

各種防護衣を着装した消防活動時の隊員の 生理的負荷に関する検証

赤野 史典*, 青木 千恵**, 佐藤 建司**, 玄海 嗣生**

概 要

化学災害等で各種防護衣を着装している場合、暑さによる身体的負担は防火衣と比較して大きくなり、特に夏季にはこれらの防護衣を着装した活動は非常に過酷である。

そこで、本検証では3種類の防護衣着装状態（毒劇物防護衣、陽圧式防護衣及び毒劇物防護衣に防火衣の重ね着）での具体的な身体的負担の程度や、環境温度等の環境要因により生じる差異について調査した。

検証の結果、いずれの防護衣を着装した時の活動においても、時間経過により熱による身体的負担が極めて大きくなることが分かった。また、それぞれの防護衣着装状態で防護衣内温度の蓄熱のしやすさが異なり、特に毒劇物防護衣に防火衣を重ね着した場合、極めて放熱しにくく防護衣内に蓄熱しやすいことから、環境温度が低い場合でも短時間で高体温に至ることが分かった。

1 はじめに

化学災害等における消防活動時には、毒劇物から隊員の身体を防護するために毒劇物防護衣又は陽圧式防護衣を着装するよう定められている¹⁾。さらに、火災を伴う化学災害等の場合には、火災の熱から隊員の身体及び防護衣を保護するため、毒劇物防護衣の上に防火衣を重ねて着装する必要がある。これらの防護衣は、毒劇物と身体との接触を防ぐために遮蔽性と密閉性を高めた構造を持ち、また防護衣表面に酸やアルカリが付着した場合でも腐食しない等、JIS規格²⁾に準じた性能を満たす生地素材と厚みが確保されているのが特徴である。

一方で、毒劇物からの防護性を高めるが故に、これらの防護衣を着装した際の身体的負担については一般的な火災対応の防火衣を着装した場合と比較して大きく、特に、夏季においては非常に過酷な環境となることが経験的に知られている。しかしながら、これらの防護衣を着装することによる身体的負担の程度や、活動時の気温等の環境の違いに応じてどのような生理的な差異が生ずるのか、具体的に調査した先行検証はない。

そこで本検証では、特に熱中症予防の観点から、①防護衣着装時の生理的変化の特徴を把握し、②それを基に熱中症の予防方策について提言することで、化学災害等における活動隊員の安全管理に寄与することを目的とした。

2 検証方法

(1) 期間

平成27年1月16日（金）～2月18日（水）

(2) 場所

東京消防庁消防技術安全所2階 運動学実験室

(3) 被験者

健康診断による就業区分が「W1」（通常勤務可）に属する当庁職員のうち、検証協力に同意が得られた者（男性8名）を被験者として指定し実施した。

被験者の身体的特性については、年齢:37.9±6.9歳、身長:174.8±4.9cm、体重:71.8±4.1kg（平均±標準偏差）である。

(4) 検証方法

被験者に対してAに示す防護衣条件のうち1つの防護衣を着装させ、Iに示す環境条件のうち1つに設定した恒温恒湿室内で、Uに示す作業を実施させた。

測定開始に先立ち、室温23℃に設定した前室にて被験者の健康チェック、裸体重の測定、心拍数計、体温計、温湿度計の体への取り付け、防護衣、空気呼吸器等の着装等の準備をさせた。

被験者は恒温恒湿室に移動し、測定を開始するとともに測定者は測定開始から2分毎に被験者に記録用紙とボールペンを手渡し、暑さ感覚と身体的負担感覚について評価させ、併せて空気呼吸器の圧力指示計の数値を測定（目測）した。

*中野消防署 **活動安全課

被験者の体温と心拍数は恒温恒湿室の室外にて測定者がリアルタイムで観察を続け、被験者の体温が高体温の危険水準である 38℃（日本産業衛生学会の示す、高温熱下作業の深部体温の許容基準）³⁾に達した時点あるいは空気呼吸器の圧力指示計（測定開始時 26MPa）が 6 MPa 以下となり、ボンベ残圧低下の警告鳴動（以下「6 鳴動」という。）が生じた時点で測定を終了とした（消防活動中に 6 鳴動が生じた場合、空気ボンベを交換するためにいったん活動を中断し、撤退することになっている¹⁾）。測定終了後は着装している防護衣を速やかに離脱し、裸体重の測定を実施した。

各条件の実施順序については、検証の実施に伴う慣れや疲労、トレーニング効果等が生ずることが予想されたため、これらを相殺する目的で被験者ごとにランダム割り付け法にて決定し実施した。

ア 防護衣条件（表）

- (ア) 毒劇物防護衣（以下「毒劇」という。）
- (イ) 陽圧式防護衣（以下「陽圧」という。）
- (ウ) 毒劇物防護衣に防火衣の重ね着（以下「毒刺」という。）

表 防護衣の外観及び総重量

	毒劇	陽圧	毒刺
外観			
総重量	16.60 kg	18.35 kg	21.00 kg

イ 環境条件

- (ア) 環境温度 20℃、相対湿度 70%

熱中症の発生が増え始めるとされる気温 25℃⁴⁾より十分に低く、一般的には熱中症の発生危険に対する意識が希薄な時期である東京の 2014 年の 4 月、10 月の最高気温の平均である 19.6℃（4 月）、23.0℃（10 月）⁵⁾を参考に便宜的に設定した。（以下「20℃条件」という。）

- (イ) 環境温度 30℃、相対湿度 70%

東京の夏季（7・8 月）の 3 年間の最高気温を平均した 31.7℃、このときの平均湿度 70%⁵⁾を参考に、東京の夏季に近似した環境として設定した。（以下「30℃条件」という。）

- (ウ) 環境温度 40℃、相対湿度 70%

日本全国の最高気温の記録である 41.0℃（2013 年 8 月 12 日、高知県江川崎）や東京の最高気温の記録である 39.5℃（2004 年 7 月 20 日）⁵⁾を参考に、発生しうる最も暑い状況に近似した環境として設定した。（以下「40℃条件」という。）

なお、本検証では環境条件を比較する上で環境温度の差異に着目したため、30℃条件で設定した相対湿度を参考に、いずれの環境条件も相対湿度を 70%とした。

ウ 作業

消防活動を模擬するため、踏み台昇降運動（踏み台高さ 20 cm）を実施させた。踏み台昇降運動のテンポについては、1 分あたり 100 拍となるように設定したメトロノームの電子音に歩調を合わせるよう被験者に教示した。（写真）



写真 測定中の被験者の様子

- (5) 測定

ア 体温

無線式耳式体温計（シスコム社 DBTL-1）を使用し、被験者の鼓膜温を計測した。

イ 発汗量

体重計（タニタ社精密体重計 WD-150）により計測した。被験者の測定前後の裸体重を計測し、その差を求め発汗量とした。なお、1 回目（測定前）の裸体重の計測から 2 回目（測定後）の裸体重の計測までの間、被験者の水分収支を発汗のみとするために水分摂取と排泄を制限した。

ウ 心拍数

心拍数計（Polar 社 RS800CX）を使用し計測した。

エ 防護衣内温湿度

ボタン型温湿度計（KN ラボラトリーズ社ハイグロクロン）を使用し計測した。

オ 暑さ及び身体的負担に関する主観的評価

Visual Analogue Scale (VAS) 法の手法を活用して、測定開始を含む 2 分毎に記録用紙により測定した。記録用紙には、図 1 で示すとおり、質問項目毎に水平 100 mm の直線が予め記されており、この直線の左端を「全く感じない」、右端を「耐えられない」とし、測定時に被験者が感じた暑さ及び身体的負担の程度をそれぞれの直線上に「×」印で記させた。測定終了後に、直線上に記された「×」の位置を直線左端からの距離 (mm) で求め、この数値 (最小 0 ～最大 100) を主観的評価として用いた。

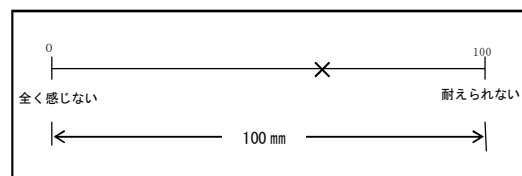


図 1 VAS の例

(6) 統計学的分析

防護衣条件間の平均値の比較には統計ソフト（R version 3.1.1）を使用して一元配置分散分析（対応あり）を行い、多重比較には holm 法を用いた（有意水準 5 %）。結果等で示す数値については、特に断りのない限り平均値とした。

3 結果

(1) 体温

体温の推移については図 2～4 に示す。体温はいずれの条件についても測定開始から上昇あるいは開始後 5 分程度までいったん下降した後に上昇に転じ、以後、上昇を続けた。毒刺は 20℃条件、30℃条件において他と比較して体温が高く推移した。40℃条件においては、毒劇と毒刺が同じように高く推移した。

測定開始から終了までの体温の上昇幅（最高体温-最低体温の差）については図 5 に示す。20℃条件では毒刺（1.7℃）が最も大きく、次いで陽圧（1.3℃）が続き、毒劇（0.9℃）が最も小さかった。30℃条件では毒刺（2.0℃）が最も大きく、陽圧と毒劇は 1.6℃で同程度であった。40℃条件では毒劇、陽圧、毒刺のいずれも 1.9～2.0℃で同程度であった。なお、防護衣条件間（3 群間）に有意な差は認められなかった。（ $p=0.07\sim0.40$ ）

体温の上昇の程度が測定の終盤に顕著であったことから、各測定の終了前 10 分間の体温の推移を抽出した結果、10 分間当たりの上昇速度は、20℃条件では毒刺が 0.9[℃/10 分]で最も大きく、次いで陽圧が 0.7[℃/10 分]で続き、毒劇が 0.4[℃/10 分]で最も小さかった。30℃条件では毒刺が 1.3[℃/10 分]で最も大きく、陽圧と毒劇は 0.9[℃/10 分]で同程度であった。40℃条件では毒劇、陽圧、毒刺のいずれも 1.3～1.4[℃/10 分]で同程度であった。

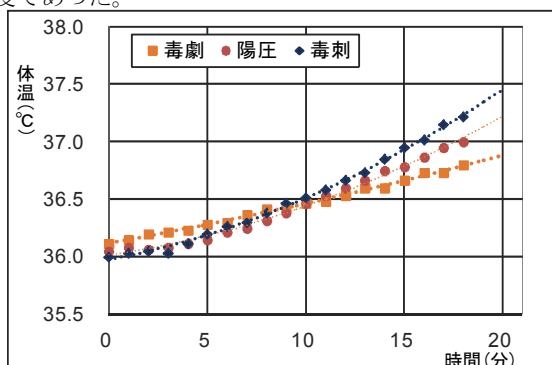


図 2 体温の推移（20℃条件）

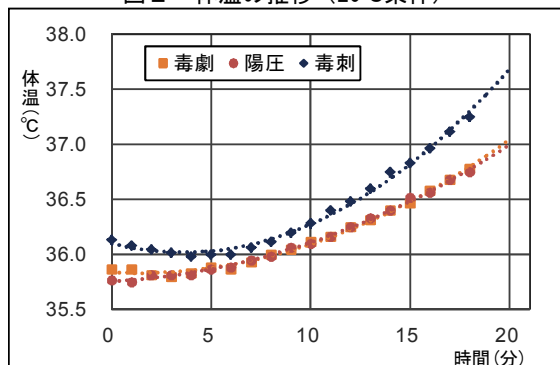


図 3 体温の推移（30℃条件）

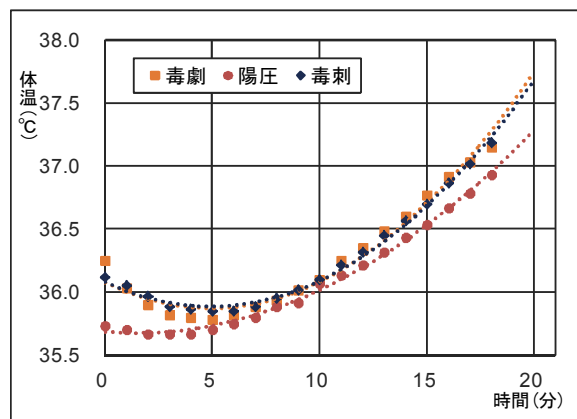


図 4 体温の推移（40℃条件）

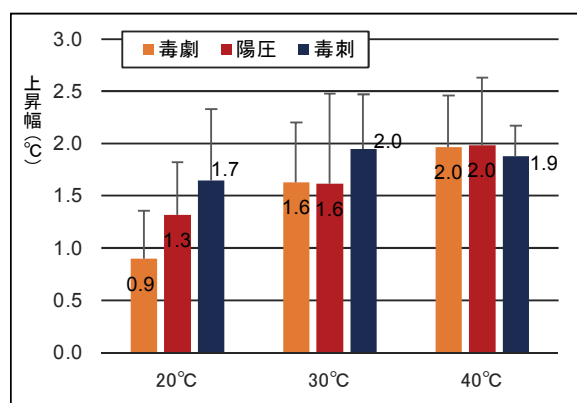


図 5 体温の上昇幅（最高体温-最低体温）

(2) 発汗量

発汗量については図 6 に示す。いずれの環境条件についても、発汗量が最も多いのは毒刺（0.59～0.69kg）で、次いで毒劇（0.46～0.63kg）、最も少ないのは陽圧（0.44～0.61kg）だった。環境温度の上昇に伴い、いずれの防護衣条件についても発汗量は増加した。なお、防護衣条件間（3 群間）に有意な差は認められなかった。（ $p=0.06\sim0.26$ ）

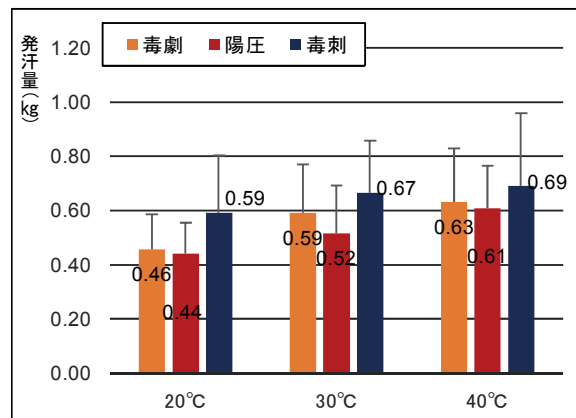


図 6 発汗量

(3) 心拍数

心拍数の推移については図7～9に示す。心拍数はいずれの条件についても測定開始から上昇し、時間の経過とともに傾斜は緩やかになるもののプラトー状態（横ばい）には至らず、少しずつ上昇を続けた。毒刺はいずれの環境条件についても他と比較して心拍数が高く推移した。陽圧は毒劇と比較して、20℃条件、30℃条件は心拍数が高く推移したが、40℃条件では同程度であった。

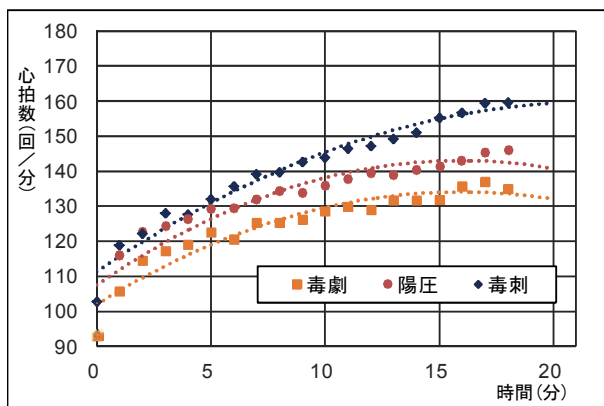


図7 心拍数の推移 (20℃条件)

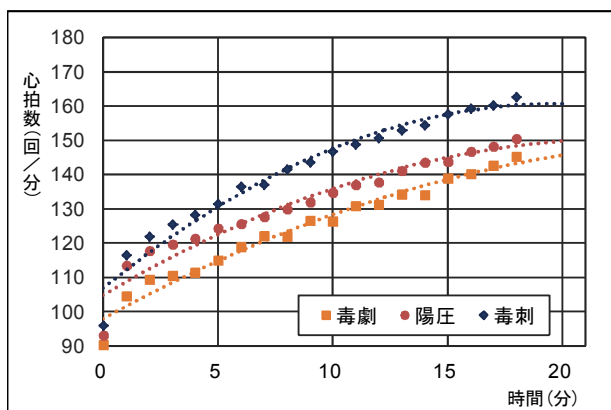


図8 心拍数の推移 (30℃条件)

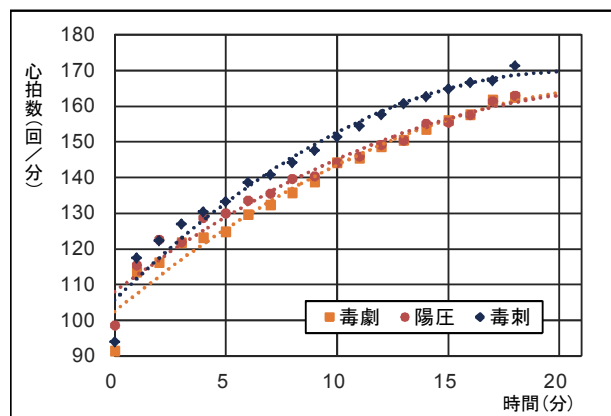


図9 心拍数の推移 (40℃条件)

心拍数の最高値については図10に示す。20℃条件では毒刺 (165 回/分) は毒劇 (144 回/分)、陽圧 (153 回/分) に対して有意 ($p<0.05$) に高かった。30℃条件で

は毒刺 (170 回/分) は毒劇 (154 回/分) に対して有意 ($p<0.01$) に高かった。40℃条件では3群間に有意な差は認められなかった。 ($p=0.06\sim0.95$)

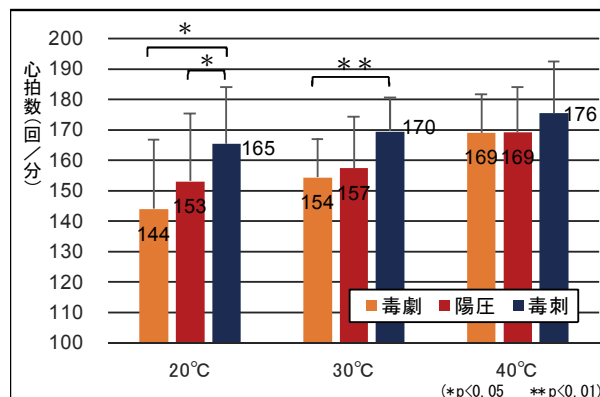


図10 心拍数の最高値

(4) 防護衣内温度

防護衣内温度の推移については図11～13に示す。防護衣内温度はいずれの条件についても測定開始から上昇し、時間の経過とともに傾斜は緩やかになり、15～20分経過するころにはほぼプラトー状態に至った。毒刺は20℃条件、30℃条件で高く推移するものの、40℃条件では毒刺と毒劇が同程度であった。陽圧はいずれの環境条件でも低く推移した。

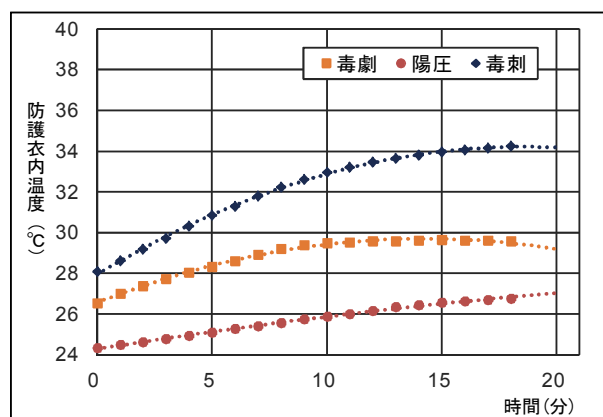


図11 防護衣内温度の推移 (20℃条件)

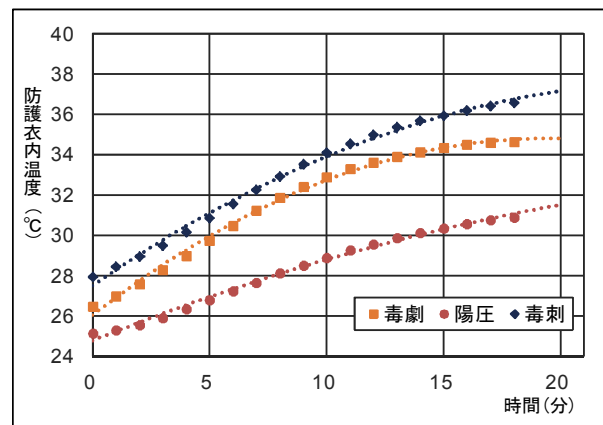


図12 防護衣内温度の推移 (30℃条件)

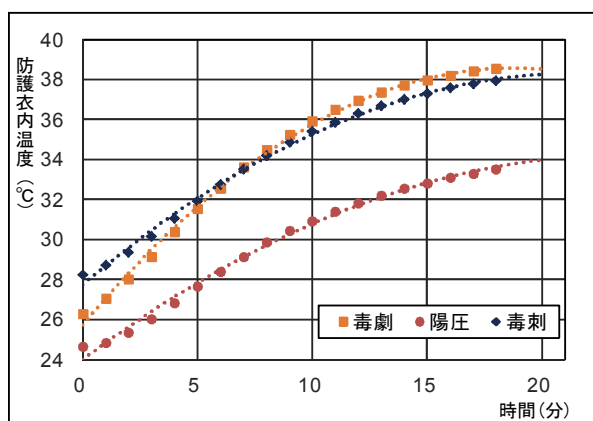


図 13 防護衣内温度の推移 (40°C条件)

防護衣内温度の最高値については図 14 に示す。20°C 条件、30°C 条件では、毒刺 (それぞれ 34.4°C、37.2°C) が最も高く、陽圧 (同 27.3°C、31.6°C) が最も低く、3 群間でそれぞれ有意な差 (いずれも $p < 0.01$) が認められた。40°C 条件では毒劇 (38.9°C)、毒刺 (38.4°C) は陽圧 (34.3°C) に対して有意 ($p < 0.01$) に高かった。

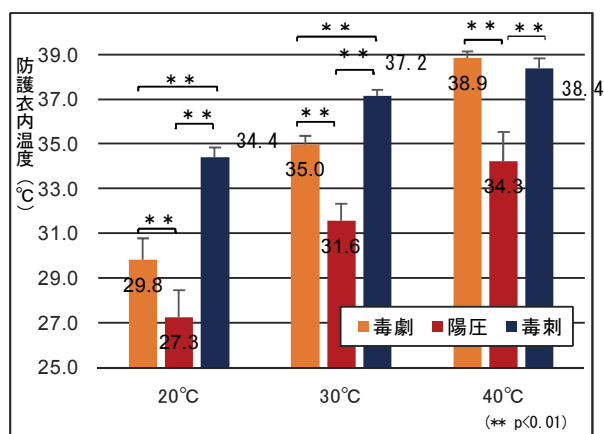


図 14 防護衣内温度の最高値

(5) 暑さに関する主観的評価

暑さ感覚はいずれの条件についても測定開始から上昇し、時間の経過とともに傾斜は緩やかになるものの上昇を続けた。毒刺はいずれの環境条件についても他と比較して高く推移した。陽圧は 20°C 条件では毒劇より高く、30°C 条件では同程度となり、40°C 条件では僅かながら毒劇の方が高く推移した。

暑さ感覚の最高値については図 15 に示す。20°C 条件では高い方から毒刺 (55)、陽圧 (41)、毒劇 (28) の順となり、毒刺と毒劇の間に有意な差 ($p < 0.05$) が認められた。30°C 条件、40°C 条件では 3 群間に有意な差は認められなかった。(それぞれ $p = 0.17 \sim 0.84$, $p = 0.11 \sim 0.28$)

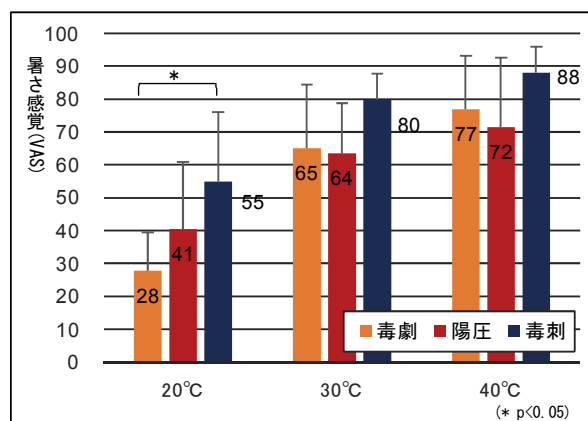
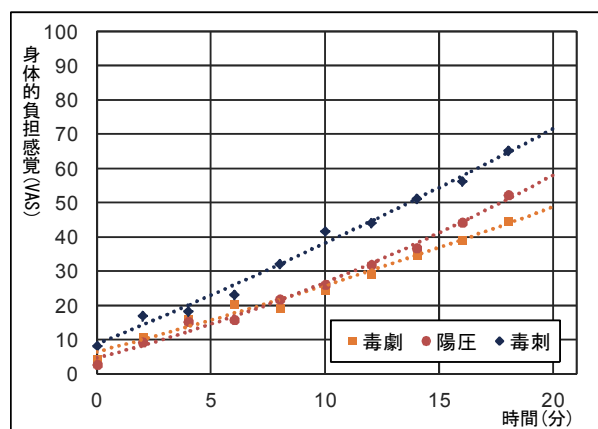


図 15 暑さ感覚 VAS の最高値

(6) 身体的負担に関する主観的評価

身体的負担感覚はいずれの条件についても測定開始から上昇し、時間の経過とともに直線的に上昇を続けた。毒刺はいずれの環境条件についても他と比較して高く推移した。陽圧は 20°C 条件では毒劇より高く、30°C 条件では同程度となり、40°C 条件では図 16 で示すとおり僅かながら陽圧の方が高く推移した。



身体的負担感覚の最高値については図 17 に示す。いずれの環境条件についても毒刺 (58~82) は最も高かった。20°C 条件では毒劇 (30) が最も低いものの、30°C 条件、40°C 条件では毒劇 (61、60) と陽圧 (65、60) は同程度であった。なお、防護衣条件間 (3 群間) に有意な差は認められなかった。 ($p = 0.06 \sim 0.26$)

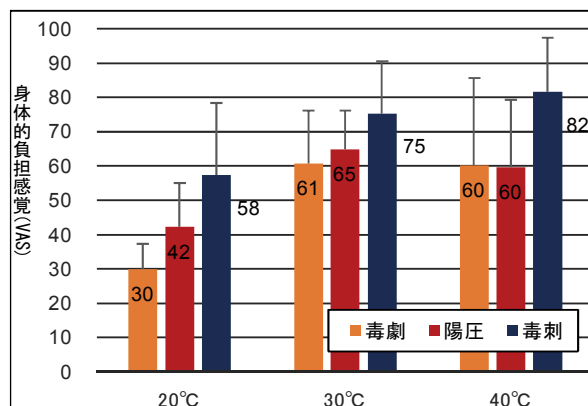


図 17 身体的負担感覚 VAS の最高値

(7) 空気呼吸器のボンベ残圧

空気呼吸器のボンベ残圧の2分毎の減少量は、いずれの条件についても時間の経過とともに緩やかに低下する様子がみられた。

ボンベ残圧の2分毎の減少量の平均値については図18に示す。いずれの環境条件についても、防護衣条件間（3群間）に有意な差は認められなかった。（ $p=0.05 \sim 0.84$ ）

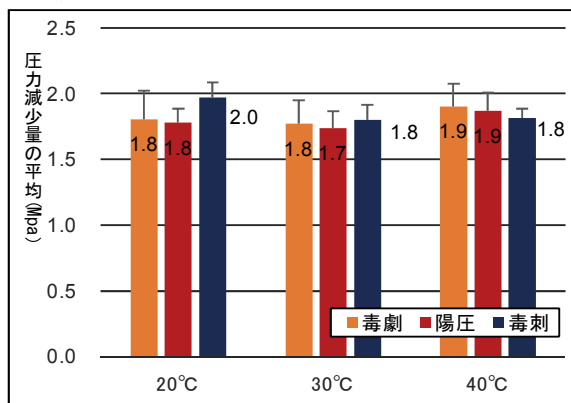


図18 2分毎のボンベ圧力減少量の平均

4 考察

本検証では防護衣の着装による身体的負担を具体的に把握するため、毒劇、陽圧、そして毒刺の3条件について比較し評価した。また、環境条件として熱中症の発生が危惧される30℃条件、40℃条件の他、一般的には熱中症に対する危険意識が希薄な20℃条件についても評価した。これらの条件において、被験者に対して消防活動と同等となる強度の作業を実施させ、熱中症発生危険の観点から被験者の示す生理的な反応について観察した。本検証では測定を終了基準のひとつを空気呼吸器のボンベ残圧が6鳴動するまでの時間とし、結果18～26分となった。この時間は熱中症予防の観点から「6鳴動による撤退」を有効に活用できるものと考えられる。

(1) 体温

体温の推移は、いずれの防護衣についても開始から10分以降は体温が直線的な上昇を続け、30℃条件、40℃条件のみならず、比較的環境温度の低い20℃条件についても同様な様子が見られた。これは防護衣の着装により身体から外界への熱放散が著しく阻害され、体温調節システムが機能できていないことを示す。中でも毒刺については体温の上昇幅が防護衣3者の中で最も大きく、また20℃条件についても30℃条件、40℃条件と同様な推移となることが確認できた。これは毒劇物防護衣に防火衣を重ね着したことによる熱抵抗（熱の伝えにくさ）の増大が主な要因であると考えられる。毒劇については20℃条件では体温の上昇幅が3者で最も小さいものの、30℃条件、40℃条件で環境温度が高くなるに従い体温の上昇幅も大きくなった。このことは、毒劇に用いられている生地が比較的薄く3者の中では熱抵抗が最も小さいと考えられ、20℃条件では熱放散がある程

度可能である反面、40℃条件では外界からの熱の流入を許しやすいものと考えられる。陽圧については、詳細は後述（4）防護衣内温度を参照）するが、防護衣の構造上、外界からの影響を受けにくく比較的低い防護衣内温度を維持するものの、毒劇、毒刺と同様に体温調節システムが機能するのは困難であることが確認できた。

体温の上昇速度については、40℃条件で10分当たり1.3～1.4℃、30℃条件についても0.9～1.3℃の体温上昇を伴うこと、体温38℃以上の危険水準に達することをできる限り避けることを考慮すると、夏季において防護衣を着装した活動や訓練では10分程度の活動毎に休息を取り、活動を再開する場合には体温を37℃以下まで下げることが適当であると考えられる。

(2) 発汗量

発汗は体温調節システムの中でも熱放散を担う重要な要素のひとつである。気化熱を利用して効率的に体温の上昇を抑えるものであり、100gの汗がすべて皮膚から蒸発した場合には、体重70kgのヒトの体温を約1℃下げることができるとされている⁶⁾。一般的には体温の上昇に従い発汗量は増え、その量は最大で1時間当たり1～2ℓに達すると言われている⁷⁾。

本検証では、空気呼吸器の空気ボンベ1本分の活動時間（18～26分）内の測定において、平均約0.4～0.7kgの発汗量を観測し、最大1.1kgに達する被験者も見られ、これはヒトの発汗能力の最大値に近いものであったと推測される。有意差は認められないものの、防護衣3者の中では毒刺で発汗量が多くなる傾向が見られ、また環境条件が高温になるに従い発汗量も増加する傾向が見られた。

検証結果より、概ねの目安として20分の活動で体重1%程度、1時間に換算すると体重3%程度の脱水を招くことが確認できたことから、夏季において防護衣を着装した活動では、水分補給の目安として10分の活動につきコップ1杯分（250ml）以上、20分の活動でのペットボトル1本分（500ml）以上を摂取するのが望ましい。

(3) 心拍数

心拍数は一般的には運動強度の指標として用いられることが多く、運動強度の増加に伴い心拍数が増加することが知られており、その他、精神的な興奮や体温の上昇等に伴っても増加する。体温が上昇すると体温上昇を抑制しようと体温調節システムが作動し、皮膚血管が拡張してラジエーターの機能を発動するため循環血液量が再分配され、また発汗に伴い循環血液量が徐々に減少する。このような状況の中、限られた循環血液量で筋肉等への酸素運搬量を維持するために心拍数は増加する。本検証で観察した心拍数については温熱負担による影響も大きいと考えられ、単に運動強度を示す指標とするよりは、運動強度と温熱負担の複合的な身体的負担を示す指標として捉えるべきである。

防護衣条件の差異に着目すると、例えば20℃条件の

最高心拍数について毒劇は 144 回／分のところ毒刺では 165 回／分に達していた。この差異は、それぞれの防護衣の総重量の差異（16.6kg と 21.0kg の差、約 4.4kg）とともに、防護衣の熱抵抗により生じた温熱負担の差異によるものと考えられる。一方で、環境条件の差異に着目すると、例えば毒劇の最高心拍数について 20℃条件では 144 回／分であるところ、40℃条件では 169 回／分に達しており、こちらは単純に環境温度の違いによる温熱負担の差異であると言える。このように、同じ環境でも着装する防護衣の差異による身体的負担は大きく異なり、また同じ防護衣でも環境温度が異なると身体的負担が大きく異なることが確認できた。中でも毒刺は総重量が重く、また熱抵抗の大きさに伴う身体的負担が非常に大きいことから心拍数も突出して高く、毒刺の 20℃条件の心拍数（165 回／分）は毒劇、陽圧の 40℃条件の心拍数（ともに 169 回／分）に匹敵するものであった。毒劇については、総重量が軽く、また生地が薄いことから動きやすく、20℃条件では温熱負担も小さいことから心拍数は低いものの、40℃条件では他の防護衣と同程度であった。陽圧については、詳細は後述（(4)防護衣内温度を参照）するが、防護衣内温度が比較的低いことから温熱負担が小さいものの、防護衣の重量や構造上の動きにくさなどもあり、心拍数から見る身体的負担は 3 者の中では中程度であった。

温熱負担を評価するための生理的指標として、国際標準化機構（ISO）は心拍数に関する指標を示しており、ISO9886⁸⁾では作業中の最高心拍数は $[185-0.65 \times (\text{年齢})]$ を、持続心拍数は $[180- (\text{年齢})]$ を超えてはならないとしている。この基準を本検証の被験者の平均年齢（37.9 歳）に照らし合わせると、最高心拍数は 155 回／分、持続心拍数は 142 回／分となるが、結果としては 20℃条件の毒劇を除きこれに匹敵、あるいは遥かに超えるものであった。このような指標から見ても、防護衣を着装した活動は温熱負担の増大に伴う心拍数の増加が著しいことから、心拍数を把握し隊員の負担を考慮した活動が望ましい。

(4) 防護衣内温度

防護衣内温度は、被験者の作業（踏み台昇降運動）に伴い産生された熱と、防護衣外界の環境温度との熱収支により決定すると考えられる。20℃条件、30℃条件については体温（約 37℃前後）より環境温度が低いため身体から外界へ熱が放散される温度勾配が生じ、40℃条件については逆に外界から身体側へ熱が流入する温度勾配が生ずる。

本検証の結果から、毒刺はいずれの環境条件でも他の防護衣と比較して防護衣内温度（34.4～38.4℃）が高いことから、熱抵抗が極めて大きく熱が身体から外界へ放散せず防護衣内に蓄熱していることが確認できた。毒劇については、20℃条件、30℃条件では防護衣内温度の上昇が比較的緩やかなものの、40℃条件では毒刺よりも高

い傾向が見られ、生地が薄いこと、つまり熱抵抗が低いことから外部からの熱の流入も容易に許してしまうことが確認できた。

陽圧については防護衣 3 者で比較すると防護衣内温度は突出して低く、これは、防護衣内の空気層の量が多いこと、陽圧を保つために空気呼吸器から排出された呼気が防護衣内に一時的に蓄積され、防護衣内の気圧が閾値を超えると排気弁（一方弁）より外界へ排気されることから、防護衣内に熱が蓄積しにくいという特徴が現れたと考えられる。

(5) 暑さに関する主観的評価（暑さ感覚）

本検証では、測定中の被験者が暑さをどの程度感じ取っているのかを評価するため VAS を用いて主観的評価の調査を行った。暑さを「全く感じない」を 0、「耐えられない」を 100 とし、測定時の被験者の主観的な暑さを回答させるものである。得られた回答（数値）からその程度を具体的な形容詞で表現する統一的な区分等は存在しないものの、概ね 50 以上の領域では暑さによる不快さが明確になり、数値の上昇と共に精神的な余裕が失われていく、として差し支えないと思われる。

検証の結果、暑さ感覚の最高値として 20℃条件の毒劇（28）と陽圧（41）は 50 を下回っていたものの、毒刺（55）は 50 を超え、30℃条件、40℃条件ではいずれの防護衣も 50 を超えており、被験者は暑さを強く感じていたことを示す。特に、40℃条件の毒刺については暑さ感覚が 88 に達し、殆ど限界に近い状態だったと言える。いずれの環境条件についても、毒刺（55～88）は他の防護衣と比較して暑さを強く感じられており、体温や防護衣内温度等で得られた客観的な測定結果と同様の傾向を示していた。

防護衣を着装した活動中に暑さを感じた場合、暑さ感覚を自ら制御することは困難であり、防護衣を離脱するまで暑さ感覚を低減することができない。また、防護衣を離脱する際には除染作業を行い、安全な領域まで移動する必要があり、脱衣作業自体も容易ではないことから、防護衣を着装中の暑さ感覚には精神的な圧迫感をも伴う。特に、暑さ感覚が 50 を超えるような状況での活動は精神的な余裕が失われ集中力の維持が困難となり、思わぬ事故に発展しやすいことから十分な注意が必要である。

(6) 身体的負担に関する主観的評価（身体的負担感覚）

暑さ感覚と同様に、身体的負担感覚についても調査を行った。

検証の結果、身体的負担感覚の最高値として 20℃条件の毒劇と陽圧を除きその他の条件では 50 を超えていたことから、被験者は身体的負担を強く感じていたことを示す。特に、毒刺（58～82）は他の防護衣（毒劇 30～61、陽圧 42～65）と比較すると数値が大きく、被験者は他の防護衣より強い負担を感じていたことが確認できた。暑さ感覚と比較すると、身体的負担感覚の方が全体的に低い傾向が見られ、このことは防護衣を着装した

活動に伴う困難性として、被験者は身体的負担より温熱負担をより強く感じていたものと考えられる。

(7) 空気呼吸器のボンベ残圧

空気呼吸器のボンベ残圧については、測定中の被験者の呼吸による空気消費量の推移を評価するために調査した。空気呼吸器の圧力指示計を2分間毎に目測したものであり、ボンベ残圧の2分毎の減少量（差分）から被験者の換気量を推測した。正確性には欠ける方法ではあるが、大まかな傾向については把握できたものと思われる。

検証の結果、ボンベ残圧の2分毎の減少量は、20℃条件、30℃条件では時間の経過とともに低下する傾向が見られ、40℃条件では概ね横ばい状態で推移していた。また、ボンベ残圧の2分毎の減少量の平均値については、防護衣の差異、環境条件の差異に関わらず、ほぼ同じ値が得られた。

一般的には、心拍数の増加とともに酸素消費量、つまり換気量は正の相関があることが知られている。先述のとおり、本検証においても心拍数の時間経過に伴う増加や、防護衣条件や環境条件の差異に伴う心拍数の差異が見られたことから、換気量についても心拍数の増加に伴う増加や、条件間での差異があるものと予想していたが、予想に反して有意な差異は認められなかった。

5 おわりに

(1) まとめ

本検証を通じて、防護衣を着装した活動は温熱負担の増大に伴い身体的負担が極めて高いことが確認できた。消防という職業的な特性上、活動を避けることも、防護衣の着装を避けることもできないが、このような悪条件の中、熱中症の発生は運用面で予防することが望まれる。

本検証を通じて得られた知見と、防護衣着装時の熱中症発生を予防する運用の提言については次の通りである。

ア 毒劇、陽圧、毒刺のいずれの防護衣も体温調節システムの機能を阻害し、活動に伴い体温の上昇を来す。中でも、毒刺は熱抵抗が増大し、環境温度が低い場合でも短時間で高体温に至りやすい。毒劇物防護衣は、環境の影響を受けやすく環境温度が低い場合には問題ないが、環境温度が高い場合には熱中症の危険が急激に高まる。陽圧式防護衣は、防護衣内温度は比較的低温に保たれるが、防護衣の重量や動き難さ等から身体的な負担は軽い。

イ 空気呼吸器の空気ボンベ交換のタイミングである概ね20分程度の活動で、体温は熱中症発生の危険の高まる38℃に達する場合もあることから、夏季において防護衣を着装する活動については10分程度の活動毎に休息を取り、体温を積極的に下げることが望ましい。

ウ 防護衣を着装した活動の場合、20分程度の活動で発汗量は平均約0.4～0.7kg、最大で1.1kgに達する者も見られた。防護衣着装時の発汗は体温を下げることに寄与しない無効発汗となるため、暑熱順化トレーニングを積んだ者についても脱水の危険があり、発汗量に応じ

た適切な水分補給が必要である。10分の活動につきコップ1杯分（250ml）以上、20分の活動でのペットボトル1本分（500ml）以上を摂取するのが望ましい。

エ 心拍数については、運動強度の他、温熱負担も含む複合的な身体的負担を示す指標として活用でき、また体温よりも容易に測定できることから、隊員の生理的状態を把握するうえで積極的な活用が望まれる。ISO9886に示された指標を参考とし、活動中の最高心拍数は $[185 - 0.65 \times (\text{年齢})]$ を、持続心拍数は $[180 - (\text{年齢})]$ を超えないことが望ましい。

(2) 今後の課題

本検証では、活動開始から空気呼吸器の空気ボンベ1本分の活動について観察を行った。しかしながら実際の活動はその後も続き、数十分から数時間に至ることもある。このことから、今後、実際の活動に則し活動と休息を繰り返す長時間活動の生理的状態の推移について確認する必要があると思われる。

[参考文献]

- 1) 警防業務安全管理要綱（平成10年3月27日警防部長依命通達）
- 2) 日本工業規格（規格番号：JIST8115:2010、規格名称：化学防護服）
- 3) 日本産業衛生学会：高温の許容基準、産業医学、Vol.24巻、No.5号、P545-548、1982
- 4) 中井誠一：熱中症の発生実態と環境温度、日生気誌、Vol.41巻、No.1号、P51-54、2004
- 5) 国土交通省ホームページ、
<http://www.jma.go.jp/jma/index.html>
- 6) 日本体育協会：スポーツ活動中の熱中症予防ガイドブック part4 解説（平成25年度改訂版）、日本体育協会、2013
- 7) 平田耕造：体温、第1章 IV. 汗生成のメカニズム、P40-52、有限会社ナップ、2002
- 8) ISO9886 : Evaluation of thermal strain by physiological measurements、2004

Study on the Physiological Stress on On-Scene Fire Personnel in Various Types of Protective Gear

Fuminori AKANO*, Chie AOKI**, Kenji SATO**, Tsuguo GENKAI**

Abstract

When hazmat suits are worn during responses to chemical disasters or other situations, the physical burden due to the resulting heat is greater than when fire protective clothing is in use. In particular, operations while wearing hazmat suits during the summer season can be extremely exhausting.

This study examined the specific physical burden caused by wearing three different types of protective suits (i.e., ① for hazardous materials, ② with positive-pressure air kept inside, and ③ as a “two layer” with a fire protective suit worn over a hazmat suit (“layered gear”) as well as the differences stemming from the ambient temperature and other environmental factors.

The results of the study showed that, regardless of which suit is worn during operations, the physical burden caused by heat becomes extremely severe over time. Also, the tendency of heat accumulation differs depending on which suit is worn; heat accumulates extremely easy and is difficult to dissipate when wearing the layered gear in particular, and a high body temperature is reached in a short period of time even when the ambient temperature is low.