

# 暑熱環境下の海洋作業における熱的限界と温熱対策に関する研究

— (その1) 熱収支モデルと温熱指数 —

正員 村山 雅己\* 正員 福地 信義\*\*  
中橋 美智子\*\*\*

Study of Thermal Threshold and Counter-Measures for Human Body  
in Oceanic Working Environment  
(1st Report) Heat Balance Model and Heat Storage Index

by Masaki Murayama, *Member* Nobuyoshi Fukuchi, *Member*  
Michiko Nakahashi

## Summary

The marine structure using under hot environment should be designed with careful thought of defending the workers against heat stress. An adequate heat stress index of human body is necessary for classifying the severity of working environment and taking some counter-measures.

In order to grasp the relation between the thermal state of human body and the thermal environmental factors such as operative temperature, metabolic heat and clothes, the experiment is carried out during the excise by ergo-meter in the constant temperature and humidity room and under the sunshine environment. Being based on the results of experiment, the heat balance model of human body is established with a view of calculating the quantity of heat storage as a heat stress index.

Further, the storage of body heat defined in this report is clarified to be useful for various thermal conditions.

## 1. はじめに

暑熱環境下の海洋作業では、人体に蓄積する熱のために作業能力が低下したり、さらに昇じると熱中症を患うこともあり得る。特に日射がある場合には、熱的に激しい状態に陥る。このため、海洋構造物などの設計時には、そこで行われる作業に対する人体の熱量解析を行い、熱的な作業限界を超えることが予測される場合には、予め何らかの温熱対策を講じる必要がある。

本報では、暑熱環境下の作業時において、代謝量、環境温湿度、衣服抵抗などの熱的要因が体温に与える影響を把握するために、恒温室および日射環境下において、運動量、

環境温度、被服などを変えながら皮膚温、直腸温および衣服内湿度の計測を行った。さらにこの実験結果により変温する外殻層と熱恒常性のある中核部に分けた熱収支モデルを作成し、皮膚温を求める式を導いた。これにより人体の蓄熱量の計算式を定めて温熱指数とした。また、熱的要因と蓄熱量の関係を調べ、熱的に作業限界について考察した。

## 2. 暑熱環境下における作業時の体温計測

暑熱環境下において作業を行う人の熱的状态は環境温度、湿度、気流速を始め、海面および周囲構造物の温度に依存する熱輻射、それに太陽輻射に依存する。この環境における作業者は、仕事をする事による人体内部から代謝産熱を、呼吸による放熱と皮膚表面から衣服を通した放熱を行い、人体基幹部の熱的恒常性を保っている。

熱恒常性を保つといっても全身が様な温度になっているわけではなく、部位によって多少差異がある。人体を全く熱平衡が保たれている高温の中核部と、それよりも低温の末梢組織からなる外殻層で取り囲んだ2重構造と考えた場合、外殻層の表面温度は皮膚温で代表され、中核部の温

\* 船舶機装品研究所

\*\* 九州大学工学部

\*\*\* 東京学芸大学生生活科学

原稿受理 平成8年1月10日

春季講演会において講演 平成8年5月15, 16日

度は外部から容易に測定できる場所として直腸内が一般的であり、肛門から8 cm以上の深さとされている。なお、一般的に皮膚温は33°C前後であり、直腸温は37.5°C前後である。

仮に中核温は常に恒常性が保たれており、殆ど変化しないものとするれば、人体内部の産熱は呼吸による放熱以外は血流等による熱移動により皮膚表面から放熱をしている。皮膚は熱的境界であると共に、皮膚血管、汗腺などの体温調節反射の末梢効果器の活動を介して熱放散調節にあずかり、さらに皮膚温度受容器の活動によって体温調節反応の動因となる皮膚温度感覚情報の発生する場でもある。このことから、作業時における皮膚温および直腸温を測定することにより、人体の熱的狀態を把握し、後述する人体の熱収支モデルによる人体の熱的限界を定めるための資料とする。

## 2.1 実験方法

実験は軽運動と重運動の2種類の作業を設定し、運動(作業)時の皮膚温、直腸温および衣服内湿度を測定する。作業負荷は次の2種類とした。

i) 作業サイクルA: 環境温度を一定とし1サイクルを安静 [20分] → 軽運動 [10分] →

休み(安静) [5分] → 重運動 [10分]

として、一人で着用衣服を変えながら3サイクル又は4サイクルを連続して行う。

運動はエルゴメータを使用し、軽運動時の代謝エネルギーを約110 [W/m<sup>2</sup>]、重運動を約270 [W/m<sup>2</sup>]程度とした。

ii) 作業サイクルB: 1サイクルを

安静 [10分] → 軽運動 [30分] → 安静 [30分] → 軽運動 [30分]

← 環境気温 20°C → ← 環境気温 25°C →

→ 安静 [30分] → 軽運動 [30分]

← 環境気温 30°C →

とし、軽運動が終了すると同時に環境温度を変化させて1サイクルのみを行う。この場合の代謝エネルギーは約129 [W/m<sup>2</sup>] または約165 [W/m<sup>2</sup>]とした。

### (1) 被験者の諸元

被験者は海上における労働であることを考慮し、青年男子5名とした。被験者の諸元をTable 2.1に示す。体表面積  $A_b$  は、次式によって算出した<sup>1)</sup>。

$$A_b = W_b^{0.425} \times H_b^{0.725} \times 0.007246 \quad [\text{m}^2] \quad (2.1)$$

ここで、 $W_b$  は体重 [kg]、 $H_b$  は身長 [cm] である。

被験者の服装はすべての実験で統一し、下半身は綿のパンツに綿の作業ズボン、上半身は被服面積率を変化させ、綿長袖シャツ、綿ランニング、毛長袖シャツ、ヌードの4種類とした。実験に使用した着用衣服と、体表面積に対する衣服の被服面積率をTable 2.2に示す。

### (2) 人体の温度測定位置

実験における皮膚温の測定箇所は、平均皮膚温の算出のために一般的に認められた5箇所(後頸部、上腹部、前腕

Table 2.1 Specification of the subject

| subject | age | sex  | height (cm) | weight (kg) | body surface area (m <sup>2</sup> ) |
|---------|-----|------|-------------|-------------|-------------------------------------|
| A       | 20  | male | 173         | 58          | 1.71                                |
| B       | 19  | male | 178         | 62          | 1.79                                |
| C       | 21  | male | 172         | 76          | 1.91                                |
| D       | 22  | male | 178         | 66          | 1.84                                |
| E       | 31  | male | 180         | 80          | 2.01                                |

Table 2.2 Subject wear and rate of cloth surface area

|                            | wear  | rate of cloth surface area (include the lower half clothes) |
|----------------------------|---|---|
| the upper half of the body | 1. Stripped to the waist ( without clothes) | 55.0 %  |
|                            | 2. running shirt(cotton)                    | 66.8 %  |
|                            | 3. long sleeve shirt (wool, cotton)         | 85.8 %  |
| the lower half of the body | short pants and working trousers (cotton)   |   |

部、大腿部、下腿部) およびこれに補助として、(上腕部、前頸部、背中、肩、背)の5点を追加した。人体基幹部の温度測定点として直腸温を測定するほか上腹部と背中の2点に湿度センサーを使用して衣服内湿度を測定した。

平均皮膚温  $\theta_{sk}$  は、次式によって計算する<sup>2)</sup>。

$$\theta_{sk} = (9.8c1 + 32.8c2 + 19.6c3 + 17.2c4 + 20.6c5) / 100 \quad [^\circ\text{C}] \quad (2.2)$$

ここで、 $c1$ : 後頸部皮膚温、 $c2$ : 上腹部皮膚温、 $c3$ : 前腕部皮膚温、 $c4$ : 大腿部皮膚温、 $c5$ : 下腿部皮膚温である。なお、本実験における皮膚温の測定は心臓側の左を基準とし、左前腕部、左大腿部、左下腿部とした。

## 2.2 恒温室内における室内実験

暑熱環境下における基礎的なデータを得るために、恒温室を使用して環境温度を精密にコントロールした実験を行った。

### (1) 環境温度が一定の場合の実験

環境温度を30°Cと一定に保ち、作業負荷をサイクルAとして実験を行った。Table 2.3に被験者3名による実験の結果から、各運動時前後の皮膚温度の差および各運動の代謝量を示す。また、代表例としてFig. 2.1に被験者Cの実験結果を示す。

毛の長袖シャツの場合を除き、軽運動時での皮膚温上昇はほとんど認められなかった。しかし重運動においては必ず皮膚温上昇があり、暑熱下における運動が一定の条件を

Table 2.3 Difference of temperature between start and end of exercise, and metabolic heat production

| subject | long sleeve shirt (cotton)       |                                  | running shirt (cotton)           |                                  | long sleeve shirt (cotton)       |                                  | stripped to the waist (without clothes) |                                  |
|---------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|---|----------------------------------|
|         | light exercise (10 min)          | heavy exercise (10 min)          | light exercise (10 min)          | heavy exercise (10 min)          | light exercise (10 min)          | heavy exercise (10 min)          | light exercise (10 min)                 | heavy exercise (10 min)          |
| A       | 0 °C<br>112 W/m <sup>2</sup>     | +0.01 °C<br>278 W/m <sup>2</sup> | +0.94 °C<br>106 W/m <sup>2</sup> | +0.49 °C<br>283 W/m <sup>2</sup> | +0.29 °C<br>108 W/m <sup>2</sup> | +0.89 °C<br>280 W/m <sup>2</sup> | +0.10 °C<br>109 W/m <sup>2</sup>        | +0.30 °C<br>279 W/m <sup>2</sup> |
| B       | -0.09 °C<br>108 W/m <sup>2</sup> | +0.20 °C<br>274 W/m <sup>2</sup> | +0.01 °C<br>108 W/m <sup>2</sup> | +0.22 °C<br>276 W/m <sup>2</sup> | +0.14 °C<br>108 W/m <sup>2</sup> | +0.37 °C<br>276 W/m <sup>2</sup> | -0.17 °C<br>108 W/m <sup>2</sup>        | +0.27 °C<br>276 W/m <sup>2</sup> |
| C       | -0.23 °C<br>104 W/m <sup>2</sup> | +0.35 °C<br>262 W/m <sup>2</sup> | -0.47 °C<br>105 W/m <sup>2</sup> | +0.57 °C<br>262 W/m <sup>2</sup> | +0.61 °C<br>106 W/m <sup>2</sup> | +0.33 °C<br>263 W/m <sup>2</sup> | -0.49 °C<br>105 W/m <sup>2</sup>        | +0.39 °C<br>262 W/m <sup>2</sup> |

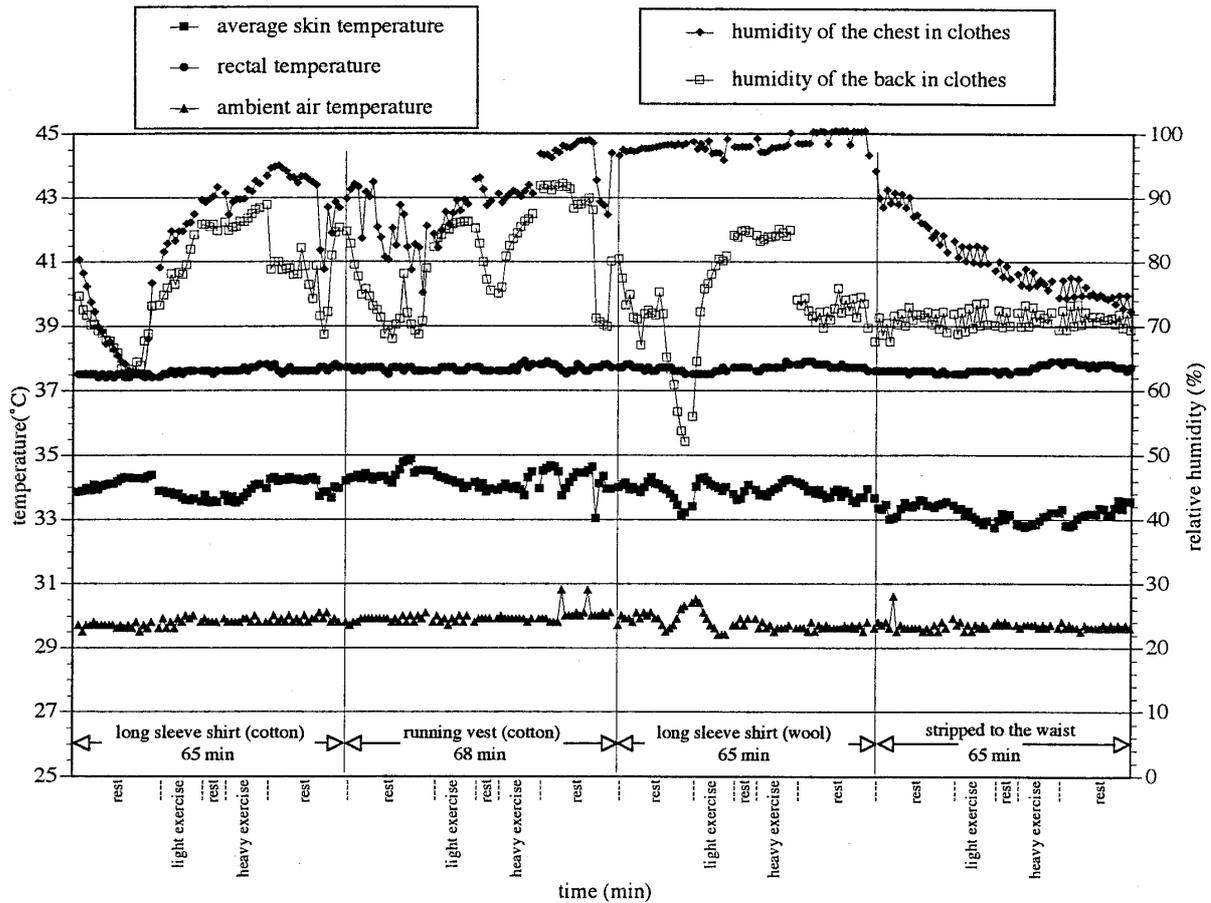


Fig. 2.1 Average skin temperature and rectal temperature in constant temperature and humidity room (subject C)

超えれば皮膚温上昇に影響を及ぼすことを示している。また、直腸温に関しては温度上昇が僅かに認められるものの顕在化しておらずほぼ一定の値である。また、着用衣服の相違に関する比較としては、綿の長袖シャツ、綿のランニングなどでは大きな相違は認められなかった。しかしながら、毛の長袖シャツの場合は相違が現われ、発汗が多くなり、被験者の感覚表現としても熱的不快感を表明した。毛の長袖シャツにおける実験結果のみは、軽運動においてもすべての被験者の皮膚温が上昇しており、被服熱抵抗の過剰から運動によって皮膚温が上昇し、それを補償するために発汗が大きく促されている。綿と毛の長袖シャツの比較において、発汗しない状態では、感覚的に大きな差はないことから、素材の熱抵抗というよりは透湿抵抗の差、そして皮膚と肌着の接触面における水分処理の差であると考えられる。これらは、綿素材は発汗などで濡れると皮膚によく密着し、熱伝導がよくなることから肌着に含まれる水分が効率よく暖められ気化熱放熱が活発になること、毛素材は濡れても肌に密着せず且つ吸湿性はあるものの、吸水性は小さいことから発汗による水分が綿素材のように皮膚付近に保持されず効果的に暖められないで無駄に流れ去ってしまうことによる。

実験最後のプロセスでの上半身裸での実験では、衣服が

ないことから僅かな気流速でも発汗による気化熱損失が効率よく行われ、被験者は快適感を表明しており、皮膚温はかえって低下の傾向を示した。

## (2) 環境温度が変化する場合の実験

環境温度が変化する場合における作業時の皮膚温度変化を考察するために、作業サイクルBにより環境温度を20°C、25°C、30°Cと変化させて実験をおこなった。Fig. 2.2, Fig. 2.3に被験者Dと被験者Eの実験結果を示す。また、Table 2.4に実験結果から得られた運動前後の皮膚温度の差と代謝量および衣服内湿度から判定した発汗の有無を示す。

環境温度は運動終了の直後に設定を変更し、被験者が休息状態において温度上昇をさせている。環境温度による皮膚温上昇の傾向は、運動後の代謝の遅れを考慮したとしても明らかであり、環境温度の皮膚温への影響度の大きさを示している。Fig. 2.2の被験者Dの運動は、129 W/m<sup>2</sup>程度と比較的軽い運動であったことから、環境気温25°Cの時まで衣服内湿度は40%前後と低く、気温30°Cの運動時になって初めて衣服内湿度が上昇し発汗が発生している。この実験結果から、同じ運動をしても気温が低ければ発汗せず、高い場合には発汗することがわかる。そして、発汗は少なくとも皮膚温が約34°Cになると発生することがわかる。ま

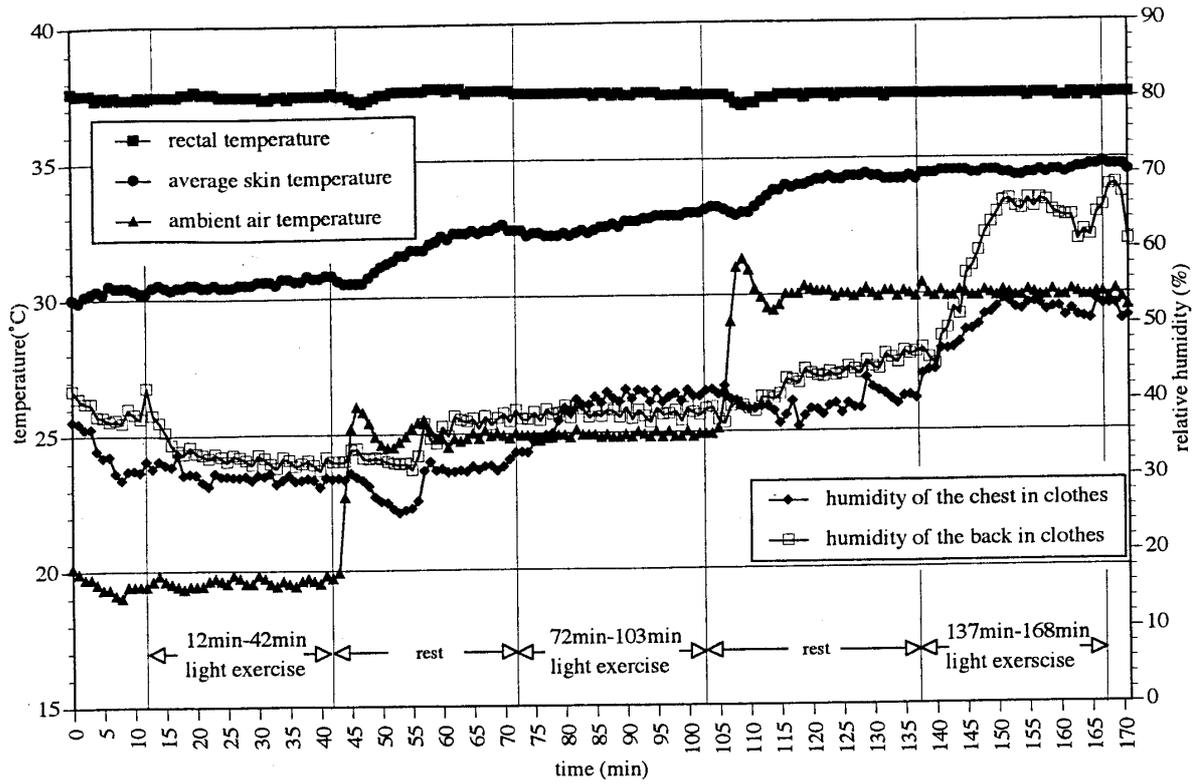


Fig. 2.2 Average skin temperature and rectal temperature in constant temperature and humidity room (subject D) -in the case of changing the ambient air temperature-

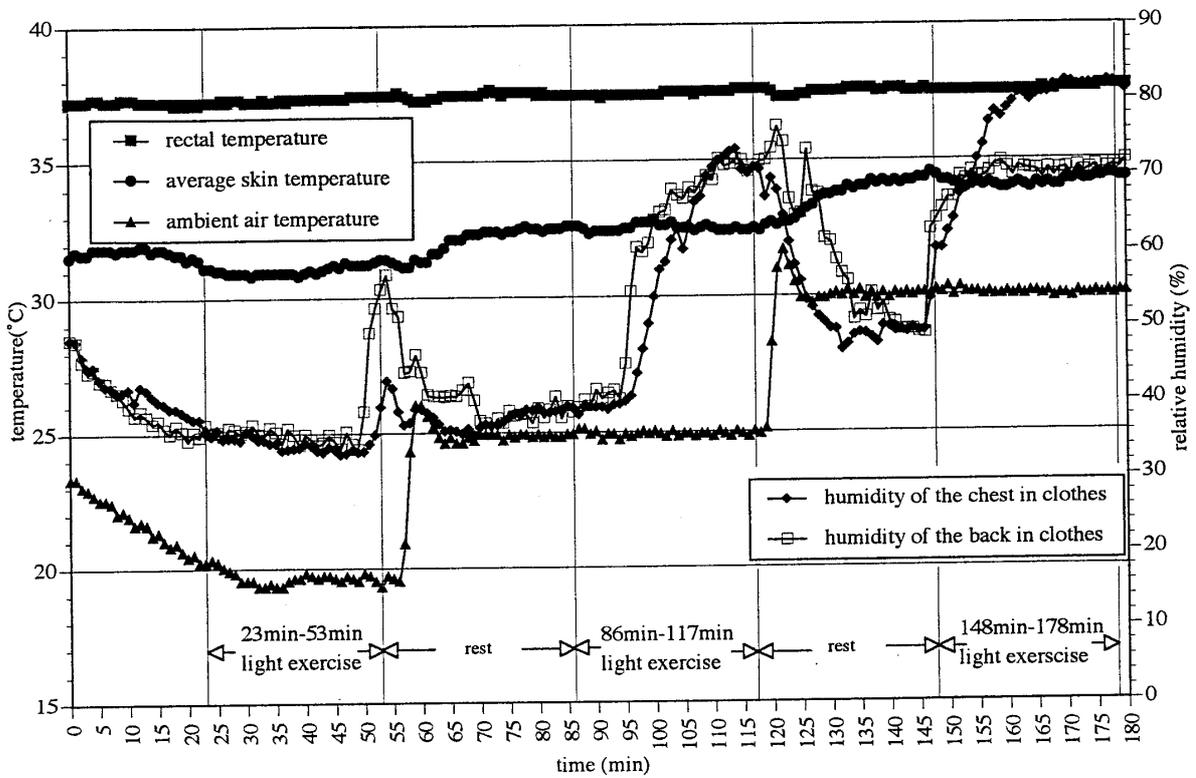


Fig. 2.3 Average skin temperature and rectal temperature in constant temperature and humidity room (subject E) -in the case of changing the ambient air temperature-

Table 2.4 Difference of temperature between start and end of exercise, and metabolic heat production -in the case of changing the ambient air temperature-

| subject | exercise:20°C<br>(30 min)               | rest:25°C<br>(30 min)                  | exercise:25°C<br>(30 min)                    | rest:30°C<br>(30 min)                  | exercise:30°C<br>(30 min)                    |
|---------|---|--|--|--|--|
| D       | +0.45 °C<br>129 W/m <sup>2</sup><br>dry | +1.62 °C<br>60 W/m <sup>2</sup><br>dry | +0.93 °C<br>129 W/m <sup>2</sup><br>dry      | +0.97 °C<br>60 W/m <sup>2</sup><br>dry | +0.3 °C<br>129 W/m <sup>2</sup><br>sweating  |
| E       | +0.46 °C<br>165 W/m <sup>2</sup><br>dry | +1.39 °C<br>60 W/m <sup>2</sup><br>dry | -0.04 °C<br>165 W/m <sup>2</sup><br>sweating | +1.72 °C<br>60 W/m <sup>2</sup><br>dry | -0.22 °C<br>165 W/m <sup>2</sup><br>sweating |

た、気温がある程度以上であると、運動開始後数秒で発汗が起こることが報告されており<sup>3)</sup>これを裏付ける結果である。

Fig. 2.3の被験者Eの運動は被験者Dに比べて165 W/m<sup>2</sup>と約3割程度大きな代謝量として実験を行った結果、どの気温においても運動中に発汗が起こり、皮膚温上昇すると発汗が起こり皮膚温上昇が抑えられている傾向が示されている。発汗は皮膚温と密接な関係があることが知られているが、恒温環境下で安静にしているときの発汗と運動による発汗の違いがあるかどうかについては未だ明確な結論が出ていない。被験者Eの実験において環境気温20°Cと25°Cでは、計測による皮膚温は34°Cに至らずに発汗が起こっており、運動時には非温熱性の因子が発汗を促進させていると考えられる。

### 2.3 日射環境下における屋外実験

暑熱環境下においてもっとも影響のあると考えられる日射環境下における実験を屋外において行った。実験は東京学芸大学(国分寺市)生活科学棟屋上の一角に、気流速の影響をできるだけ減少させるために幅3.6 m×奥行2.7 m×高さ1.8 mの寸法で囲いを作り、床には人工芝を敷いて実験を行った。日射の測定はエプリー型全天日射計を使用した。

作業サイクルはAを基本とし、測定1サイクルを、日陰安静[20分]→日向安静[10分]→軽運動[10分]→休み(安静)[5分]→重運動[10分]と安静を日陰と日向に分け、上半身の着用衣服は綿の長袖シャツ又は上半身裸体で実験を行った。

Table 2.5に被験者4名の実験結果から得られた運動前後の皮膚温度の差と代謝量および衣服内湿度から判定した発汗の有無を示す。また、Fig. 2.4, Fig. 2.5に被験者Aと被験者Eの実験結果を示す。

Fig. 2.4, 被験者Aの実験時は晴天に恵まれ、若干の雲はあるもののほぼ日射環境下において実験を行った。実験は午前10時半に開始し、午後1時半に終了するように設定した。

日射による皮膚温の上昇を検討するために、5点測定による加重平均皮膚温の他に、上腕部、前頸部、背中、肩、背の5点を追加し、10点の相加平均による皮膚温も測定し

Table 2.5 Difference of temperature between start and end of exercise, and metabolic heat production-in the case of sunshine environment-

| subject | long sleeve shirt(cotton)                         |   | stripped to the waist                  |  |
|---------|---|---|--|--|
|         | light exercise<br>(10 min)                        | heavy exercise<br>(10 min)                  | light exercise<br>(10 min)             | heavy exercise<br>(10 min)             |
| A       | +0.3 °C<br>110 W/m <sup>2</sup><br>a few sweating | +0.2 °C<br>284 W/m <sup>2</sup><br>sweating | -0.2 °C<br>110 W/m <sup>2</sup><br>... | -0.2 °C<br>285 W/m <sup>2</sup><br>... |
| B       | 0 °C<br>108 W/m <sup>2</sup><br>dry               | -1.7 °C<br>276 W/m <sup>2</sup><br>sweating | -1.2 °C<br>108 W/m <sup>2</sup><br>... | -0.7 °C<br>273 W/m <sup>2</sup><br>... |
| C       | -0.1 °C<br>105 W/m <sup>2</sup><br>sweating       | +0.6 °C<br>262 W/m <sup>2</sup><br>sweating | +1.0 °C<br>105 W/m <sup>2</sup><br>... | -1.3 °C<br>262 W/m <sup>2</sup><br>... |
| E       | -0.9 °C<br>102 W/m <sup>2</sup><br>sweating       | +0.3 °C<br>251 W/m <sup>2</sup><br>sweating | -1.7 °C<br>102 W/m <sup>2</sup><br>... | -0.8 °C<br>251 W/m <sup>2</sup><br>... |

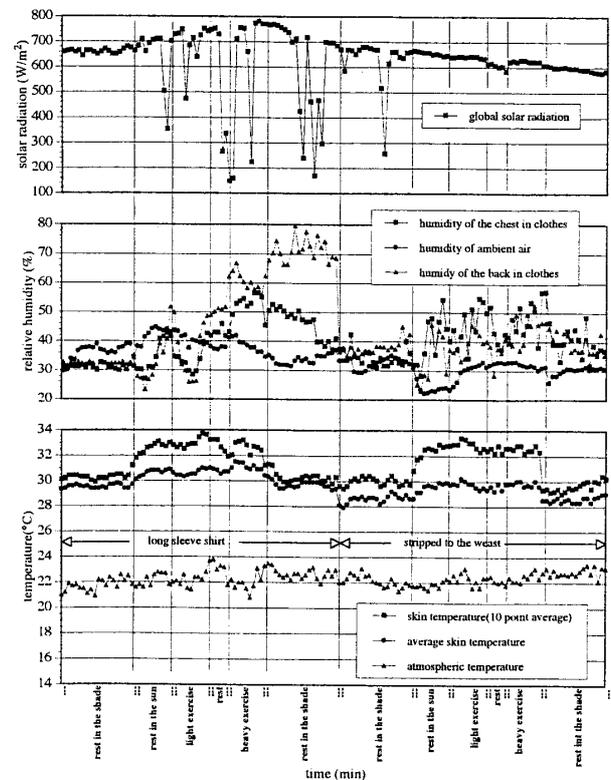


Fig. 2.4 Variation of skin temperature (subject A) -sunshine environment-

た。日射に直接暴露されている皮膚の部分では40°C程度まで上昇が見られ、発汗すると急激に下がるという状態である。Fig. 2.4の被験者Aでの実験では重運動の時に急激に発汗し、その結果10点相加平均皮膚温°Cでは2.5°C、5点加重平均皮膚温でも1°C程度まで下がる状態が見られた。環境気温は22°C前後と比較的低温であり、上半身裸体時の実験では皮膚温の温度上昇はほとんどなく低下傾向にあり、被験者全員とも涼感を感じ、快適感を表明していることから、発汗が皮膚温低下に効率よく働いていることがわかる。

Fig. 2.5の被験者Eの実験では、開始時には日射があり

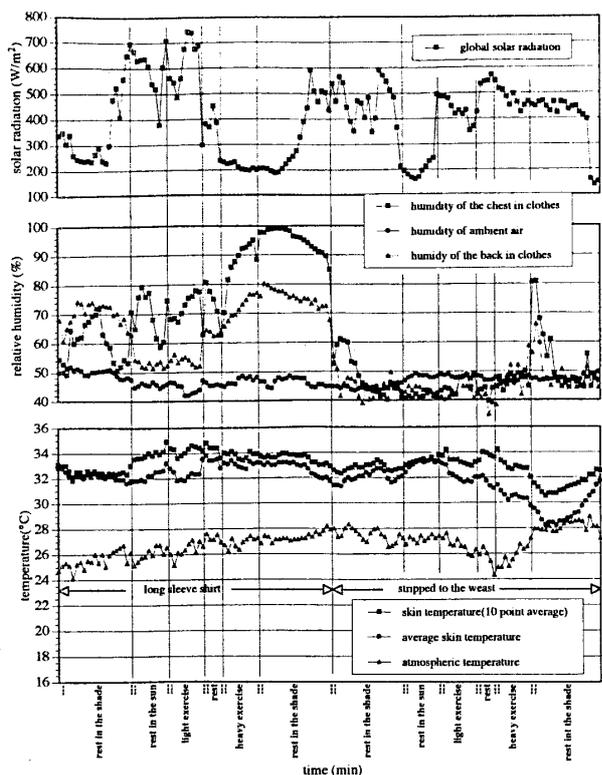


Fig. 2.5 Variation of skin temperature (subject E) -sunshine environment-

長袖シャツによる軽運動までは順調であったが、重運動に入って発汗が起ると同時に日射が雲によって遮られ若干変則的な実験となった。上半身裸体での実験では発汗はほとんどなかったが、同じく重運動の最後頃に発汗が起り、その結果休息時に皮膚温の大きな低下が見られた。

### 3. 太陽輻射

海上暴露環境下において作業をしている人体が受ける太陽輻射(日射)は、熱的に大きな要因である。しかしながら、熱帯から寒冷地域までの全世界的な海上における汎用の熱的指標を作成するには、どの地域での日射熱量も把握できなければならないことから、その地域の緯度、作業時刻などから推定する人体の受ける太陽輻射(日射量)の定式化を行う。

#### 3.1 太陽位置

任意の海域、任意の時刻における天球上の太陽の位置は、太陽方位角 $\psi$ と太陽高度 $H$ によって決めることができる。太陽方位角は観測地点と太陽を結ぶ直線の地平線への投影線と正南方向のなす角度である。正南方向は南中時の太陽方位角であり $\psi=0$ となり、午前の東方向はマイナス、午後の西方向はプラスの符号をつける。太陽高度 $H$ は、太陽と地平線のなす角度である。日の出、日没が太陽高度 $H=0$ であり、南中時の太陽高度を南中高度という。

太陽高度 $H$ と太陽方位角 $\psi$ は、三角法の公式により次式で与えられる。

$$\sin H = \sin \phi \sin \delta + \cos \phi \cos \delta \cos \Omega \quad (3.1)$$

$$\left. \begin{aligned} \sin \psi &= (\cos \delta \sin \Omega) / \cos H \\ \cos \psi &= (\sin H \sin \phi - \sin \delta) / \cos H \cos \phi \end{aligned} \right\} \quad (3.2)$$

ここで、 $\phi$ は観測地点の緯度、 $\delta$ は観測時刻での太陽視赤緯、 $\Omega$ は南中時を $0^\circ$ 、1時間を $15^\circ$ とした時角である。

太陽方位角は $\sin \psi$ と $\cos \psi$ の符号でどの方位に位置するか判断し、 $\sin \psi > 0$ 、 $\cos \psi < 0$ のとき太陽位置は西から北の位置にあり

$$\psi = \tan^{-1}(\sin \psi / \cos \psi) + 180^\circ \quad (3.3)$$

$\sin \psi < 0$ 、 $\cos \psi < 0$ のとき太陽位置は北から東の位置にあり

$$\psi = \tan^{-1}(\sin \psi / \cos \psi) - 180^\circ \quad (3.4)$$

となる。その他の場合の太陽位置は南側に位置しており、

$$\psi = \tan^{-1}(\sin \psi / \cos \psi) \quad (3.5)$$

で表すことになる。

太陽視赤緯は理科年表等を用いて得ることもできるが、次式で近似されている。

$$\left. \begin{aligned} \sin \delta &= 0.397949 \Theta \\ \Theta &= 360 \times (n - 81) / 365 \end{aligned} \right\} \quad (3.6)$$

ここで、 $n$ は元旦を1とした通日である。

#### 3.2 日射熱量

太陽輻射(日射)は、大気圏外日射量 $J_0$ が大気を通過して散乱し、法線面直達日射量 $J_{dn}$ と散乱日射量 $J_{sh}$ に分けられる。観測地点における上半球から水平面に照射される日射は全天日射量であり、法線面直達日射量に $\sin H$ を乗じた値と散乱日射量の和となる。

大気圏外日射量 $J_0$ は、地球-太陽間の平均距離 $L$ にある場合の大気圏外日射量(太陽常数) $J_{sr}$ を使用したDuffieの近似式<sup>4)</sup>がある。

$$J_0 = J_{sr} [1.0 + 0.033 \cos(2\pi n / 365)] \text{ [kW/m}^2\text{]} \quad (3.7)$$

ここで、 $J_{sr}$ は、今までに何回か数値が修正されているが、現在では $1.37 \times 10^3$  [W/m<sup>2</sup>]が使用されている。

法線面直達日射量 $J_{dn}$ は一般的にBouguerの式が使用されており次式で表される。

$$J_{dn} = J_0 \cdot \kappa^{1/\sin H} \text{ [kW/m}^2\text{]} \quad (3.8)$$

ここで、 $\kappa$ は大気透過率であり、法線面直達日射量 $J_{dn}$ と大気圏外日射量 $J_0$ の比 $J_{dn}/J_0$ であって大気の透明度を代表している。しかしながら、Bouguerの式は大気の曲率を考慮していないため、太陽高度 $H$ が低い朝夕においては見かけ上大きな値になる。

散乱日射量 $J_{sh}$ は観測に基づき天空を等輝度拡散面と仮定して導いた式が知られており、次式で表される<sup>5)</sup>。

$$J_{sh} = (1/2) J_0 \cdot \sin H [(1 - \kappa^{1/\sin H}) / (1 - 1.4 \log_e \kappa)] \text{ [kW/m}^2\text{]} \quad (3.9)$$

大気透過率 $\kappa$ については後述する。

全天日射量 $J_t$ は、水平面に入射する上半球の日射量であり、傾斜面には、この他にも構造物、海面等から反射する反射日射量 $J_{rx}$ が入射する。傾斜面の取り扱いには非常に困

難ではあるが、次式の概算式で傾斜角  $\chi$  の傾斜面に入射する反射日射量  $J_{rx}$  を計算している。

$$J_{rx} = [1 - (1 + \cos \chi) / 2] \rho_G (J_{dh} + J_{sh}) \quad [\text{kW/m}^2] \quad (3.10)$$

ここで、 $\rho_G$  は海面の反射率、 $J_{dh} = J_{dn} \cdot \sin H$  は水平面直達日射量で、 $(J_{dh} + J_{sh})$  は全天日射量である。

### 3.3 海上における大気透過率 $\kappa$ の推定

大気透過率  $\kappa$  は地域によっても季節によっても変化し、一日の時刻、太陽高度  $H$  によっても変化する。大気透過率の日変化は次式で表されている<sup>6)</sup>。

$$\kappa = 1.0 - (1.0 - \kappa_0) \sin^{1/3} H \quad (3.11)$$

ここで、 $\kappa_0$  は地面に垂直に入射する場合の大気透過率である。

一般に使用できる大気透過率は、資料がない。そのため、1975年6月から1978年10月まで九州喜入からペルシヤ湾までを往復するオイルタンカー日石丸の船上で測定した全天日射量を使用し、推定を試みた。Fig. 3.1は赤道直下の緯度0度から緯度10度までの海上において、船上で測定された全天日射量を晴天、雨天に関わらずプロットしたものと、緯度を5度、大気透過率  $\kappa_0 = 0.5$ ,  $\kappa_0 = 0.6$  そして  $\kappa_0 = 0.7$  として (3.7) 式~(3.8) 式および (3.11) 式を使用して計算した全天日射量をプロットしたものである。

計算値から、緯度5度の地点では全天日射量は1年間に4月と9月頃の2回ピークがあることがわかるが、測定値の最大値もこのカーブに従っていることがわかる。Fig. 3.1から、大気透過率  $\kappa_0$  は、およそ0.6を最大値として使用することができると思われる。

### 3.4 人体の受ける日射熱量の算定

人体に照射される日射量  $J_{man}$  を、体表面積  $A_b$  の水平面と垂直面および法線面日射量  $J_{dn}$  と散乱日射量  $J_{sh}$  から推定すると次のようになる。日本人男子の平均的な身長

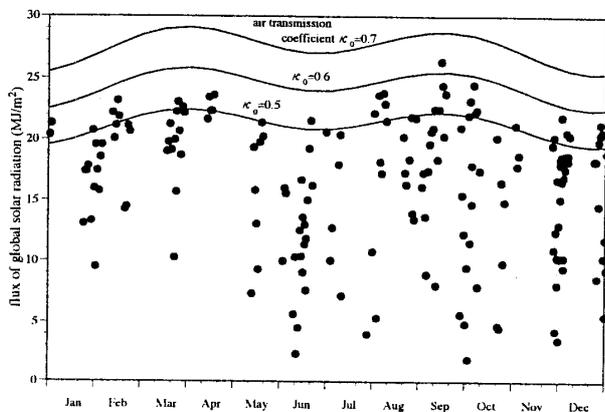


Fig. 3.1 Global solar radiation on the oil tanker (Nisseki maru) in latitude  $0^{\circ} \sim 10^{\circ}$  area at June 1975 to October 1978, and calculated global solar radiation used air transmission coefficient  $\kappa_0 = 0.7$ ,  $\kappa_0 = 0.6$ ,  $\kappa_0 = 0.5$

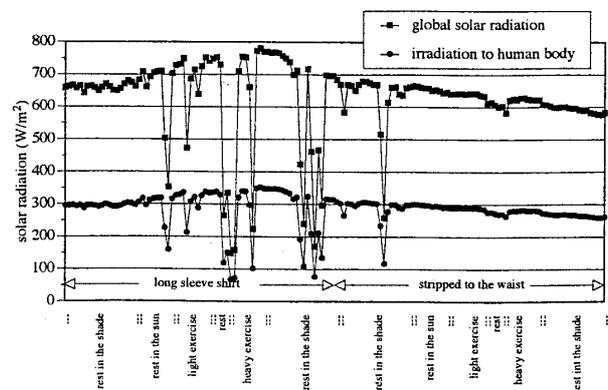
170 cm と体重 60 kg から (2.1) 式を使用して体表面を計算すると約  $1.72 \text{ m}^2$  となる。そして、人体を真上から見た投影面積を肩幅  $0.45 \text{ m} \times$  奥行き  $0.15 \text{ m} = 0.0675 \text{ m}^2$  とし、これを水平面、残りを垂直面とすれば、人体の垂直平面は  $0.96 A_b$ 、水平面は  $0.04 A_b$  となる。さらに、人体の水平断面を円と仮定すると、日射が人体半面に照射されても表面積に対して照射率は  $\cos \chi$  で与えられ、約 62% になることから、体表面積  $A_b$  の人体へ照射される日射熱量  $J_{am}$  は次式で与えることができる。

$$J_{am} = (0.96 A_b / 2 \times 0.62) \cos H \cdot J_{dn} + 0.04 A_b \cdot \sin H \cdot J_{dn} + J_{sh} \cdot A_b \quad [\text{kW}] \quad (3.12)$$

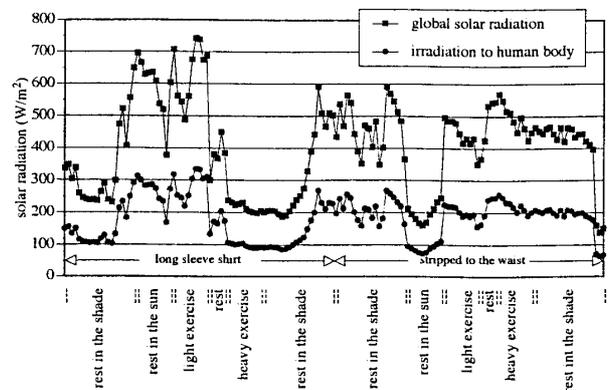
(3.12) 式を整理し、人体へ照射される単位体表面積当たりの日射熱量  $J_{man}$  で表すと次式になる。

$$J_{man} = (0.3 \cos H + 0.04 \sin H) J_{dn} + J_{sh} \quad [\text{kW/m}^2] \quad (3.13)$$

Fig. 3.2 に日射環境下における屋外実験での全天日射量を使用し、(3.13) 式を用いて計算した単位表面積当たりの人体への照射量を示す。



(a) Subject A (21 September 1995)



(b) Subject E (29 September 1995)

Fig. 3.2 Irradiation to human body and the global solar radiation

## 4. 人体熱収支モデル

### 4.1 暑熱環境下の人体の熱的狀態

暑熱環境下の海洋作業における人体の熱的作業限界と温熱対策を策定するために、人体の熱収支を表す数学モデルを構築し、これにより熱的狀態を把握する。

#### (1) 熱収支の構成要因

人体は代謝による発熱と外部への放熱の差により体温が変化する。ただ、人体の中核部は体温調節機構により恒常性を保つため、熱平衡差は皮膚表面から20 mm程度(温暖環境)までの外殻層の温度変化、特に皮膚温の変化として現われる。なお、外殻層は全体の約2/5を占める

以下に熱収支の要因を掲げる<sup>7)8)9)</sup>。

#### a) 発熱要因

作業の負荷によって決まる代謝量  $M$  と仕事  $W$  のエネルギー差は、

$$M - W = M(1 - \epsilon) \quad [W/m^2] \quad (4.1)$$

となる。ここに  $\epsilon$  は作業効率 ( $W/M$ ) である。

$M$  の算定には、作業負荷が変化した際には酸素摂取量が即応できずに酸素量不足や過多の状態となることにより、代謝量に時間遅れを生じること<sup>10)11)</sup>を考慮しなければならない。

#### b) 中核部からの直接放熱要因

呼吸による蒸発潜熱  $E_{res}$  と対流熱伝達  $C_{res}$  があり、これらの量は代謝量  $M$  に比例し、次式で求められる。

$$E_{res} = 1.7 \times 10^{-5} M (5865 - P_{da}) \quad [W/m^2] \quad (4.2)$$

$$C_{res} = 0.0014 M (34.0 - \theta_a) \quad [W/m^2] \quad (4.3)$$

ここに、 $\theta_a$  は環境気温 [ $^{\circ}C$ ] であり、 $P_{da}$  は露点温度における飽和水蒸気圧 [Pa] である。

#### c) 皮膚表面からの放熱要因

顕熱としては皮膚から衣服を通しての対流熱伝達  $C$  と放射熱伝達  $R$  があり、次式で表す。

$$R + C = h \cdot F_{cl} (\theta_{sk} - \theta_0) \quad [W/m^2] \quad (4.4)$$

ここに、 $h$  は総合熱伝達率 [ $W/m^2 \cdot k$ ]、 $F_{cl}$  は衣服の伝熱効率であり、さらに  $\theta_{sk}$  は皮膚表面温度 [ $^{\circ}C$ ]、 $\theta_0$  は作用温度 [ $^{\circ}C$ ] である。

また、潜熱としては、皮膚表面からの蒸発熱  $E_{sk}$  があり、発汗と不感蒸泄が関係し、衣服の透湿抵抗に支配される。

$$E_{sk} = \beta (0.06 + 0.94 W_{rsu}) h_e \cdot F_{pcl} (P_{sk} - P_{da}) \quad [W/m^2] \quad (4.5)$$

ここに、 $h_e$  は蒸発に伴う熱伝達率 [ $W/m^2 \cdot Pa$ ]、 $F_{pcl}$  は衣服の透湿抵抗、 $W_{rsu}$  は発汗による体の濡れ面積率である。また、 $P_{sk}$ 、 $P_{da}$  は各々皮膚温および露点温度での飽和水蒸気圧 [Pa] であり、さらに  $\beta$  は潜熱の修正係数である。

従って、(4.1) 式より (4.2) 式～(4.5) 式を差し引いたものが人体の熱平衡差となり、これが体温変化のための熱量となる。

なお、(4.1) 式～(4.5) 式に現われる各種係数の値につ

いては文献<sup>9)</sup>に詳述しているの、ここでは省略する。

#### (2) 暑熱環境下の特殊要因

暑熱環境下の海洋作業では日射熱量は人体の熱的狀態に大きく影響する。熱収支の計算では (4.4) 式に含まれる作用温度  $\theta_0$  に (3.13) 式による人体に照射される日射熱量  $J_{man}$  の温度換算分  $\Delta\theta_{sr}$  を加算する必要がある<sup>12)</sup>。

$$\Delta\theta_{sr} = \eta \cdot J_{man} / (h_r + h_c) \quad (4.6)$$

ここに、 $\eta$  は衣服の吸収率、 $h_r$  は太陽の輻射熱伝達率 ( $4.65 W/m^2 \cdot k$ ) である。また、 $h_c$  は対流熱伝達率であり、気流 [m/s] に向かって速度  $v_{rw}$  [m/s] で動く場合は次式で与えられる。

$$h_c = 8.612 v_{rw}^{0.53} + 1.98 v_a^{0.86} \quad [W/m^2 \cdot k] \quad (4.7)$$

### 4.2 人体熱収支の数学モデル

熱平衡差で生じる人体外殻層の温度変化を表現する数学モデルをつくり、これにより暑熱環境下に人体を累積する熱量を計算する熱積算式を導く。

#### (1) モデル化のための仮定

海洋作業を対象とするため、長時間の連続した作業は少なく、作業種の異なる比較的短時間の連続した作業が組合わさることを考慮して、次の仮定を行う。

a) 仕事量は階段状に変化し、各作業ステージ内では一定とみなす。作業ステージ間において一定とみなせない場合は分割する。なお、作業効率は各作業ステージとも一定 ( $\epsilon=0.18$ ) とする<sup>9)</sup>。

b) 環境要因 (気温、湿度、気圧等) の変化は、体温の変化に比べ緩やかなので、各作業ステージ内では一定とみなす。

c) 衣服の抵抗 (熱的狀態) は着衣してからしばらく経過しているものとし、定常値をとるものとする。この事と、衣服の熱容量は人体に比べ小さいことから、衣服の熱容量は無視する。

人体の深部体温の恒常性により中核温度は一定とし、皮膚を主体とする外殻層の温度のみを変化するものとする<sup>10)</sup>。このことは2.2および2.3で述べた計測結果において、中核温の代表である直腸温が  $37.3 \sim 37.4^{\circ}C$  に保たれていることから妥当な仮定である。ただし、熱的極限状態が続き、体温調節能力の限界を超える場合には中核温度は変化し、作業限界に至ることになる<sup>10)</sup>。

#### (2) 熱収支モデル

人体の熱的狀態を Fig. 4.1(a) のように模式化して、外環境-衣服-外殻層-中核部間の熱移動を考える。特に外殻層は2 cm程度と薄く、薄板状であるため、Fig. 4.1(b) に示すような1次元的な伝熱機構と見なす。

皮膚 (表面) 温度を  $\theta_{sk}$  および中核温度を  $\theta_{es}$  とすると、皮膚表面から中核部までの温度分布は Fig. 4.2(a) に示すような放物線となり、真皮中の細動脈網の部分に温度の高まりがある<sup>10)</sup>。この温度分布は、皮膚表面からの放熱・受熱があると、まず皮膚温度が  $\Delta\theta_0$  変化し、これが熱伝導によ

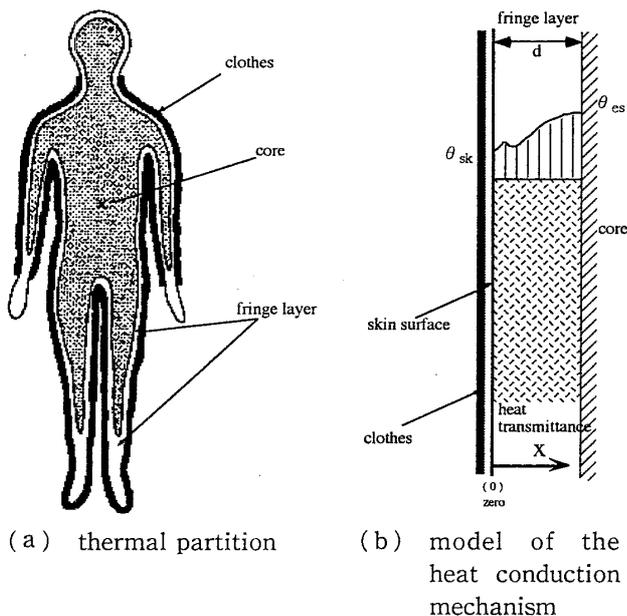


Fig. 4.1 The heat conduction mechanism of the human body

り中核部に向かってしだいに伝わっていく。

1次元的な熱伝導方程式は、座標を  $x$ , 時間を  $t$  とすると、次式で表される。

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = k \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} \quad (4.8)$$

ここに、 $k$  は換算温度拡散率 [ $\text{m}^2/\text{s}$ ] であり、血流も含めた熱運搬機能を換算したものである。中核部では温度変化はないものとする、(4.8) 式の解は次のように与えられる。

$$\theta(x, t) = \Delta \theta_s \left[ \left(1 - \frac{x}{d}\right) - \frac{2}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \sin \frac{n\pi x}{d} e^{-k(n\pi/d)^2 t} \right] \quad (4.9)$$

ここに、 $d$  は外殻層の厚さである。

この式で表される温度の状態は、Fig. 4.2(b)に示されるように、最初は皮膚表面のみの温度変化  $\Delta \theta_s$  がしだいに内部に伝わり、直線分布となって定常化する。従って、ある時点において熱量が内部へ浸入する度合い（熱浸入率と呼ぶ） $\phi(t)$  は次のように定義される<sup>13)</sup>。

$$\begin{aligned} \phi(t) &= \int_0^d \theta dx / \left( \frac{\Delta \theta_s d}{2} \right) \\ &= 1 - \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{(2n-1)^2} \\ &\quad \times \exp \left\{ k \left[ \frac{(2n-1)\pi}{d} \right]^2 t \right\} \end{aligned} \quad (4.10)$$

(4.10)式中の級数は時間がある程度経つと第1項のみで十分であり、 $\phi(0) = 0$  の条件と合わせて次のように近似する。

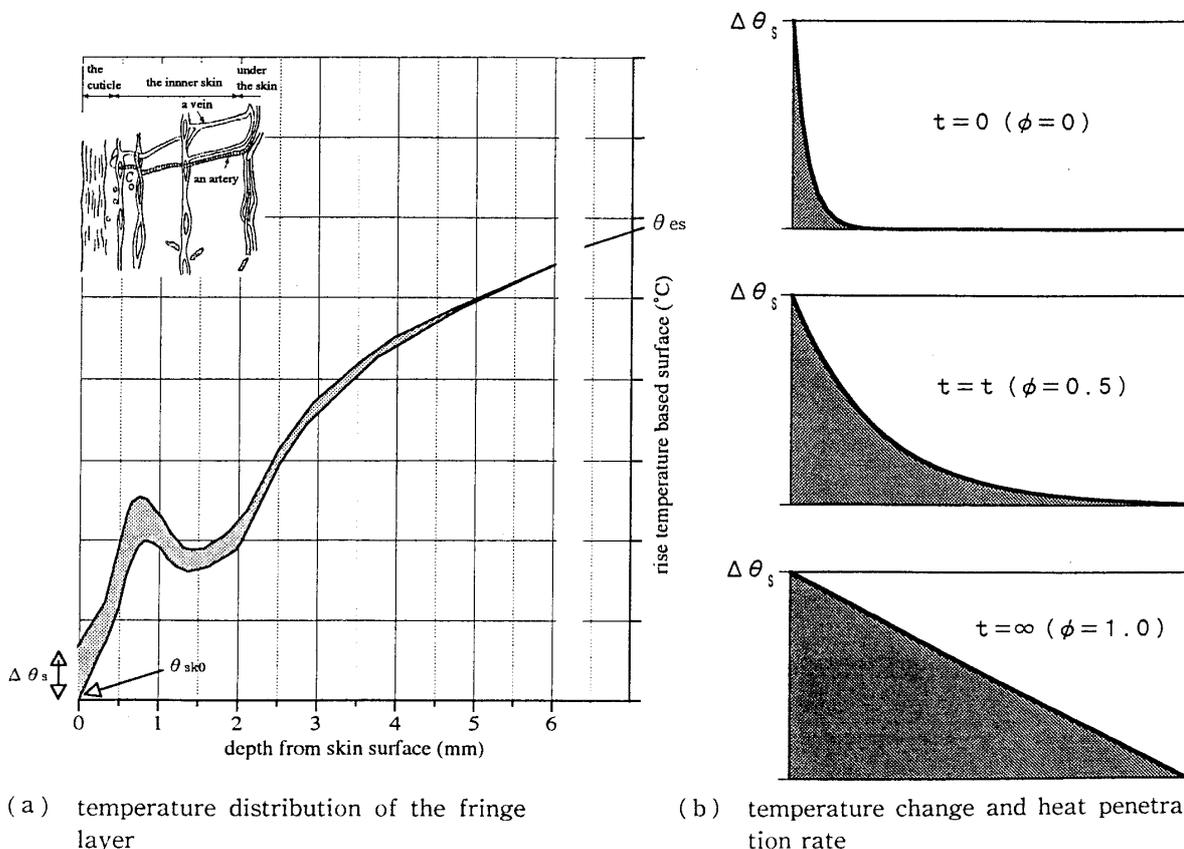


Fig. 4.2 Temperature distribution and heat penetration rate of fringe layer

$$\phi(t) \cong 1 - e^{-\omega t} \quad (4.11)$$

ここに、 $\omega = \pi^2 k/d^2$  である。

外殻層の温度変化に要する熱量は (4.1) 式～(4.5) 式で表される熱平衡の差に等しいので、熱収支方程式は次のようになる。

$$\begin{aligned} \frac{1}{2} m_s \int_0^t \Delta\theta_s(\xi) \phi(t-\xi) d\xi \\ = \int_0^t [q_r - \alpha(\theta_{sk0} + \Delta\theta_s(\xi) - \theta_0)] d\xi \end{aligned} \quad (4.12)$$

ここに、 $m_s$  は外殻層の単位面積当たりの熱容量であり、 $\theta_{sk0}$  は作業ステージ開始時の皮膚温度、 $\xi$  は時間積分のための補助変数である。また、

$$q_r = M(1-\varepsilon) - E_{res} - C_{res} - E_{sk} \quad (4.13)$$

$$\alpha = h \cdot F_{c1} \quad (4.14)$$

(4.12) 式の左辺は、外殻層の温度変化を熱浸率  $\phi(t)$  を単位時間の応答関数とした畳み込み積分で表している。

(4.12) 式は書き改めると次のように表される。

$$\int_0^t \Delta\theta_s(\xi) \left[ \frac{m_s}{2} \phi(t-\xi) + \alpha \right] d\xi = [q_r - \alpha(\theta_{sk0} - \theta_0)] t \quad (4.12)'$$

これは第1種の Volterra 型積分方程式であり、第2種へ変換する。

$$\begin{aligned} \Delta\theta_s(t) + \frac{m_s \omega}{2\alpha} \int_0^t e^{-\omega(t-\xi)} \Delta\theta_s(\xi) d\xi \\ = \frac{q_r}{\alpha} - \theta_{sk0} + \theta_0 \end{aligned} \quad (4.15)$$

この方程式の解は次のようになる。

$$\Delta\theta_s = \left( \frac{q_r}{\alpha} - \theta_{sk0} + \theta_0 \right) \left[ 1 + \frac{1 - e^{-\omega(1 - m_s/2\alpha)t}}{\frac{2\alpha}{m_s} - 1} \right] \quad (4.16)$$

従って皮膚温度は  $\theta_{sk} = \theta_{sk0} - \Delta\theta_s$  であることにより、次式で求められる。

$$\theta_{sk} = \theta_{sk0} - \left( \theta_{sk0} - \theta_0 - \frac{q_r}{\alpha} \right) \frac{\left[ 1 - \frac{m_s}{2\alpha} e^{-\omega(1 - m_s/2\alpha)t} \right]}{1 - \frac{m_s}{2\alpha}} \quad (4.17)$$

### 4.3 計算例

皮膚温度の計算式 (4.17) 式び妥当性を調べるために、この式による計算結果と恒温室内および日射環境下における計測結果との比較を行う。計算には次のことを考慮している。

a) 発汗の状態は実験時の衣服内湿度の値から判定した。

b) 対流熱伝達率  $h_c$  の計算に用いる風速は、静止時は屋内 0.1 m/s 屋外 0.5 m/s とし、運動中は体の動きによる相対風速と衣服の開口部の動きによる衣服内からの熱移流<sup>10)</sup>を考慮して 2 m/s とした。

c) 作業ステージの開始時における作業負荷の変化に代

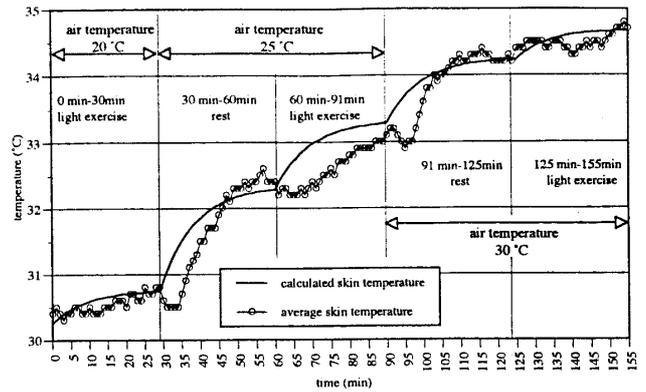


Fig. 4.3 Relationship of the skin temperature and calculated skin temperature (subject D)

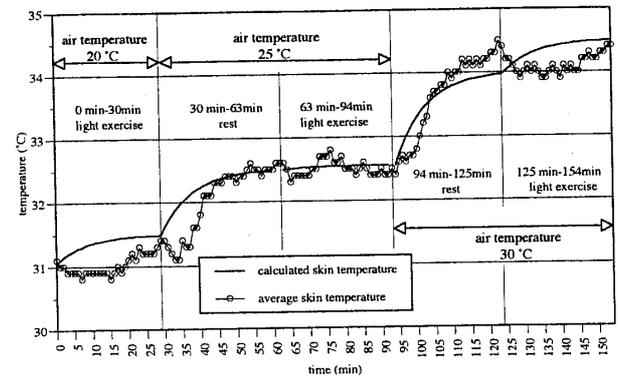


Fig. 4.4 Relationship of the skin temperature and calculated skin temperature (subject E)

謝量の決定要因である酸素摂取が追従できないことを考慮して、代謝量に時間遅れが生じるものとした<sup>10)11)</sup>。

計算に際しては、熱拡散の度合い  $\omega$  は、外殻層 (皮膚と脂肪) の換算熱拡散率を  $k = 0.84 \times 10^{-7} (\text{m}^2/\text{s})$  とし<sup>12)</sup>、厚さ  $d = 20 \text{ mm}$  とすると、 $\omega = 0.0021 (1/\text{s})$  となる。一方、熱容量  $m_s$  は、皮下脂肪量、高熱に対する順化度などにより、変温域帯の個人差が大きく、実験値より同定した値 [ $2.5 \times 10^3 \sim 4.1 \times 10^3 (\text{J}/\text{m}^2)$ ] を用いた。

#### (1) 環境温度が変化する場合の実験

被験者 D および E (実験条件は Table 2.4 および計測結果は Fig. 2.2, Fig. 2.3 に示す) について、皮膚温の計測値と計算値を比較して Fig. 4.3 および Fig. 4.4 に示す。これらの図より、全般的な皮膚温の変化は (4.17) 式により解析できることが分かる。ただし、両者は細部に異なる点が見られるが、作業ステージ切替時などの熱的諸要因を計算に考慮してない事に原因する。

#### (2) 日射環境下における実験

被験者 A および E (実験条件は Table 2.5 および計測結果は Fig. 2.4, Fig. 2.5 に示す) について Fig. 3.2 のような人体に照射される日射熱量の場合について解析を行った。結果を Fig. 4.5 および Fig. 4.6 に示す。なお、図中の

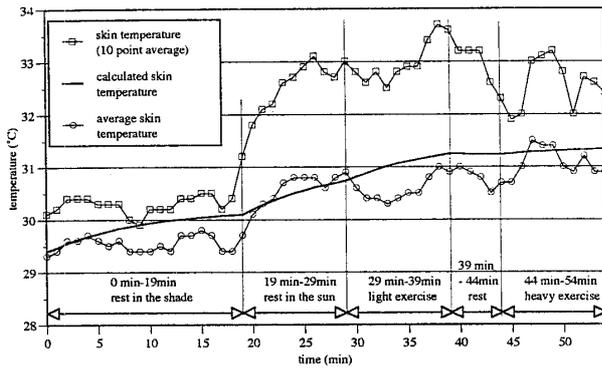


Fig. 4.5 Relationship of the skin temperature and calculated skin temperature (subject A) -sunshine environment-

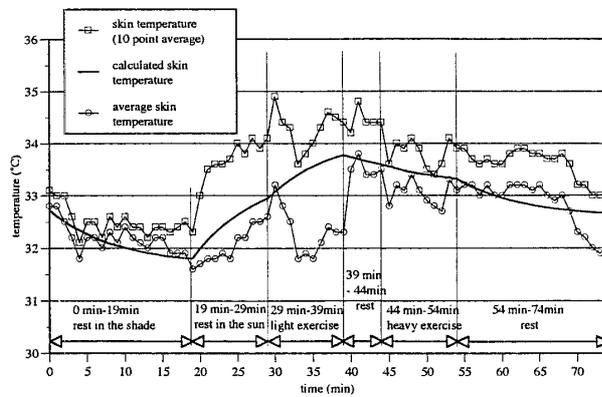


Fig. 4.6 Relationship of the skin temperature and calculated skin temperature (subject E) -sunshine environment-

皮膚温計測値は(2.2)式による5点加重平均および10点の相加平均の値を示している。これは日射熱量による皮膚温変化は5点計測では完全には追従できないものと考えた事による。

これらにより、日射時の熱量は(3.13)式に基いた(4.6)式による作用温度への加算により取り扱い得ることが分かった。

なお、(4.6)式における放射熱の吸収率は衣服(白系)0.4<sup>(4)</sup>および皮膚0.6<sup>(12)</sup>として面積率により $\eta=0.43$ とした。

### 5. 蓄熱量と熱的作業限界

人体に熱が蓄積されると作業能力が低下し、さらに昇じると熱中症に至るため、暑熱環境下での作業では何らかの温熱対策を行うか、作業継続時間の限界設定を行う必要がある。これらの判断の尺度として、熱平衡に欠かせない熱蒸散に対する発汗量の比である高温ストレス指標(HSI)や予想4時間発汗(P4SR)指標が用いられている<sup>12)</sup>、ただ、これらの指標は発汗以外の熱的要因が考慮し難く特に海洋暴露環境では使いづらい面がある。

ここでは、人体の外殻層に蓄積される熱量を用いて、熱的諸要因を考慮した暑熱環境下の温熱指数とする。

#### 5.1 1作業パターンと熱蓄積

任意の時点における人体の熱収支 $q(t)$ は次のようになるので、

$$q(t) = q_r - \alpha(\theta_{sk}(t) - \theta_0) \tag{5.1}$$

第 $n$ 作業ステージの時刻 $t=t$ における累積熱量 $H_n(t)$ は次のように表される。

$$H_n(t) = \sum_{i=1}^{n-1} Q_i(T_i) + Q_n(T_i) \tag{5.2}$$

ここに、

$$Q_i(t) = (q_{ri} + \alpha_i \theta_{0i})t - \alpha_i \int_0^t \theta_{sk}(\xi) d\xi \tag{5.3}$$

ただし、 $T_i$ は第1作業ステージの継続時間であり、各主要因には添字(i)を付して表す。

$$q_{ri} = M_{(i)}(1 - \epsilon) - E_{res(i)} - C_{res(i)} - E_{sk(i)} \tag{5.4}$$

$$\alpha_i = h \cdot F_{cl(i)}$$

なお、(5.3)式における、 $\theta_{sk}(t)$ は、(4.17)式で表され、その時間積分値は次のようになる。

$$\begin{aligned} \int_0^t \theta_{sk}(\xi) d\xi = & [(\theta_0 + q_r/\alpha) - \lambda(\theta_{sk0})]t/(1-\lambda) \\ & + \lambda(\theta_{sk0} - \theta_0 - q_r/\alpha) \\ & \times [1 - \exp(-\omega(1-\lambda)t)]/\omega(1-\lambda)^2 \end{aligned} \tag{5.5}$$

ここに、 $\lambda = m_s/2a$ である。

例として、環境温度が変化する場合の実験における被験者DおよびE(実験結果はFig. 2.2, Fig. 2.3)の蓄熱量を計算するとFig. 5.1のようになる。被験者Eの方が運動量が多いので蓄熱量が多いが、途中で降下するのは発汗開始により放熱量が増すことによる。

#### 5.2 熱的要因と作業限界

皮膚温の(4.17)式に基づいた蓄熱量(5.2)式は環境(作用)温度、代謝量、clo値、風速、日射熱量等の熱的要因の影響を表すことができるが、特に前2者に蓄熱量 $H_n(t)$ は大きく依存する。

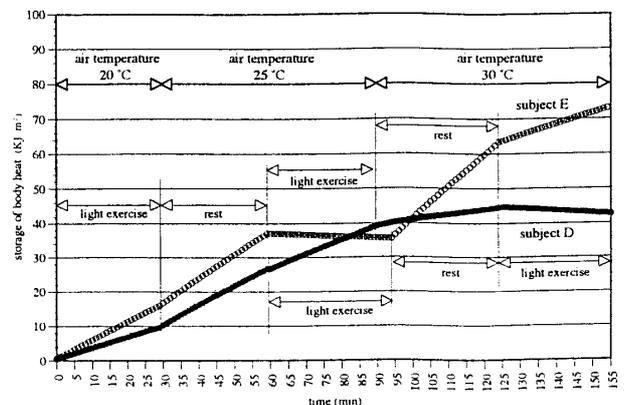


Fig. 5.1 Relationship of the storage of body heat of the subject D and the subject E

(1) 環境温度

環境 (作用) 温度  $\theta_0 = 20 \sim 40^\circ\text{C}$  において, 比較的重度の作業 (代謝量  $247 \text{ W/m}^2$ ) を継続して行った場合の蓄熱量  $H_1(t)$  を計算する。

この場合, 初期皮膚温は  $30.2^\circ\text{C}$  とし, 発汗による身体の濡れ率  $W_{rsW}$  は, 作業開始時に既に体が濡れている場合には  $100\%$  であるが, 乾いている場合には皮膚温  $\theta_{sk}$  に依存する次式<sup>15)</sup> により決める。

$$W_{rsW} = [0.4(\theta_{sk} - 32.5) + 0.286] / (35.5 - \theta_{sk}) \quad (5.6)$$

$(0 \leq W_{rsW} \leq 1)$

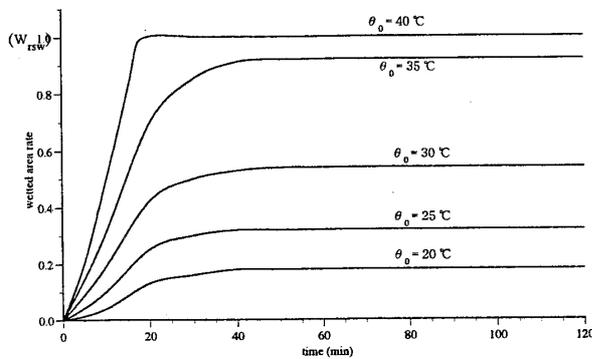
計算例における濡れ率  $W_{rsW}$  と皮膚温  $\theta_{sk}$  の変化を Fig. 5.2 に示すが, いずれも 40 分程度で平衡状態となる。

各環境温度に対応した蓄熱量は Fig. 5.3 のようになるが, 下限は濡れ率  $100\%$  であり, 上限は (5.6) 式による濡れ率の場合である。なお,  $40^\circ\text{C}$  では作業中ほとんど  $100\%$  の状態であり, 上下限はほぼ一致する。

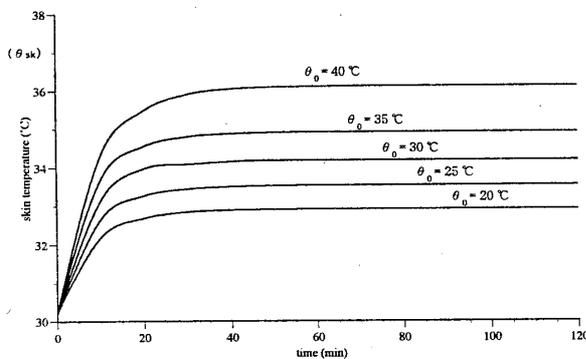
日射がある場合には, 作用温度  $\theta_0$  に日射熱量による換算温度  $\Delta\theta_{sr}$  を付加した環境温度に対する蓄熱量を求めればよい。

(2) 代謝量

環境温度  $30^\circ\text{C}$  において作業負荷を, 軽度 ( $102 \text{ W/m}^2$ ), 中程度 ( $165 \text{ W/m}^2$ ), 重度 ( $247 \text{ W/m}^2$ ), と変えた場合の蓄熱量の経時変化を Fig. 5.4 に示す。これらより発汗による放熱の状態が極めて蓄熱量に影響することがわかる。



(a) the time change of the wetted area rate



(b) the time change of the skin temperature

Fig. 5.2 Variation of human thermal condition of the each atmospheric temperature

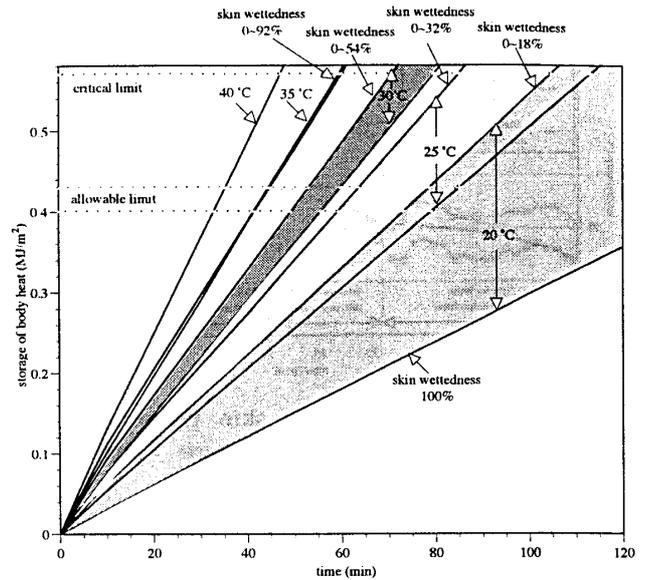


Fig. 5.3 Relationship of atmospheric temperature and the storage of body heat (metabolic heat:  $247 \text{ W/m}^2$ )

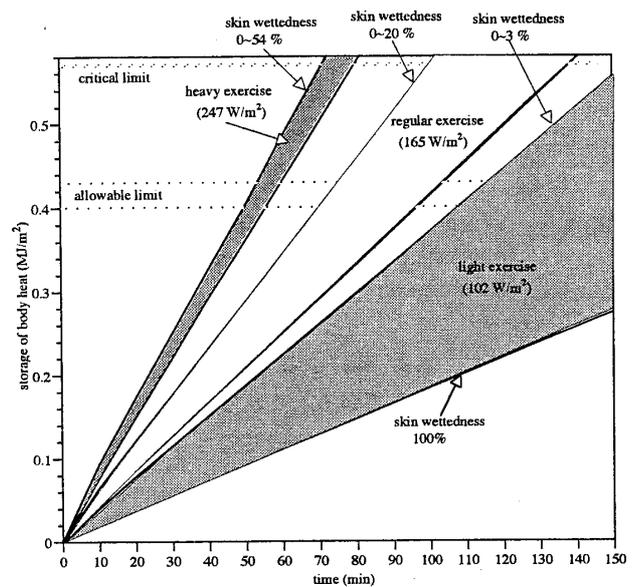


Fig. 5.4 Relationship of metabolic heat production and the storage of body heat (atmospheric temperature:  $30^\circ\text{C}$ )

(3) 熱的作業限界

海洋構造物の設計時に, そこで行われる作業を想定して, 熱的な作業限界を超えることが予測される場合には何らかの温熱対策を講じる必要があるが, その補償レベルの判定には蓄熱量  $H_n(t)$  を用いればよい。なお, ここで述べる作業限界には疲労や倦怠によるものは含まないものとする。

熱的作業限界を定めるには多くの作業分析を行う必要があり, その限界および対策については第2報以降に述べる。ここでは文献を基に, 許容限界の目安について考えてみる。

i) 船舶関係の労働調査<sup>16)</sup>では、機関員の石炭焚作業は、1時間労働に1時間休息で乾球40°Cが限界であり、35°Cであれば継続可能となっている。焚火作業は重労働であり、Fig. 5.3から蓄熱量を読みとると、40°Cで0.76 MJ/m<sup>2</sup>、35°Cで0.61 MJ/m<sup>2</sup>となり、この付近が極限とみられる。

ii) 航空宇宙関係の実験<sup>17)</sup>では、活発に働かしている筋肉に1000 Btu (1.056 MJ)まで蓄熱することができることが分かっている。この値に欧米人の平均体表面積1.86 m<sup>2</sup>を用いると限界値は0.57 MJ/m<sup>2</sup>となる。ただし、一般に作業能力は生理的に耐えうる限界値の75%付近で悪化し始めることから許容値は0.43 MJ/m<sup>2</sup>となる。

以上のことから、許容限界は0.4 MJ/m<sup>2</sup>程度と考えられるが、この値に何らかの余裕を加味しなければならない。

## 6. 結 言

恒温室および日射環境下において運動時の体温計測を行い、これに基づいて皮膚温を求める計算式を導き、この式は実験との比較により全般的な皮膚温の変化を表し得ることを確認した。暑熱環境下の海洋作業における熱的作業限界と温熱対策を策定するため、皮膚温の式を基に人体の蓄熱量の計算式を定め、この式が各種の熱的要因の影響を表現でき、温熱指数として有用なことを示した。

なお、人体蓄熱量の計算には、発汗の放熱効果は極めて大きく、体温調節反応も含めてさらに精密化を図る必要がある。

## 参 考 文 献

- 1) 高比良英雄 (1925) 日本人新陳代謝論 (其二), 日本人体表面積の測定並に之を表す式に就て, 栄養研報, 1, 61-95.
- 2) 倉田正一・船津雄三: 平均皮膚温の算出について, 労働科学, 30 (1954).
- 3) Beaumont, W. Von & Bullard, R. W. Sweating: Its rapid response to muscular work, Science, 141 c pp. 643-646. (1963)
- 4) Duffie J. A., Beckman W. A.: Solar Engineering of Thermal Processes, Wiley-Interscience, pp. 1~26. (1980)
- 5) 田中俊六他: 最新建築環境工学 (改訂版), 井上書店, (1992)
- 6) 安藤定雄他: 浮遊式海洋構造物の実海域実験-その2. 実験構造物の日射による温度分布について: 日本造船学会論文集, 第167号, pp. 301-311, (1990).
- 7) 村山雅己, 中橋美智子: 海洋暴露環境における人体の温熱制御に関する基礎的研究 (第1報), 日本造船学会論文集, 第173号, (1993).
- 8) 村山雅己, 中橋美智子: 海洋暴露環境における人体の温熱制御に関する基礎的研究 (第2報), 日本造船学会論文集, 第176号, (1994).
- 9) 村山雅己, 福地信義, 中橋美智子: 海洋暴露環境における人体の温熱制御に関する基礎的研究 (第3報), 日本造船学会論文集, 第178号, (1995).
- 10) 中山昭雄編: 温熱生理学, 理工学社, (1981).
- 11) 長峰普吉: スポーツとエネルギー・栄養, 大修館 (1979).
- 12) 人間-熱環境編集委員会編: 人間-熱環境, 日刊工業新聞社, (1989).
- 13) 福地信義, 栖原二郎: 船舶艦装における熱伝達問題 (その3), 日本造船学会論文集, 第154号 (1983).
- 14) 日本機械学会: 伝熱工学資料 (第4版), 丸善 (1991).
- 15) 松岡脩吉: 平均皮膚温と「ぬれ面積」との関係, 第8回人間-熱環境シンポジウム報告集, pp. 73-76, (1984).
- 16) 三浦豊彦: 高温労働における休息について, 労働科学, vol. 30, No. 3 (1954).
- 17) Wortz, E. C, etc; Study of Heat Balance in Full Pressure Suits, Aerospace Med., 38 (1967).