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

正員 村山 雅己* 正員 福地 信義**
中 橋 美智子***

A Characteristic Study on Thermal Stress and Countermeasures for Human Body in Marine Exposure Working Space

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

Summary

The marine structure using under severe oceanic environment should be designed with careful consideration of keeping the exposed working place to be comfort. In case of severe conditions beyond the criterion of thermal environment, some countermeasures for thermal compensation, such as a working space with windbreakers or sunshades, need to be taken adequately. The designer of an offshore structure should understand the dependence of the thermal stress of human body on the thermal environmental factors such as operative temperature, metabolic heat and clothes.

In order to grasp the relation between the heat stress of human body and the thermal environmental factors, a formula for heat stress is established with a view of calculating the quantity of heat storage using the heat balance model of human body. This formula that is consisted of temperature, wind velocity, metabolic heat and clothes heat resistance, can be defined to be the critical working hours to lay down the limit time when a variation of body foundation temperature exceeds the fixed threshold value. The necessity of several kinds of compensated equipment for the protection of workers against severe exposure environment is evaluated by use of present judgement method.

1. はじめに

船舶や海洋構造物の暴露甲板での作業は、一般に厳しい熱的環境下に曝され、人体の蓄・放熱のために作業が低下したり、さらには熱中症や凍傷などにより死に至ることも起こり得る。このため暴露作業では、その温熱環境を熱的許容限界内に維持するための対策が不可欠である。特に寒冷域の海上作業では防寒や防風のための対策を行い、一方暑熱下の作業では日除けや冷却ファンなどの設備装置を設ける必要がある。このためには、設計時において種々の環境要因や人体温熱要因が人体に与える熱的影響を把握し

て、温熱対策を行うことが必要である。

本研究では、人体の熱平衡方程式を用い、人体の熱量評価と温熱対策を目的として寒冷環境における作業許容限界の簡易式を作成した¹⁾。次に、暑熱環境下の暴露作業において、日射等が人体に与える影響について検討し、人体基幹部の温度が変動しない場合の人体熱収支モデルを作成して、人体蓄熱量の時間的変化が、直線性が強いことを確認した²⁾。これに基づき、人体の熱恒常性が崩れ、蓄熱により皮膚表層部を除く中核部を主体とした基幹部の温度上昇が閾値を超える時点を熱的に作業限界とした作業可能性の判定式を確立した³⁾。

本論文では、人体に及ぼす温熱要因の影響を考察し、人体の熱平衡と温熱要因の関係を調べ、種々の環境要因・熱的要因に対する作業許容限界を求めた。さらに、作業継続の可能性の判定式により各種温熱対策の効果について評価を行い、船舶、海洋（浮体）構造物の設計時に必要となる温熱対策の指標を作成した。

* 船舶機装品研究所

** 九州大学工学部

*** 東京学芸大学（研究当時）

2. 人体に及ぼす温熱要因

ある物体からの熱の移動は高温側から低温側へ、熱伝導、対流そして熱放射の3形態により行われる。生命体である人体も同様であり、代謝による発熱を外部への仕事、呼吸による放(吸)熱、皮膚から衣服を通しての放(吸)熱を行い、人体基幹部の熱恒常性を保っている。

人体は種々温熱的な環境の中で熱的影響を受け、直接行動である衣服の脱着を含み、発汗などによる放熱の促進、ふるえ(shivering)などによる代謝の増大により熱的制御を行っている。

2.1 環境要因

人体に熱的影響を及ぼす環境要因には、環境気温、環境湿度、風速(気流)、日射による輻射などの他、雨、波しぶきなどによる濡れ、壁、床の温度に依存する周囲からの熱輻射などがある。

人体が作業する環境として各要因を考察すると以下のようになる。

海上における最高気温としては、北太平洋での試料⁹⁾から、フィリピン付近における5月に39°C以上の記録があり、最低気温としては、世界の気温分布図⁵⁾から、1月の北極海付近に-30°C以下の海域がある。また、湿度に関しては世界各地の気象観測点⁶⁾における年平均の総平均としては約70%であり、世界湿度分布図⁷⁾による海上における湿度をみるとさらに高く80%程度となっている。

海上における風速は陸上に比べてかなり高く、北太平洋の年平均風速⁸⁾は、7.5 m/sであり、冬のみの平均では9.0 m/sに達している。しかしながら、暴露作業場において作業可能な風速として考えた場合には最大20 m/s程度と思われる。

日射による放射熱量は、緯度経度など位置と時間がわかれば計算可能であり、大気透過率が定めれば太陽定数(1.37 kW/m²)により、人体の受ける輻射熱の最大値も決まる。南中時における最大値は、およそ1000 W/m²であり、時間的な要素と雲量などを考慮すると、一般的な最大値は600 W/m²程度である。なお、日射から人体の受ける輻射熱の計算については付録において説明する。

その他の要因として周囲からの熱放射がある。空気温度がいくら高くても、壁面、床の温度が低ければ肌寒く感じることもあり、影響としては小さくない。しかしながら、一般的には、気温と周囲からの放射温はほぼ同等であり、放射温の測定は一般的ではないことから、気温と放射温をそれぞれ対流熱伝達率と輻射熱伝達率で平均化した作用温度(operative temperature)が用いられている。

2.2 人体温熱要因

人体の発熱要因としては、環境より受熱する以外には代謝量のみである。椅子に座った安静状態を基礎代謝といい、1 Metの単位で表し58.2 W/m²に相当する。船舶関連の作

業における代謝量では、舵取り程度の作業で71 W/m²、投げ網作業程度で128 W/m²、荷物の陸揚げ作業で214 W/m²である⁹⁾。ここでは、簡便のため、軽作業70 W/m²、一般作業140 W/m²、重作業210 W/m²とする。

風速は外部環境要因であるが、人体移動による気流も存在する。ここでは、作業を想定し、手足の動きも考慮して、気流に向かう移動速度を0.25 m/sとする。

発汗は人体表面上発現する冷却現象としては唯一であり影響も大きい。身体の高発汗率は安静時で1.8 l/hr、運動時で3.9 l/hrといわれており¹⁰⁾、蒸発による冷却効果としては、それぞれ665 W/m²と1780 W/m²にもなる。後述する人体熱平衡方程式においては、発汗の状態は身体表面の濡れている面積率(以降、濡れ率と云う)で表し、最大が100%である。しかし、発汗はしたたり落ちるなどして冷却作用として効率良く行われるとは限らず、常に発汗する作業に従事しているなど暑熱に順応している人を除き、ここでは最大の濡れ率を85%¹¹⁾とする。

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、発汗反応の他に皮膚血管反応がある。これは、皮膚血管を拡張し皮膚血流を増加することにより深部熱の皮膚表面への熱輸送を増大する反応である。逆に寒冷時には皮膚血流の抑制が行われ深部から皮膚表面への熱輸送が少なくなり、放熱が抑制される。それでも足りない場合にはふるえ(shivering)等により代謝熱生産をあげる反応が始まる。

体温調節には自律性調節反応以外に、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る。1 cloは21°Cの静穏な室内で椅子に座っている状態(代謝量1 Met)で快適さを保てる衣服の熱抵抗であり1 clo=0.155 m²・K/Wである。クロー値の程度としては、パンツ一枚で0.1 clo、典型的な真夏の衣服「ブリーフ・パンツ・半袖の襟なしシャツ・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。作業服の最大クロー値としては衣服を重ね着しても着膨れると表面積が増え放熱が増大すること、作業性が悪くなることからから限度があり、「長袖ズボン下つなぎ肌着・サーモジャケットとズボン・厚地キルティングパーカ・厚地オーバーオール・ソックス・靴・帽子・手袋」で2.55 cloの例¹²⁾がある。

2.3 人体熱平衡方程式と蓄熱量^{1),2),3)}

人体の熱平衡方程式は代謝量 M を左辺とし、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} の合計を右辺として次式で表される。

$$M = W + C_{res} + E_{res} + C + R + E_{sk} \quad [\text{W/m}^2] \quad (1)$$

(1)式において、各要因の負値は外部からの受熱を意味する。

人体の熱平衡が崩れた場合には、その不平衡量が蓄熱され、人体基幹部の温度を上下させる要因となる。熱不平衡量を s として、熱平衡方程式を表すと次式となる。

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

ここで、 ε は、代謝量と仕事の比 M/W で表される作業効率であり、西らの実験から $[\varepsilon = 0.18]$ を使用する。

1) 呼吸による放熱は代謝量 M に依存し、次式で表される。

$$C_{res} = 0.0014M(34.0 - \theta_a) \quad [\text{W/m}^2] \quad (3)$$

$$E_{res} = 1.73 \times 10^{-5}M(5867 - P_{da}) \quad [\text{W/m}^2] \quad (4)$$

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

2) 皮膚表面からの対流と輻射はまとめて次式で表す。

$$C + R = h \cdot F_{cl}(\theta_{sk} - \theta_0) \quad [\text{W/m}^2] \quad (5)$$

ここに、 h は総合熱伝達率 $[\text{W/m}^2 \cdot \text{k}]$ 、 F_{cl} は衣服の伝熱効率 $[\text{N.D.}]$ 、 θ_{sk} は皮膚表面温度 $[\text{°C}]$ 、 θ_0 は作用温度 $[\text{°C}]$ である。

そして、総合熱伝達率 h は輻射熱伝達率 $h_r = 4.652 [\text{W/m}^2 \cdot \text{k}]$ と対流熱伝達率 h_c の合計であり、対流熱伝達率は西らの実験で気流 $v_a [\text{m/s}]$ に向かって $v_{fw} [\text{m/s}]$ で移動する場合は次式で表される。

$$h_c = 8.61v_{fw}^{0.53} + 1.98v_a^{0.86} \quad [\text{W/m}^2 \cdot \text{k}] \quad (6)$$

(5)式における伝熱効率 F_{cl} は衣服の放射と対流熱伝達への影響度合いを示すものであり、次式により表される。

$$F_{cl} = 1/(1 + 0.155 \cdot h \cdot I_{clo}) \quad [\text{N.D.}] \quad (7)$$

3) 皮膚表面からの潜熱放熱 E_{sk} は発汗がある場合には大きな放熱要因であり、次式で表される。

$$E_{sk} = \beta(0.06 + 0.94 W_{rsu})h_e \cdot F_{pcl}(P_{sk} \cdot P_{da}) \quad [\text{W/m}^2] \quad (8)$$

ここに、 h_e は蒸発に伴う熱伝達率 $[\text{W/m}^2 \cdot \text{Pa}]$ 、 F_{pcl} は衣服の透湿効率、 W_{rsu} は発汗による体の濡れ率である。さらに P_{sk} 、 P_{da} は各々皮膚温及び露点温度における飽和水蒸気圧 $[\text{Pa}]$ であり、 β は熱平衡方程式における各項目のバランスにより得られた潜熱の修正係数である。なお、大気圧での蒸発に伴う熱伝達率 h_e は対流熱伝達率 h_c を使用して次式で表される。

$$h_e = 0.0165 \cdot h_c \quad [\text{W/m}^2 \cdot \text{Pa}] \quad (9)$$

衣服の透湿効率 F_{pcl} は次式で表される。

$$F_{pcl} = 1/(1 + 0.143 \cdot h_c \cdot I_{clo}) \quad [\text{N.D.}] \quad (10)$$

以上の(3)～(5)式、(8)～(9)式により、(2)式を書き直すと、人体の熱平衡方程式は次式で表すことができる。

$$\begin{aligned} s = & M[(1-\varepsilon) - 0.0014(34.0 - \theta_a) \\ & - 1.73 \times 10^{-5}(5867 - P_{da})] \\ & - 0.0165\beta(0.06 + 0.94 W_{rsu})h_c \cdot F_{pcl}(P_{sk} - P_{da}) \\ & - h \cdot F_{cl}(\theta_{sk} - \theta_0) \end{aligned} \quad [\text{W/m}^2] \quad (11)$$

(11)式において、平衡がとれている場合には $s=0$ であり、熱的に快適であるといえる。なお、(11)式における表面皮膚温度 θ_{sk} は次式で近似する。

$$\theta_{sk} = 36.3 - 0.055h \cdot F_{cl}(36.3 - \theta_0)/(1 + 0.055h \cdot F_{cl}) \quad [\text{°C}] \quad (12)$$

蓄熱量 H_s は不平衡量 s の時間積分となり、次式で表される。

$$H_s = \int_0^t s(\tau) d\tau \quad [\text{MJ/m}^2] \quad (13)$$

安静状態から作業開始した場合、作業量は最初から一定であったとしても呼気量、心拍数など代謝量は徐々に増えて一定に達するまで時間遅れがある。しかしながら、この遅れは数十分の単位であり、蓄熱量の変化としては、初期を除き時間的線形性が強いことから、作業の各ステージ間で環境要因や熱的要因に変化のない場合には次式となる。

$$H_s = \sum_{i=1}^N S_i T_i \quad [\text{MJ/m}^2] \quad (14)$$

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。

また、基幹温度の上昇量 $\Delta\theta_b$ は蓄熱量 H_s と人体の熱容量 m_b により次式で表すことができる。

$$\Delta\theta_b = H_s/m_b \quad [\text{°C}] \quad (15)$$

この基幹温度の変化量が限界を超える場合に作業継続が不可能と判断する。

3. 人体熱平衡に対する温熱要因の影響

熱平衡方程式(11)により、ある条件において熱平衡状態($s=0$)となる気温と風速の関係を見ることができる。熱平衡状態とは、衣服の脱着など行動性の体温調節を行わなくても、時間に関係なく温熱的な快適性を保てる状態と考えてよい。ここで、代謝量、衣服熱抵抗、湿度、日射による輻射等の環境条件、作業条件の標準的な値を使用した場合について、ある温熱要因の変化と熱平衡状態を維持できる気温(以下熱平衡気温と云う)の関係を調べた。標準の条件としては、代謝量を一般作業の 140 W/m^2 、湿度 80% 、人体が気流に向かう移動速度を 0.25 m/s 、衣服熱抵抗を 1.0 clo 、日射による輻射はなしとする。(以下標準条件と云う)

熱平衡方程式による解析において、諸条件による誤差が大きく、かつ熱平衡に大きな影響を及ぼす因子として発汗による濡れ率がある。ただし、寒冷環境において基幹温度が低下するような状況では発汗は発現せず、暑熱環境において基幹温度が上昇するような状況においては発汗最大となる。ここでは、両環境に対して濡れ率 0% と、発汗最大として濡れ率 85% の場合について検討する。

3.1 衣服熱抵抗

標準条件において、衣服熱抵抗 $0.3 \text{ clo} \sim 2.0 \text{ clo}$ での風速と熱平衡気温の関係を Fig. 1 に示す。Fig. 1(a) が濡れ率 0% 、Fig. 1(b) が濡れ率 85% として計算した結果であ

Condition : Metabolic heat production:140W/m², Relative humidity:80%, Wind velocity:0.3m/s
Moving speed against wind:0.25m/s, Global solar radiation : none

(a) skin wettedness 0%

(b) skin wettedness 85%

Fig. 1 Air temperature for keeping thermal balance of human body in various insulations of clothing

る。

衣服熱抵抗が1 clo 変化すると濡れ率0%で約13~14°C, 濡れ率85%で10~11°Cの熱平衡気温差があり, 衣服による調節は大きな要因であることがわかる。ただし, 衣服熱抵抗が変わっても, 風速と熱平衡気温の関係は大差なく全体として上下するのみである。

風速が0 m/sと20 m/sでは熱平衡気温差が, 濡れ率0%で7.2°C~8.4°C上昇し, 濡れ率85%ではさらに影響が大きく9.8°C~10.4°C以上上昇する。風速20 m/s以上では熱平衡気温に大きな変化はないが, 5 m/s位までは変化率が大きく, わずかであっても風速の有無は大きい。

Fig. 1(a)から, 2 cloの衣服であれば, 標準条件で零下数度までは熱平衡を保てる快適な条件であり, Fig. 1(b)から軽量衣服の0.3 cloであれば, 多少の風があれば30°C位までは熱平衡を保てることわかる。

3.2 代謝量

標準の条件において, 代謝量を基礎代謝量 (58.2 W/m²), 軽作業 (70 W/m²), 一般作業 (140 W/m²), 重作業 (210 W/m²) と変えた場合について風速-熱平衡気温の関係をFig. 2に示す。軽作業と一般作業, 一般作業と重作業では, 熱平衡気温が濡れ率0%で10.6°C~14.6°C, 濡れ率85%で8.7°C~12.4°Cも相違し, 作業の程度が熱平衡に及ぼす影響は大きい。風速0 m/sと20 m/sでの差は, 濡れ率0%, 85%ともに軽作業においては5°C前後と僅かであるが, 一般作業では7.9~9.8°C, 重作業では11.1~14.5°Cと増大し, 作業量が大きいほど風速による熱平衡温度の上昇

量は大きい。

Fig. 2(a)から, 軽作業であれば熱平衡気温が20°C以上であるのに対し, 一般作業では10°C前後, 重作業では0°C前後まで下がり, 温熱的には作業量が大きいほど寒冷環境に強いことがわかる。逆に, Fig. 2(b)から, 重作業においては熱平衡気温が1.3°C~15.8°C, 一般作業においては14.7°C~24.5°C, 軽作業においては27.1°C~32.3°Cとなっており, 30°C以上の暑熱環境での熱平衡状態となるのは, 安静と軽作業のみである。

3.3 環境湿度

標準条件において環境湿度が20%~100%までの風速-熱平衡気温をFig. 3に示す。

濡れ率0%の場合には, 湿度が変化しても風速-熱平衡気温の关系到ほとんど影響がなく, 熱平衡気温は6.3~13.4°Cとなっている。濡れ率85%の場合には湿度差の影響は大きく, 湿度が高いほど熱平衡気温は下がる。また, 湿度によって風速による影響にも差があり, 湿度20%と100%では風速0 m/sで4.7°C程度の差が20 m/sになると12.3°Cと2.6倍も差異がある。

3.4 日射による輻射熱

標準の条件において全天日射による輻射熱が0 W/m²から1000 W/m²まで変化する場合の風速-熱平衡気温をFig. 4に示す。

全天日射の相違による風速-熱平衡気温の曲線は, Fig. 3とは逆に風速が大きくなるほど日射による熱平衡気温の差がなくなり, 濡れ率0%, 85%ともに, 風速0 m/sで12.4°C

Fig. 2 Air temperature for keeping thermal balance of human body in various metabolic heat productions

Fig. 3 Air temperature for keeping thermal balance of human body in various relative humidities

～15.2℃の差があるのに対し、20 m/s では 1.9℃～3.8℃程度まで近接している。

Fig. 4(a) から、日射なしの場合には熱平衡気温は 5.8℃～13.6℃であり、1000 W/m² の日射がある場合には－

9.4℃～9.9℃となって風速が 3 m/s 以下であれば気温 0℃以下で熱平衡の状態になる。日射による輻射変化での特徴として、風速 20 m/s の場合には、日射の有無による熱平衡気温差は 3.8℃と小さく熱平衡気温への影響が小さい。

Condition : Metabolic heat production: 140 W/m^2 , Insulation of clothing: 1.0 clo , Wind velocity: 0.3 m/s
 Relative humidity: 80% , Moving speed against wind: 0.25 m/s

(a) skin wettedness 0%

(b) skin wettedness 85%

Fig. 4 Air temperature for keeping thermal balance of human body in various global solar radiations

Condition : Metabolic heat production: 140 W/m^2 , Insulation of clothing: 1.0 clo , Wind velocity: 0.3 m/s
 Moving speed against wind: 0.25 m/s , Relative humidity: 80% , Global solar radiation: none

(a) skin wettedness 0%

(b) skin wettedness 85%

Fig. 5 Quantities of heat exchange in the thermal balance equation of human body

Fig. 4(b)においても同様であり風速 20 m/s において、日射の有無による熱平衡気温差は 1.9°C とさらに小さい。

Fig. 4 から、風速が大きい場合は日射の有無の影響が意外と小さいことがわかる。

4. 温熱的作業の限界

4.1 熱平衡方程式を構成する各要因の熱量比

Fig. 5 は、環境気温に対する熱平衡方程式と構成する各要因の比を見るために作成した図である。各要因としては、(2)式から、1) 作業効率 ε を使用して表した代謝量 M と仕事 W との差 ($M - W = M(1 - \varepsilon)$)、2) 代謝量 M を乗じ

た呼吸による対流 C_{res} と潜熱放熱 E_{res} , 3) 皮膚から衣服を通しての対流と輻射放熱 ($C+R$), 4) 皮膚表面の濡れによる潜熱放熱 E_{sk} がある。標準の条件として, 輻射放熱 R の項目に外部要因として付加される日射量はなしとし, 代謝量を一般作業の 140 W/m^2 , 湿度 80%, 風速を 0.3 m/s , 人体が気流に向かう移動速度を 0.25 m/s , 衣服熱抵抗を 1.0 clo として, 濡れ率 0% と濡れ率 85% で計算を行った。

Fig. 5 において, 濡れ率 0% で 6.5°C , 濡れ率 85% で 15.9°C が熱平衡気温である。熱量として, 呼吸による対流放熱 C_{res} と潜熱放熱 E_{res} は比較的小さく, 対流と輻射放熱 ($C+R$) の項目が大きいことがわかる。対流と輻射放熱 ($C+R$) の項目は, 低温になるに従い直線的に放熱が増大しており, 低温環境における人体皮膚表面からの対流と輻射の抑制が重要であることがわかる。しかし, 濡れ率 85% においては, 気温 28°C 以上で対流と輻射放熱 ($C+R$) の項目より潜熱放熱 E_{sk} の方が大きくなっており, 暑熱環境においては潜熱放熱の制御が重要になる。

4.2 寒冷・暑熱下の作業限界

人間は恒温動物であり体温 (以下基幹温度という) を一定に保つが, 環境により蓄・放熱が大きくなれば基幹温度は上下降し, 人種差, 個人差はあるものの閾値を超えれば死に至る。人体が温熱的に限界に達する過程において, 急激に低体温又は高体温になるわけではなく徐々に体温が低下または上昇し限界に至ることから, その限界を基幹温度の変動値で規定することが可能である。

基幹温度の致死限界値として, 低体温 (hypothermia) における死亡例では, 第二次大戦中の Dachau での人体実験でヒトを $2\sim 12^\circ\text{C}$ の冷水中に浸したときの死亡時直腸温は $24\sim 25.7^\circ\text{C}$ であったという報告があり, 正常な基幹温度を 37.5°C とすると $-11.8^\circ\text{C}\sim -13.5^\circ\text{C}$ の体温低下が致死限界となる。高体温 (hyperthermia) の例では, ヒトの基幹温度が 41.1°C を超えることはまれであり, 人体における何らかの非常機構がある事が推定されているが, 例外的には 45°C までといわれており, 正常な基幹温度から 7.5°C 上昇が致死限界となる¹⁰⁾。高体温と低体温における限界を比較すると低温限界は高温限界の約 1.6~1.8 倍もあり, ヒトは高温より低温に強いということがいえる。

暑熱下の作業限界としては一過性の条件ではなく, 以後に障害をもたらさずに継続して作業できることを条件として実験³⁾ などから基幹温度 1°C 上昇を限界とする。寒冷下の作業限界としては, (11) 式における不平衡量 s が -29.0 W/m^2 までとの報告¹⁾ あり, これは室内の快適環境指標である PMV (Predicted Mean Vote: 予測平均申告)¹³⁾ = 1.0 に相当する。また, 平均日本人成人男子¹⁴⁾ の身長 167 cm , 体重 62.7 kg から体表面積を 1.66 m^2 とし人体の熱容量を $3.47 [\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}]$ ¹⁰⁾ とすれば基幹温度を 1°C 上昇 (下降) させるに必要な熱量は 18.2 W/m^2 であり, 寒冷下の作業限界は基幹温度 -1.6°C の下降となる。

4.3 人体基幹温度

標準条件において, 環境気温に対する 1 時間作業での人体基幹温度の上昇 (下降) 値を計算した例を Fig. 6 に示す。

Fig. 6 Variation of body temperature during one hour working in various air temperatures

Condition : Metabolic heat production: 140W/m^2 , Insulation of clothing: 1.0clo , Wind velocity: 0.3m/s
 Moving speed against wind: 0.25m/s , Relative humidity: 80% , Global solar radiation: none

(a) skin wettedness 0%

(b) skin wettedness 85%

Fig. 7 Variation of body temperature during one hour working in various wind velocities

Fig. 6(a)から、環境気温 0°C では、風速約 15m/s 以上になると基幹温度が 1.6°C 低下して寒冷作業限界となることがわかり、Fig. 6(b)から、環境気温 30°C では、風速が約 20m/s 以上なければ、基幹温度が 1.0°C 上昇して暑熱作業限界となることがわかる。

Fig. 7 は、風速に対する1時間作業での人体基幹温度の上昇(下降)値を計算した例である。Fig. 7(a)から、風速が 1m/s 以下であれば、気温 -8°C 位までが寒冷作業の限界であり、Fig. 7(b)からは、無風 (0.3m/s) の場合気温約 24°C を超えると暑熱作業の限界であることがわかる。

5. 温熱対策とその効果

寒冷環境における基本的な温熱対策は、衣服の熱抵抗を大きくすることである。ただし着膨れると作業性が悪くなることから、基本的には作業用の衣服熱抵抗は小さい方がよい。作業性などを考慮すると、作業服としての衣服熱抵抗は最大 2clo 程度を目安とすべきである。これ以上熱抵抗が必要となる場合には、ヒーター付きの特殊衣服などを考慮すべきである。衣服の調節以外には、防風用の壁の設置があり、風速をおよそ5分の1に押さえることが可能である。さらに、周囲を完全に閉鎖した場合には無風状態とすることができる。

暑熱環境における温熱対策としては、裸になることは別として、より熱抵抗の小さい作業衣服を着用すること、ファンなどによる 2m/s 程度の送風を行うこと、日射を遮る日除けを設置することおよびこれらの組み合わせが考え

Fig. 8 Relation between workable hours for ambient air temperature and the countermeasures

られる。

この他にも、寒冷においては、ヒートファンの応用、暑熱においてはクーラーファンの応用などが考えられるが、気温の直接制御ということで、ここでは除外する。

人体の基幹温度が暑熱条件では 1.0°C 上昇するまで、寒

(a) Cold environment

(b) Hot environment

Fig. 9 Workable air temperature for various countermeasures

冷条件では1.6°C低下するまでを作業可能時間とし、温熱対策毎に環境気温に対する作業可能時間を計算した結果をFig. 8に示す。ただし、寒冷環境条件においては濡れ率を0%、標準条件において日射量なし、風速10 m/sとし、暑熱環境条件においては濡れ率を85%、標準条件において風速を無風(0.3 m/s)、衣服熱抵抗を0.5 cloとした。Fig. 8から、標準条件よりも温熱対策を行う毎に作業可能時間が多くっており、気温5°Cから20°C位の間は、風速が20 m/sであっても対策の必要性がないことがわかる。

Fig. 9はFig. 8における各作業可能時間において各温熱対策を行った場合の作業限界気温を表示したものであり、この図により温熱対策の効果を見ることができる。例えば-20°C環境における1時間の一般作業が想定される場合は、Fig. 9(a)から、2.0 cloの作業服を採用するか、または1.5 cloの作業服に加えて周囲を完全に閉鎖する必要があることがわかる。また、+30°Cの環境において1時間の一般作業が想定されるならば、Fig. 9(b)から、日除けと送風機を用意するか、作業時間を30分にして休息の必要があることがわかる。

6. 結 言

船舶、海洋(浮体)構造物の暴露作業場において、暑熱または寒冷下の作業が想定される場合には、設計時におい

て温熱対策を行わなければならないことから、暴露環境等による人体への熱的影響を種々要因について、その影響の度合いを人体の熱平衡を維持できる気温と風速の関係で示した。さらに、人体の基幹温度変化がある閾値を超える時点を熱的に作業限界とした作業継続の可能性の判定式を使用して、環境気温と寒冷・暑熱の各温熱対策における作業可能時間を示した。最後に、作業が想定される環境気温からどのような温熱対策を行えばよいのかを判定できる簡易な図を作成し、設計時において必要となる温熱対策の指標とした。

参 考 文 献

- 1) 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).
- 2) 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, (1996).
- 3) 村山雅己, 中橋美智子, 福地信義: 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, (1997).
- 4) 気象庁気候・海洋気象部海上気象課: Marine Climatological Summary 1981-1990, (1994)
- 5) U. S. NAVY MARINE CLIMATIC ATLAS OF THE WORLD VOL 5
- 6) 理科年表, 天文気象台編, (1993)
- 7) 浅井辰郎他: 日本・世界の気候図, 東京堂出版, (1985)
- 8) 北太平洋の風と波の統計図表 (1964-1973), 日本造船研究協会, (1980).
- 9) 空気調和・衛生工学会編: 空気調和衛生工学便覧 I 基礎編第11版, オーム社, (1989)
- 10) 中山昭雄編: 温熱生理学, 理工学社, (1981)
- 11) ISO 7933, Hot environments-Analytical determination and interpretation of thermal stress using calculation of required sweat rate, (1989)
- 12) Olesen, B. W.: 温熱環境と衣服の快適性, 繊維と工業 43(6) p. 17, (1987)
- 13) ISO 7730, Moderate thermal environments-determination of the PMV and PPD indices and specification of the conditions for thermal comfort, (1994)
- 14) JIS 衣料サイズ推進協議会: 日本人の体格調査報告書-既製衣料の寸法基準作成のための- (1978年~1981年), 日本規格協会 (1984)
- 15) 人間-熱環境編集委員会編: 人間-熱環境, 日刊工業新聞社, (1989)
- 16) 日本機械学会: 伝熱工学資料 (第4版), 丸善 (1991)
- 17) Duffie J. A., Beckman W. A.: Solar Engineering of Thermal Processes, Wiley-Interscience, 1980, pp. 1~26.
- 18) 田中俊六他: 最新建築環境工学 (改訂版), 井上書店, 1992

付録 日射から人体の受ける輻射熱の計算

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。大気圏外日射量 J_0 は、地球-太陽間の平均距離 R にある場合の大気圏外日射量(太陽常数) J_{sh} を使用した Duffie の近似式¹⁷⁾がある。

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

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 $1.37 \text{ [kW/m}^2\text{]}$ 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。

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

ここで、 κ は大気透過率である。

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¹⁸⁾。

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

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。平均日本人成人男子の身長 167 cm 、体重 62.7 kg から体表面積は 1.66 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、人体の垂直平面を $0.96 A_b$ 、水平面を $0.04 A_b$ 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 $\cos \theta$ 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。

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

(d) 式を整理して、人体のへ照射される単位体表面積当たりの日射熱量 J_{man} として次式が得られる。

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