

熱帯医学研究用環境制御実験装置

小坂光男・大渡伸・井元孝章
土屋勝彦・岡本義人・彭福春
小野哲郎*

長崎大学熱帯医学研究所疫学部門

The Application of Environmental Control Chambers for Research in Tropical Medicine. Mitsuo KOSAKA, Nobu OHWATARI, Takaakira INOMOTO, Katsuhiko TSUCHIYA, Yoshito, OKAMOTO, Fu-Chun PENG, and Tetsuro ONO (Department of Epidemiology and Environmental Physiology, Institute for Tropical Medicine, Nagasaki University)

Abstract: Two environmental control chambers (A and B) designed specifically for the study of the effect of thermal environment on man's physiological responses (A-chamber) and animal's thermal acclimation (B-chamber) have been constructed in the Institute for Tropical Medicine, Nagasaki University in April 1980. The available working space of each chamber is 52.5m³ (4.30×4.80×2.54m). The four principal environment factors affecting the human body which can be studied using these chambers are air temperature (A: -10°C to +60°C, B: +5°C to +60°C), humidity (both A and B: 30 to 95%), air movement (both A and B: less than 1 m/sec) and illumination (both A and B: 0 to 1000 Lux). Each of these factors can be controlled independently during any investigation of thermoregulatory responses to a thermal environment. In order to test the performance of two chambers, experiments on the physiological responses of rabbits to heat and cold stress were performed. The specifications for the control of these chambers and some modifications were discussed in this paper..

Tropical Medicine, 22(2), 127-136, June, 1980

はじめに

昭和52年7月より当疫学部門では環境適応の概念に立脚して、自然環境条件変化が生体活動に及ぼす影響やその量的相関を究明し、熱帯医学研究の分野に基礎資料を提供すべく、環境生理学的実験手法を用いて暑熱順化の形成過程や体温調節機序に関する研究^(1,2)を推進している。これらの研究目的を達成するために必須であり、研究開始当初からその設置が強く要望されていた環境制御装置(人工気象室)

が本年4月、当熱帯医学研究所内に完成した事は今後、本研究の進展に寄与する所が大きいと信ずる。

人体実験用人工気象室

本邦に於ける、この種の環境制御装置の設置に関する歴史は、昭和30年前後から二・三の大学や研究機関において関心が高まり、特に環境生理学や生気象学・環境工学分野の研究の推進役として、京都府立医科大学・名古屋大学医学部⁽³⁾では人体の発汗の研究や人体の暑熱・寒冷適応能力の研究、名古屋

*長崎大学医学部学生
長崎大学熱帯医学研究所業績 第1,005号
Received for publication, May, 30, 1980

大学環境医学研究所・防衛庁航空医学実験隊では低圧低温槽、遠心力発生装置などを備えて①航空事故防止を目的とした人間の適性や生理学的、心理学的行動能力限界に関する研究や②人体に加える衝撃、振動、空間識の研究、③航空医学・心理学に対する電子計算機を活用した開発研究所など供されていた^(4,5)。一方、アメリカのイエール大学・医学部附属の J. B. Pierce 研究所⁽⁶⁾ や西ドイツのマックス・プランク研究所の Kerckhoff 研究所にも、最も古いものでは昭和10年代に、改造されたものは日本と同じく昭和30年頃、さらに温湿度制御の可能な人工気象室は昭和48年頃に完備し、暑熱ストレスと快不快感に関する感覚応答や労働衛生、さらに温熱刺激に対する生体・心理反応などについての実験研究が進展していた⁽⁶⁾。

昭和55年の今日、本邦においても環境制御装置を附設している大学は多く、また装置の規模や気象因子の制御範囲や精度にも長足の進歩・改善がある。例えば、九州大学温泉治療学研究所⁽⁷⁾、九州芸術工科大学、産業医科大学、名古屋大学環境医学研究所などに新設・改造・附設された環境制御装置は圧力制御のできる環境シミュレーターであり、予算規模も通常の人工気象室の数倍にも及ぶ大型装置である。今般、文部省の特別設置として長崎大学熱帯医学研究所に新設された環境制御装置は予算的に小規模であるので圧力制御はできないが、既存のこの種の装置としては最も改良されたもので、同時期に特別設備として新規納入されたデータ処理システム(ATAC 450)との連繫において熱帯医学研究の新鋭機器として本研究目的の達成に拍車をかける事は確かである。本論文ではこれら二つの新設装置の紹介をかねて、両者を組み合わせて得られた熱帯医学研究の基礎的実験資料を発表する。

新 設 設 備

今回、長崎大学熱帯医学研究所に設置された環境制御装置は、(Ⅰ)人体用環境制御実験室と(Ⅱ)動物用環境制御実験室の2室からなる。

人体用環境制御実験室は、主として、ヒトや動物を用いた温度刺激実験に供し、動物用環境制御実験室は上記以外の使用目的として暑熱・寒冷順化動物作成を考えている。二つの環境制御実験室の配置図は図1に示す通りである。両実験室の外部には各種

の生体反応測定装置が配置されており、これらには多用途測定装置、脳波計、電気刺激装置、電磁血流計等があり、測定した脳波、心電図、筋電図、ニューロン・インパルス、体温、血圧、血流量、呼吸その他の各種反応指標をデータ・レコーダに収録する。データ処理装置(ATAC 450)では、これ等データの統計処理を行い、シリアルプリンタ、X-Yプロッタにて出力する。さらに、このデータ処理装置はアナログ信号を直接入力することが可能でありオンラインリアルタイム処理が出来る点が特長である。

環境制御実験装置の設計条件は表1に、又計装機類については表2に夫々示してある。これ等の条件を満たすため、環境実験室の主な装備として、

①断熱材：発泡硬質ウレタン

90^m/mt (0.022Kcal/H°Cm²)

②冷凍機：人体用

冷凍能力 1,900Kcal/H

冷媒 フロン12

台数 9台

動物用

冷凍能力 3,800Kcal/H

冷媒 フロン22

台数 5台

③電気加熱器：20KW

④加湿器：蒸気加湿器 10KW

⑤除湿器：冷却除湿方式

⑥照明ランプ：200W×20 スライダック連続可変

⑦吹出し、吸込み：天井全面吹出し、壁一面吸込みなど①～⑦の各種機能を備えている。

人体用と動物用環境実験室の設計条件の主な違いは、第1に、前者は、生体を一定温・湿度に暴露する目的以外に、急激な温度・湿度変化を生体刺激として用いるため、下限温度を-10°Cとし、温度条件変化に要する時間を20°C→-10°C/Hに設計した。後者の動物用環境実験室では、上記の使用目的に、さらに、暑熱・寒冷順化動物作成の目的から、変温時間及び下限温度を表1のごとく設定した。第2は、動物用環境実験室では照度のプログラム制御が出来る点である。暑熱・寒冷順化動物作成のため、数週間に亘る連続運転中、明暗の日内変化をプログラム制御にする必要がある。かくして、動物用環境実験室では温度・湿度・照度のプログラム制御を行ない時間生物学的研究も可能となる。このプログラム制御には光電式プログラム設定器が使用されている。設定法は、温・湿度目盛の記されている

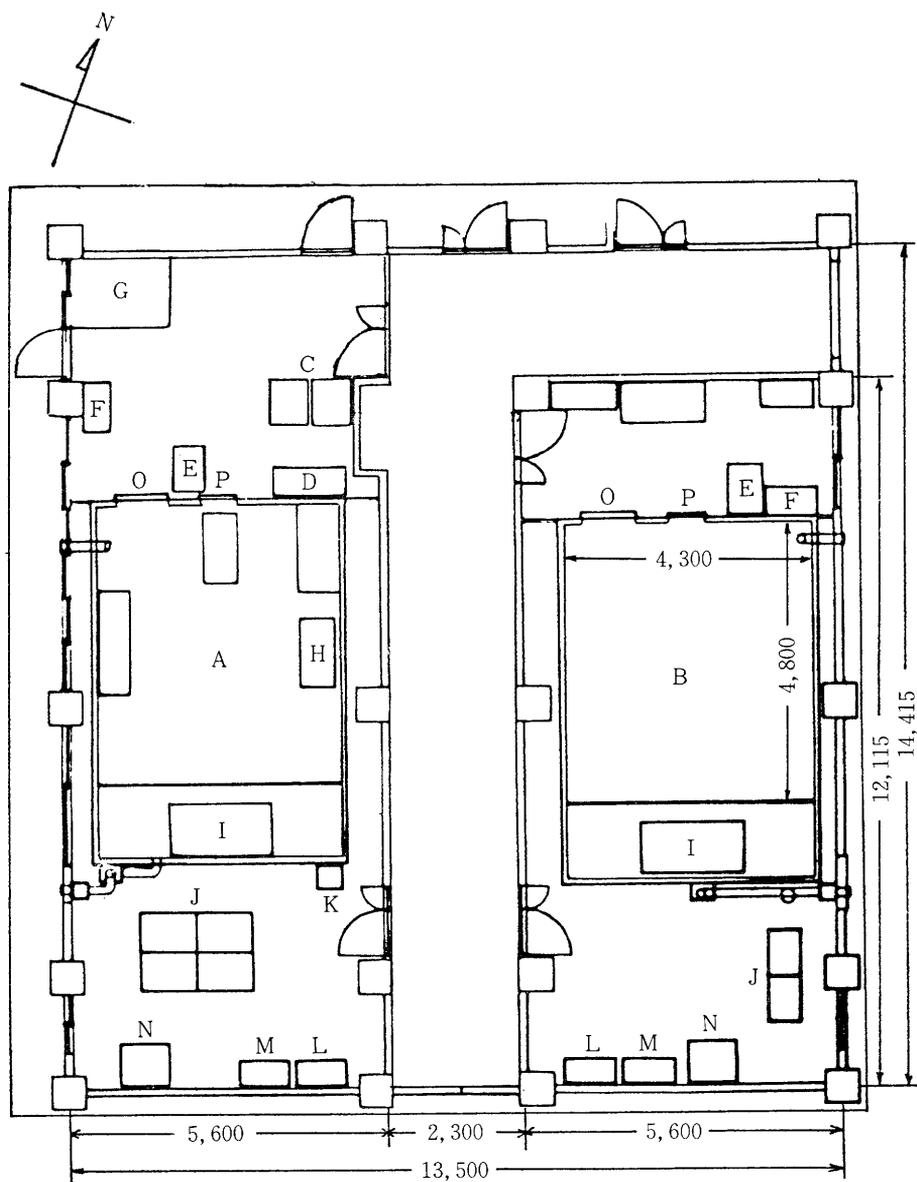


Fig. 1. The structure of the chambers

- | | |
|--|--|
| A: Environmental control chamber for man's physiological responses | D: Electroencephalograph |
| B: Environmental control chamber for animal's thermal acclimation | F: Control panel-board (Operation board) |
| C: Computer system (ATAC 450) | H: Tread mill |
| E: Electrical apparatus | J: Refrigerators |
| G: Bath unit | L: Power supply |
| I: Space for harmonized air | N: Blain unit |
| K: Humidifier | O: Door |
| M: SCR control board | P: Window |

Table 1. Control performance of the environmental chambers

Chambers	A-chamber	B-chamber
The available working space of chambers	4300×4800×2540	4300×4800×2540
Air temperature range stability distribution maximum dynamic change operation	-10°C~+60°C ±0.5°C ±1°C 20°C→-10°C/hour 20°C→60°C/hour manual & automatic (program)	+5°C~+60°C ±0.5°C ±1°C 20°C→5°C/hour 20°C→60°C/hour manual & automatic (program)
Air humidity range stability distribution maximum dynamic change operation	30%~95%RH ±3% ±5% 55%→95%RH/hour 55%→30%RH/hour manual& automatic (program)	30%~95%RH ±3% ±5% 55%→95%RH/hour 55%→30%RH/hour manual & automatic (program)
Illumination range operation	0~1000Lux serial control manual	0~1000Lux serial control 6 step program control
Control of air velocity Air flow (maximum) Electric sealed Prevention of noise	less than 1 m/sec 100m ³ /hour simply sealed less than 70 phon (A-scale)	less than 1 m/sec 200m ³ /hour simply sealed less than 70 phon (A-scale)

Table 2. Measuring instrument for temperature and humidity

1. Recorder of temperature and humidity control method measuring range stability	PID current output type -20°C~+80°C, 20%~100%RH ±0.5%
2. Programing of temperature and humidity programing method programing range stability time for program	photo-electric type -20°C~80°C, 20%~100% RH ±1.0% 0.5~196 hour/round or end less

るプログラムシートに、プログラム内容に従って黒いテープを貼り着け、回転ドラムに装着する。プログラムシートとテープ左端へ照射された光の反射光の変化を検知し、制御を行う。制御時間はドラムの回転速度で決まり、1 cycle が30分～8日間まで広範囲に設定可能で、ENDLESS に切換えると同じプログラムを繰り返して行わせることができる。

動作原理

次に、環境制御実験室に装備された機器による温度・湿度・照明の制御様式について述べる。

温度 加熱—電気加熱器

冷却—蒸気圧縮式冷凍機

湿度 加湿—蒸気加湿方式

除湿—冷却除湿方式

一般に、加熱・加湿に比べ冷却・除湿には困難な点が多い。蒸気圧縮式冷凍機では、先ず冷媒ガスは圧縮機によって、高温・高圧ガスに圧縮され、これによって機械エネルギーが熱エネルギーに変換される。次にこのガスは、凝縮器で、冷却水により、露点温度以下に冷されて液化する。次にこの冷媒液は、膨張弁へ導かれ、ここで圧力は下り蒸発器チューブ内に入る。急激な圧力低下で低温となった冷媒液は周囲の熱を吸収し蒸発する。かくの如くに一循環して冷媒ガスは再び圧縮機へ導かれる。この様に圧縮→凝縮→膨張→蒸発→圧縮のサイクルを繰り返し、蒸発器にて周囲を冷却する。次に、冷却除湿方式とは空気を露点温度以下まで冷却すると、空気中に含まれる水蒸気が水滴となって除去される現象を利用したものである。冷却除湿では、冷却する空気の状態が露点温度まで下がらないと除湿は行なわれず、その間空気中の水分の量は一定の状態である。したがって、冷却除湿では除湿による空温変化を防ぐために、循環空気の約10%が、除湿コイルを通過する様に設計されている。加熱・加湿は共に、SCR 制御による電気ヒータを用いて行なわれている。

図2⁸⁾は、湿り空気線図(キャリヤー線図)の一部を示している。図を見やすくするため、水蒸気分圧、エンタルピー、比体積等の因子を表示していない。この図の太い線で囲まれた範囲内(10°C—95%, 30°C—30%, 60°C—30%, 60°C—95%)がこの環境制御実験室における温・湿度を共に制御可能域である。除湿・加湿が行なわれない状態では、加

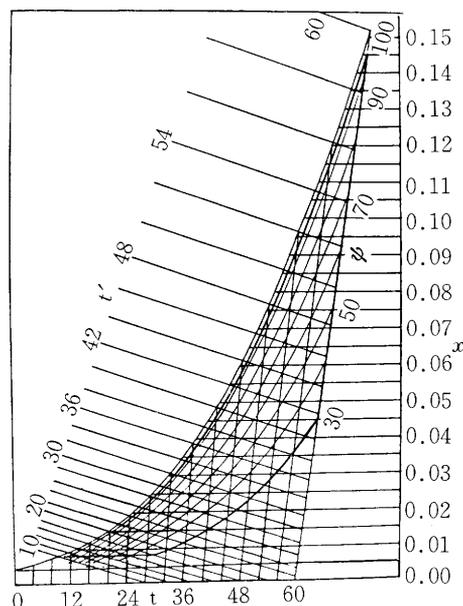


Fig. 2. Psychrometric chart

- t : Dry-bulb temperature
- t' : Wet-bulb temperature
- x : Absolute humidity
- ϕ : Saturation degree
- φ : Relative humidity

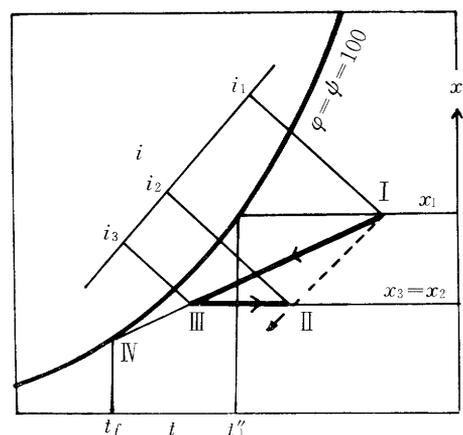


Fig. 3. A portion of psychrometric chart

- i : Enthalpy
- x : Absolute humidity
- t : Dry-bulb temperature
- t'' : Dew point in I

熱・冷却を行っても絶対湿度は一定で温度のみ変化する。一般に用いられている湿度（相対湿度）は、温度が上昇すれば低くなり、温度が下降すれば高くなる。制御範囲で乾球温度が 10°C 以下では、湿度制御が困難である。この事は図3⁹⁾に示す様に、条件Ⅰの空気を冷却し条件Ⅱにする場合には、ⅠとⅡを結んで延長した線が飽和空気線と交わらないから、ⅠからⅡに直接変化させることはできない。そこで間接的に、Ⅰ・Ⅲと目的のⅡの絶対湿度 x_2 との交点Ⅲ（ $x_2=x_3$ ）まで先ず冷却し、次にⅢよりⅡへ加熱して目的を達する。この時、調和機より室内へ吹出される空気の状態はⅣである。しかし、吹出し空気の温度が 0°C 以下になると、除湿コイル面の水滴が凍結し、除湿が不可能となる。室内温度を 10°C 以下にするには、通常、吹出し口での温度は 0°C 以下であり、湿度制御が不能となるためである。

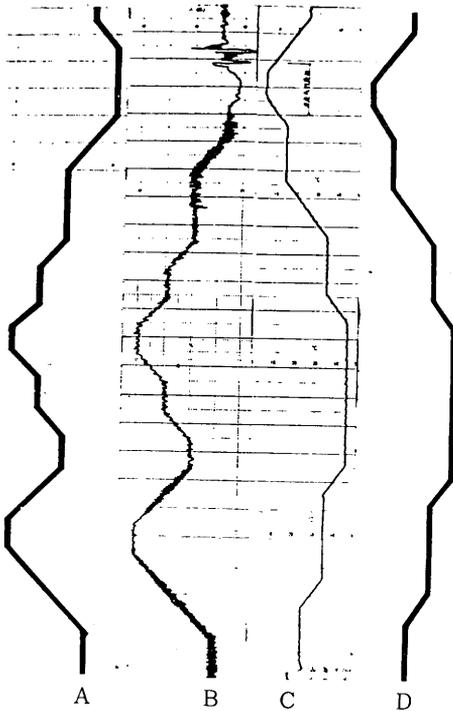


Fig. 4. A simultaneous recording of temperature and humidity following automatic control program
 A: control program of humidity
 B: measured humidity
 C: measured temperature
 D: control program of temperature

図4は、人体用環境実験室における24時間プログラム制御とその結果を示す。温度の誤差範囲は $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ 、湿度のそれは $\pm 3\%$ 以内に収まっている。温度・湿度共に、プログラム値とその実測例は、ほぼ平行に推移している。しかし詳細に観察すると、実測温度変化とプログラム温度変化の間には10~15分の潜時が生じている。この原因は、加熱・冷却における電気的信号の伝達は時間的にすみやかに行なわれるが、冷凍機が負荷の状態に応じ順次作動してゆくには機械的時間遅れは避けがたく、さらに加熱・冷却が作動を始めてから、室温を設定値まで変化させるのに時間を要するからである。一方、図4の湿度変化をみると、プログラム値と実測値にはほとんど潜時がない。この理由は人体用環境実験室では、特に -10°C まで温度を下げる必要から、室外に加湿器があり、常時一定量の蒸気が作られ、保存されていて、加湿の指令に対しすみやかに応答出来る仕組である。又、この図で、温度 5°C の設定部分では、湿度は乱れ、湿度制御不能を示すが、その理由は既述の事項を考慮されたい。以上の様に、装置の性能は装備されている機器により制限されると共に、温度・湿度制御の如き物理現象は自然科学の法則に従うものである。

データ処理装置

図5は、データ処理装置のブロック・ダイアグラムである。使用言語は Basic である。

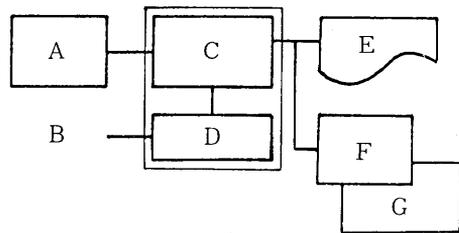


Fig. 5. Computer system
 A: console and key board
 B: analog signal
 C: central processing unit
 D: A/D converter
 E: printer
 F: X-Y plotter
 G: CRT display

処理装置本体の性能は
 記憶装置 素子: ICメモリ
 容量; 32KW
 A/D変換 分解能; 10bit
 クロックタイム; 10 μ s~9s, EXT
 補助記憶装置 (デジタルカセット)
 容量; 50KW
 転送速度; 1.3kw/s
 ブラウン管表示
 表示; 処理波形, 座標軸, 文字・数字
 等
 分解能; 1024 \times 1024 point
 ブラウン管; 100 \times 100mm角型
 シリアルプリンタ
 X-Yプロッタ

熱帯医学研究法

図6, 7, 8は, 人体用環境実験室で行なった実験データをデータレコーダに収録し, データ処理装置 (ATAC 450) を使用して X-Y プロッタに作図させた結果を示す。

実験方法

- (a) 実験動物: male albino rabbit (体重3.0kg)
 (b) 環境 実験室内条件: ①温度 25 $^{\circ}$ C, 湿度 60% [thermo-neutral] ②温度 35 $^{\circ}$ C 湿度 6% [heat-stress] ③温度10 $^{\circ}$ C 湿度60% [cold-stress]
 (c) 手術・測定: 温度25 $^{\circ}$ C, 湿度60%の室内条件にて, 手術は無麻酔 (時に局所麻酔) にて実施した。被験動物を腹位固定にて, 頭部皮膚を切開し, スクリュー電極を, 頭頂骨に一ヶ所, 前頭骨に二ヶ所 (内一ヶ所を不関電極) 装着した。筋電位測定用針電極を上腕三頭筋へ, 又, 心電位測定用針電極を右前肢, 及び左前肢の皮下へ挿入した。

測定は, EEG (M.C., L.C.) ECG (第I導出) EMG, 及び, 熱電対を用い耳介皮膚温, 直腸温を測定した。

(d) 結果:

図6は, 室温25 $^{\circ}$ C, 湿度60%の中性温度環境条件下に暴露されたウサギより得られた結果である。EEG (motor cortex) : α 波, β_1 波を基調とした安

静覚醒脳波を示している。ECG (heart rate) : 約300cycle/min. EMG: 筋肉の緊張が落ち, 筋電位変化は見られない。呼吸数: 約180cycle/min, 直腸温: 38.4 $^{\circ}$ C, 耳介皮膚温: 35.5 $^{\circ}$ C。

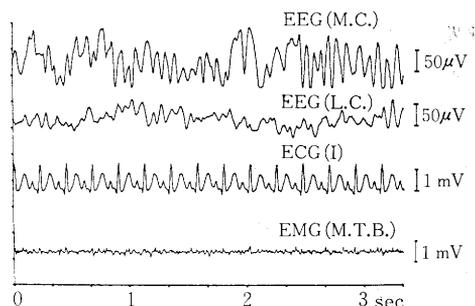


Fig. 6. A recording measured by using ATAC 450. physiological responses of rabbit to thermoneutral (Room temperature: 25 $^{\circ}$ C)

EEG(M.C.): motor cortex
 EEG(L.C.): limbic cortex
 ECG(I): I-lead
 EMG(M.T.B.): M. triceps brachii

図7は, 室温10 $^{\circ}$ C, 湿度60%の寒冷環境条件下に暴露されたウサギからのデータを示す。EEG (motor cortex) : β 波を基調とする覚醒状態を示している。ECG (heart rate) : 約320cycle/min. EMG : 寒冷ふるえ (cold shivering) による熱産生の亢進状態を示す。呼吸数: 約110cycle/min, 直腸温: 38.2 $^{\circ}$ C, 耳介皮膚温: 25.7 $^{\circ}$ C

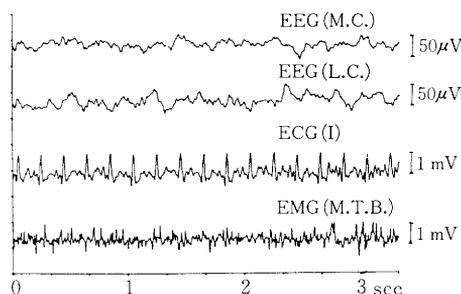


Fig. 7. A recording measured by using ATAC 450. physiological responses of rabbit to cold stress (Room temperature: 10 $^{\circ}$ C)

EEG(M.C.): motor cortex
 EEG(L.C.): limbic cortex
 ECG(I): I-lead
 EMG(M.T.B.): M. triceps brachii

図8は、室温35°C、湿度60%の暑熱環境条件下に暴露された時の結果である。EEG (motor cortex): θ 波を基調とするまどろみ(傾眠)状態を示している。ECG (heart rate): 約300cycle/min, EMG: 筋肉の緊張が落ち筋電位変化はみられず, 呼吸数: 400cycle/min, 直腸温: 39.3°C, 耳介皮膚温: 38.7°C.

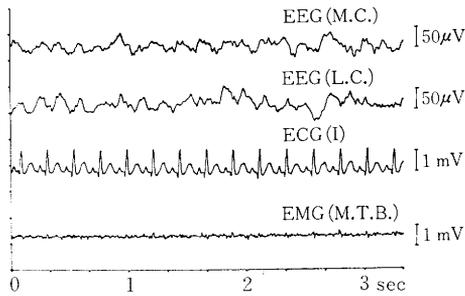


Fig. 8. A recording measured by using ATAC 450. physiological responses of rabbit to heart stress (Room temperature: 35°C)
 EEG(M.C.): motor cortex
 EEG(L.C.): limbic cortex
 ECG(I): I-lead
 EMG(M.T.B.): M. triceps brachii

図9は、AD変換を行って作図した図6, 7, 8とは異なり、生体信号を脳波形で直接記録した結果

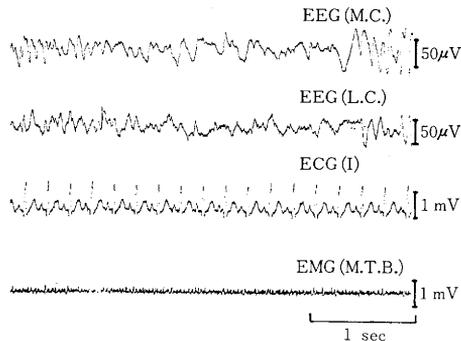


Fig. 9. A recording measured by using electroencephalograph. physiological responses of rabbit to thermo-neutral (Room temperature: 25°C)
 EEG(M.C.): motor cortex
 EEG(L.C.): limbic cortex
 ECG(I): I-lead
 EMG(M.T.B.): M. triceps brachii

である。前出の記録と有意の差を認めない点に注意されたい。

図10は、中性・寒冷・暑熱の三種の異なる温度環境条件下で測定した EEG (motor cortex) の周波数分析結果と、EMG による heart rate の分析結果 (ATAC 450使用) である。脳波の周波数分析に用いたプログラムは、一波長の Interval time を計測し、その結果をヒストグラム (Histogram) 表示させたものである。したがって Interval time は横軸の右端が最も長く、これを周波数に変換したため、右端が低周波数に表示されたものである。heart rate の分析には、1分間に計測された R 波の数をヒストグラム表示させたものである。縦軸は共にカウント数を示す。

EEG (motor cortex) の周波数分析結果より室温 25°C の中性温度環境条件下では、13 Hz をピークとし、8~20 Hz の α 波及び、 β_1 波が多い安静時の脳波パターンを示している。室温 35°C の暑熱環境条件下では、5 Hz をピークとする 4~8 Hz の θ 波が多い傾眠脳波パターンを示している。室温10°Cの寒冷環境条件下では、30 Hz をピークとする 15~35 Hz の β 波が多い覚醒脳波パターンを示している。

中性温度環境条件下では、心電図による heart rate は、290~320 cycle/min の範囲でピークは 300 cycle/min である。室温 35°C の暑熱環境条件

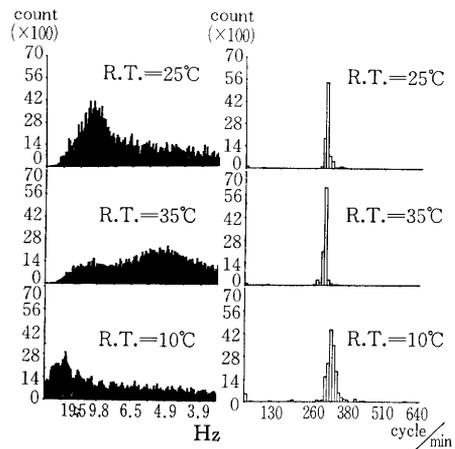


Fig. 10. Histograms of frequency analysis of EEG (M.C.) and heart rate of rabbit
 EEG(M.C.): motor cortex
 R.T.: room temperature

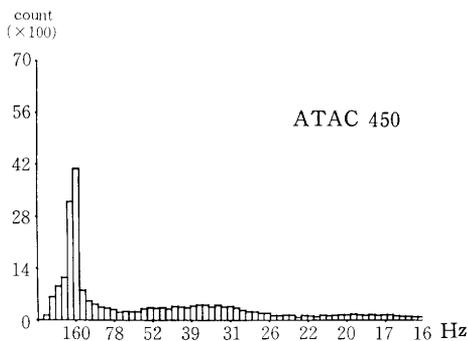


Fig. 11. Histogram of frequency analysis of EMG (M.T.B.) during cold shivering in rabbit (Room temperature: 10°C)
EMG (M.T.B.) : M. triceps brachii

下では、280~310 cycle/min, 25°Cの中性温度環境条件下の場合に比べ少し減少している。一方、室温 10°Cの寒冷環境条件下では、300~360 cycle/minの範囲で、ピークは 320 cycle/min を示し、中性温度環境条件下における heart rate に比べ増加している。

図 11 は、室温 10°C における寒冷ふるえ (cold shivering) 時の筋電図周波数分析結果である。図より筋電位変化の周波数は、300~150 Hz で 160 Hz 付近の筋電図が高頻度に記録されている。

考 察

自然環境をシミュレートして実験室内で人工環境を作る試みは、1930年代から急進展をしたといっても過言ではない。しかし、実験室内で作られる人工環境の制御には限りがあり、例えば、自然環境下での順化には Acclimatization, 人工気象室内での順化には Acclimation と使いわけて、両者の差異を

表示している。一般に、自然環境と対比して環境制御装置の特長や欠点を調べるには、その装置の開発・改良の歴史を顧みるのもよい。さらに、新設の人工気象室を評価するためのチェックポイントとしては、①装置の室内面の材質にもよるが、室内壁の表面温度と室温の差やそれによる熱伝導・対流・放射について考慮する事、②調和器からの空気は天井全面より吹出され、調和器側の壁全面に吸入されるとして、その際、室内の気流分布が問題となり、③気流の不均一さは室内温度分布の不均一に直結すると考え、④室内の負荷物体、たとえば、研究者や被験者、実験動物、各種計器類一脳定位固定装置、DC レコーダ、血圧計・呼気ガス分析装置・各種アイソレーションボックス、トレッドミル、ベッド・バランス、机、椅子などの室内配置と気流分布、特に熱源 (照明・ヒト・動物・計測器類) による室温分布の乱れの有無などに注意を要する。さらに、⑤装置の機関部の容量を調べて負荷物体の室内搬入の許容範囲を検討したり、⑥空気噴出口で発生する騒音の防止の良否、⑦シールドによる室内の照明落差の有無、そして最も重要なチェックポイントとして⑧或る室内気象条件から新たな設定条件に到達するまでの所要時間の長短、⑨設定条件と実測値との誤差について調べればよい。今回、本研究所に設置された装置については、一応、現段階における最良の策を講じて作られていると信ずる。

環境制御装置とデータ処理装置 (ATAC 450) を組合せたウサギによる温度刺激実験及びその結果の分析については、本論文では、熱帯医学研究分野における環境生理学的なアプローチを示しており、今後は、暑熱や寒冷に順化した動物を用いて温度ストレスによる体温調節反応の差異を検索し、温度順化の形成過程や体温調節中枢機序の解明に努力したい。

謝 辞

本環境制御実験装置の設置までの過程において多大なる御尽力を頂いた本研究所長・片峰大助教授および前所長の林 薫教授・内藤達郎教授に衷心より謝意を表すると共に、本装置の設営に際し、日夜の労を厭わず渾身から御協力を頂いた大西熱学工業の名古屋営業所および日本光電九州株式会社の長崎出張所の諸氏に深く感謝の意を表する。

文 献

- 1) 小坂光男 (1977) : 中脳における体温調節機構. 医学のあゆみ, 100(12), 853-854.
- 2) 小坂光男 (1980) : 高体温と臓器障害. 総合臨床, 29(3), 420-427.
- 3) 高木健太郎, 熊沢孝朗 (1963) : 人体実験用環境調節装置. 空気調和・衛生工学, 37(1), 52-57.
- 4) 日本生物環境調節学会編 (1973) : 生物環境調節ハンドブック. P.830. 東京大学出版会. 東京.
- 5) 加地正郎編 (1975) : 人間・気象・病気, NHK ブック. 223-224. 日本放送出版協会.
- 6) Jensen, P. K., Nishi, Y., Graichen, H., & Rascati, R. (1975) : A test chamber design for investigating man's thermal comfort and physiological response. ASHRAE Transaction, 81(1), 73-82.
- 7) 矢永尚士, 加地正郎 (1974) : 今回設置された人工気象室. 医学のあゆみ, 90(1), 43-47.
- 8) 東京大学. 内田研究室 (1951) : 湿り空気線図 (HC 線図) 0~120°C 大気圧760 mmHg.
- 9) 空気調和衛生工学会 (1975) : 空気調和衛生工学便覧, I-P.67.