

消防服のヒート・ストレスに対する予防策 ～換気と頭部冷却の効果～

物部博文^{*1}, 村山雅己^{*2}, 生野晴美^{*3}, 中橋美智子^{*4}

Precaution against heat stress of fire fighting clothes -The effects of ventilation and head cooling-

Hirofumi MONOBE^{*1}, Masaki MURAYAMA^{*2},
Harumi IKUNO^{*3}, Michiko NAKAHASHI^{*4}

Abstract

We gave exercise load of 280W/m² to 4 healthy subjects under a condition of 30 ± 0.1 °C, Rh 60 ± 5%. We compared a change of body temperature at the cases of ①fire-fighting clothes, ②fire-fighting clothes with ventilation, ③fire-fighting clothes with head cooling, ④fire-fighting clothes with ventilation and head cooling. As a result, in comparison with firefighting clothes, the external ear temperature and mean skin temperature were restrained by ventilation and the head cooling. Furthermore, temperature of an external auditory-miatus and a rise of mean skin temperature compared it with fire fighter clothes, and it was restrained about 1°C when we used the ventilation and head cooling.

Key Words : *heat- stress, selective brain cooling, protective clothing for fire fighting, head cooling,*
ヒート・ストレス、選択的脳冷却、消防員装具、頭部冷却

1. はじめに

火災に対応する消防員の装具は、消防員の身体を防護する目的で、耐熱性が最優先して開発されるので、必然的に衣服熱抵抗の高い密閉型の衣服となる。しかし、このような密閉型の衣服は、衣服内気候の換気が少ないので、発汗による潜熱放散が抑制される。その為に消火活動に伴う人体の代謝による蓄熱を短時間に増大させ、消防員に過度なヒートストレスを与える¹⁾。

このヒートストレス対策としては、両脇下部および後背部の衣服内ポケット、あるいは冷却ベスト内へ冷却剤を収納しヒートストレスを緩和する方法が存在する。しかし、これら方法がどの程度体温を抑制するのか検討した報告事例は少なく、十分な評価がなされているとは言い難い^{3, 4)}。実際に我々が行った実験では、体幹部の局所冷却による体温抑制効果は小さいこと、さらに頭部の温

^{*1} 横浜国立大学教育人間科学部 助教授,

^{*2} 船舶機装品研究所 主任研究員,

^{*3} 東京学芸大学生活科学学科 教授,

^{*4} 東京学芸大学 元教授,

Yokohama National University, Associate Prof.

Res. Inst. Engineering, chief researcher.

Tokyo Gakugei University, Professor .

Tokyo Gakugei University, Professor emeritus.

度上昇が認められること、それが被験者に不快感を与えることが認められている⁵⁾。そこで、我々は、選択的脳冷却を利用した冷却システムが、ヒートストレスの防止に効果あるかを検討したところ、一定の効果が認められることを報告した⁶⁾。しかし、いかに頭部の冷却効率が高く、なおかつ機能的に重要であるとしても、身体の全体表面積に占める頭部の割合を鑑みると、より広い部位の冷却が必要であろう。そこで、我々は、表面積が大きく、なおかつ運動の制約を受けにくい体幹部の熱放散を効果的に促進できれば、頭部冷却との相乗効果で、ヒートストレスの抑制を促すことができる考えた。

なぜなら体幹部の熱放散を妨げる要因は、発汗により衣服内気候の飽和水蒸気圧が高くなるので、皮膚からの潜熱放散が抑制されることに他ならない。そこで、飽和水蒸気を衣服外に放散し、低飽和水蒸気の外気を導入すればこの問題は解決できると考えた。

本研究では、前述した頭部送風と体幹部の衣服内気化熱放散を促進させる方法（換気）、両方を併用するといった3つのヒートストレス対処法について、消防員装具の通常装着と比較してその効果を明らかにした。

2. 実験方法

2.1. 被験者および環境条件

実験における被験者の概要を表1に示した。

表1 被験者の概要

被験者	性	年齢	身長(m)	体重(kg)	体表面積(m ²)
A	M	21	1.72	65.0	1.72
B	M	21	1.75	65.0	1.74
C	M	23	1.72	60.0	1.66
D	M	29	1.69	67.0	1.72

本研究は、表1に示した健康な成人男子4名を被験者として、消防員装具の着用実験を行った。実験時の環境条件は、恒温恒湿装置を用いて、室温 30±0.5℃、相対湿度 50±5%の一定条件とした。なお、実験にあたっては、被験者に事前に実験内容の説明を行い、なおかつ倫理面には十分に配慮して実験を行った。

2.2. 実験日時および測定時間

実験は、予備実験を含めて2001年8月から10月にかけて行われた。測定時間は、午前11時から午後3時までの間とし、それぞれの被験者は時間帯をほぼ統一して実験を行った。また、実験は、被験者が食事後1時間以上経過した後に行った。

2.3. 着用衣服

実験で使用した衣服の種類とその素材を表2に示した。基本衣服として、ランニング・シャツ、パンツ、トレーニングウェアの上下、靴下に統一し、この状態に消防員装具を着用させた。さらに実験では、この状態に各種冷却システムを装着させた。

消防員装具は、表2に示す様な上衣3層、下衣2層構造のK社製消防員装具を用いた。

表2 着用衣服の種類と素材

着用衣服	衣服の素材
〈基本衣服〉	
トレーニングウェア上	ポリエステル・綿混紡
トレーニングウェア下	ポリエステル・綿混紡
ランニングシャツ	綿 100%
パンツ	綿 100%
靴下	綿 44%・ポリエステル 56%
〈消防員装具〉	
消防員装具上衣	表地素材:メタ系アラミド繊維 40%、パラ系アラミド繊維 60%、制電繊維 1%以下。透湿防水層:メタ系アラミド繊維 95%、パラ系アラミド繊維 5%。断熱層:アラミド繊維主体の特殊構造。
消防員装具下衣	表地素材:メタ系アラミド繊維 40%、パラ系アラミド繊維 60%、制電繊維 1%以下。透湿防水層:メタ系アラミド繊維 95%、パラ系アラミド繊維 5%。
手袋	ケブラー + セラミックレザー、セラミックレザー、
ブーツ	
ヘルメット	

実験条件は、①通常の消防員装具の着用：写真1、2の様に襟元を締めた状態（通常の状態）で消防員装具を着用した場合（通常装着）。②換気：①に換気システム（ファンにより毎分7Lの風量で衣服内飽和水蒸気を外部へ放散する小型モーターを利用したユニット、写真3および写真4）を装着した場合、③頭部送風：写真5の様に冷却ファンを用いて毎分71の風量でヘルメット内へ外部空気（30℃、50%RH）を導入した状態。④②と③の併用。⑤基本衣服（ジャージ）の合計5条件について実験を行い、比較・検討した。



写真1 装具着用



写真2 装具着用

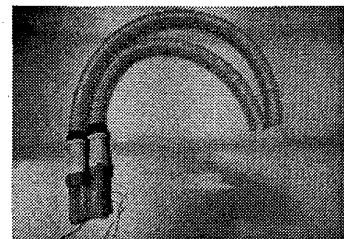


写真3 換気装置

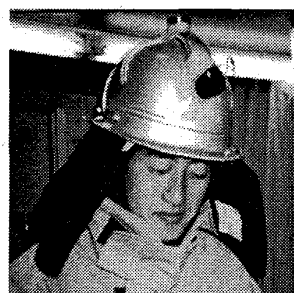


写真5 頭部送風



写真4 換気装置の装着

なお、換気および頭部送風実験については、予備実験として、小型ファンを2基装着させた状態について、電圧を1V刻みで上げていった時に、被験者が十分な風量を体感できる9Vとした。

2.4. 測定項目および測定方法

測定項目および測定器具を表3に、測定部位を図1に示した。測定項目として、平均皮膚温、深部温としての外耳道温、脈拍数を、また、主観的な評価として温熱感、湿潤感の測定を行った。

表3 測定項目および測定器具

測定項目	測定方法
皮膚温・衣服内温	銅-コンスタンタン熱電対(TYPE-T)
外耳道温	モナサームディスプレイサブル温度計 (マリンスプロット社製)
脈拍数	脈拍計(日本光電製)
着用感	温熱感(5段階法) 湿潤感(5段階法)

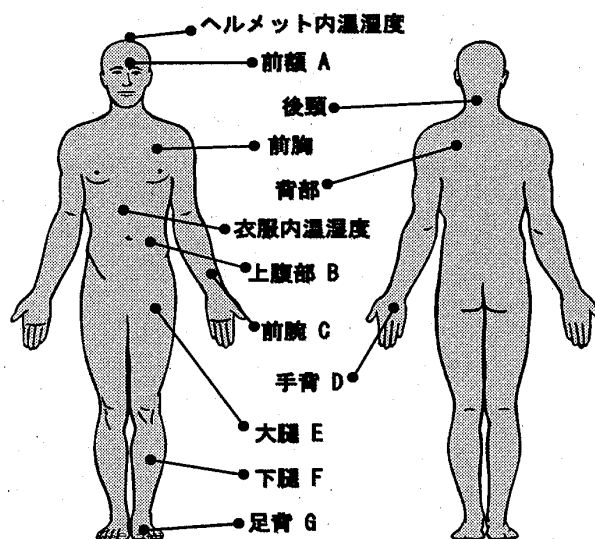


図1 測定部位

2.4.1. 平均皮膚温および外耳道温

皮膚温は、銅-コンスタンタン熱電対(TYPE-T)を用いて HARDY&DUBOIS による平均皮膚温の測定部位7点(前額、上腹、前腕、手背、大腿、下腿、足背)、衣服内温度として鳩尾部、背部、後頸部、ヘルメット内を測定した。外耳道温は、モナサーム・ディスプレイサブル温度センサー(マリンスプロット社製)を用いて測定した。

これらの温熱データについては、20点式データレコーダーHR1300(横川電気製)により、10秒間隔で記録を行った。ただし、分析には、1分毎のデータを用いた。なお、平均皮膚温(T_{sk})は、HARDY&DUBOIS による以下の式を用いて算出した⁶⁾。

$T_{sk} = 0.07A + 0.35B + 0.14C + 0.05D + 0.19E + 0.13F + 0.07G$ (*A~G は、測定部位の皮膚温、位置については、図1を参照。)

2.4.2. 脈拍数

本来なら心拍数を求めるべきではあるが、計測器の取り付けによる衣服内気候および皮膚温への影響を避けるために、耳朶部での脈拍測定（日本光電製）を1分毎に行った。

2.4.3. 着用感

着用感については、5段階の尺度（温熱感については、1：普通、2：やや暑い、3：暑い、4：非常に暑い、5：耐えられない。湿潤感については、1：普通、2：やや蒸す、3：蒸す、4：非常に蒸す、5：耐えられない。）を用いて、被験者に口答で1分ごとに申告させた⁷⁾。

2.4.4. 実験手順

実験に際して、被験者を30分以上前に実験室に入室させ、恒温室の温度に慣れさせた。

実験手順としては、センサーを装着、消防員装具を着用し、5分間の安静状態をおいた後、エルゴメーターによる 280 W/m^2 相当の運動負荷を与え、運動終了後に再び安静状態を5分間おいた。

2.4.5. 分析方法

得られた測定値は一元配置の分散分析を用いて、各条件による差を統計的に処理した。有意水準は、Scheffeの方法を用いて5%水準、1%水準のものを採択した。

3. 実験結果

3.1. 平均皮膚温、外耳道温の変化と温熱感

3.1.1. 平均皮膚温および外耳道温

3.1.1.1. 平均皮膚温

各条件別にみた平均皮膚温の変化を図2に示した。消防員装具を着用すると皮膚温は急上昇し、通常着用の場合は運動終了後5分後でもっとも高い値 (37.1°C) を示した。一方、頭部送風、換気、換気・頭部送風等の対応策を用いている場合は、運動終了2～3分後が皮膚温のピークを示し、それぞれ、頭部送風、 36.7°C 、換気 36.6°C 、換気・頭部送風 36.1°C の順であった。ピーク値の差をみると、標準着装に対して頭部送風・換気併用では約 1°C 低く抑えられた。ジャージに対して標準装着、頭部送風、換気は14分後以降、換気と頭部送風は16分以降有意に高い値を示したが、それ以外の群間では有意な差は認められなかった。

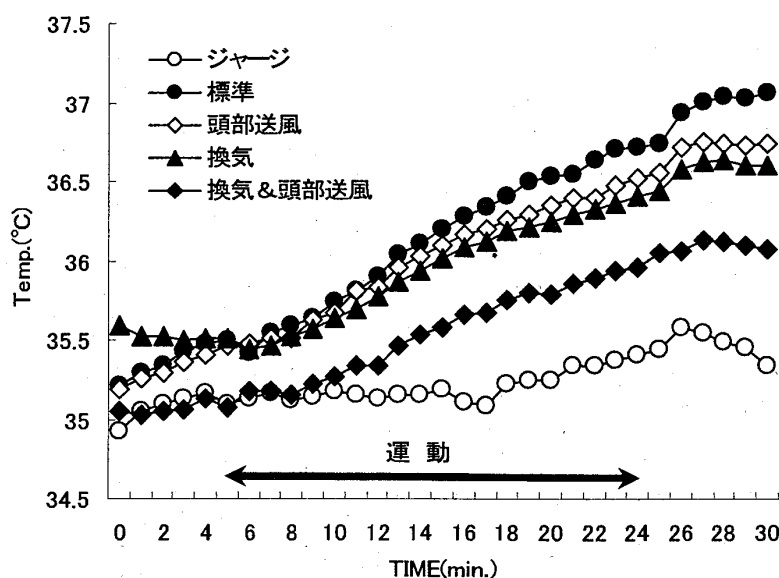


図2 条件別にみた皮膚温変化

3.1.1.2. 外耳道温

各条件別にみた外耳道温の変化を図3に示した。消防員装具を着用すると外耳道温は急上昇し、通常着用の場合は運動終了後4分後でもっとも高い値(38.0℃)を示した。一方、換気、頭部送風、換気&頭部送風等の対応策を用いている場合は、運動終了1~2分後が皮膚温のピークを示し、それぞれ、換気 37.7℃、頭部送風 37.4℃、換気・頭部送風 37.2℃の順であった。運動に伴う外耳道温の上昇に対して、頭部送風の効果は大きく、標準着装が38℃まで上昇したのに対して、頭部送風、換気・頭部送風併用はそれぞれ0.7℃、0.9℃抑制された。しかし、各条件間での有意な差は認められなかった。

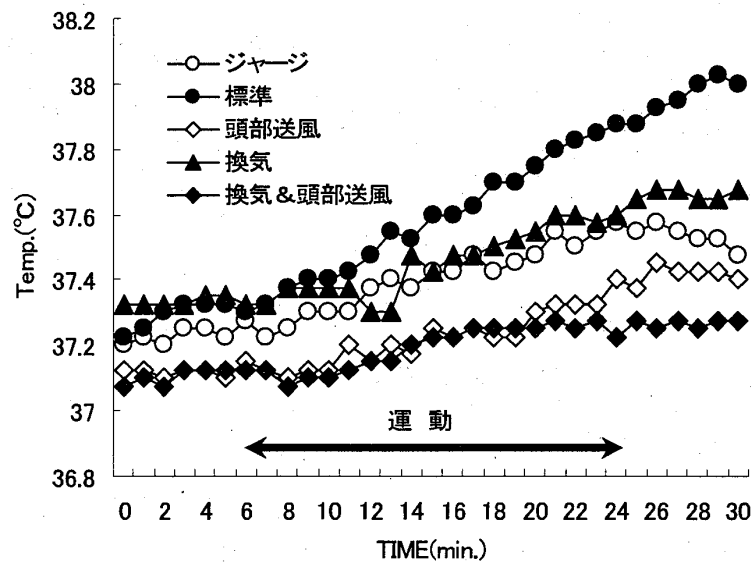


図3 条件別にみた外耳道温変化

3.1.2. 脈拍数、温熱感および湿潤感

3.1.2.1. 脈拍数

各条件別にみた脈拍数の変化を図3に示した。標準着装状態と頭部送風が最も高く、それぞれ125拍/分、一方、換気(110拍/分)、換気・頭部送風(102拍/分)が低い値を示した。

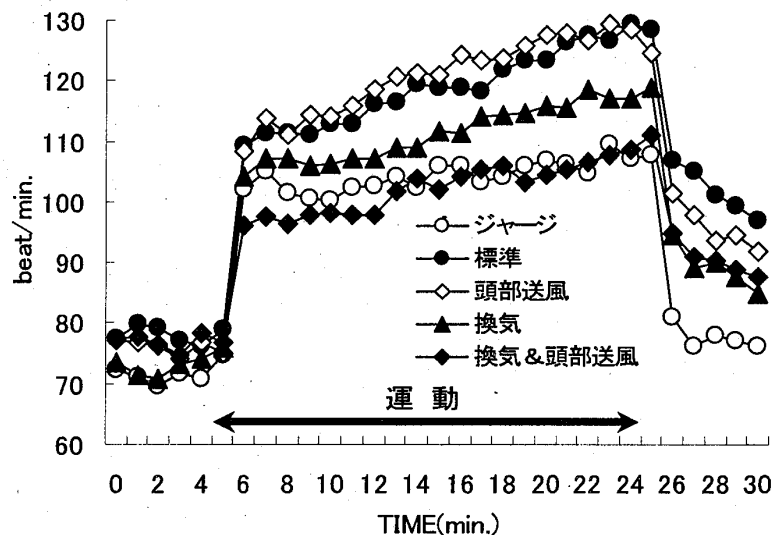


図4 条件別にみた脈拍数変化

3.1.2.2. 温熱感および湿潤感

各条件別にみた温熱感の変化を図5に示した。標準着装が最も温熱感がもつとも悪い温熱感の状態を示した。標準着装と比較すると、ジャージ、換気、頭部送風、換気・頭部送風併用は明らかに低く抑えられた。しかし、ジャージ、換気、頭部送風、換気・頭部送風併用の間では、明確な差は認められなかった。

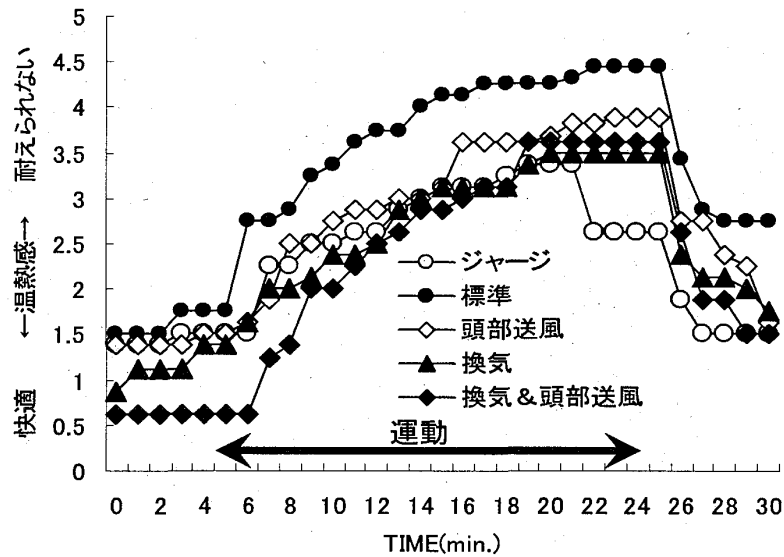


図5 条件別にみた温熱感変化

各条件別にみた湿潤感の変化を図6に示した。湿潤感も温熱感同様の結果であった。すなわち、標準着装が最も悪い状態を示す一方で、ジャージ、換気、頭部送風、換気、換気・頭部送風併用が低く抑えられた。しかし、ジャージ、換気、頭部送風、換気・頭部送風併用の間では、明確な差は認められなかった。

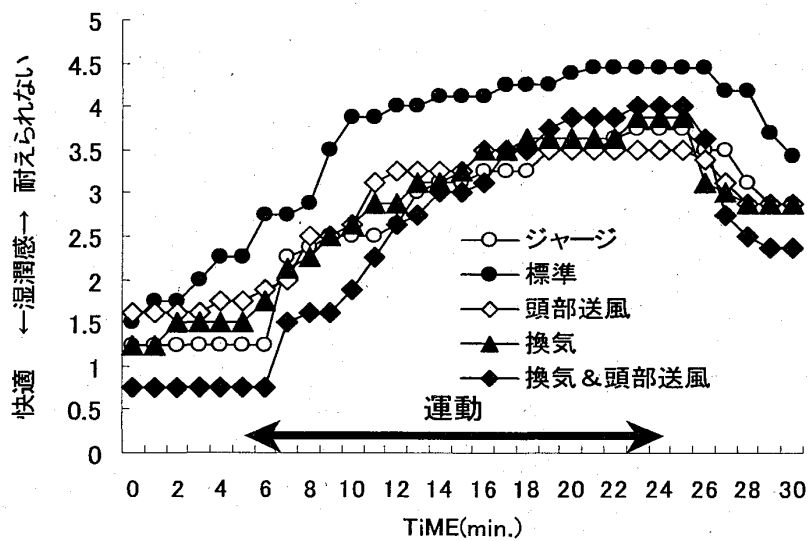


図6 条件別にみた湿潤感変化

3.1.3. 発汗量（着衣付着量）

各条件別にみた着衣に付着した水分量を図7に示した。標準着装とジャージでは明らかな差が認められたが他の条件では差が認められなかった。

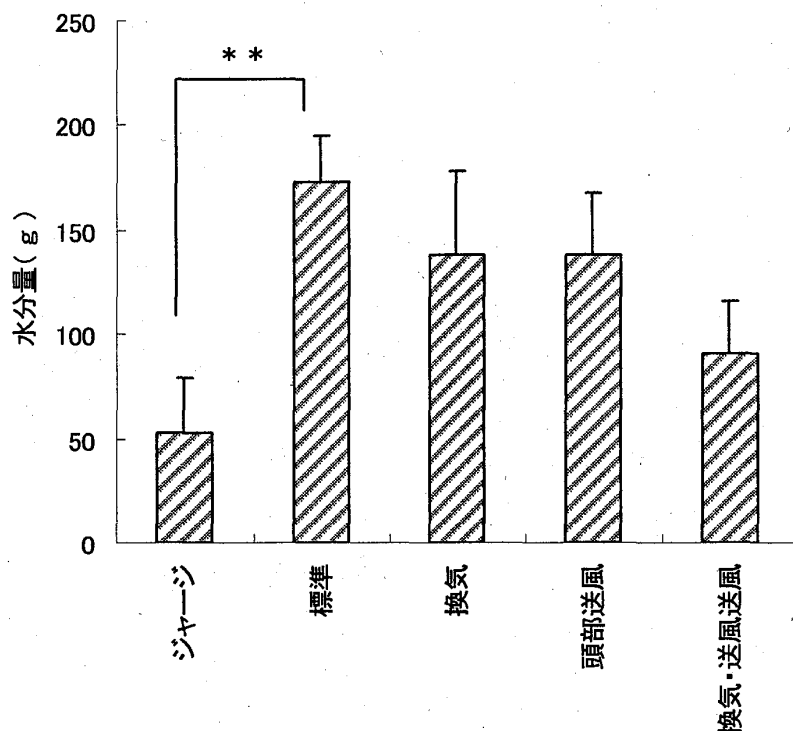


図6 各条件別にみた着衣付着水分量の差

3. 考 察

消防用防火衣に要求される性能は、ISO11613 (ISO/TC94 SC14) Protective clothing for firefighters に記されている。これによれば、消防用防火衣は、①熱的要素、難燃性 (ISO15025)、②炎 (ISO9151) と放射熱 (ISO6942) に対する熱伝導性、③熔融金属に対する防護性などが要求される。また、消防用防火衣は、透湿防水層、断熱層、静電防止層、空気層、外層などの多層構造として構成され、外装は主に布地、アルミ蒸着地となっている。さらに、構造として、頭部をヘルメットとしこころで覆うこと、頸部は火傷防止のために2重になっていること、防火手袋とブーツを着用することなど、衣服の構成が多層になっているので、きわめて密閉性が高い。その様な消防員装具の標準着装時に 280W/m^2 相当の運動を負荷した場合の体温上昇を、換気、頭部送風と比較すると、換気システム、頭部送風は一定の効果を示すといえる。さらに、平均皮膚温および外耳道温の変化、着用感を比較すると、換気・頭部送風を併用する場合で、より明瞭な効果が認められる。少なくとも消防用防火衣の標準装着時と比較すると、外耳道温および平均皮膚温で約 1°C の体温上昇抑制効果が認められたので、 30°C の気温でも出動した消防員がヒート・ストレスで倒れるという事故は防止できると考えられる。

上記の様に ISO 規格では、防火性能については、非常に細かく規定されているものの、消防服の快適性については、「ヒート・ストレスに対する対応策を含むこと」が記載されるのみである。しかし、気温が 30°C を超える環境条件下で消防員が出動した場合、ヒート・ストレスが生じる可能性が高く

なるので、なんらかの対策を講じることは、安全に消火活動を行ううえでも必然的な措置であると考えられる。しかし、実際には有効な方法は確立しておらず、今回の方法は充電式の乾電池を使用すれば4時間以上冷却可能である点からも効果的な方法であると言える。

5. 結 論

温度 $30 \pm 0.5^{\circ}\text{C}$ 、相対湿度 $50 \pm 5\%$ の条件下で、健康な被験者4名に対して、 $280\text{W}/\text{m}^2$ 相当の運動負荷を与えた。その時の体温の変化を、①消防服の着装、②換気、③頭部冷却、④換気と頭部冷却という各条件下で比較した。その結果、消防服の着装時と比較して、換気、頭部送風では、外耳道温および皮膚温上昇が若干、抑制された。さらに、換気と頭部送風を併用した場合は、外耳道温および平均皮膚温の上昇が通常着装と比較して約 1°C 抑制された。

6. 参考文献

- 1) 消防科学研究所：濃煙・熱気内で活動する消防隊員の労働負担について、消防科学研究所報、26, 1989.
- 2) Michael J. Karter, Jr., and Paul R. LeBlanc : U.S. Firefighter Injuries 1997, Reprinted from NFPA Journal, 92(6), 1998.
- 3) 消防科学研究所：防火外とうの冷却装備に関する研究、消防科学研究所報、30, 1993.
- 4) 町田広重、伊藤昌夫、正木豊、山田羊一、小原朗敬：消防活動における熱中症予防対策の研究、消防科学研究所報、37, 2000.
- 5) 物部博文他：消防員装具のヒートストレス改善に関する研究、日本生理人文学会誌、7(1), 43-47, 2000.
- 6) Hardy, J.D. & DuBois, E.F.: The technic of measuring radiation and convection, J. Nutr., 15, 461-475, 1983.
- 7) 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、178, 1995.
- 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、179, 1997.