

密閉型衣服：消防員装具のヒートストレス対処に関する研究と開発

製品安全評価センター：船舶艤装品研究所 村山 雅己

元東京学芸大学教育 中橋美智子

東京学芸大学教育 生野 晴美

横浜国立大学教育人間科学 物部 博文

1. 研究開始の経緯 研究経緯

国際航海をする船舶では、消防員装具の積みつけが義務付けられており、油火災を想定した重厚な装備となっている。危険物を運搬するバルクキャリア、特に液体化学薬品のばら積み貨物船などにおける火災を想定した場合、消防員装具は全身を覆う外部環境から防護されたものでなくてはならない。しかしながら、このような完全装備タイプの消防員装具を着用した場合ヒートストレスにより20～30分程度しか作業が行えないことが躁練及び各種実験などにより確認されており、より活動範囲の広い消防員装具が要望されていた。現在ISOにおいても消防員装具の標準要件が話し合われており、ヒートストレスの問題は認識されているが対処案等は明確ではない。



我々は、消防員装具のみならず外環境から人体を保護するための防護服類のヒートストレスについて各自の専門分野を活かして検討を行い「密閉型衣服プロジェクト」グループを構成して調査実験を開始した。主な実験としてはヒートストレスの評価方法を確立するために、サーマルマネキンによる透湿性の抑制度合いの測定、人体着用による皮膚温上昇測定などを試みた。そして、具体的な成果として、各消防員装具のヒートストレスを起こさせる程度について比較測定としてであるが確立し、かつヒートストレス低減効果のある対処法の提示、さらに作業時におけるヒートストレスの程度を警告するアラームの開発を行った。



2. 「密閉型衣服プロジェクト」研究の目的、ターゲット

ここで、密閉型衣服：消防員装具（以下密閉型衣服という）とは、熱輻射等の外環境から保護されており、結果として衣服熱抵抗が高く透湿性が少ないか殆どない衣服、または外気との換気のない衣服等をいう。

密閉型衣服によるヒートストレスとは、環境気温が30℃を超えるような暑熱下において、「発汗による潜熱（気化熱）放熱」が密閉型衣服により抑制され、作業による代謝熱が人体に蓄熱することによる熱中症

である。つまり、暑熱下において熱抵抗の高い（保温性の高い）衣服を着用し、さらに密閉型衣服であるがために換気・透湿が抑制され、結果として発汗での潜熱放熱が抑制されている状況である。次式に示す人体の熱平衡方程式において、人体からの放熱に大きく寄与するのは輻射と対流放熱（R+C）であるが、環境気温 30 あたりにおいては、条件にもよるが潜熱放熱 E_{sk} の項が大きく影響してくる。

$$s = M - W - C_{res} - E_{res} - (R + C) - E_{sk}$$

呼吸による
熱不平衡量 代謝量 仕事 対流放熱 潜熱放熱 皮膚からの
輻射と対流放熱 潜熱放熱

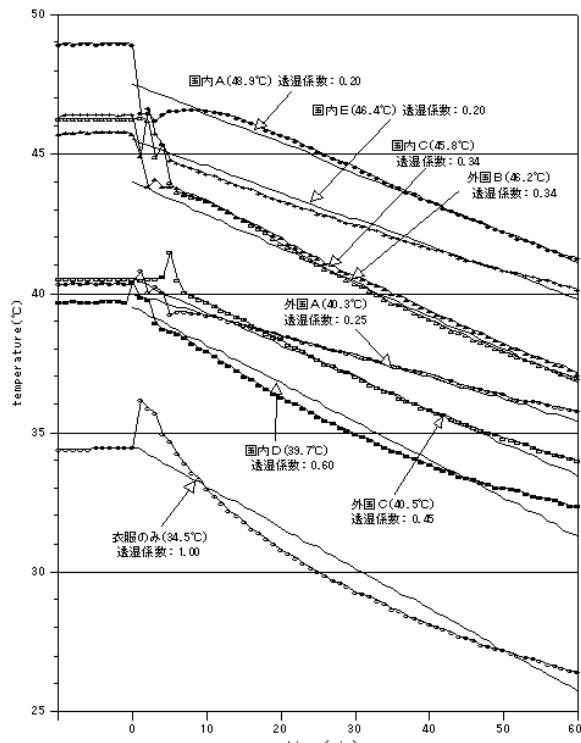
本プロジェクトの目的は、密閉型衣服のヒートストレス対処であり、具体的には密閉型衣服のヒートストレスに関する評価法（測定法）の確立、ヒートストレス対処方法の検討を行って、ヒートストレス対処方法の開発（作業時間の延長方法の開発）、ヒートストレスの限界の予測方法の確立をターゲットとした。

3. ヒートストレス評価法の確立

ヒートストレスの対処を開発するためには、密閉型衣服のヒートストレスに関する評価方法がなければならない。そのうえで、ヒートストレス対処に関する各方法の効果を評価することになる。

サーマルマネキンを使用したヒートストレス評価方法の検討

密閉型衣服によるヒートストレスの主原因は、前項で書いたとおり、透湿の抑制である。このことから、「透湿を抑制する度合い（透湿係数）=ヒートストレスの度合い」の評価とすることを想定しサーマルマネキンを使用した実験を行った。実験方法は環境気温 20 一定の恒温室において、発熱量を固定したサーマルマネキンに作業着と消防員装具を着用させ、皮膚表面温が安定した後、体温相当の温水により下着を含む作業着を湿潤させ平均皮膚温の降下を測定した。そして、人体熱平衡方程式を使用し、潜熱放熱の項において透湿を抑制する係数（透湿係数）を設け計算値と実測値の温度降下曲線を整合することにより、透湿係数を決定した。



衣服湿潤時におけるサーマルマネキン表面皮膚温の温度降下と温度降下の計算曲線

項目		単位	消防員装具(国内製品)				
乾燥時	全平均表面温度		衣服のみ	国内 A	国内 C	国内 D	国内 E
	胸部及び臀部の平均表面温度		34.5	48.9	45.8	39.7	46.4
	乾燥時の熱抵抗値	m^2K/W	0.254	0.475	0.435	0.345	0.410
	表面空気熱抵抗を除く(clo値)	clo	0.63	1.86	1.63	1.14	1.53
	計算における初期皮膚温度		34.5	47.5	44.0	39.5	45.5
計算における透湿係数		N.D	1.00	0.20	0.34	0.60	0.20

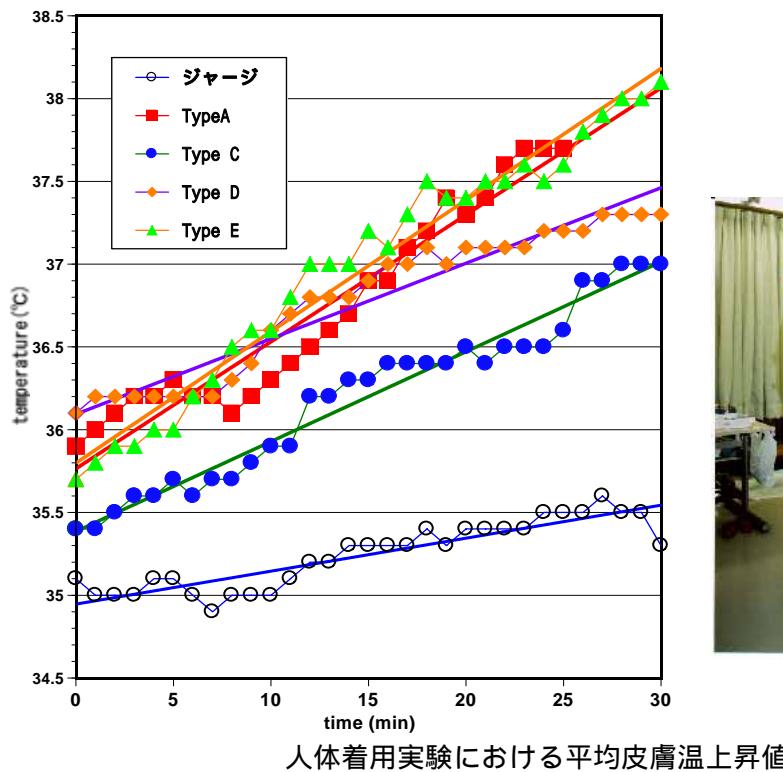


サーマルマネキンによる実験に使用した作業服(左端)と消防員装具

人体着用実験によるヒートストレス評価方法の検討

密閉型衣服のヒートストレス評価において、人体着用実験は温熱感などの評価も得られることから比較検討の方法としては極めて有用である。人体着用実験の場合、環境気温と環境の風速が皮膚温などの測定において大きな変動要因となるが、恒温室を使用し気温制御のための気流に注意して環境気温一定とした室内において実験を行うことにより、安定した実験が行うことができる。

ヒートストレスの評価のための実験としては、恒温室内において環境気温を30℃一定としエルゴメーターを使用して120W/m²相当の作業を20分間継続して行うことによる皮膚温、鼓膜(外耳道)温、直腸温などの上昇を測定した。この実験において、多少の個人差はあるものの、平均皮膚温の上昇値にはかなりの再現性がみられ、サーマルマネキンによる実験結果との比較においてもヒートストレス評価の傾向は一致した。



人体着用実験における平均皮膚温上昇値

4. 消防作業による作業程度の調査

密閉型衣服のヒートストレス対処方法を検討する上で、実際の現場においてはどのような対処を行っているのか、またどのような状況においてどのような対処が必要なのかを把握する必要がある。そのため、各地域における消防署を訪問し調査を行った。火災の形態として住居地域の木造家屋火災、ビルなどの火災、そして山林火災などがあり山林火災ではさらに焼失面積によりその規模は小規模、中規模、大規模に3分類されている。消防員のヒートストレス障害が報告されるのは殆どがビル火災である。興味深い調査結果として、作業が長時間に及ぶ山林火災では最初から消防員装具を着用していない。現在、これらの調査結果から各火災における代表的なシナリオを作成し、時間軸に沿って作業を解析すると共に人体による作業実験を行い、体温上昇等がどのように変動するかを確認中である。



木造家屋火災

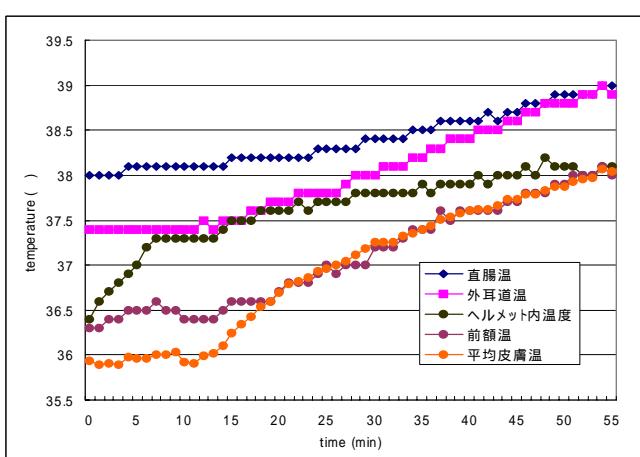
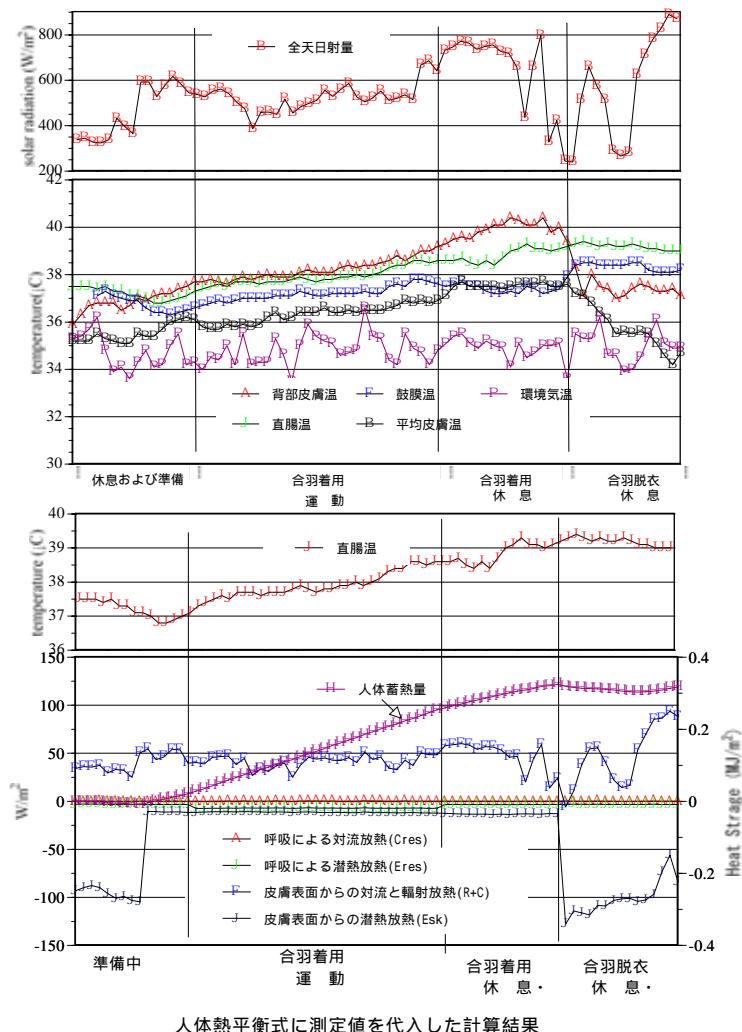
1時間5分

0:00	出場
0:05	
0:10	現場到着
0:15	消火準備、救助確認
0:20	救助作業
0:25	消火活動
0:30	鎮圧
0:35	残火作業
0:40	0:25
0:45	
0:50	鎮火
0:55	撤収作業
1:00	0:10
1:05	退場
1:10	
1:15	
1:20	
1:25	
1:30	

火炎の中に入ることから、完全防護でないければならない。また、階段、はしごの上り下りがあり、瞬時にかなりの運動量

5. 人体のヒートストレス（基幹温度）の限界

密閉型衣服の使用においてヒートストレスによる限界についても検討を行った。実験は、暑熱環境における日射を含めた実験と室内における実験を行った。暑熱下でトレーニングを行っている被験者は耐性が見られるなど人体の順応問題もあるが、直腸温が1℃を超えた場合にのぼせ症状の申告があることから直腸温上昇1℃が安全限界とみる。鼓膜温(外耳道温)は、選択的脳冷却に説明される機能によりヒートストレスを発現するような非常時においては極力冷却されていると考えられ、人体の代表温度としては使用できないと考える。



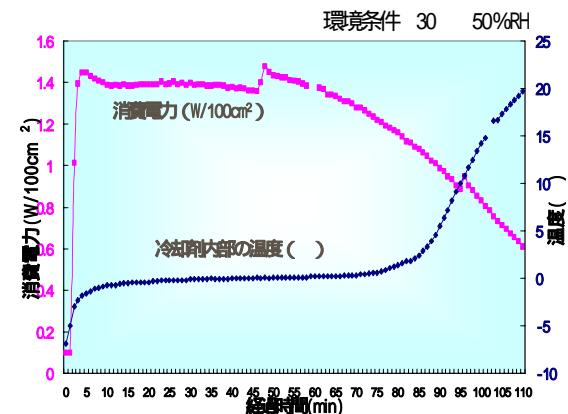
消防員装具着用における限界実験（1時間）

6. 各ヒートストレス対処方法の効果

30 を超える暑熱下において、消防員装具を着用しての作業はヒートストレスを起こすことは経験的にもはっきりしており、消防員装具の生地に透湿性のあるゴアテックスを使用するとか、構造的に煙突効果を極力利用できるようにするなどの対処が行われている。また、積極的な方法としては、背中と両脇に冷却剤を入れるなどの方法も採用されている。

冷却剤による対処効果

実際に採用されている冷却剤を使用して人体着用実験を行った結果、冷却剤の有無による平均皮膚温上昇に有意差は見られなかった。それどころか、体幹部の部分冷却による血管収縮が原因と思われる頭部部位の熱ストレスが観察された。カトーテック製のサーモラボを使用し、冷却剤の熱吸収能力を測定した結果、1/4個(面積100cm²、4袋で1シート、)で約1時間冷却効果をキープできることがわかった。しかしながら、計算上においては、両脇と背中に3個の冷却剤を使用した場合でも体重60kgの人間を1時間で約0.3体温降下させる程度の熱吸収能力である。



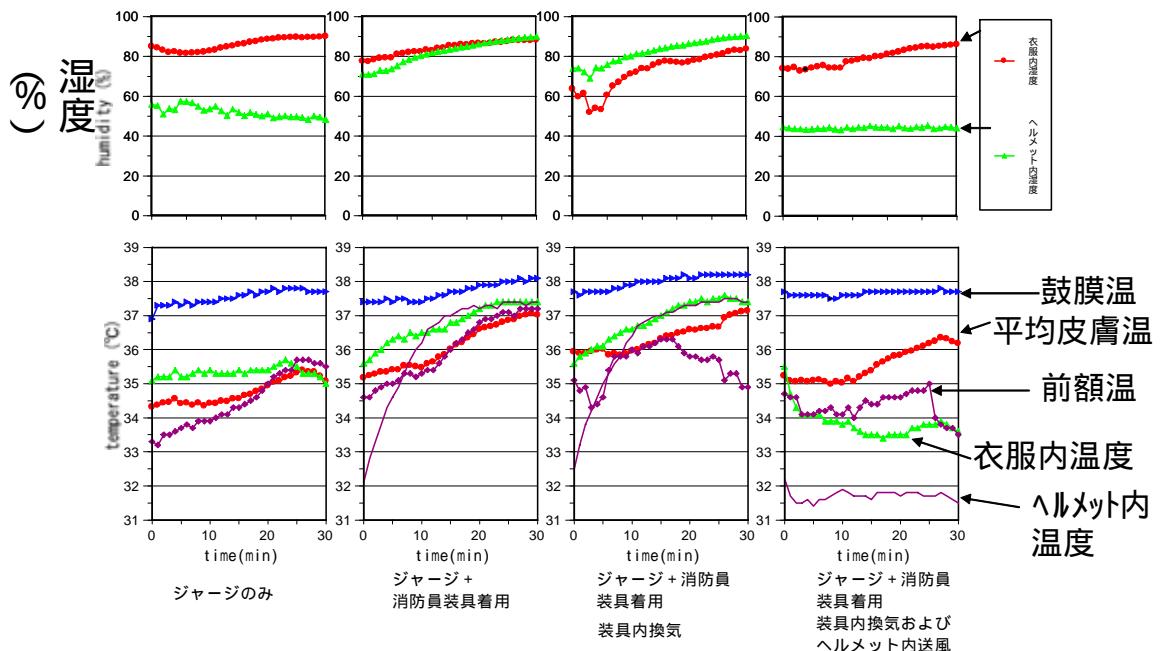
強制換気法の効果

種々の対処法を検討していくうえで、現在の衣服素材と衣服の構成による自然換気などでは対処できないと結論した。その上で動力を用いる強制的な方法について検討を行い、SANO 製の直流ジェットファン2個を充電式のニッケル水素電池単3型(1.2V1500mAh)8本直列9.6Vで駆動する強制換気法の実験を行った。

強制換気を行う密閉型衣服は市販もされており、特別な方法ではない。市販されている換気服は、一般的には衣服とは別に設置された比較的大きなモーターファンと電力を使用しパイプ等を経由して衣服内の送風換気を行う方法であり携帯できるタイプではない。



市販されている換気服と我々の実験において行った方法において大きな違いは、送風ではなく衣服内の排気を行っていることがある。つまり、強制換気というよりは強制的に透湿を促進させる程度のイメージである。脇の下辺りから $50\text{cm}^3/\text{s}$ 程度の風量で高湿度の衣服内空気を排気し結果として首筋、袖口などからの自然な外部空気の流入を促進させることにより衣服内の湿度を下げ発汗による潜熱放熱を促すことを意図した。



我々の実験において使用した装置は、写真にあるとおり、小さな 60 g 程度のファンを用いており、衣服内用と頭部用にファンを 2 個づつ使用するにしても電池等すべてを入れて 1 kg に満たない装置であり、ファンの消費電力から数時間の連続使用が可能である。

人体着用実験により強制換気法の効果を検討した結果は顕著であり、適切に用いれば消防員装具を着用しないジャージのみの平均皮膚温上昇に近いものであり、被験者の感覚もそれを裏付けている。

実験前の検討として、両脇の下の 2 点のみから排気した場合、脇の下周辺のみの効果しか得られないのではないかなどが懸念されたが、線香の煙などによるチェックでも首筋、

両袖、すそなどから均一な衣服内への外気流入が認められ、体の動きに応じて少なくとも上半身全体で均一な換気（透湿）が確認された。

この強制換気法は、外気環境が体温を超えるかつ湿度が高い場合には効果がないことははっきりしているが、現実としてそのような状況は極めて少ない。しかしながら、原理を知って応用することは求められる。

7. 今後の課題など

強制換気法において問題点のひとつとして頭部の換気がある。頭部の換気を行わず、衣服内ののみの換気を行った場合、頭部に熱ストレスが現れ現実的でない。実験においては頭部も換気を行っており、よい結果を得た。しかしながら、ヘルメット内の換気についてはヘルメットの加工が必要であり、ヘルメットの要件を満たす必要がある。強制換気法について我々は効果を確認し、方法と原理を示したのみで具体的な製品としての詰めは行っていない。

ヒートストレスアラームの推奨

消防員装具の作業調査において、消防作業におけるヒートストレス対処は自己責任・自己管理であるとされ、各自で対処するよう求められていた。しかしながら、ガイドラインのない自己責任による対処は極めて難しいと考える。我々はヒートストレスの対処法の検討、特に着用実験を重ねているうちに、消防員が自身のヒートストレス状況を常に把握しモニターできれば必要なときに撤退できヒートストレス障害に対して大きな効果があることに気がついた。

自身のヒートストレスを把握するには、体温をモニターすればよい。ヒートストレスを把握するための温度測定点は額温度が推奨であり、1点のみで十分である。温度センサーの実際の設置としてはヘルメット内バンドの額部分に軽くセンサーが接触するようにすればよい。

警報を発する温度としては37.5℃前後と考える。けれども、個人差があることから各自で検討して設定すればよい。

最後に我々が検討し開発したヒートストレスの対処法について広報の機会を与えていただいたい社団法人日本繊維製品消費科学会および「快適性を考えるシンポジウム」委員長平田耕造先生に謝意を表します。

