The Japan Society of Naval Architects and Ocean Engineers

労働安全のための日射下の温熱環境評価と熱対策に関する研究
(その1　暑熱環境と人体蓄熱)

正員 福地信義*　正員 竹内　淳**

A Study of Thermal Stress Based on Metabolic and Radiation Heat for Improvement of Working Environment in Exposed Spaces
(Part 1 Aspects of summer heat and storage of body heat)

by Nobuyoshi Fukuchi, *Member*　Jun Takeuchi, *Member*

Summary

As a recent tendency to take high interest in the environmental problem, the time has come to reconsider the present working conditions. The thermal environment at an exposed working place in a hot season with skylight should keep within the thermal limitation of human body, considering the metabolic heat and radiation heat. Otherwise, the storage of body heat accumulating during an operation has an effect on deteriorating the work efficiency and the deficit of attention. In case of severe conditions beyond the criterion of thermal environment, some countermeasures such as the use of sunshade or cooling fan need to be taken adequately. Then, the relation between the heat storage of body during work and the environmental factors has to be clarified reliably corresponding to the magnitude of working load.

In order to grasp this relation, the formula of heat storage of human body considering the effect of sunshine is established, and the experiment in the exercise using an ergo-meter is carried out with measuring the temperature of body skin under sunshine environment. Moreover, the working conditions on the upper deck of a building ship are measured to investigate the actual situation of working environment. And it attempts to examine the thermal criterion of working environment by merging these results.

緒　言

1．1　はじめに

造船工場での作業は一般に夏季には厳しい熱的環境下に曝され、人体の産熱・放熱の不平衡による蓄熱のために作業効率の低下、注意力低下による労働災害の生起、さらには熱中症の発症も起こり得る。特に、日射のある環境では熱的に厳しい状態に陥ることも考えられ、許容できる温熱環境を確保できない場合には、人体を熱的許容限界内に維持するための暑熱対策が必要となる。日照下の作業では、日除けや冷却ファンなどの熱対策が考えられるが、そのためには生産計画時に種々の環境要因や温熱要因が人体に与える熱的影響を把握して、適切かつ効果のある温熱対策を行うことが不可欠である。

本研究では、まず造船所外業現場の熱的な環境調査を行ってその実態を把握するとともに、エルゴメーターを

* 九州大学大学院工学研究院
** 九州大学大学院工学府(研究当時、現在 IHI-MU)
原稿受理　平成17年5月30日

NII-Electronic Library Service

The Japan Society of Naval Architects and Ocean Engineers

用いた作業負荷や環境要因に応じた人体の皮膚温度を計測し、人体の熱平衡方程式から人体蓄熱量を計算した。また、日射のある暑熱環境下での作業において代謝量、周囲温湿度、衣服抵抗などの熱的要因と人体の熱平衡との関係を調べた。さらに種々の環境・温熱要因と作業許容限界の判断指標となる人体の蓄熱量との関係を明らかにして、暑熱環境下の作業における熱的安全性を評価する指標について考察した。

1．2 暑熱環境下の労働安全と熱中症

暑熱環境下に曝されたり、あるいは運動などによって人体内部で多くの熱を発生させるような条件下にある場合には熱中症が発症し、体温を維持するための生理的な反応により生じる失調状態から、全身の臓器の機能不全に至る病態を生じると云われている。労働中の熱中症ついては、暑熱環境下での作業の危険性について認識がないまま作業が行われることに原因があり、適切な休憩時間、水分・塩分等の補給、作業者の健康状態の把握などが必要である。したがって、事業者および労働者1人1人に熱中症の予防に対する基本的な知識を持たせ、必要な熱対策を講じることにより、熱中症やそれに伴う様々な事故の発生を防止することができる。

熱中症[1]は、軽症度では四肢や腹筋などに痛みを伴った痙攣があり、さらに失神に至るが、他に脈拍が速く弱い状態になり、呼吸回数の増加、顔色が悪くなる、唇がしびれる、目眩なども見られることがあり、この時点に至る前に作業を中止しなければならない。これを超えると、脱水と塩分などの電解質が失われることで抹消の循環が悪くなり、極度の脱力状態となって、目眩感、疲労感、虚脱感、頭重感（頭痛）、失神、吐き気、嘔吐などの症状が発生すると云われている。

また医学的には、1)病態生理学的に体温調節機構の失調、体温または脳溢の上昇を伴う中枢神経障害が原因の“熱射病”、2) 大量の発汗による塩分喪失に対して補給不足によって起こる“熱痙攣”、3)、皮膚血流量が増加し、代償的に心拍数が増加して一定限度を超えたときに起こる循環障害を主体とする“熱虚脱”、および4) 大量の発汗で血液が濃縮し、心臓の負担増大や血流分布の異常が起こる“熱疲労”に分類されており、それぞれの症状に応じた処置と発生防止策が必要である[1].

2 人体に及ぼす温熱要因と人体熱平衡方程式

2．1 人体の熱収支

人体は発熱体であり恒温体である。体内で産出した代謝熱を仕事（行動）、呼吸による放熱、皮膚から衣服を通しての対流・放射により外部環境に逃がして熱平衡を保ち、人体基幹部の体温を一定に保っている。この熱平衡が崩れ、蓄熱がプラスに向かった時は発汗などの放熱を促す現象が起こり、逆にマイナスに向かった時はふるえなどの産熱を促す現象が生じる。したがって、人体蓄熱量が0に近い時が人体にとって快適な環境であり、これを外れるほど人体に激しい環境になると云える。

この人体と環境との熱交換に影響を与える要素をここでは環境温熱要因と呼び、その主要因は代謝量、着衣量、環境温度、環境湿度、気流速、放射温度である。

2．2 人体温熱要因と環境要因

人体の発熱要因は代謝量のみであり、この量を表すには *Met*（Metabolic equivalents）を用いる[2]。椅子に座った安静状態を基礎代謝といい、この状態を 1*Met* の単位で表し、58.2 W/m^2 に相当する。作業・運動時の代謝量は、およそ軽作業 70 W/m^2（1.2*Met*）、一般作業 140 W/m^2（2.4*Met*）、重作業 210 W/m^2（3.6*Met*）程度となっている。

高温時の体温調節における自律性調節反応での人体冷却の制御方法としては、発汗反応と皮膚血管反応がある[1),3)]。発汗反応は人体表面上に発現する冷却現象であり、安静時で 665 W/m^2 および運動時で 1789 W/m^2 にもなる。これに対し、皮膚血管反応は、皮膚血管を拡張・収縮し皮膚血流を増減することにより深部熱の皮膚表面への熱輸送を増減する反応である。

体温調節における自律調節反応以外に、衣服の脱着などの行動性の調節がある。衣服はクロー[*clo*]値と呼ばれる熱抵抗で表され[4),5)]、1*clo* は 21℃の静穏な室内で椅子に座っている状態（代謝量 1.0*Met*）で快適さを保てる衣服の熱抵抗であり、1*clo*＝0.155 $m^2 \cdot K/W$ である。clo 値の程度としては、典型的な真夏の衣服「ブリーフ・パンツ・半袖の袖なしシャツ・薄い靴下・サンダル」で 0.3*clo* であり、重厚なビジネススーツ「長袖・長ズボンの綿製下着・シャツ・上下のスーツ・ジャケット・チョッキ・毛糸の靴下・重厚な靴」で 1.5*clo* 程度である[4]。

なお、clo 値の推測方法として重量による推測方法があり[5]、例えば男性用衣服では、

$$[\text{重ね着 clo 値}]=[\text{衣服重量合計}(g)]\times 0.00058+0.068 \quad (1)$$

で表される。例として、日射環境下での蓄熱に関する実験では、作業服(上下)1040g、下着 220g、靴 400g の計約 1660g となっている。これより、実験時の clo 値≒1.03[clo]となり、計算においては *clo* 値を 1.0 とした。

人体に熱的影響を及ぼす環境要因[3]には、環境気温、

NII-Electronic Library Service

The Japan Society of Naval Architects and Ocean Engineers

環境湿度（相対湿度）、気流速（風速）、日射による放射、壁や床の温度に依存する周囲からの熱放射などの他、雨による濡れなども考えられる。ここでは日射のある暑熱環境下での作業を対象とするため、雨による濡れについては考慮しない。

2．3　人体熱平衡方程式と蓄熱量

人体の熱平衡方程式は代謝量 M に対し、外へなす仕事 W、呼吸による対流と潜熱放熱（$C_{res}+E_{res}$）、皮膚からの対流と輻射放熱（$C+R$）、そして不感蒸泄と発汗などによる皮膚表面の濡れによる潜熱放熱 E_{sk} の合計が平衡する式で表される[6),7),8)]。

$$M = W + C_{res} + E_{res} + C + R + E_{sk} \quad [W/m^2] \qquad (2)$$

しかし、暑熱環境下での作業では人体に照射される日射熱量を加算する必要があり、本研究では(2)の左辺に日射熱量 E_{sun} を加えて計算を行った。

$$M + E_{sun} = W + C_{res} + E_{res} + C + R + E_{sk} \quad [W/m^2] \qquad (3)$$

なお、(2)、(3) 式において各要因の負値は外部からの受熱を意味する。

この熱平衡方程式より、体内の熱不平衡量を S とすると次式で表され、熱の平衡がとれている場合には S は 0 となる。

$$S = M(1-\varepsilon) - C_{res} - E_{res} - E_{sk} - (C+R) + E_{sun} \quad [W/m^2] \qquad (4)$$

ここで、ε は代謝量と作業量の比 W/M で表される作業の効率である。西ら[9)]が行った負荷 $W=29.7\,W/m^2$ に調節されたエルゴメーターを使用した実験では、代謝量 $M=164\,W/m^2$ の関係になっており、ここではこの比をとって $\varepsilon=0.18$ 程度とみなす。

(4) 式の各項目を個別に見ていくと次のようになる。

(1) 呼吸気道からの対流熱伝達 C_{res} と蒸発潜熱 E_{res}

呼吸量が代謝量に比例するものとして次式で与えられる。

$$C_{res} = 0.0014M(34.0 - T_a) \quad [W/m^2] \qquad (5)$$

$$E_{res} = 1.73\times10^{-5}M(5867 - P_{da}) \quad [W/m^2] \qquad (6)$$

ここで、P_{da} は露点温度における飽和水蒸気圧[Pa]であり、$P_{da} = P_a \cdot RH$ で表される。P_a は環境温度における飽和水蒸気圧[Pa]、RH は相対湿度[無次元；n.d.と記す]、そして T_a は環境温度[℃]である。環境温度から飽和水蒸気圧を求めるには次式により 0～40℃の範囲において ±3Pa の精度で求められる。

$$P_a = 133.3\exp\left[18.67 - 4030/(235 + T_a)\right] \quad [Pa] \qquad (7)$$

(2) 対流熱伝達 C および放射熱伝達 R

対流熱伝達 C と放射熱伝達 R は作用温度 T_o および clo 値で表した衣服の熱抵抗 I_{clo} を用いて次式で表すことができる。

$$C + R = h(T_{sk} - T_o)F_{cl} \quad [W/m^2] \qquad (8)$$

ここで、h は総合熱伝達率であり、対流熱伝達率 h_c と放射熱伝達率 h_r の合計であり、放射熱伝達率は人体表面温度と環境の平均放射温度の差が 30℃程度までは、$h_r = 4.652\ W\cdot m^{-2}\cdot ℃^{-1}$ で与えられている。また、F_{cl} は衣服の放射と対流熱伝達への影響の度合いを表す伝熱効率であり、次式で計算できる。

$$F_{cl} = 1/(1 + 0.155\cdot h\cdot I_{clo}) \quad [n.d.] \qquad (9)$$

(3) 皮膚表面からの蒸発潜熱 E_{sk}

衣服を着用した人体の皮膚表面からの最大の蒸発放熱 E_{max} は、衣服の熱抵抗と透湿抵抗および発汗、不感蒸泄が関係し、次式で与えられる。

$$E_{\max} = h_e \cdot F_{pcl}(P_{sk} - P_{da}) \quad [W/m^2] \qquad (10)$$

ただし、P_{sk} は皮膚温度 T_{sk} での飽和水蒸気圧[Pa]である。ここで、蒸発熱の放熱量は発汗量に支配され、発汗が起きていない場合には濡れ面積率 W_{rsw} が 0 になるが、不感蒸泄があることから蒸発熱の拡散は 0 とならず、不感蒸泄による放熱は $E_{\max}$ の 6%、発汗によるものを 94% とする。したがって、皮膚表面からの蒸発による E_{sk} は濡れ面積率 W_{rsw} を考慮して次のように表す。

$$E_{sk} = \alpha(0.06 + 0.94W_{rsw})E_{\max} = 0.0165\alpha(0.06 + 0.94W_{rsw})h_e \cdot F_{pcl}(P_{sk} - P_{da}) \quad [W/m^2] \qquad (11)$$

ただし、α は衣服を通した蒸発潜熱の放出に関する修正係数であり、(4) 式において極めて快適な状態を想定し $S=0$ となるよう値を決め、$\alpha=0.25$ とした[7)]。

a) 熱伝達率 h_e

大気圧のもとにおける蒸発に伴う熱伝達率 h_e は次式で与えられる。

$$h_e = 0.0165\cdot h_c \quad [W/m^2Pa] \qquad (12)$$

ここに、h_c は対流熱伝達率であり、気流速や放熱体の形や大きさによって異なる。ここでは、より大きい気流速にも対応できる、気流 v_a [m/s]に向かって速度 v_{fw} [m/s]で歩行する場合の西らの実験式[9)]を用いる。

$$h_c = 8.61v_{fw}^{0.53} + 1.93v_a^{0.86} \quad [W/m^2K] \qquad (13)$$

b) 透湿効率 F_{pcl}

皮膚表面で蒸発した水分が衣服を透過するときの影響は、衣服の熱抵抗 I_{clo} と環境の対流熱伝達の関数として、西らが衣服の透湿効率 F_{pcl} を次のように[9)]誘導している。

$$F_{pcl} = 1/(1 + 0.143h_c \cdot I_{clo}) \quad [n.d.] \qquad (14)$$

c) 濡れ面積率 W_{rsw}

濡れ面積率 W_{rsw} は皮膚温度 T_{sk} の関数で次のように表される。

NII-Electronic Library Service

The Japan Society of Naval Architects and Ocean Engineers

$$W_{rsw}=\{(T_{sk}-32.5)\beta+0.5\}/\{2.5a+(35.5-T_{sk})\}$$
$$(0\le W_{rsw}\le 1)\quad [n.d.]\qquad (15)$$

ここに、β は気流速にわずかながら依存する係数であるが、経験的に約 0.7 で代表することができる。濡れ面積率 W_{rsw} は、不感蒸泄などにより常に若干の濡れがあり、$0.06\le W_{rsw}\le 1$ となる。

(4) 日射熱量 E_{sun}

日射による熱量 E_{sun} は、人体に照射される日射量 J_{man} の温度換算分 ΔT_{sr} で表し、次式を (8) 式に含まれる作用温度 T_o に加算することで、一般にはその影響を取扱っている[10]。

$$\Delta T_{sr}=\eta\cdot J_{man}/(h_r+h_c)\qquad [^oC]\qquad (16)$$

ここで、η は衣服の吸収率である。

しかし、本研究では日射による影響を精確に算定する必要があり、人体に照射される日射量と衣服および人体との間の影響を考慮して次式のような日射熱量 E_{sun} の項を新たに導出し、(2) 式に算入した。

$$E_{sun}=\frac{C_s}{1/\varepsilon_{cl}+1/\varepsilon_{body}-1}\left((T_{cl}+273)^4-(T_{sk}+273)^4\right)$$
$$[W/m^2]\qquad (17)$$

ただし、C_s は黒体の放射定数 $5.67\times10^{-8}W\cdot m^{-2}\cdot K^{-4}$、$\varepsilon_{cl}$ は衣服の放射率[n.d.]、ε_{body} は人体表面の放射率[n.d.]、T_{sk} は皮膚温度[℃]、T_{cl} は日射の影響を受けた衣服温度[℃]である。t_{cl} を日射の影響を受けていない衣服温度[℃]および Δt_{cl} を日射による衣服温度の増加分[℃]とすると、T_{cl} は次のように表される。

$$T_{cl}=t_{cl}+\Delta t_{cl}=t_{cl}+\frac{\varepsilon_{cl}\cdot J_{man}}{h_{cl}\cdot\rho\cdot\delta}\qquad [℃]\quad (18)$$

ここで、h_{cl} は衣服の比熱[$J\cdot kg^{-1}\cdot℃^{-1}$]、$\rho$ は衣服の密度[kg/m^3]、δ は衣服の厚さ[m]である。

$$t_{cl}=(T_a+T_{sk})/2\qquad [℃]\quad (19)$$

(5) 人体蓄熱量

以上、(5) ~(15) 式および (17) ~(19) 式をまとめて (4) 式を書き改めると、人体熱平衡方程式は次式のようになる。

$$S=M[(1-\varepsilon)-1.73\times10^{-5}(5867-RH\cdot Pa)$$
$$-0.0014(34.0-T_a)]-h(T_{sk}-T_o)F_{cl}$$
$$-0.0165\alpha(0.06+0.94W_{rsw})h_c\cdot F_{pcl}(P_{sk}-RH\cdot P_a)$$
$$+\frac{C_s}{1/\varepsilon_{cl}+1/\varepsilon_{body}-1}\left((T_{cl}+273)^4-(T_{sk}+273)^4\right)$$
$$[W/m^2]\qquad (20)$$

蓄熱量 H_s は不平衡量 S の時間積分となり、次式となる。

$$H_s=\int_0^{\tau}S(\tau)d\tau\qquad [J/m^2]\qquad (21)$$

安静状態から作業開始した場合、作業の各ステージ間で環境要因や熱的要因に変化が少ない場合には次式で表される。

$$H_s=\sum_{i=1}^{N}S_iT_i\qquad [J/m^2]\qquad (22)$$

ここに、S_i, T_i は作業ステージ i の単位時間当たりの蓄熱量および継続時間である。

人体蓄熱量には限界値があり[1]、これを超えないように蓄熱の抑制を行うには、1) 気温、平均放射温度、気流速を調整する、2) 作業負荷を減らして代謝量を減少する、3) 作業間に休憩を取る、などの暑熱対策があり、これらの効果を推定するのに、以上の式を用いる。

2．4 温熱指標

人間の温冷感、および快適感を左右する生理的要因は平均皮膚温および皮膚濡れ面積率であるといわれ、この２つの生理学的変量は人体と環境間の熱収支により決まる。環境側では気温、湿度、平均放射温度 (MRT)、気流速の４つの気候要素が、人体側では代謝量と着衣量の２つの要因が重要であり、この６つを温熱要因と呼ぶ。平均皮膚温度、皮膚濡れ面積率はこれら温熱要因により決定されるので、最終的には、これら６つの温熱要素が人間の温熱感覚を左右することになる。

そして、これら６つの温熱要因を適宜組み合わせて、簡単なものから精巧なものまで、多くの温熱指標が提案されている。主観的指標とされる Yaglou らの有効温度や熱平衡方程式に基づく指標として Gagge による作用温度や修正有効温度、Fangar による PMV および PPD などがよく用いられている[11),12)]。

以下にこの研究で用いる温熱指標を述べる。

1) 修正有効温度 (CET)

周壁面 (床、天井を含む) 温度が体表面温度と異なると、人体と周壁の間に放射熱伝達が生じ、これが温冷熱感覚に及ぼす影響は非常に大きい。気温、相対湿度、気流速による温冷熱感覚の総合指標である有効温度において、気温の代わりにグローブ温度を用いてに放射の影響を加えたものが修正有効温度 (CET) である。

2) PMV (Predicted Mean Vote；予測平均申告)

Fangar が代謝量、着衣量をも含めた総合快適指標 PMV[13]を提案し，－３の寒いから＋３の暑いまでの７段階で評価し、快適域の範囲として $-0.5<PMV<+0.5$ を推奨している。ただし、この指標 (ISO7730)[14]は快適性の評価には優れているが、過酷な条件向きの指標ではない。PMV は次式で計算される。

NII-Electronic Library Service

The Japan Society of Naval Architects and Ocean Engineers

$$PMV = (0.303e^{-0.036M} + 0.28)\{(M - W) - 3.05\times10^{-3}\left[5733 - 6.99(M - W) - P_{da}\right] - 0.42\left[(M - W) - 58.15\right] - 1.7\times10^{-5}M(5867 - P_{da}) - 0.0014M(34 - T_a) - r_{cl}h_c(t_{cl} - t_a) - 3.96\times10^{-8}r_{cl}\left[(t_{cl} + 273)^4 - (t_r + 273)^4\right]\} \quad (23)$$

ただし、t_r は平均放射温度(MRT)、r_{cl} は全体表面積に対する着衣面積の比である。

$-1.0<PMV<+1.0$ の範囲では70%の人が満足を表明し、この PMV＝±1.0 の条件を (20) の人体蓄熱量と比較検討すると、熱不平衡量 S が約±29.0 W/m^2 に相当する。また、人体が不快感なく耐えられる極限の熱不平衡量 S=93.0 W/m^2 は PMV＝3.0 に相当している。ただし、これらの値は、推奨使用範囲（気流速 1.0m/s 以下、気温 10～30℃、平均放射温度 10～40℃、衣服熱抵抗 1～2clo、代謝量 46～232 W/m^2）で計算した結果である。

3）湿球黒球温度（WBGT）

人体の熱収支に影響の大きい気温、湿度、放射熱による感覚指標で、気温（乾球温度）t_a、グローブ温度 t_g、湿球温度 t_w から次式により求められる[15]。

・日射のある屋外：

$$WBGT = 0.7t_w + 0.2t_g + 0.1t_a \quad [℃] \quad (24)$$

・日射のない屋内外：

$$WBGT = 0.7t_w + 0.3t_g \quad [℃] \quad (25)$$

WBGT は熱帯地域における軍事訓練の限界条件を検討する目的で提案されたものであるが、現在では屋外ばかりでなく、鋳物工場、溶鉱炉、精錬所等の室内においても暑熱環境の検討に際しての標準尺度として推奨されている。なお、Table 1 に ISO7243[15]に規定されている WBGT 熱ストレスの基準値を示す。

3　日射環境下の温熱環境評価

造船所外業工場における熱対策の検討や作業者の人体蓄熱量の予測を行うために、A造船所において、気温、相対湿度、日射量などの熱的環境計測および作業の様子、内容、その継続時間などの調査を行った。また、計測は、岸壁にて艤装工事中のバルクキャリアー(Lpp;279m、B；45m、D；24.4m、載貨重量 177,000ton）の高温環境となる上甲板において行った。

3．1　計測方法

暑熱環境の計測には以下の計測器・装置を用いた。

1）アメニティメーター（京都電子工業製 AM-101）：気温、相対湿度、気流速、平均放射温度（グローブ球で測定）を測定し、PMV を演算するポータブル型の温熱環境計測器である。

2）暑熱環境計（WBGT 計）（京都電子工業製 WBGT-101）：気温、相対湿度、黒球温度を測定し、人が感じる熱ストレスに影響の大きい湿度、輻射熱、気温の３つの因子による指標である WBGT を演算する ISO7243 規定の温熱環境計測器である。

3）全天日射計（英弘精機製 MS-601F）：　波長範囲 0.3μm～3.0μm までの任意の平面に到達する直達日射強度と散乱日射強度による全天日射強度を測定するための放射計である。

4）２次元放射温度計（日置電機製 3460）：　物体から放射される赤外線エネルギー量を測定することにより、物体の温度を（8×8 素子）により２次元的に測定するための計測器である。

また、上甲板において行われていた作業の様子やその姿勢、採られていた熱対策などをスチールカメラにより記録し、作業内容やその継続時間などをビデオカメラにより記録した。

3．2　計測結果

（1）アメニティメーターによる計測

計測当日はほとんど雲の無い快晴であり、上甲板における午前 10 時から午後 3 時までの気温、相対湿度、気流速、平均放射温度の変化をそれぞれ Fig. 1 に示す。この日は平均放射温度が最高で 99.9℃を記録するなど、日射の影響以外に、上甲板上が感覚的に非常に厳しい熱的環境であることを示している。

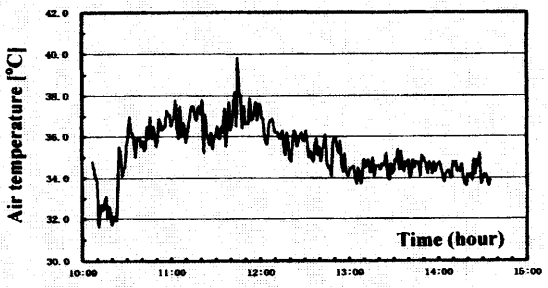
Table 1　Reference values corresponding to a given situation (ISO7243)

Metabolic rate class	Metabolic rate, M	Reference value of $WBGT$	
	Related to a unit skin surface area	Person acclimatized/ not acclimatized to heat	
	W/m²	°C	
0 (resting)	M<65	33 / 32	
1	65<M<130	30 / 29	
2	130<M<200	28 / 26	
3	200 <M<260	No sensible air movement 25/22	Sensible air movement 26/23
4	M>260	23/18	25/20

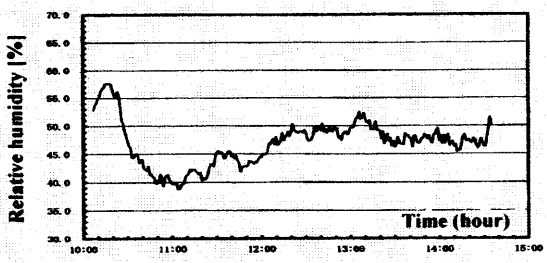
NOTE – The values given have been established allowing for a maximum rectal temperature of 38 °C for the persons concerned.

NII-Electronic Library Service

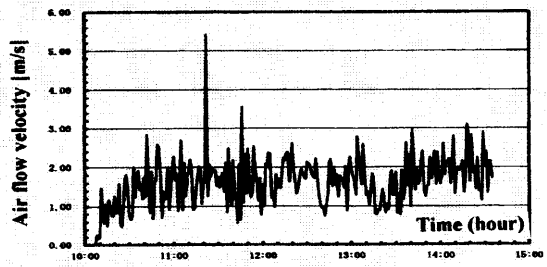
The Japan Society of Naval Architects and Ocean Engineers



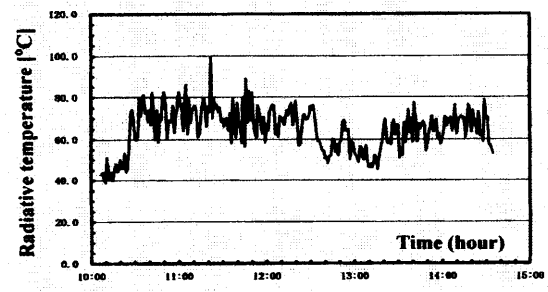
(a) Air temperature [average: 35.3°C]



(b) Relative humidity [average: 49.3%]



(c) Air flow velocity [average: 1.6m/s]



(c) Radiative temperature [average: 63.7°C]

Fig. 1 Variation of weather conditions

（2）WBGT計による計測

測定したWBGTをFig. 2に示す。その平均値は32.6℃であり、ISO7243の基準値また日本体育協会による指針において「運動は原則中止」とされている31℃を超えており、上甲板上は熱的に厳しい環境であることが分かる。

（3）全天日射計による計測

全天日射計により測定した全天日射量をFig. 3に示す。最高全天日射量は1036 W/m^2あり、大気圏外の日射量である太陽定数が1370 W/m^2であることを考えれば、非常に日射の強い日であったことが分かる。　図において、急激に全天日射量が減少している箇所は雲およびゴライアスクレーンや作業中の機材の影、もしくは作業者の影によるものである。

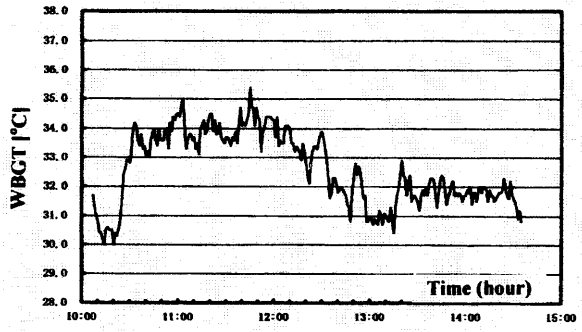


Fig. 2 Variation of WBGT

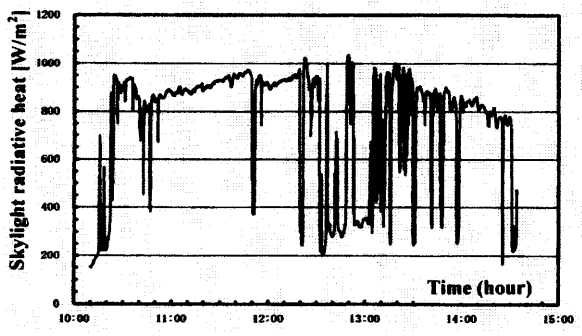


Fig. 3 Variation of skylight radiative heat

（4）2次元放射温度計による計測

直射日光下の上甲板において2次元放射温度計により測定した1m四方64点の平均温度は以下のようである。

- 上甲板温度： 62.9℃ 、（遮光ネット下）42.3 ℃
- ハッチコーミング側面温度： 51.0℃ 、（遮光ネット下）38.8 ℃
- ハッチコーミング側の配管温度：49.9℃ 、（遮光ネット下）38.6 ℃
- 作業者衣服温度: 37. 6℃ 、（周囲温度）51.9 ℃

デッキ温度は 60～65℃（平均 62.9℃）であり、一方ハッチコーミング側面は艤装品の影や日射の入射角が浅いこともあり、上甲板ほどの温度には至っていない。また、配管などもその色や材質の吸収率が小さいために、上甲板の温度ほど上昇していない。

熱対策として遮光ネットが張られ、その影に入っている上甲板温度は 37～47℃（平均 42.3℃）であり、直射日光下とは20℃ほどの差がある。ハッチコーミング側面、配管においても10℃ほどの温度低下が見られる。全天日射量もネットの遮光率に応じて低下することから、遮光ネットは日射環境下での熱対策として非常に有用であると考えられる。

NII-Electronic Library Service

The Japan Society of Naval Architects and Ocean Engineers

衣服温度は平均で37.6℃となっているが、汗による濡れが無い場合には衣服温度が40℃を超えることも予想される。

（5）作業内容および継続時間

上甲板では、ブロックの継目、艤装品の溶接とそれに伴うスラグ落とし、またはガス切断の作業が大半を占めており、その準備として重量物の運搬（移動）などが行われていた。この他には、ハッチコーミング周囲への足場の取り付け、ジャッキを用いたブロックの継目のズレ調整作業などが行われていた。

上甲板における作業の例として、ビデオカメラにより記録した軽度作業および中程度作業における作業内容毎の全作業時間に対する割合をTable 2に示す。軽度作業は船体外板の継目の溶接作業であり、代謝量の大きいスラグ落としや重量物の運搬などの作業が少なく、後述の作業と代謝量の関係より推定した平均代謝量も平均で1.80*Met*であったことから軽代謝速度と判定した。中程度作業は艤装品を上甲板に溶接する作業であり、溶接作業とスラグ落としが交互に繰り返され、代謝量も平均で2.08[Met]であったことから中代謝速度とした。

（6）熱対策

熱対策として採られていたのは、遮光ネット、冷却ファンによる送風、冷水機の設置などであった。

a)遮光ネットは、遮光ネットを張れない場所が多く、使用時の作業性などからその影に入らずに作業するなど、対策としての効果をあまり発揮していなかった。

Table 2 Time ratio of each work to the whole work

Class	Work contents	Working time	Ratio [%]
Low Metabolic work	Preparation,Marking,Cleaning	7m16s	33.9
	Welding	13m03s	60.8
	Tearing off the slug	9s	0.7
	Taking a rest	59s	4.6
	Whole working time	21m27s	100
Moderate Metabolic work	Preparation,Marking,Cleaning	5m25s	17.9
	Welding	17m47s	58.8
	Tearing off the slug	7m02s	23.3
	Taking a rest	0s	0.0
	Whole working time	30m14s	100

b)冷水機は、近くで作業している作業者は頻繁に利用し、作業場所が遠くても水筒に冷水を入れて作業場所まで持って行く作業者がいるなど、設置場所や設置台数などを考慮すれば、より効果的な対策になると考えられる。

c)ダクトによる送風は、ダクトが数多くの作業場所に引かれ、作業場所の移動に伴い機具の移動と共にダクトを延長するなどして利用し、その依存性は高いように見受けられた。

3．3 作業と代謝量

ISO7243ではTable 3のように、代謝量は休憩中、低代謝速度、中代謝速度、高代謝速度、極高代謝速度の5つのクラスに分類されており、この表から各種の作業がどの程度の代謝量であるのかを推測することができる。

Table 3 Classification of levels of metabolic rate

Class	Metabolic rate range, M		Value to be used for calculation of mean metabolic rate	
	related to a unit skin surface area W/m²	for a mean skin surface area of 1,8 m² W	W/m²	W
0 Resting	$M < 65$	$M < 117$	65	117
1 Low metabolic rate	$65 < M < 130$	$117 < M < 234$	100	180
	Examples Sitting at ease: light manual work (writing, drawing); hand and arm work (inspection, assembly or sorting of light materials); arm and leg work (driving vehicle in normal conditions, operating foot switch or pedal). Standing: drill (small parts); coil winding; machining with low power tools; casual walking (speed up to 3,5 km/h).			
2 Moderate metabolic rate	$130 < M < 200$	$234 < M < 360$	165	297
	Sustained hand and arm work (hammering in nails, filling); arm and leg work (off-road operation of lorries); arm and trunk work (work with pneumatic hammer, plastering, intermittent handling of moderately heavy material); pushing or pulling light- weight carts or wheelbarrows; walking at a speed of 3,5 km/h to 5,5 km/h; forging.			
3 High metabolic rate	$200 < M < 260$	$360 < M < 468$	230	414
	Intense arm and trunk work; carrying heavy material; shovelling; sledge hammer work; walking at a speed of 5,5 km/h to 7 km/h. Pushing or pulling heavily loaded handcarts or wheelbarrows; chipping castings			
4 Very high metabolic rate	$M > 260$	$M > 468$	290	522
	Very intense activity at fast to maximum pace; climbing stairs, ramp or ladder; walking quickly with small steps, running, walking at a speed greater than 7 km/h.			

NII-Electronic Library Service

The Japan Society of Naval Architects and Ocean Engineers

前述の上甲板での作業それぞれを、作業の様子を記録したビデオとTable 3との比較により、作業内容に対する代謝量を以下のように推測した。

1）溶接機材の設置および準備、マーキング、後片付け：低代謝速度にあたると推測でき、代謝量を 100[W/m²]（1.72[Met]）とする。

2）溶接作業： Table 3の作業例に無く、資料より代謝量は低代謝速度にあたる 110[W/m²]（1.89[Met]）とする。

3）溶接のスラグ落とし： 釘を打つのと同等作業と見て、中代謝速度にあたると推測でき、代謝量を 165[W/m²]（2.84[Met]）とした。

4）休憩： 代謝量 65[W/m²]（1.12[Met]）とする。

4 代謝量・環境要因と人体蓄熱に関する実験

人体蓄熱量の限界値を超えないように、温熱環境要因を考慮して作業負荷を減らしたり、作業間に休憩を取るなどの暑熱対策を策定するためには、代謝量・環境要因と人体蓄熱の関係を把握する必要がある。そのために、日射環境下においてエルゴメーターを用いた運動による人体蓄熱実験を行った。

4．1 実験方法と条件

（1） 実験の概要

実験は7階建屋上の一角に、気流速の影響を避けるためにアルミニウム製の囲い（幅 3.1m×奥行 3.2m×高さ 2.0m）の中にエルゴメーターを設置して運動を行い、日射のある暑熱環境下における作業負荷や環境要因に応じた人体の皮膚温度を計測して、以下の3種類の要因の影響を調べる人体蓄熱実験を行った。

1)作業負荷の影響： エルゴメーターの負荷（作業による発熱量）を 0W（安静立位）、 110W（低代謝速度）、160W（中代謝速度）に設定して計測する実験

2)個人差の影響: 4被験者による負荷 160W の運動による実験

3)日射量の影響を見るために日射量が少ない、中程度、多いの3ケースについての実験

なお、実験時の服装は、工場作業者に合わせて、ヘルメット、作業服上下、Tシャツ、パンツ、靴下、安全靴を身に付け、その被服量はおよそ 1.0*clo* であった。

これらの実験の概念図を Fig. 4 に示す。

（2） 環境要因および皮膚温度、鼓膜温度の測定

暑熱環境下において作業を行う人体の熱的状態は、太陽からの日射も含む温熱環境要因に依存し、作業による代謝産熱と呼吸・皮膚表面からの放熱により、人体基幹部の熱的恒常性を保っている。

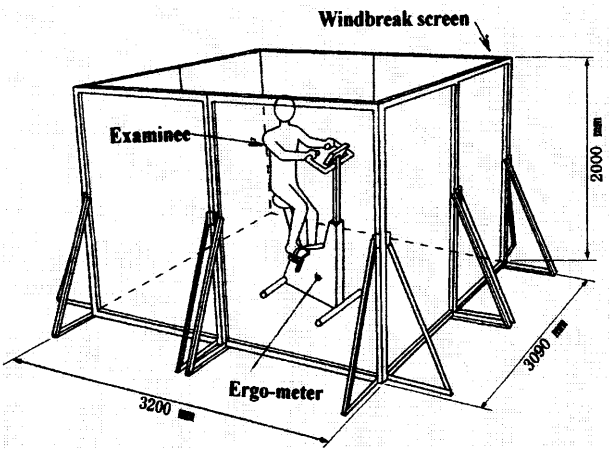


Fig. 4 Conceptual state of experiment

ここでは人体を熱平衡が保たれている中核部と末梢組織からなる外殻層により取り囲まれている二重構造と考え、外殻層の表面温度は皮膚温度により代表し、中核部の温度を外部から容易に測定できる鼓膜温度によって代表した。この鼓膜温度は脳を灌流する内頸動脈血温度をよく反映し、深部体温の指標となり、赤外線センサーを用いた非接触温度計により測定できる。

蓄熱量計算に用いる環境要因の測定には、ISO7726に従ってアルミ板を張った囲いの中に設置したアメニティメーターおよびWBGT計により測定した。また、全天日射量の測定は同じ屋上の一角にて行った。

皮膚温度については、熱電対型センサーを後頸部 t_1、肩甲骨付近 t_2、手甲部 t_3、下腿部 t_4 の4点に貼り付けて測定し、次式により平均皮膚温度 T_{sk} を算出する[3]。

$$T_{sk} = 0.28t_1 + 0.28t_2 + 0.16t_3 + 0.28t_4 \quad [℃] \quad (25)$$

この他に、参考値として衣服温度（大腿部、胸部）を測定した。

（3） 実験の手順

1）実験開始時に黒球温度などが平衡状態に達している様に、開始30分前頃に囲いの中にアメニティメーター、WBGT計を設置し、計測を開始する。

2）全天日射計を影に入らないような位置に設置し、PCに接続されたデータロガー（江藤電気製 CADAC2）に接続する。

3）被験者の体に皮膚温度計測のための熱電対端子を貼り付け、DETA COLLECTER（安立計器製 AM-7052）により記録する。

4）服装の準備が出来たら、日陰にて5～10分ほど安静にする。

5）実験開始1分前に囲いの中に入り、エルゴメーターの設定（負荷、年齢、時間）を入力し、心拍数センサー

NII-Electronic Library Service

The Japan Society of Naval Architects and Ocean Engineers

を取り付ける。

6）負荷が設定されたエルゴメーターによる運動を 15 分間行う。1 分毎に心拍数と鼓膜温度を記録し、このモニタリングにより実験の継続・中止を決める。

7）運動終了後、再び日陰に移動し、十分に鼓膜温度が下がるまで安静にする。

(4) 被験者の諸元

個人差の影響を調べる実験における被験者の諸元を Table 4 に示す。また、普段の運動量により熱に順応する早さの差異が考えられるため、普段の運動の程度について調査した。

なお、被験者の代謝量および蓄熱量を計算するのに必要な体表面積 A_b は次式によって算出した[3]。

$$A_b = W_b^{0.425} \times H_t^{0.725} \times 0.007246 \quad [m^2] \quad (26)$$

ここで、W_b は体重[kg]、H_t は身長[m]である。

Table 4 Principal conditions of examinees

Examinee	Age	Height[cm]	Weight[kg]	Surface are[m²]	Usual Exercise
A	24	169	74	1.86	Beach vallyball (twice week)
B	23	175	76	1.93	no exercise
C	22	168	62	1.72	no exercise
D	23	179	58	1.75	Softball (once a week)

4．2 実験結果

（1）個人差に関する実験

運動による皮膚温度，鼓膜温度および人体蓄熱量の変化に対する個人差に関する実験を、4 被験者について行った。実験は快晴の日に、弱めの中代謝速度に相当する負荷 160 W の運動（2.42～2.60 Met）について 15 分間を目標として行った。被験者B、Cはともに運動開始から 13 分で、被験者Dは 6 分で心拍数が警告値を超えたため、その時点で運動を中止した。各被験者の実験時の条件を Table 5 に示す。

Fig.5 に被験者A、B、C、Dの皮膚温度、鼓膜温度の計測値と蓄熱量計算の結果を示す。

皮膚温度に関しては、各被験者の初期皮膚温度に差があるものの、皮膚温度の上昇速度は同程度であり、また実験終了後の皮膚温度の降下速度もほぼ同じである。普段からの暑熱下での運動している被験者Aの熱順応を除けば（推定）、皮膚温度の上昇速度には個人差があまり無い。

Table 5 Experimental conditions of each examinee

Examinee	Load[W]	Met.heat[Met]	Temp.[℃]	Humid.[%]	MRT[℃]	Velocity[m/s]	Skylight[W/m²]
A	160	2.48	35.9	47.2	61.7	1.22	909
B	160	2.42	35.6	51.0	61.2	1.31	925
C	160	2.60	35.2	46.0	63.4	1.67	897
D	160	2.57	35.0	49.6	59.6	1.23	821

鼓膜温度は、被験者A、B、Cともに同じような上昇速度を示している。ただし、被験者C、Dにおいては運動中止前後に急激な鼓膜温度が上昇・下降する乱れが見られる。

蓄熱量については、環境要因や皮膚温度に変動があるにもかかわらず、各被験の発熱量（蓄熱量の増加率）はほぼ同じで、その累積値である蓄熱量の変化は時間的な線形性が強い。したがって、蓄熱量に関しても個人差は少ないと考えられる。しかし実際には運動中に心拍数が警告値を超えた被験者もおり、蓄熱量の限界値には健康状態や熱順応性による個人差があると考えられる。

なお、この実験の結果より、蓄熱量に対する個人差の影響はあまり大きくないと考え、以降の実験では被験者Aについてのみ実験を行った。

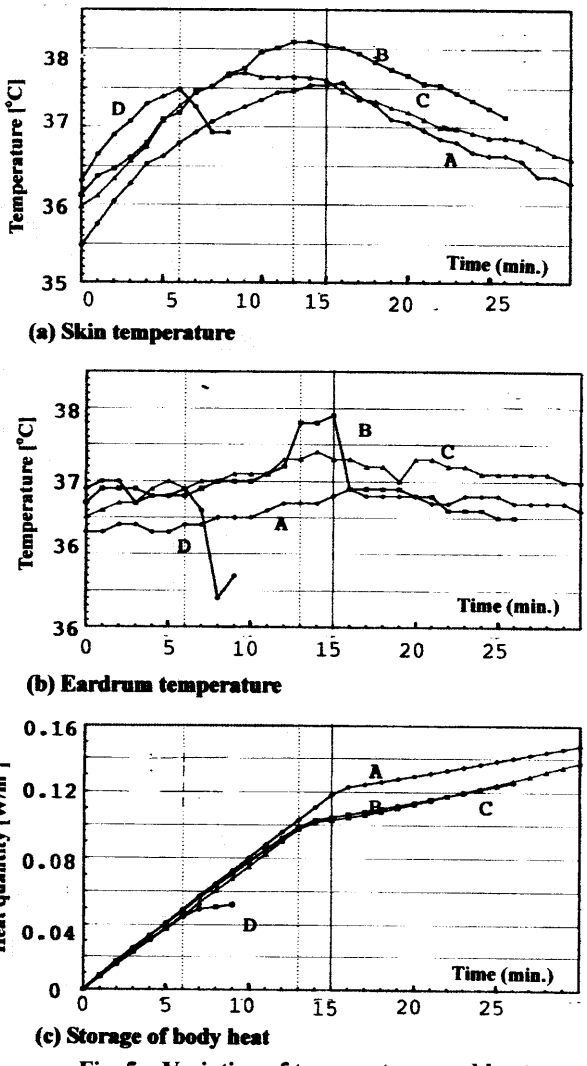


Fig. 5 Variation of temperatures and heat storage of examinees

（2）代謝量に関する実験

代謝量の変化に対する代謝量およびその時間的線形性の違いを明らかにするために、エルゴメーターによる

NII-Electronic Library Service

The Japan Society of Naval Architects and Ocean Engineers

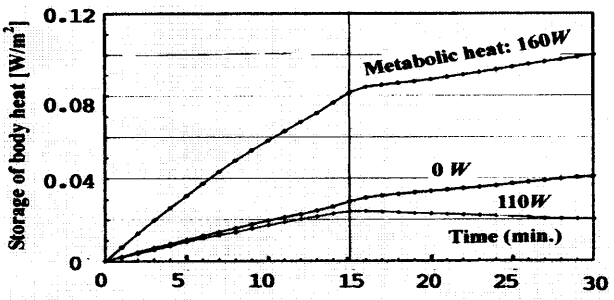
運動負荷を 0*W* (1.12*Met*)、110*W* (2.02*Met*)、160*W* (2.48*Met*) と変えて実験を行った。ISO7243 の分類によれば、これらの運動は「休憩中」、「低代謝速度」、弱めの「中代謝速度」に相当する。なおこの実験では、全天日射量が少ない（薄曇）および多い（快晴）の２条件において実験を行った。

その実験条件を Table 6 に示し、被験者Aの蓄熱量の算出結果を Fig. 6 に示す。

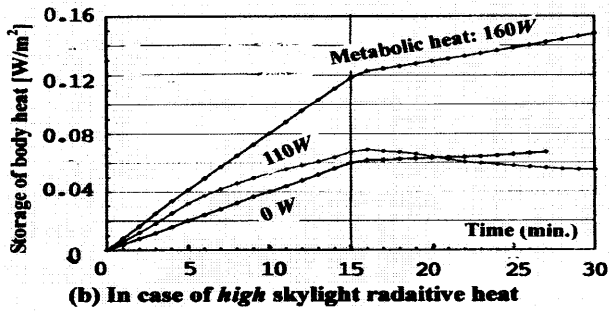
代謝量および全天日射量は当然蓄熱量に影響する。全天日射量が多い場合には、代謝量が多くなるに従い蓄熱量も増加しているが、全天日射量が少ない場合の負荷 0*W* と 110*W* では蓄熱量が逆転しており、低代謝量の場合には環境要因が大きく影響するものと推測される。気温や平均放射温度にそれほどの差が見られなかった負荷 160*W* の実験では、全天日射量の多少により生じる気温や平均放射温度などの差異による影響と併せて、日射による影響が強く表れている。

Table 6 Conditions of experiment for varying metabolic rates

Load[W]	Met.heat[Met]	Temp.[℃]	Humid[%]	MRT[℃]	Velosity[m/s]	Skylight[W/m²]
0	1.12	28.7	52.1	43.4	0.70	410
0	1.12	33.3	56.8	65.1	2.11	811
110	2.02	26.3	66.0	33.6	0.93	451
110	2.02	29.2	47.8	62.4	2.19	874
160	2.48	33.7	43.8	45.3	1.00	309
160	2.48	35.9	47.2	61.7	1.22	909



(a) In case of *low* skylight radaitive heat



(b) In case of *high* skylight radaitive heat

Fig. 6 Storage of body heat in experiment for varying metabolic rates

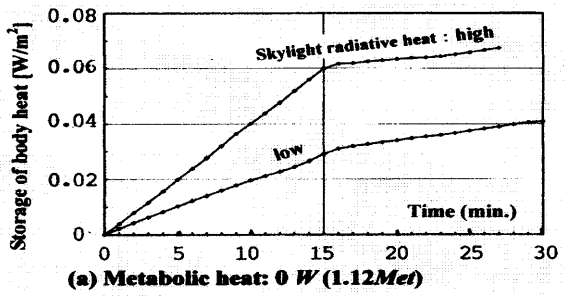
（3）日射量に関する実験

日射の蓄熱量への影響を調べるために、全天日射量が低、中、高の場合において、運動負荷を 0*W*、110*W*、160*W* と変えて実験を行った。ただし、中程度の日射量における負荷 0*W* の実験は適当な条件が揃わなかった。なお、この実験においても被験者Aについてのみ実験を行った。

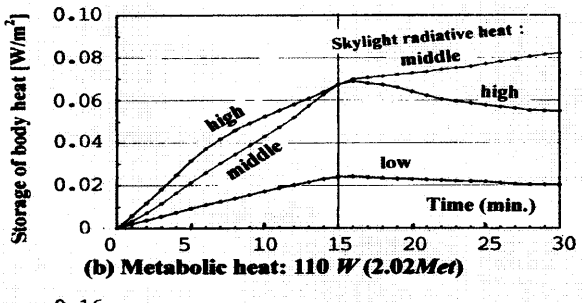
Table 7 に日射量に関する実験を行った際の条件を示し、Fig. 7 に被験者Aの蓄熱量の算出結果を示す。

Table 7 Conditions of experiment for varying radiative heats of skylight

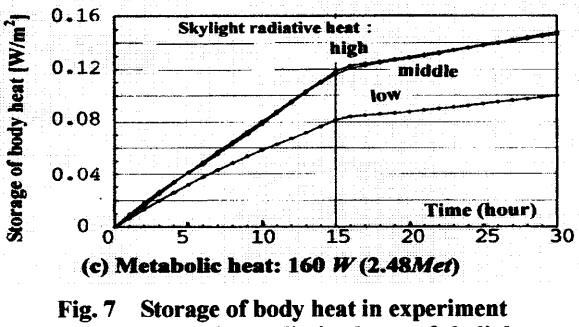
Load[W]	Met.heat[MWT]	Temp.[℃]	Humid.[%]	MRT[℃]	Velosity[m/s]	Skylight[W/m²]
0	1.12	28.7	52.1	43.4	0.70	410 (low)
0	1.12	33.3	56.8	65.1	2.11	811 (high)
110	2.02	26.3	66.0	33.6	0.93	451 (low)
110	2.02	32.4	62.2	44.9	1.16	594 (middle)
110	2.02	29.2	47.8	62.4	2.19	874 (high)
160	2.48	33.7	43.8	45.3	1.00	309 (low)
160	2.48	35.7	49.6	59.0	1.14	712 (middle)
160	2.48	35.9	47.2	61.7	1.22	909 (high)



(a) Metabolic heat: 0 *W* (1.12*Met*)



(b) Metabolic heat: 110 *W* (2.02*Met*)



(c) Metabolic heat: 160 *W* (2.48*Met*)

Fig. 7 Storage of body heat in experiment for varying radiative heats of skylight

NII-Electronic Library Service

The Japan Society of Naval Architects and Ocean Engineers

全ての負荷において、全天日射量が多くなるほど蓄熱量は多くなる傾向にある。ただし、負荷 160 W においては、全天日射量が中程度および多い場合には蓄熱量の差はほとんど無く、蓄熱量に対する全天日射量の影響はそれ程大きく現れていない。これに対し、全天日射量が少ない場合と中程度の場合には気温などの差が僅かである割には蓄熱量に大きな差異が見られる。一方、負荷 110 W の場合には、全天日射量が増すに応じて蓄熱量が増加している。このことから、全天日射量は人体蓄熱へ決定的ではないが、かなり影響を及ぼすものと考えられる。

(4) ファンの効果に関する実験

造船所において実際に行っている熱対策の１つとして、放熱を促すための冷却ファンによる送風がある。この冷却ファンによる送風がどれほど人体の放熱に対して影響を及ぼすのかを明らかにするために、扇風機による送風中にエルゴメーターにより負荷 160 W の運動を行い、蓄熱に対するファンの効果を調べた。この際、扇風機を３台縦に配置し、エルゴメーターで運動している被験者の全身になるべく均等に 2.0 m/s の風が当たるように調整した。また、全天日射量が多いおよび少ない場合において被験者Ａについて実験を行った。

Table 8 に代謝量に関する実験を行った際の条件を、Fig. 8 に蓄熱量の算出結果を示す。

蓄熱量に関しては、全天日射量が多少に拘わらず、ファン無とファン有りとの間に明らかな差が見られ、扇風機による送風により放熱が促され、蓄熱が抑制されていることが伺われる。また、全天日射量が多い場合と少ない場合の蓄熱量の間に差異が見られ、このことからファン有無に拘われず全天日射量が人体の蓄熱量に２次影響も含めて大きな影響を及ぼすことがわかる。

Table 8 Conditions of experiment with/without operating cooling fans

Load [W]	Met.heat[Met]	Temp.[℃]	Humid.[%]	MRT[℃]	Velocity[m/s]	Skylight[W/m²]
160 (No fan)	2.48	33.7	43.8	45.3	1.00	309 (low)
160 (No fan)	2.48	35.7	49.6	59.0	1.10	712 (high)
160 (Operating fan)	2.48	24.9	52.9	42.2	2.00	440 (low)
160 (Operating fan)	2.48	29.1	49.6	52.5	2.00	703 (high)

4．3 実験結果に関する考察

(1) 温熱指標と代謝量

実験において得られた種々の温熱環境要因の計測データと、それらから算出される人体蓄熱量との関係を明らかにするために、統計的手法を用いて温熱環境要因と人体蓄熱量の関係について考察する。

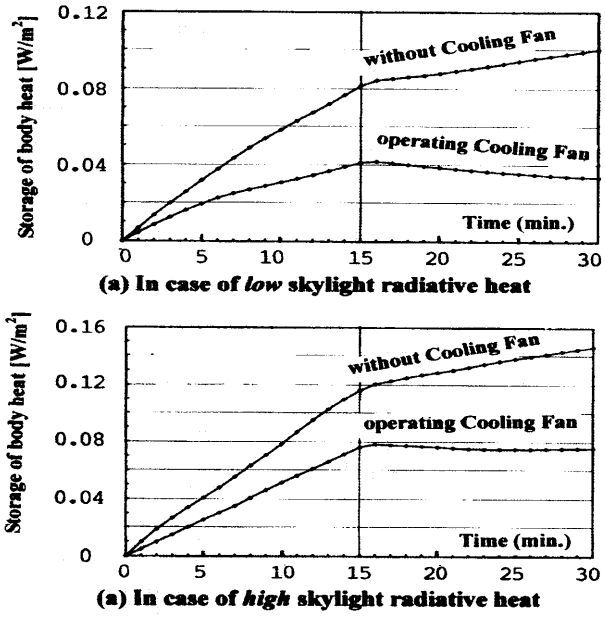


Fig. 8 Storage of body heat in experiment with/without operating cooling fans

まず、温熱環境要因の中でも、屋外では直接的な制御が難しい気温、相対湿度、気流速などの気象要因と制御可能な代謝量に分け、各要因が人体蓄熱量与える影響を調べた。この際、気象要因の影響度を１つの指標で表すために WBGT を採用した。WBGT は前述のように、気温（乾球温度）t_a、グローブ温度 t_g、湿球温度 t_w から算出され、気温、相対湿度、平均放射温度（全天日射量）、気流速を総合した指標である。

そして、各実験における計測データから１時間の人体蓄熱量を計算して、それぞれを 0.1～0.2、0.2～0.3、0.3～0.4、0.4～0.5 ($MJ/m^2 \cdot hour$) に分け、WBGT と代謝量の関係を示すと Fig. 9 のようになり、この図から実線で示すような蓄熱量の境界が推定される。

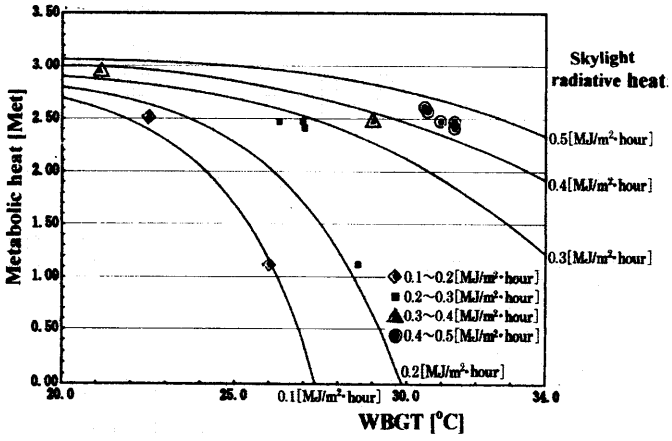


Fig. 9 Relation between WBGT and metabolic heat

NII-Electronic Library Service

The Japan Society of Naval Architects and Ocean Engineers

これから、1)休憩中や低労働の代謝量においては、蓄熱量は WBGT に支配される,2)中程度の労働の代謝量においては、2-a)WBGT が小さい場合には、WBGT と他の環境条件により蓄熱量は大きく変化し、2-b)WBGT が大きい場合には、WBGT に関係なく人体蓄熱量は多くなる,と考えられる。 なお、Fig.9 を実活用するためにはさらに多くの温熱条件における実験により精度を高める必要がある。

（2）相関分析

温熱環境の各要因と人体蓄熱量の関係を明らかにするために相関分析 [16]を行った。相関分析を行う際には、温熱環境要因相互の重複を除去するために偏相関係数を用いて検証し、偏相関係数の計算においては、蓄熱量を目的変数にとり、代謝量、気温、相対湿度、平均放射温度、気流速、皮膚温度、全天日射量などの温熱環境要因を説明変数とした。なお、計算には被験者Aの実験データ 203 個を用いた。また、無相関検定における有意水準は 5%とし、この相関係数の信頼性限界は 0.138 となる。

Table 9に偏相関係数と有意確率を示す。参考として、Table 10 に各データの平均値および標準偏差を示す。

代謝量に従い蓄熱量も変化する実験的事実に加えて、皮膚表面での対流熱伝達や周囲からの放射熱交換に関与する気温（偏相関係数:0.95）および平均放射温度(0.92)の蓄熱量に与える影響は大きいと推測される。逆に、皮膚表面での放熱や周囲からの放射による熱交換に関与する気流速(-0.55)や皮膚温度(-0.90)が上昇すれば蓄熱量が減少するという負の相関が現れている。

Table 9 Partially correlation between thermal factors on storage of body heat

Objective variable	Storage of body heat
Explanation variable	Partially correlation
Metabolic heat	0.974
Air temperature	0.949
Relative humidity	0.417
MRT	0.916
Air flow velocity	-0.554
Skin temperature	-0.900
Skylight radative heat	0.319

Table 10 Averages and standard deviations of thermal factors on experimental data

		Average	St. deviation
Body strage heat	[W/m²]	80.75	36.53
Metlic heat	[Met]	2.18	0.52
Air temperature	[℃]	30.79	3.70
Relative humidity	[N.D.]	0.521	0.074
MRT	[℃]	52.42	12.71
Air velosity	[m/s]	1.579	0.812
Skin temperature	[℃]	35.77	0.94

相対湿度（0.42）および日射量（0.32）に関しては、蓄熱量との間に強い相関関係は見られなかった。従って、日射量や相対湿度は熱的快適性対して大きな影響を及ぼす要因であるが、人体の蓄熱量に対してはそれほど大きな影響は与えない。

このことから、暑熱対策として人体蓄熱の抑制を行うには、代謝量や気温、平均放射温度、気流速を調整することが最も効果的である。これには、作業負荷を減らして代謝量を減少させたり、作業間に休憩を取るなどして蓄熱を抑制する他、ファンなどによる強制的な気流速の増加により放熱を促すことなどが対策として考えられる。なお、日射環境下における具体的な作業限界と暑熱対策については次報において述べる。

5 結 論

造船所外業現場における暑熱環境下の労働安全の確保を目的として、艤装工事中の船舶の上甲板上において種々の環境要因の計測および作業内容、作業時間、採られている熱対策等に関する調査を行い、外業現場の熱的環境の実態を把握した。これによると、夏季の外業現場は温熱指標 WBGT が ISO7243 の基準値を超える得る熱的に厳しい環境であり、遮光ネットの使用や冷却ファンによる送風などの熱対策が効果的であることを明らかにした。また、エルゴメーターを用いた実験により、作業負荷や環境要因に応じた人体の皮膚温度の変化を計測し、さらに日射による受熱の影響を加えた人体熱平衡方程式を作成して人体蓄熱量を計算した。これらの結果から、種々の温熱環境要因と人体蓄熱量の関係を調べ、蓄熱量の変化は時間的線形性が強く、個人差が少ないことがわかった。そして人体を熱的許容限界内に維持するための熱対策のあり方について考察した。

なお、日射環境下における具体的な蓄熱量予測と作業限界および暑熱対策の効果については次報において述べる。

参考文献

1) 中山昭雄（編）：温熱生理学、理工学社 (1995)
2) 南幸治（編）：建築計画原論・建築設備、共立出版 (1957)
3) 人間－熱環境系編集委員会編：人間－熱環境系、日刊工業新聞社 (1989)
4) 建築学大系編集委員会編 ：建築学大系８、彰国社 (1959)

NII-Electronic Library Service

The Japan Society of Naval Architects and Ocean Engineers

5) 中橋美智子、吉田敬一：新しい衣服衛生、南江堂 (1990)
6) ISO7933、Hot environments-Analytical determination and interpretation of thermal stress using calculation of required sweat rate (1989)
7) 村山雅己、福地信義、中橋美智子：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）、日本造船学会論文集、第 179 号、pp.239-251 (1996)
8) 村山雅己、福地信義、中橋美智子：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２）、日本造船学会論文集、第 182 号、pp.507-519 (1997)
9) Nishi,Y., Gagge,A.P.: Humid operative temperature. A biophysical index of thermal sensation and discomfort, Jour. of Physiology, Paris, No.63, pp.365-368 (1971)
10) 村山雅己、福地信義、中橋美智子：海洋暴露作業における人体への熱的影響と温熱対策の評価、日本造船学会論文集、第 183 号、pp.499-508 (1998)
11) 井上宇市：空気調和ハンドブック、丸善 (1982)
12) 空気調和・衛生工学会編：空気調和・衛生工学便覧１基礎編、空気調和・衛生工学会 (1989)
13) ISO7730、Moderate thermal environments-Determination of the PMV and PPD indices and specification of the conditions for thermal comfort (1994)
14) Fanger,P.O.: Thermal Comfort, 2nd ed., McGraw-Hill, New York (1972)
15) ISO7243、Hot Environments-Estimation of the heat stress on working man, based on the WBGT－index(wet bulb globe temperature) (1989)
16) 菅民郎：多変量解析の実践、現代数学社 (1993)

NII-Electronic Library Service