活動環境危険警告に関する基礎検証

相河 好江*、大滝 英一*、徳永 敦司**

概 要

消防隊員の熱傷による事故を防止するため、消火活動時の熱環境の変化に基づき警告を発する装置について検証を行ってきた。しかし、外部環境の一点の温度から熱傷危険について判断することは困難であるとともに、消防隊員の「熱さ」に対する主観的評価と、警告装置の作動状況に乖離があり、有益な結果を得られなかった。

そこで、皮膚表面の温度変化に基づき警告を発する装置を用いて、熱環境下における消防隊員の「熱さ」に対する主 観的評価、警告装置の作動状況の関係について検証を行った。

その結果、熱環境下において、個人装備品(防火衣)を通して被験者の皮膚表面に熱が伝わる時間は個人差が大きいが、皮膚表面で感じる「熱さ」の主観的評価は、個人差は少なく概ね共通していることを確認した。

1 はじめに

これまでに消防隊員の熱傷による事故を防止するため、温度や熱流束等の外部環境の変化に基づき警告を発する複数の装置について検証を行ってきた。しかし、温度、湿度、空気(熱)の対流、放射熱及び個人装備品の状態等(防火衣の空気層等)、多数の要因が複雑にある熱環境下において、外部環境の一点の温度から消防隊員の熱傷危険について判断することは困難であった。また、消防隊員の熱に対する「熱さ」の主観的評価と警告装置の作動が乖離する等、消防活動上有益なものとなり得る結果を得られなかった。

そこで本検証では、防火衣内部の皮膚表面の温度 変化により警告を発する装置を用いて、熱傷防止の 予測の可能性について検証を行った。

2 検証方法

(1) 概要

温度変化に基づき警告を発する装置(以下「警告装置」という)を、被験者の膝部皮膚表面に取り付け、熱環境を再現した区画内に待機させる。その際の、「熱さ」に関する主観、区画内部温度、警告装置の鳴動状況及び脱出時間について記録した。

(2) 実施日

平成28年2月29日から3月2日までの3日間

(3) 検証場所

東京消防庁 消防技術安全所総合実験室

(4) 実験条件

ア区画

外観を写真1、寸法及び熱電対測定位置を図1に示す。 なお、熱電対の水平位置は、壁から5cm離した位置とする。



写真 1 検証区画

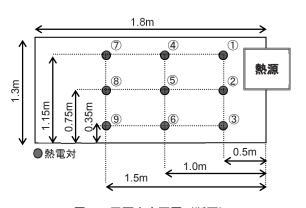


図1 区画内立面図(断面)

^{*}装備安全課 **防災安全課

ィ 熱源

熱風機 (SHIZUOKA 製機) (表1、写真2)

表 1 熱源性能

		_
	熱種別	発熱量
熱風機	対流熱	(弱) 26, 750Kcal/h (強) 35, 940Kcal/h



写真2 熱源(熱風機)

ウ 熱環境

「消防隊員用個人防火装備に係るガイドライン」 $^{1)}$ (以下「ガイドライン」という)では、消防活動時の熱環境を火災初期での消火活動のような低い熱環境から、フラッシュオーバー時の消火活動のような高い熱環境まで4つの領域に分けて示している(表2)。

今回の検証では表 2 の Hazardous にあたる、通常の消火活動時の雰囲気温度 100 \mathbb{C} \sim 160 \mathbb{C} 程度の熱環境の範囲で実施した(図 2)。

表 2 消防活動時の熱環境

	熱環境	雰囲気温度 (℃)	熱流速 (kW/㎡)
Routine	火 災 初 期 及 び 残 火 処 理 時 の 消火活動時	~100 程度	~ 1
Hazardous	活動に制限を 受けない通常の 消火活動時	100~160 程度	1~4
Extreme	活動が制限される 火災が拡大した時	160~235 程度	4~10
Critical	放射熱の範囲が広く 火炎に巻き込まれた 時及びフラッシュオ ーバーが発生し、 短時間で避難しなけ ればならない時	235 程度~	10~

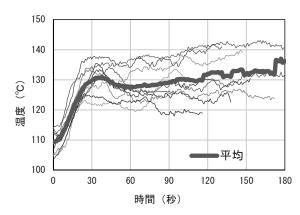


図2 熱電対⑥の温度変化(全実験の測定値)

(5) 警告装置及び測定機器

ア 警告装置(写真3)

皮膚に痛みを感じる I 度熱傷は 44 \mathbb{C} から始まるとされているため、皮膚表面の温度を感知し、38 \mathbb{C} から 46 度まで 2 \mathbb{C} 上昇するごとに異なる警告音を発する装置を作成した(写真 3)。仕様を表 3 に示す。また、それぞれの温度で警告装置の鳴動パターンを表 4 のように設定した。

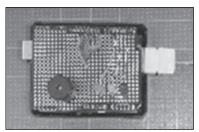


写真3 警告装置(外観)

表 3 警告装置仕様

名称	仕様
マイクロコンピュータ	Arduino UNO
熱電対アンプ	MAX 社製 31855
センサー	K 熱電対 (薄型)
ブザー	音圧 80 (dB)

表 4 警告鳴動種別

温度	鳴動パターン
38°C	•
40°C	••
42°C	•••
44°C	
46°C	••••

■ : 1.0秒 ●:0.5秒

イ 測定機器 データロガー

区画内温度を図1に示す9点測定し、データロガーによりサンプリング周期1秒で記録(写真4)。



写真4 データロガー

(6) 被験者

5名 (A~E) (表5)。

被験者	性別	年齢
Α	男性	35
В	男性	38
С	男性	29
D	男性	30
E	男性	40

表 5 被験者

(7) 実施手順

ア 被験者の膝部皮膚上に警告装置のセンサーを貼付ける。(写真5)

イ 当庁で現在使用している執務服、防火衣及び空気呼吸器等の個人装備品を完全着装する。

ウ 上記(4) ウに設定した熱環境の区画内に進入し、熱源から 1 m の位置で熱源に背部を向け検索姿勢 (折り膝) のまま待機する (写真6)。

- エ 警告装置が鳴動した時間をそれぞれ記録する。
- オ 被験者自らの判断により、熱による危険を身体に感じた場合は区画から脱出する(最長3分まで)。
- カ 脱出直後に熱さに関する主観調査及び熱さを感じた 部位とその感覚等についてアンケート調査を行う(図3)。



写真5 センサー貼付け状況



写真6 実験状況

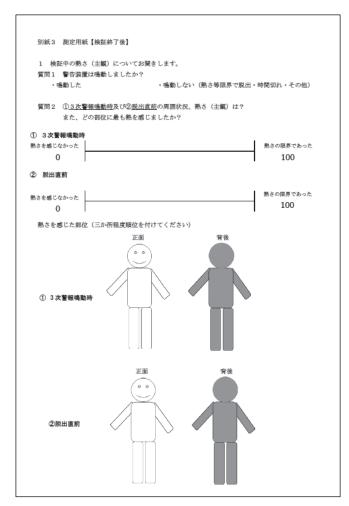


図3 アンケート用紙(一部抜粋)

熱さの主観調査には、VAS** (Visual Analogue Scale) 法を用いた。

※ 図4に示す水平100 mmの直線の左端を「まったく熱くない」、右端を「熱さの限界」とし、警報鳴動時及び脱出時に被験者が感じた「熱さ」の程度を直線上に指で指し示す方法とした。その位置を直線左端からの距離(mm)で求め、この数値(最小0から最大100)を主観的評価として用いた。

図4 VASの例

キ 上記ア〜カまでを、被験者1名につき2回(左右各1回ずつ実施)、計10回実施した。

なお、1回目と2回目では、1時間間隔をおき、防火 衣の蓄熱を除去し、また、被験者の熱疲労を取り除き実 施した。

- (8) 測定値
- ア 区画内温度9点(図1)
- イ 警告装置鳴動開始時間(秒)
- ウ 区画内滞在時間(秒)
- エ 「熱さ」の主観

3 検証結果

被験者 1名につき 2回検証を行ったため、検証を行った順に、1回目(もしくは1)及び 2回目(もしくは2)と記載する。

10 回の検証で脱出前に 44^{\circ}の警告が作動したのは 3 回のみであった。

一方、40°Cの警告は 10 回の検証中 7 回作動しており、全ての被験者で左右いずれかは作動していた。このことから、40°Cの警告作動時を中心として、結果及び考察を行う。

(1) 時間と「熱さ」の主観の関係

各被験者の「熱さ」の主観(脱出時及び40℃警告装置 鳴動時)について図5に示す。

各被験者の 40℃の警告装置鳴動時間と脱出時間について表6に示す。

脱出時間と「熱さ」の主観との関係を図6に示す。

各被験者における1回目及び2回目の、「熱さ」主観値 及び脱出時間の関係を表7に示す。

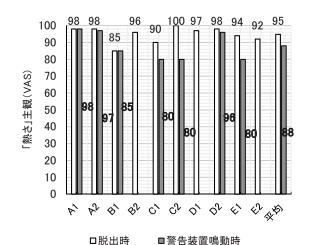


図5 「熱さ」の主観

表6 警告装置鳴動時間及び脱出時間(秒)

	警告装置鳴動時間(秒)					脱出
		4	警 告 種別	IJ		時間
	38°C	40°C	42°C	44°C	46°C	(秒)
A 1	-	171	180	-	_	180
A 2	-	140	-	-	-	180
B 1	-	126	-	-	-	126
B 2	69	-	-	-	_	93
C 1	ı	110	113	165	180	180
C 2	34	49	72	108	_	148
D 1	ı	1	ı	ı	_	135
D 2	35	52	75	96	_	117
E 1	54	85	119	ı	_	133
E 2	65	_	_	_	_	156
平均	51	105	112	123	180	145

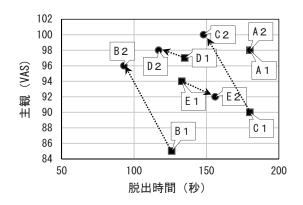


図6 脱出時間と「熱さ」主観

表7 「熱さ」主観値及び脱出時間の関係

被験者	主観値 (大小)	脱出時間(大小)
Α	1回目=2回目	1回目=2回目
В	1回目<2回目	1回目>2回目
С	1回目<2回目	1回目>2回目
D	1回目<2回目	1回目>2回目
E	1回目>2回目	1回目<2回目

表 6 より、40℃の警告装置鳴動時間は平均 105 秒(変動係数 43%)であり、個人差が大きかった。

表6及び図7より、検証1回目より2回目の方が同程度の区画内温度での「熱さ」の主観値が高いもしくは同程度であったが、逆に、脱出を判断する時間(区画内滞在時間)は、2回目の方が短い傾向が確認できた。

(2) 時間(脱出)と温度(区画内)の関係

脱出時間と区画内温度との関係を図7及び図8に示す。 なお、図7は、温度⑥(被験者膝部付近)を、図8は 温度④(区画内高温箇所)を示している(図1参照)。

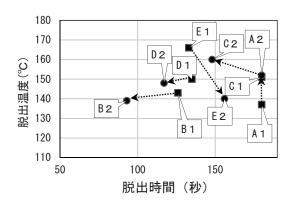


図7 脱出時間と温度⑥(被験者膝部付近)

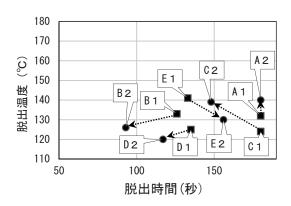


図8 脱出時間と温度④(区画内高温箇所)

各被験者における1回目及び2回目の脱出時の区画内 温度を表8に示す。

表8 脱出時の区画内温度

20 2011			
被験者	温度⑥ (℃)	温度④ (℃)	
7以為先行	被験者膝部付近	区画内高温箇所	
A 1	132	137	
A 2	140	152	
B 1	133	143	
B 2	126	139	
C 1	124	151	
C 2	139	160	
D 1	125	150	
D 2	120	148	
E 1	141	166	
E 2	130	140	

各被験者における1回目及び2回目における、脱出時間、脱出時温度の大小及び温度差の関係を表9に示す。

表9 脱出時間と温度(1回目、2回目)の関係

被験者	温度(高低)	脱出時間(大小)	6	(4)
Α	1回目<2回目	1回目=2回目	(膝部)	(区画内)
В	1回目>2回目	1回目>2回目	7	4
С	1回目<2回目	1回目>2回目	15	9
D	1回目>2回目	1回目>2回目	5	2
Е	1回目>2回目	1回目<2回目	11	26

表9より、被験者E以外は、脱出を判断する時間(区画内滞在時間)は、2回目の方が短かく、もしくは同程度になる傾向が確認できた。

(3) 温度(脱出時)と「熱さ」の主観の関係

脱出時温度(図1の⑥及び④の位置)と「熱さ」の主 観との関係を図9及び図10に示す。

なお、図9は、温度⑥(被験者膝部付近)、図10は温 度④(区画内高温箇所)の脱出温度を示している(図1 参照)。

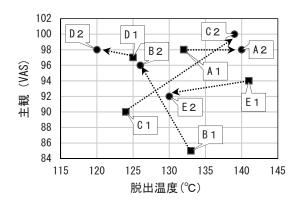


図9 温度⑥(被験者膝部付近)と主観

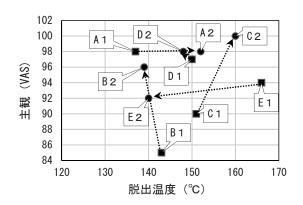


図10 温度④(区画内高温箇所)と主観

各被験者における1回目及び2回目の、主観値、脱出 時温度の大小及びその際の温度差の関係を表10に示す。

表 10「熱さ」主観値と温度(図 1 ⑥及び④)の関係

被	主観差	温度	温度差(1回目	
験者	(大小)	(高低)	6	4
13			(膝部)	(区画内)
Α	1回目=2回目	1回目<2回目	8	14
В	1回目<2回目	1回目>2回目	7	4
С	1回目<2回目	1回目<2回目	15	9
D	1回目<2回目	1回目>2回目	5	2
Е	1回目>2回目	1回目>2回目	11	24

表 10 より、検証1回目より2回目の方が「熱さ」をより感じ主観値が高い、もしくは同程度になる傾向が確認できた。

(4) 警告装置作動状況

各被験者における1回目及び2回目の警告装置作動時の区画内温度及び主観値を表11に示す。

なお、警告作動時は40℃の警告音が鳴動した時とする。

表 11 警告装置鳴動時(40°C)の区画内温度と主観

被験者	温度⑥ (℃)	温度④ (℃)	主観
134.34	被験者膝部付近	区画内高温箇所	_
A 1	132	139	98
A 2	143	150	97
B 1	133	143	85
B 2	_	_	ı
C 1	124	150	80
C 2	128	156	80
D 1	_	_	ı
D 2	124	145	96
E 1	135	164	80
E 2	_	_	_

3(1)の表 6 及び図 5 より、脱出時及び警告音鳴動時 $(40^{\circ}C)$ における「熱さ」の主観値の差及び警告装置鳴動から脱出までの時間差の関係を図 11、表 12 に示す。

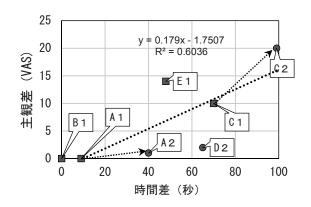


図 11 警告装置鳴動から脱出までの時間差

表 12 警告装置鳴動から脱出までの時間差

被験者	主観値差(VAS)	時間差(秒)
A 1	0	9
A 2	1	40
B 1	0	0
B 2	_	_
C 1	10	70
C 2	20	99
D 1	_	_
D 2	2	65
E 1	14	48
E 2	_	_

(5) アンケート結果

ア 熱を感じた部位

アンケートにより、被験者が熱を感じた部位について調査した。最も多かったのは膝が 14 件で 66%、次いで手甲部が 7 件で 33%であり、この 2 か所で 9 割以上を占めた (写真 7、図 12)。

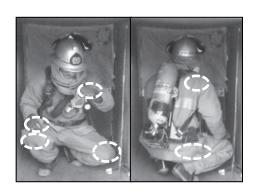


写真7 熱を感じた部分

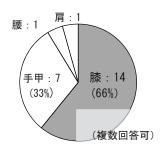


図 12 熱を感じた部分

熱の感じ方については、「ヒリヒリする」、「しびれる」、 「痛みを感じる」等の回答を得た。

イ 警告装置に関する意見(抜粋)

- (ア) 肯定的意見
- a 外部温度で警告音を発する装置より有効である。
- b 44℃を感知した時は熱すぎると感じた。警告としては40℃が良いと思う。
- c 温度で警告を出すことで受傷を避けることにつながると感じた。
- (4) 否定的意見
- a どこの温度(膝、手背、腰部)をとるかで、温度が大きく変わるので、現場で危険を感じるのが難しいと思う。
- b 防火帽の外の温度で鳴動させたほうが良い。

4 考察

- (1) 区画内温度と「熱さ」の主観(VAS) の比較
- ア 警告装置鳴動時(40℃)
- (7) 表 11 より、警告装置鳴動時(40°C)における区画内温度(図 1 の⑥の位置)と「熱さ」の主観(VAS) の相関係数は、
- · ⑥被験者膝部付近: R=0.299 (-1 ≦R≦1)
- であり、警告装置鳴動時 (40°) における区画内温度と「熱さ」の主観には相関はほぼないといえる。
- (4) 図 11 及び表 12 より 40℃警告装置鳴動後から脱出するまでの時間と、40℃警告装置鳴動時における「熱さ」の主観と脱出時の「熱さ」の主観の差における相関係数は、
- R=0.78 $(-1 \le R \le 1)$

であり中程度の相関しか確認できなかった。

イ 区画内脱出時

図5及び表8より、区画内温度(図1の⑥の位置)と「熱さ」の主観(VAS)の相関係数は、

・⑥被験者膝部付近: R=0.092 (-1≦R≦1)

であり、脱出時区画内温度と、「熱さ」の主観には相関はほぼないといえる。

上記ア及びイより皮膚側に警告装置を設置した場合、 40℃の警告に基づいて脱出を判断することは概ね妥当で あると考えられる。しかしながら、表 6 より、被験者により鳴動時間の差が大きく警告音作動状態が一定していない。

また、防火衣等の個人装備品を通して皮膚に熱が伝わる時間、「熱さ」の感じ方及び「熱さ」の限界は個人により大きく異なる。

これらの要因として、以下のことが考えられる。

- ・発汗量による防火衣内部の湿度
- ・警告装置センサー取り付け位置
- ・被験者の体格差及び防火衣サイズ
- 防火衣の空気層の有無

なお、被験者 E に関しては「熱さ」の主観及び脱出時間の傾向が逆になった。これは、表 8 より、1回目と2回目では区画内最高温度の差が25℃以上あったため、逆の傾向になったと考えられる。

(2) 区画内滞在時間と区画内温度の関係

被験者の自己判断により区画内から脱出したのは、10回中7回であった。区画内滞在時間とその際の区画内温度(図1の④及び⑥の位置)の関係を図13に示す。

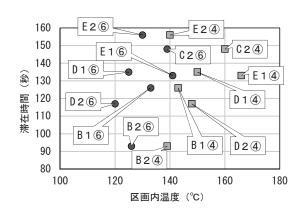


図13 区画内滞在時間と区画内温度 (④区画内最高温度、⑥被験者膝部温度)

自己判断により脱出するまでの区画内滞在時間と、その時の区画内温度の相関係数は、

・⑥被験者膝部付近: R=0.460 ($-1 \le R \le 1$) であり、脱出を判断する時間と、区画内温度はある程度 の相関が確認できた。

このことから、脱出を判断する要因は区画内温度及び、 滞在時間に依存していることが考えられる。

しかしながら、表9より、一定区画内において区画内 温度変化が±15℃程度であれば、周囲の雰囲気温度の温 度変化が脱出を判断する要素ではないと考えられる。

5 まとめ

(1) 警告装置の設定

ガイドラインでは、皮膚表面温度が 44℃になると皮膚 に痛みを感じる等熱傷危険が始まる温度としていたが、 防火衣内部に警告装置を設定する場合、熱環境下からの 脱出を考慮し40℃程度の設定がおおむね妥当である。

しかしながら、皮膚側における警告装置の設置には、 防火衣内部状況や、センサーの位置等の多くの課題があ る。

(2) 「熱さ」主観、温度、時間

ア 表2の Hazardous にあたる熱環境から、脱出を判断する要因は外部温度や熱環境滞在時間以外にも多く存在する。長時間における活動時は進入する外部温度等を常に意識する必要がある。

イ 同程度の熱環境下 (温度変化±15℃程度) であっても、熱環境への進入を繰り返すことにより熱による蓄積は避けられない。進入管理者は早期の脱出させる判断を常に意識する必要がある。

6 おわりに

本検証では、皮膚表面の温度変化に基づき警告を発する装置を用いて、熱環境における消防隊員の「熱さ」の感じ方、熱環境からの脱出を試みる状況等について検証を行った。

今後、本検証で実施した条件以外に、以下の条件を 付与した場合についても検討する余地がある。

- ・放射熱による熱源
- 外部及び内部の湿度状況
- ・ 広範囲の区画
- ・被験者数の増大
- ・センサーの精度、取り付け条件

[参考文献]

1) 総務省消防庁:消防隊員用個人防火装備に係るガイドライン、2011年5月

Basic Study on the Hazard Notices in Operational Environments

Yoshie AIKAWA*, Atsushi TOKUNAGA**, Hidekazu OTAKI*

Abstract

In order to protect firefighters from heat injuries, the Fire Technology and Safety Laboratory conducted research on the warning device that responds to temperature changes around the firefighters in operation. However, the study did not produce helpful results because of the difficulty in judging the heat burn risks by a single point temperature around the firefighters and also of the discrepancy between the firefighters' subjective evaluation of heat and the equipment's evaluation of heat.

Accordingly, the Fire Technology and Safety Laboratory conducted another study with a different type of warning devices that measures and reacts to the temperature on the skin in order to explore the relationship between the firefighter's evaluation and the equipment's evaluation. The result showed that the firefighters generally made similar evaluations regarding the heat on their skins, though there was a major individual difference in the time that it takes for heat to reach their skins through the personal protective gears (fire coats).

 $[\]star$ Equipment Safety Section $\star\star$ Community Safety and Disaster Education Section