね対応関係にあることが確認された。

2. 各種負担と直腸温の変動特性

20°C 環境中で、S 装備および P 装備状態の軽労作から重労作へと労作量を増大させた場合の直腸温の作業開始からの上昇度 (以下「直腸温上昇度」という) の時系列的変化を、Fig. 3 に示す。S 装備時の変動は、労作負荷量の増大に対応して穏やかな上昇傾向が認められ、熱収支的な平衡状態が最後まで持続している。反面、P 装備で重労作を行った場合には、しだいに 1°C に接近するような好ましくない直腸温の上昇傾向がわずかでめられている。また、環境温度を 20°C から 35°C ま

Table 1. Continuous hours of work and average relative metabolic rate with several wearing suits during three kinds of step-working tests in various environmental temperatures.

(a) Continuous hours for working (hr : complete working period is 1.50)							(Ave.±S.D.)		
Suits Work	S type*			T type			P type		
	Light*	Moderate	Heavy	Light	Moderate	Heavy	Light	Moderate	Heavy
20°C*	1.50 ±0.00	1.50 ±0.00	1.50 ±0.00	1.50 ±0.00	1.50 ±0.00	1.50 ±0.00	1.50 ±0.00	1.50 ±0.00	1.50 ±0.00
25°C	1.50 ±0.00	1.50 ±0.00	1.50 ±0.00	1.50 ±0.00	1.50 ±0.00	1.50 ±0.00	1.50 ±0.00	1.50 ±0.00	0.99 ±0.09**
30°C	1.50 ±0.00	1.50 ±0.00	1.50 ±0.00	1.50 ±0.00	1.50 ±0.00	0.74 ±0.29**	1.08 ±0.24**	0.77 ±0.23**	0.57 ±0.14**
35°C	1.50 ±0.00	1.50 ±0.00	1.50 ±0.00	1.03 ±0.00**	1.13 ±0.15**	0.58 ±0.03**	0.53 ±0.12**	0.48 ±0.09**	0.46 ±0.09**

(b) Average relative metabolic rate									
20°C*	1.9	3.4	5.1	2.7	3.7	4.9	2.2	3.6	5.7
25°C	2.4	3.4	5.2	2.5	3.2	5.6	2.3	3.8	5.4**
30°C	2.3	3.9	5.8	2.5	3.9	5.3**	2.6**	4.2**	6.0**
35°C	2.8	3.9	5.7	2.6**	3.9**	4.7**	3.4**	4.8**	6.7**

* Standard experimental condition, ** The case of giving up halfway.

Table 2. Heart rate with several wearing suits during three kinds of step-working tests in various environmental temperatures (beat/min).

(Ave.±S.D.)									
Suits Work	S type*			T type			P type		
	Light*	Moderate	Heavy	Light	Moderate	Heavy	Light	Moderate	Heavy
20°C*	92.0 ±17.0	97.0 ±11.0	109.0 ±13.0	94.0 ±9.0	103.0 ±7.0	122.0 ±11.0	96.0 ±10.0	112.0 ±12.0	131.0 ±17.0
25°C	92.0 ±9.0	108.0 ±11.0	127.0 ±11.0	108.0 ±13.0	108.0 ±3.0	134.0 ±9.0	116.0 ±8.0	135.0 ±17.0	148.0 ±13.0**
30°C	104.0 ±16.0	116.0 ±1.0	126.7 ±7.7	112.0 ±12.0	129.0 ±7.0	160.0 ±11.0**	147.0 ±13.0**	148.0 ±20.0**	161.0 ±10.0**
35°C	115.0 ±13.0	134.0 ±2.0	151.0 ±6.0	141.0 ±8.0**	147.0 ±3.0**	163.0 ±10.0**	141.0 ±14.0**	155.0 ±15.0**	170.0 ±7.0**

* Standard experimental condition, ** The case of giving up halfway.

で上昇させた場合での軽労作時の直腸温への影響度を Fig.4 に示すが、P 装備の場合には、軽労作状態であっても、環境温度の上昇による影響を大きく受け始め、短時間に急増する現象が発現している。

Table 3 に、作業終了直前の直腸温の上昇度の結果を示すが、T 装備や P 装備での労作時の一部において、30 分から 60 分前後の労作時間帯にもかかわらず、1~2°C

の上昇度、すなわち、温熱ストレス発現の目安である 38°C を超過している事例が認められており、労作の継続が困難な状況であった事実と一致する。

ここで、30°C 環境中での軽労作から重労作負荷条件下での酸素消費量 (X) と直腸温 (Y) との関係を衣服装備別にみた結果、おのおの、 $Y=0.0002X+0.37$ (S 装備: $r=0.15$, $p>0.05$), $Y=0.0006X+0.37$ (T 装

Fig. 3. Time sequential characteristics of elevation of rectal temperature with several wearing suits during three kinds of step-working tests in 20°C environment (Ave.±S.D.).

Table 3. Elevation of rectal temperature after wearing several suits during three kinds of step-working tests in various environmental temperatures (degree).
(Ave.±S.D.)

Suits Work	S type*			T type			P type		
	Light*	Moderate	Heavy	Light	Moderate	Heavy	Light	Moderate	Heavy
20°C	0.05 ±0.16	0.08 ±0.07	0.33 ±0.02	0.11 ±0.13	0.45 ±0.01	0.65 ±0.08	0.35 ±0.01	0.54 ±0.12	0.84 ±0.10
25°C	0.07 ±0.10	0.34 ±0.21	0.50 ±0.15	0.41 ±0.22	0.32 ±0.19	0.81 ±0.37	0.58 ±0.27	0.70 ±0.17	0.80 ±0.06**
30°C	0.37 ±0.18	0.62 ±0.09	0.81 ±0.23	0.46 ±0.09	0.70 ±0.15	0.71 ±0.22**	0.81 ±0.15**	0.99 ±0.29**	0.83 ±0.23**
35°C	0.41 ±0.13	0.62 ±0.07	0.84 ±0.35	0.73 ±0.03**	0.74 ±0.05**	0.78 ±0.04**	0.90 ±0.17**	0.94 ±0.21**	1.74 ±0.30**

* Standard experimental condition, ** The case of giving up halfway.

備, $r=0.54$, $p<0.05$), および $Y=0.0015X+0.36$ (P 装備: $r=0.63$, $p<0.05$) の関係式となる。

また, 20°C から 35°C の温度条件下での酸素消費量 (X) と直腸温 (Y) との関係を示し, 代表例として中労作時

での衣服装備別にみた結果, おおの $Y=0.0023X+0.35$ (S 装備: $r=0.78$, $p<0.01$), $Y=0.0009X+0.36$ (T 装備: $r=0.34$, $p>0.05$), および $Y=0.0021X+0.35$ (P 装備: $r=0.71$, $p<0.01$) の関係

Fig.4. Time sequential characteristics of elevation of rectal temperature with several wearing suits during light step-working test in various environmental temperature (Ave.±S.D.).

式となり、両者の間にはおおむね対応関係にあることが確認された。

3. 直腸温の上昇予測式の作成

著者らは、直腸温の上昇度を予測することを目的として、今回の36負荷条件下で得られた全データを整理して、横軸(X軸)に労作時間 $\log(t)$ を取り、縦軸(Y軸)に直腸温上昇度をプロットすると、みかけの定常状態が成立するまでの過渡状態では、直腸温の上昇度 (ΔT_r) と作業継続時間 (t) との関係は、次の単回帰の実験式(1)ではば近似できることがわかり、これは、Wissler^{3,4)}らが、過渡状態においては直線近似できると指摘した理論的な解析結果とほぼ一致する。

$$\Delta T_r(S, T, M) = a \cdot \log(t+30) + b \quad (1)$$

ここで、

a, b : 実験値を基に、おのおのの条件ごとに単回帰式から求めた傾きと切片

t : 作業経過時間(分)

S : 衣服装備の種類 (S, T, P 装備に相当)

T : 環境温度 (20, 25, 30, 35°C の段階的)

M : 労作の強度 (RMR)

しかし(1)式は実験式そのものであり、予測条件が限定され、限られた条件しか適用できず、この実験式では、現場での実用性がほとんど認められないものといえる。

そこで、現場で測定される環境の温度条件、衣服条件、対象となる作業の平均 RMR 値をおおむね知ることにより、予定した作業時間後の直腸温上昇度をある程度の誤差範囲内で把握できる予測式を作成することを目的として、上述(1)式を、さらに着用装備ごとに次の(2)～(4)式のような一般式に展開した。

$$\Delta T_{rs} = f_s(T, m) \cdot \log(t+30) - g_s(T, m) \quad (2)$$

$$\Delta T_{rt} = f_t(T, m) \cdot \log(t+03) - g_t(T, m) \quad (3)$$

$$\Delta T_{rp} = f_p(T, m) \cdot \log(t+30) - g_p(T, m) \quad (4)$$

ここで、

ΔT_{rs} , ΔT_{rt} , ΔT_{rp} : S, T, P 装備時の直腸温の上昇度 (°C)

$f_s, f_t, f_p, g_s, g_t, g_p$: 予測式の傾き、切片に関する係数

T, m : 作業環境の温度、労作の強度 (RMR)

t : 作業経過時間 (分)

次に、装備条件、環境温度条件、労作の強度条件の相違に基づいて、実験値から上記の f と g の値を算出した。さらに、上記(2)～(4)式の係数である f や g と、実験条件である環境温度および RMR との関係を求めるため、次の(5)、(6)式で示す2次の重相関解析を行い、S 装備、T 装備、P 装備ごとにおおむねの係数決定数 (k_n, h_n) の値を求めた。

$$\begin{aligned} f_{s,t,p}(T, m) = & k_1 s_{t,p} \cdot T + k_2 s_{t,p} \cdot m \\ & + k_3 s_{t,p} \cdot T^2 + k_4 s_{t,p} \cdot m^2 \\ & + k_5 s_{t,p} \cdot T \cdot m \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} g_{s,t,p}(T, m) = & h_1 s_{t,p} \cdot T + h_2 s_{t,p} \cdot m \\ & + h_3 s_{t,p} \cdot T^2 + h_4 s_{t,p} \cdot m^2 \\ & + h_5 s_{t,p} \cdot T \cdot m \end{aligned} \quad (6)$$

これらの展開により、目的とする作業時間後における直腸温上昇度 (ΔT_r) は、最終的に、次の(7)式によって予測できることになる。

$$\Delta T_{rs,t,p} = f_{s,t,p}(T, m) \log(t+30) - g_{s,t,p}(T, m) \quad (7)$$

ここで、上述(7)式を用いて、各衣服装備に対応した最大 90 分まで連続的に作業を継続した場合における直腸温の上昇予測値と実験結果との関係のうち、35°C 環境中での代表例を、Fig.5 に示すが、おおむね $\pm 0.2 \sim \pm 0.3^\circ\text{C}$ の範囲内ではば一致していることが確認された。

また、代表例として、30°C 環境中における 30 分後、60 分後、そして 90 分後の直腸温上昇度の予測結果を、Table 4 に示し、また、実験値との相関関係を、Fig.6 に示す。

同結果によれば、直腸温上昇度は、環境温度や労作強度の大小に大きく依存することが明瞭となり、とくに、30°C 以上の温熱環境中で、P 装備で軽労作を行った場

Fig.5. Typical examples of predicted elevation of the rectal temperature compared with experimental data in the case of three kinds of step-working tests. (The case of 35°C environment.)

合には、最終的に $2 \sim 3^\circ\text{C}$ 前後の高い上昇度が予測されており、この結果は、今回の実験を途中で放棄した負荷条件とはば一致している。

4. 温熱ストレス発現までの作業時間の予測

実現場において、夏期の温熱環境下での作業員の安全を確保するためには、目的とする作業時間に対する直腸温上昇度を予測しておくことも必要であるが、それと並行して、作業員の直腸温がある温度に到達するまでに許容される作業時間（以下「許容作業時間」という）を、事前に予測できることも、実用的見地からみて重要な課題といえる。

そこで、直腸温等は、季節差や日差の影響により初期値や変動特性が微少ながら変化するため、それらのばらつきを考慮し、ある誤差範囲内で許容作業時間を予測することとした。すなわち、前述(7)式の左片の上昇度

Table 4. Predicted value of rectal temperature elevation with several wearing suits during three kinds of step-working tests in various environmental temperature.

a) Predicted rectal temperature after 30 min							(Ave. deg.)		
Suits Work	S type*			T type			P type		
	Light*	Moderate	Heavy	Light	Moderate	Heavy	Light	Moderate	Heavy
20°C*	—	—	0.017	—	0.163	0.451	0.170	0.175	0.403
25°C	0.021	0.163	0.197	0.028	0.271	0.518	0.056	0.153	0.471
30°C	0.130	0.271	0.305	0.291	0.149	0.623	0.271	0.459	0.868
35°C	0.165	0.307	0.340	0.449	0.608	0.769	0.815	1.049**	1.594**

b) Predicted value of rectal temperature after 60 min									
20°C*	—	0.087	0.191	0.051	0.260	0.620	0.356	0.364	0.551
25°C	0.123	0.284	0.395	0.163	0.391	0.770	0.262	0.478	0.873
30°C	0.265	0.434	0.554	0.383	0.630	1.027**	0.632	1.056**	1.659**
35°C	0.360	0.573	0.665	0.709	0.975	1.392**	1.467**	2.099**	2.910**

c) Predicted value of rectal temperature after 90 min									
20°C*	0.001	0.161	0.313	0.174	0.329	0.739	0.487	0.498	0.656
25°C	0.195	0.369	0.536	0.259	0.477	0.949	0.407	0.709	1.158**
30°C	0.360	0.549	0.730	0.499	0.779	1.314**	0.889	1.480**	2.220**
35°C	0.497	0.700	0.895	0.894	1.237**	1.835**	1.930**	2.812**	3.834**

* Standard experimental condition, ** The case of giving up halfway.

Fig.6. Comparison of elevation of rectal temperature measured in experiment and predicted values by Eq.(7) under various conditions (* $p < 0.01$).

(ΔT_r) を、温熱ストレス発現の目安としての上昇限界を、0.8、1.0 および 1.2°C の 3 種類に設定した。そして、右片の作業の RMR に 2、4、6 を、また、環境温度に 20°C から 35°C を入力し、予測ソフト搭載の携帯型計算機により許容作業時間 (t) を求め Fig.7 に示した。

同予測結果から、S 装備のような軽装備状態では、高温環境中で極重労作を長時間続けるような特殊な状況を除いては、温熱ストレスの発現は考えにくいものといえる。

そして、同一の環境温度と労作条件での許容作業時間は、着用する衣服装備が軽装備から重装備への移行に対応して、急速に短縮されており、衣服装備の熱特性の良否によって、許容作業時間に有意差 ($p < 0.01$) が生じることが明瞭に示されている。

IV. 考 察

暑熱環境中で働く作業者を温熱ストレスから防護し、熱中症等の健康障害の発生を可能な限り防止するための

Fig. 7. Estimated examples of acceptable working period until the rectal temperature exceed above 1.0 ± 0.2 degree by Eq. (7). — rectal temp. 1° up, ---- rectal temp. 0.8° up, - · - rectal temp. 1.2° up.

作業環境の温熱指標として、NIOSH⁹⁾ は、1973 年に、WBGT を最も望ましい温熱指標として推奨し、また ACGIH¹⁰⁾ や、OSHA⁷⁾ では、WBGT を温熱指標として採用している。

WHO⁸⁾ は、1969 年に、温熱ストレインの度合を表す生理指標として、直腸温、心拍数、水分喪失量（以下「発汗量」という）の 3 指標を掲げているが、とりわけ直腸温は、最も効果的に利用できる指標として勧告し、とくに重労働における長期間連日高温暴露時に、直腸温が 38°C を超えないことを勧告している。

日本においては、1982 年に、日本産業衛生学会（以下「産衛学会」という）が、温熱ストレスによる好ましくない生理反応の発現を防止することを目的として、許容温度条件と（WBGT 値、CET 値）と、その環境中で許容される作業の RMR の区分とを 5 段階に対応させ、かつ 1 時間連続、または 2 時間断続作業等の作業時間を考慮した職場における高温の許容基準の改訂案を発表し、1983 年に産衛学会は、これを許容基準¹¹⁾ として勧告した。

しかし、産衛学会の許容基準を実際の作業現場で具体的に運用するためには、肝付⁹⁾ らが指摘するように、作業環境の温度測定はもちろんのこと、作業の RMR を知る必要がある。また、対象とする作業の RMR を知るためには、作業姿勢や動作の観測から間接的に推定するか、またはダグラスバック法や著者らが提案した電中研式モニタリング手法等²⁾ により、作業時間と対応させて RMR を実測する必要がある専門的な知識と経験を要する。

また、同基準の環境温度条件と許容される RMR との

関係は、策定要綱や適応内容の遵守が前提条件であるが、このうち、温熱ストレスの発現防止に重要な要因となる、適当な水分・塩分の補給や、夏季の普通の作業衣服条件などの条件を容易に確保できない職場では、上述のストレス要因の影響度について事前に十分な調査・検討を行い、予見される事態に即応した管理・運用を図ることが、産衛学会の同許容基準を遵守する上で重要なことである。

温熱環境条件下作業時の直腸温の変動に関する研究は、以前から多くの研究者らによって行われてきたが、とりわけ、Nielsen¹⁰⁾ らは、直腸温の変動する水準が作業負担のみで支配される温度範囲（以下「不感領域」という）が存在し、その不感領域は大体 $5 \sim 35^\circ\text{C}$ の範囲であること、そして、その領域を超えると環境温度に対応して急速に亢進する等の変曲点が存在することを指摘し、その後 Lind^{11,12)} や Wyndham¹³⁾ らによっても確認されている。

今回の著者らの実験は、産衛学会の指摘するように、被験者が温熱環境に十分に順化された状況下で実施することを考慮して、夏季の暑熱時期を選定し、日常の実験は同期間を通じてすべてランダムに行った。

その結果、直腸温等の諸生理機能は、労作負荷量が重労働側へ、また環境温度の高温側への上昇に対応して亢進する傾向が認められた。とくに、4 種類の環境温度のうち、 30°C 以上の温度条件の場合には、比較的に低い労作量でも諸生理機能に亢進反応が発現する傾向が多く認められており、渡辺^{14,15)} が、また鈴木¹⁶⁾、三浦¹⁷⁾ らが、環境温度、あるいは有効温度（ET＝感覚温度）などで、大体 $28 \sim 31^\circ\text{C}$ 前後になると、諸生理機能の反応

に大きな変化が生じることを実験的に確認した事実にはほぼ一致している。

全体の傾向として、環境温度が高く、労作負荷量が大きく、かつ衣服装備が重装備になるにつれて、温熱ストレスの発現が早まる傾向が明瞭であるが、細部にわたって検討すると直腸温の上昇度が 1°C を超過するような亢進反応の発現に係わる不感領域は、労作負荷量が重労作側に増大するにつれて、しだいに低い温度領域に移行する傾向が認められ、さらに、衣服装備の重装備化によって、この傾向が強まる関係にあることが明らかとなり、Nielsen¹⁰⁾らが指摘した傾向にはほぼ一致している。

今回の実験では、標準装備としての軽装備から重装備に該当すると思われる3種類の作業衣服を選定したが、作業衣服の特性の良否が想像以上に大きく影響することが認められた。たとえば、同程度の労作量や環境温度下でも、衣服の特性によって、引き起こされる生理反応の程度に有意($p < 0.05$)差が認められている。とくにP装備で代表されるような、衣服内での熱収支の平衡状態を阻害する衣服材料の場合には、 25°C 環境中の中労作時において、直腸温が 1°C に近い上昇度を示すという、通常の一般作業時では到底見られない大きな値が観測されている。

一方、Rowlandsら^{18,19)}が、作業衣服着用時の直腸温の変動に関する研究を実施しており、著者らのP装備に近いPVC製非換気型と換気型の衣服を用いて、ほぼ 30°C 環境中で500 kcal/hrの労作負荷実験を行い、換気型衣服の 0.42°C に対して非換気型衣服は約 0.8°C の直腸温の上昇度が見られたと報告し、またRogang²⁰⁾らは、 $20\sim 30^{\circ}\text{C}$ の環境中で、非換気型のPVC製衣服を着用し、300 kcal/hrの労作負荷実験を行った結果、ほぼ 25°C 環境中で短時間のうちに、約 0.9°C 前後の上昇度となり、着用衣服の衣服気候特性の良否によって、明らかに 38°C を超過する場合は十分ありうる事実を報告している。一方、Gaggeら²¹⁾は、同じ環境温度下であっても衣服の特性によって、おのおの有効温度や感覚温度が異なることをノモグラムを作成して指摘している。すなわち、被験者の主観的判断を基調とした有効温度や新有効温度(ET^*)などを発展させて、環境温度と着衣量とを変数とした新標準有効温度指標(SET)によれば、上述の 30°C 環境温度下での有効温度は、S装備着用時では約 27°C 前後であり、T装備では約 30°C 前後と評価されるが、この評価結果は、環境温度 30°C 中でのT装備状態で徐々に亢進反応が発現し始めたことにはほぼ一致している。また、P装備は不透湿性衣服材料であるため、有効温度 30°C よりはるかに高いものと評価される

ことから、衣服が軽装備から重装備になるに伴い、変曲点がしだいに低温度側に転移するような今回の実験結果を理解しうるものといえる。

一方、心拍数を含む循環機能の変動に関する研究は、Mostardi²²⁾、Williams²³⁾ら、また長時間高温暴露時の循環機能への影響についての勝浦²⁴⁾、Dillら²⁵⁾の報告によれば、心拍数は直腸温上昇が亢進状態に至る以前に環境温度の直接的影響を受け、150回/分以上まで上昇することを指摘している。とくに三浦²⁶⁻²⁸⁾、佐藤²⁹⁾、Atterborn³⁰⁾らは、高温下での毎分心拍数の怒限度を150(心拍増加率:210%)としており、これを超えると心拍数は急増することを指摘している。また、橋本³¹⁾、酒井³²⁾、佐藤³³⁾、桑田³⁴⁾らは、労作負荷量と心拍数との間にはほぼ完全な相関関係が成立することを指摘しているが、今回の実験結果においても両者の間にはほぼ相関関係が認められ、また心拍数と直腸温との間にも、Kamon^{35,36)}らが指摘したような相関関係が、ほぼ認められている。

とくに、衣服装備着用時の心拍数等の循環系機能に及ぼす影響については、Hemming³⁷⁾、Brown³⁸⁾らが、PVC製の数種の不浸透性の衣服装備着用時の被験者実験を行い、負荷開始後15分前後で非着用時に対して数10%の増加率(170~180回/分)となることを報告している。著者らの衣服着用時の一部においても、短時間のうちに150回/分をはるかに超えるような有意($p < 0.05$)な心拍数増加が観測されており、Anderson³⁹⁾らが指摘した年代と心拍数との関係を考慮しても、明らかに問題が残る心拍数といえる。

一般的に、裸体時の皮膚表面から環境側に放散される総熱量は、皮膚温と環境温度との差、および皮膚と環境の水蒸気圧差でほぼ支配されるが衣服着用の場合には、Woodcock⁴⁰⁾、Blockley⁴¹⁾らの理論により、基本的には、衣服の熱抵抗値($\text{m}^2\cdot\text{K}/\text{W}$)と水蒸気抵抗値($\text{m}^2\cdot\text{mmHg}/\text{W}$)が小さいほど、着用者の皮膚表面からの環境への放散熱量が大きくなる関係にある。今回の供試衣服装備を熱特性から比較すると、II章の実験方法の項でも述べたが、T装備とP装備の熱抵抗値は、おのおの 0.096 と 0.062 ($\text{m}^2\cdot\text{K}/\text{W}$)とほぼ同じにも関わらず、両者の間における生理機能の亢進反応の発現時期や直腸温の上昇度に相当の差が生じている。この理由として考慮できるのは、T装備の水蒸気抵抗値の 0.264 に対して、P装備が $87.2\text{ m}^2\cdot\text{mmHg}/\text{W}$ と100倍近い特性差がある。著者らは今回の実験において、環境の相対湿度を現場測定結果を判断して $65\pm 5\%$ としたが、今回のように温熱環境下での高度な発汗作用を伴う状況では、衣服内の湿度は90%以上⁴²⁾と推定される。

したがって、衣服内と環境側の両者の間には非常に大きな熱的勾配が生じることになり、その勾配差に比例して熱放出が行われたことになる。ここで、本実験条件に比べて、環境の相対湿度が 65% より高い場合には、人体から衣服を介して環境への熱放出は減少することになり、反面、低い場合にはさらに促進される方向に作用するため、衣服着用時の生理反応への影響度は、労作により生じる体内産生熱を発汗作用等を促進させ、体外や衣服装備外へ蒸散させる指標となる水蒸気抵抗値の大小に強く支配されるものといえる。

このことから、著者らの P 装備に代表されるような不透透製の衣服材料は、発汗作用による体温調節機能を完全に阻害する方向に作用するため、三浦ら^{43,44}が指摘するように、温熱環境中での衣服装備を選定する場合には、衣服材料の熱特性等を十分に考慮して選定しないと、熱中症等に発展する可能性が高いといえる。

一方、温熱ストレスの発現の指標として直腸温の上昇度を予測する研究としては、Givoni⁴⁵、Dayal⁴⁶らの軽装備に近い条件下での心拍数からの予測研究や、Givoni⁴⁷、Schlegel⁴⁸らの S 装備に近い衣服装備で高温環境下における休憩状態での女性被験者による実験を行い、労作終了後における温熱ストレスの発現の有無の予測研究等が行われている。

しかし、著者らが関係している職場では、(1)労作中の生理機能の測定が困難、(2)S 装備に近い状態での作業は非常にまれな状況、(3)労作中での自由な飲水の困難、(4)対象者が男子に限定、等の制約条件があり、これまでのいずれの研究例も実用的な条件を考慮した予測手法例は見当たらない。

一方、許容作業時間の予測研究については、Goldman⁴⁹らが、有効温度⁵⁰、P4SR⁵¹、WBGT⁵²等の各種温熱評価指標に対応させて高温環境下での耐用時間の予測式を提案し、環境温度条件と許容作業時間との関係は、両対数表示で直線近似となる等の、著者らの解析結果に近い予測式の提案をしているが、これらの予測式は、軽労作以下の休憩状態下で、かつ衣服装備条件が考慮されていない等の実用的な問題が残る。また、Kamon⁵³らは、Belding⁵⁴らが提案した Heat Stress Index 指標の生物熱方程式を数式化して、作業現場で直接的に温熱ストレスの大小や許容作業時間をポケット計算機を使用して算定する手法を提案しているが、著者らが前述した条件を考慮したような、直腸温上昇度に応じて許容作業時間を予測する実用的な研究とは異なる。

養島ら⁵⁵は、日常的な直腸温の変動値について、数日反復測定での直腸温は平均 37.06℃ 前後の値を示し、昼

間帯が 37℃ 以上になり、就寝帯が 37℃ 以下となる傾向にあり、一日の動揺範囲が 0.92℃ 前後になると指摘している。このため著者らは、昼間帯での労働時の直腸温がいずれの場合にも 38℃ を超過する状況を考慮し、直腸温が $1 \pm 0.2^\circ\text{C}$ 上昇するまでの許容作業時間の範囲を予測した。同予測結果から、容易に S 装備のような軽装備への転換が困難な職場においては、環境温度を下げるか、重労作から軽労作へと改善する等の対策の必要性が明らかとなった。

一方、たとえば、RMR6.0 で約 50 分間の許容作業時間(約 1℃ 上昇)を確保できる環境温度は、T 装備では約 28.7℃ (湿度 65%, WBGT: 約 24.8℃) となり、P 装備では約 25.9℃ (WBGT: 約 22.0℃) となり、T 装備と P 装備着用時の抑制すべき温度差は約 3℃ (WBGT: 約 3℃) と評価される。AIHA の指針⁵⁶によれば、著者らが供試した T 装備のような「通風の悪いジャケットまたは防護服」に該当する場合には、正常な衣服装備時の WBGT 値より 2℃ 程度下げ、また、P 装備のような「完全密閉スーツ」に該当する場合には、5℃ 程度低く抑制する等の対策を指摘しているが、両衣服装備間の WBGT 差は約 3℃ と評価され、著者らの供試衣服の温度差に一致している。

ここで、AIHA の「正常な衣服装備」と著者らの軽装備としての「S 装備」の同等性や、AIHA の労作の大小に無関係に一律な WBGT 補正などの前提条件の違いがあるが、一連の研究結果を勘案すると、ほぼ一致した傾向が認められ、本研究の妥当性が示唆されたものと考ええる。

V. 結 語

高温環境下で働く作業員の温熱ストレスの発現を防止するための対策の提案を目的として、衣服装備を 3 条件、湿度一定で気温 4 条件、また、労作を軽、中、重労作の 3 段階に設定し、夏季の暑熱に十分に順化した状態での総計 36 条件下の被験者実験を行い、各種負荷条件と温熱ストレスの発現の有無とその程度について検討するとともに、現場で測定した温度条件や労作条件等を入力することにより作業開始前に、経時的な直腸温の上昇度の予測や、目標とする直腸温上昇までに確保できる許容作業時間の予測等について検討した。本研究で明らかとなったことは、以下のとおりである。

(1) 直腸温等の生理指標の急増する水準が、労作負荷のみで支配される不感領域が存在し、その場合の変曲点が大体 30℃ 前後であること、また、その不感領域は労作負荷の重労作側への移行につれてしだいに低い領域に

移行する現象が見られた。

(2) 衣服装備の重装備化に伴い、その不感領域の低温側への移行現象がさらに強まることが確認され、高温熱環境下作業時に使用される衣服装備の選定に際しては、衣服装備の熱的特性を十分に考慮することが望ましいといえる。

(3) 環境温度条件、労作条件、および衣服装備条件と直腸温上昇度との関係を、2次の重相関解析手法を用いて評価し、実験予測式を提案した。同予測式では、直腸温上昇度は作業継続時間の対数とほぼ比例関係にあることを実験的に確認した。

(4) 同予測式を用いて、経時的な上昇度を予測した結果、実験値との相関は、 $\pm 0.2^{\circ}\text{C}$ 前後の範囲内ではほぼ一致し、環境温度と労作条件が同程度であっても、衣服装備条件によって、 $2\sim 3^{\circ}\text{C}$ 程度の上昇度と推定された。

(5) 温熱ストレス発現までの許容作業時間がある程度の誤差を認めた上で予測した結果、許容作業時間は、衣服条件、環境条件および労作条件等の負荷要因にほぼ支配され、とりわけ、衣服の熱的特性の良否が非常に大きな生体負担になることを具体的に指摘した。

本研究によって、衣服装備を容易に軽減することが困難な職場においても、環境温度や労作条件のいずれかの要因を、人間工学的配慮によって改善することにより、温熱ストレスの発現防止がある程度容易になり、産衛学会の基準を遵守する際の一助になるものと考えられる。

文 献

- 1) 日本産業衛生学会. 高温の許容基準. 産業医学 1986; 28: 224-226.
- 2) 吉野賢治, 高野研一, 重田定義. 無拘束エネルギー代謝率リアルタイムモニタリングシステムの開発と性能評価. 産業医学 1985; 27: 390-399.
- 3) Wissler EH. Steady-state temperature distribution in man. *J Appl Physiol* 1961; 16: 734-740.
- 4) Wissler EH. A mathematical model of the human thermal system. *Bull Math Biophys* 1964; 26: 147-166.
- 5) NIOSH. Criteria for a recommended standard: occupational exposure to hot environments. U.S. Department of Health, Education and Welfare, Health Services and Mental Health Administration. National Institute for Occupational Safety and Health, 1972.
- 6) ACGIH. Threshold limit value for chemical substances and physical agents in the workroom environment with intended changes for 1976, Threshold limit values, heat stress. 58-65.
- 7) OSHA. Heat stress standard. OSHA's Advisory Committee Recommendations National Safety News, June 1975: 89-94.
- 8) Report of WHO Scientific Group. Health factors involved in working under conditions of heat stress. Geneva: WHO Tech Resp 1969: No. 412.
- 9) 肝付邦憲. 職場における高温の許容基準案 (昭和57年度日本産業衛生学会の暫定値) に求められる測定法の解説. 労研維持会資料, 1983: No. 984.
- 10) Nielsen M. Die Regulation der Körpertemperatur bei Muskularbeit. *Scand Arch Physiol* 1963; 18: 57-60.
- 11) Lind AR. Physiological criterion for setting thermal environmental limits for everyday work. *J Appl Physiol* 1963; 18: 51-56.
- 12) Lind AR. Physiological criterion for setting thermal environmental limits for everyday work. *J Appl Physiol* 1963; 18: 51-56.
- 13) Wyndham CH, Bouwer WV, Devine MG et al. Physiological responses of African laborers at various saturated air temperature wind velocities and rates of energy expenditure. *J Appl Physiol* 1952-53; 5: 290-298.
- 14) 渡辺昭彦. 作業環境と労働負担. 労働科学 1979; 34: 49-55.
- 15) 渡辺昭彦, 肝付邦憲, 三浦豊彦. 炭鉱坑内温度基準についての実験的考察. 労働科学 1975; 5: 631-646.
- 16) 鈴木武夫, 石川清文, 川森正夫. 高温環境下の生体反応について. 労働科学 1957; 33: 243-249.
- 17) 三浦豊彦, 木村菊二, 富永洋志夫ほか. 外気温を考慮した夏季の冷房の至適温度に関する実験的研究. 労働科学 1964; 40: 295-324.
- 18) Rowlands RP. Physiological conditions in pressurized suits: evaluation and control of thermal stress. Rome: Proceeding of the first International Congress of Radiation Protection, 1966.
- 19) Rowland RP. Physiologically safe working conditions for men wearing pressurized suits. *AHSB (RP) R 70*, 1966.
- 20) Rogang E. An evaluation of the tolerance to heat of man working PVC clothing and air line respirator. United Kingdom Atomic Energy Association PG Rep 1968: 512.
- 21) Gagge AP, Stolwijk JA, Nishi Y. An effective temperature scale based on a simple model of human physiological regulatory response. *ASHRAE Trans* 1971; 77: 247-262.
- 22) Mostardi R, Kubica R, Veicsteinas A et al. The effect of increased body temperature due to exercise on the heart rate and on the maximal aerobic power. *Eur J Appl Physiol* 1974; 33: 237-245.
- 23) Willams CG, Bredill GA, Wyndham CH et al. Circulatory and metabolic reactions to work in heat. *J Appl Physiol* 1962; 17: 625-638.
- 24) 勝浦哲夫. 長時間高温暴露による循環機能水準の変化について. 日本人間工学会講演文集 1979; 20: 36-39.
- 25) Dill DB et al. Physical performance in relation to external temperature. *Arbeitsphysiologie* 1931; 3: 508-518.
- 26) 三浦豊彦. 日本の高温作業. 公衆衛生 1954; 16: 52.
- 27) 三浦豊彦. 高温環境下の労働が循環機能に及ぼす影響について—高温の怒限度についての考察—. 労働科学 1952; 28: 727-738.
- 28) 三浦豊彦, 森岡三生, 木村菊二ほか. 高温作業者の生理機能に及ぼす熱練の影響. 労働科学 1956; 31: 74-81.

- 29) 佐藤徳郎. 高熱労働者の作業による身体的変化. 産業医学 1949; 2: 209-213.
- 30) Atterbom HA, Massman PB. Physiological effects on work performance of vapor-barrier clothing and full-face respirator. J Occup Med 1978; 20: 45-52.
- 31) 橋本邦江. 定常状態の成立条件に関する研究 (第1報) 動的動作における脈拍数の定常化の条件について. 労働科学 1934; 31: 238.
- 32) 酒井 郎. 動的作業に於ける定常状態の成立限界を決定する指標について. 昭和医学会雑誌 1954; 15: 9.
- 33) 佐藤繁三. 労働時における運動酸素消費量について. 体力科学 1959; 8: 123-131.
- 34) 桑田百代, 杉浦徳美. 家事労働の負担について (エネルギー代謝率と心拍数増加率との関係). 家政学雑誌 1970; 21: 406-411.
- 35) Kamon E, Belding H. Heart rate and rectal temperature relationship work in hot humid environments. JAP 1971; 31: 472-477.
- 36) Kamon E, Belding H. Relationship of physiological strain to change in heart rate during work in the heat. AIHA Assoc J 1972; 701-708.
- 37) Hemming AA, Paul BM. Physiological effects on performance of vapor-barrier clothing and full-face respirator. J Occup Med 1987; 518-532.
- 38) Brown JR. Impermeable clothing and heat stress. Med Serv J 1965; 518-532.
- 39) Anderson KL, Shephard RJ, Denolin H, et al. Fundamentals of Exercise Testing. WHO, 1971.
- 40) Woodcock AH. Moisture transfer in system, Part I. Textile Res J 1962; 32: 628-633.
- 41) Blockley WV. NASA-CR-65260, 1965.
- 42) 和田 脩, 武田俊一, 木村明夫. 衣服の着心地 (水分特性) に関するコンピュータとシミュレーション. 繊維学会誌 1983; 39: 25-33.
- 43) 三浦豊彦, 森岡三生, 木村菊二ほか. 熱ふく射の生体に及ぼす影響 (第I報). 労働科学 1956; 32: 610-619.
- 44) 三浦豊彦, 森岡三生, 木村菊二ほか. 熱ふく射の生体に及ぼす影響 (第II報). 労働科学 1957; 38: 595-603.
- 45) Givoni B, Goldman RF. Predicting heart stress rate response to work, environment, and clothing. J Appl Physiol 1973; 34: 201-204.
- 46) Dayal D, Ramsey JD. A heat rate index for assessing heat stress. Congr Int Ergonomics Assoc 1976; 6: 537-547.
- 47) Givoni B, Goldman RF. Predicting rectal temperature response to work environment, and clothing. J Appl Physiol 1972; 32: 812-822.
- 48) Schlegel RE. Application of a predictive core temperature model to heat stress experimentation. Human Factors Soc Annu Meet 1980; 24: 377-381.
- 49) Goldman PF, Green EB, Iampietro PF. Tolerance of hot, wet environments by resting men. J Appl Physiol 1965; 20: 271-277.
- 50) Houghton FC, Yaglou CP. Determining lines of equal comfort. ASHVE Trans 1923; 29: 163-176, 361-384.
- 51) McArdle B, Denhan W, Hollong HE et al. The prediction of the physiological effects of warm and hot environments. Med Res Council 1947; Rep. No. RNP: 47/391.
- 52) Yaglou CP, Minald D. Control of heat casualties at military training centers. Am Med Assoc Arch Ind Health 1957; 6: 302-316.
- 53) Kamon E, Ryan C. Effective heat strain index using pocket computer. Am Ind Hyg Assoc J 1981; 42: 611-615.
- 54) Belding HS, Hatch TF. Index for evaluating heat stress in term of resulting physiological strain. Heat Pip Air Cond 1955; 27: 129-136.
- 55) 養島 高編. 日本人人体正常数値表. 東京: 技報堂, 1958: 195-196.
- 56) AIHA. Abbreviated guidelines for heat stress exposure. AIHAJ, 1978.

著者への通信先：吉野賢治，〒201 狛江市岩戸北 2-11-1 電力中央研究所ヒューマンファクター研究センター Reprint requests to Human Factor Research Center, Central Research Institute of Electric Power Industry, Iwato-Kita 2-11-1, Komae, Tokyo, 201 Japan (K. Yoshino)