

消防活動時における輻射熱と温度に関する調査研究

玉越孝一*、根本昌平*、富田 功*

概 要

本調査研究は、一般住宅などの居室規模の空間での火災を想定して、居室内における輻射熱等の熱環境から、消防隊員が着装する防火衣内への熱の伝わり方、防火衣内での熱の溜まり方、それらの身体の場合による違いを測定することによって、消防隊員が消火活動時に安全に行動するための指標を策定するものである。

1 はじめに

現在の消防隊員の防火衣は、熱からの防御や防火衣内部の熱の発散性等いろいろな面から研究がなされているが、消防隊員の受傷事例は、無くなっていない。

本調査研究においては、消火活動時における消防隊員の受傷部位、熱傷に至る温度等を調査し、居室空間を想定して、消防隊員が受ける熱量等を測定し、防火衣内部の温度変化等を考察することにより、消火活動時に消防隊員が安全に活動する為の指標を検討する。

2 熱傷について

(1) 文献調査

ア 受傷部位について

消防隊員の受傷部位を把握し、測定機器設置の参考とする為に、過去5年間の東京消防庁における消防隊員の受傷事例(熱傷)の調査を行った。

まず、受傷部位については、2つに分類することができる。手甲部における熱傷と頭部付近(顔面、頸部、気道)における熱傷である。

各受傷部位における受傷理由については、ほとんど同じであり、手甲部における熱傷は、熱を受けていることに気付かず、気付いた時には熱傷に至っていたものであり、頭部付近における熱傷は、急激な熱気の噴出により熱傷に至ったものである。

イ 熱傷について

熱と熱傷の関係を数量的に評価する為、資料収集を行った。人間の皮膚が熱傷となる数量的基準として、資料には、温度のみのもの、熱流束と時間の関係、温度と時間の関係で表したものがあつた。ここで、熱流束[kW/m²]とは、単位時間(1秒間)あたりに単位面積(1m²)に流入する熱量[J]を表すものである。

皮膚表面への熱の伝わり方は、輻射によるものや、対流、

伝導によるものが考えられる。それらにより伝達された熱が皮膚へ流入した結果、皮膚の温度上昇をもたらし、熱傷にいたると考えられる。したがって、数量的に評価する基準としては、熱の流入を考え、熱流束と時間の関係を用いることとした。

文献による対流及び輻射による熱傷への影響は、次のとおりである。

熱環境からの熱伝達として、伝導は除外する。

(ア) 輻射による熱の伝達

輻射熱は、赤外線などと同様に電磁波であり、電磁波により熱が伝達される。表1は、輻射熱により熱傷となる熱流束と時間の関係を文献資料より得たものである。

表1 輻射熱による熱流束と時間と症状の関係

熱流束	症状
1.2kW/m ²	長時間の露出に耐えられる最大輻射熱
1.4kW/m ²	苦痛を感じはじめる。
2.1kW/m ²	1分後苦痛
4.2kW/m ²	10～20秒で苦痛
7.0kW/m ²	20数秒でひどい火傷、数秒で痛み
10.5kW/m ²	10～20秒で火ぶくれ、数秒で苦痛

(イ) 対流による熱伝達

消防隊員が熱気から熱傷する時は、主に対流により熱エネルギーが伝達されると考えられる。この時の熱流束は、その場における湿度と温度に関係があり、温度が高くなれば増加し、同じ温度においても湿度が高くなると増加する。

表2は、低湿度下においての熱傷に到る温度と時間の関係を文献から得たものである。表2からもわかるように、低湿度下では、100度近い高温であっても、熱傷にいたるのに30分程度の時間を要するが、高湿度下となれば、数分で熱傷となる。

また、高湿度下において熱傷にいたる時間は、数分としが書かれておらず、温度、湿度による違いが分かり難い為、

* 第一研究室

高温度、高湿度下の熱流束を実験により確認した。

表2 温度と湿度と時間との関係

	低湿度	高湿度
5 0℃	数時間	数分
7 0℃	1 時間	
8 2℃	4 9 分	
9 3℃	3 3 分	
1 0 5℃	2 6 分	
1 1 5℃	2 3.5 分	
1 3 0℃	1 5 分	
2 0 0℃	5 分	

3 高温・高湿度環境の実験

(1) 実験目的

高温・高湿度環境における熱流束の測定

(2) 実験施設

実験施設は、消防科学研究所2階にある熱環境室を使用した。寸法は、縦3.6m×横2.7m×高さ2.3mであり、熱環境室内の温度を-10℃から80℃、相対湿度を+30RH から+95RH に変化させることができる施設である。(写真1, 2参照)



写真1 熱環境室前景

写真2 熱環境室内部

(3) 実験設定

ア 実験内容

熱環境室において、温度(50℃、60℃、70℃)と湿度(50%、60%、70%)を3段階に変化させ、熱流束を測定した。

イ 測定機器の設定

図1に示す●の位置に、表3に示す測定機器を設置した。

記録は、各測定機器の電圧出力をデータ記録機(データロガー)により、AD変換したものをパーソナルコンピュータで制御し、記録した。

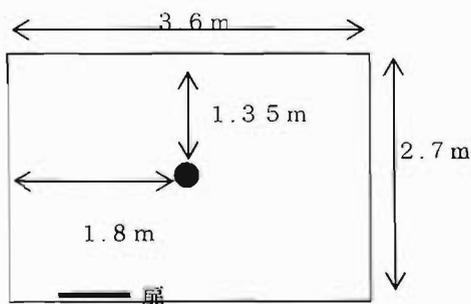


図1 設置位置(熱環境室を上方から見た図)

表3 測定機器

測定機器	個数	位置	高さ	備考
熱流束計	1	中央(●の位置)	1.7 m	水平向
温湿度計	1	中央(●の位置)	1.7 m	温度、湿度の計測

ウ 実験手順

- ① 熱環境室内の温度を50℃に保ちながら、徐々に相対湿度を50%まで上昇させる。
- ② 50%に到達した時点で加湿及びファンを停止させた状態で、5分間熱流束を測定する。
- ③ その後、徐々に相対湿度を60%まで上昇させる。
- ④ 60%に到達した時点で加湿及びファンを停止させた状態で、5分間熱流束を測定する。
- ⑤ その後、徐々に相対湿度を70%まで上昇させる。
- ⑥ 70%に到達した時点で加湿及びファンを停止させた状態で、5分間熱流束を測定する。

この一連の過程を温度設定60℃、70℃について実験を実施した。

(4) 測定結果

実験より得た各5分間の熱流束の平均値と温度と湿度の関係を表4に示す。

表4 温度と湿度と熱流束の関係(高湿度)

	50%	60%	70%
50℃	0.29 kW/m ²	0.33 kW/m ²	0.45 kW/m ²
60℃	0.89 kW/m ²	1.20 kW/m ²	1.51 kW/m ²
70℃	1.88 kW/m ²	2.17 kW/m ²	2.59 kW/m ²

(5) 考察

表4の値と熱傷の症状との関係を考える為に、同じ熱量として、輻射の熱流束(表1)と対流の熱流束(表4)を比較すると、60℃—60%の値は、長時間受けても耐えられる限界に達している。70℃の高湿度での各湿度では、数分間熱を受けると痛みを感じる値となる。

また、第4研究室で実施した「高温・高湿度環境下における身体暴露に関する研究」の熱環境室における執務服での平均滞在限界時間の表が表5である。これまでに示した数値は、皮膚に直接流入する熱を示したものであるため、防火衣装着なし(執務服)の表を使用した。

表5 平均滞在限界時間(防火衣装着なし)

	70%	80%	90%
50℃	24分20秒	17分43秒	9分36秒
55℃	13分30秒	6分06秒	2分30秒
60℃	3分00秒	31秒	23秒
65℃	26秒	9秒	未実施

表1と表4を比較すると、表4における70℃—70%の値2.59 kW/m²は、表1から読み取ると20秒から60秒で苦痛になる値であり、表5の65℃—70%の滞在時間は、26秒間であり、実験結果とほぼ一致しており、

65℃における各湿度の値についても数十秒滞在できる値である。

よって、今回の調査研究においては、表4の数値は、表1と比較して使用できると考え、以下の実験において検討を行う。

4 閉鎖空間における熱環境の測定

(1) 実験目的

熱環境下における放水前後の熱流束及び温度の測定

(2) 実験施設

実験施設は、消防科学研究所燃焼実験室内にある移動実験室(写真3、4参照)を使用した。寸法は、縦3.6m×横3.3m×高さ2.15mで壁、天井はALC、柱は鉄骨造である。



写真3 移動実験室前景

写真4 移動実験室内部

(3) 実験設定

ア 実験内容

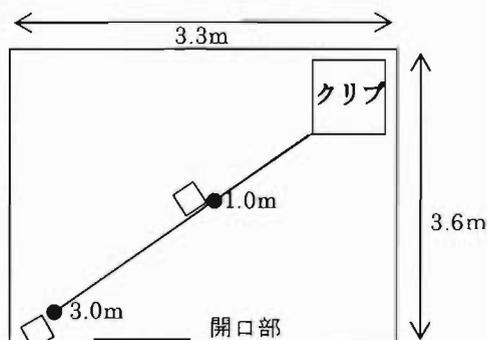
1単位クリブ(1単位クリブとは、「消火器の技術上の規格を定める省令」(昭和39年9月17日自治省令第27号)第3条の規定された第2模型である。以下「クリブ」という。)を火源として使用し、閉鎖空間における熱流束、室温、クリブからの輻射熱を遮った温度の測定した。

イ 測定機器の設置

表6で示す測定機器を写真6のように設定し、図2、写真5のようにクリブから1m、3mの位置に設置した。温度は、室温とクリブからの輻射熱を遮った温度を測定した。

表6 測定機器

測定機器	個数	測定対象	備考
熱流束計	1	熱流束	・高さ:1.05m
熱流束計	1	輻射熱流束	・高さ:1.05m
熱電対	2	温度	・高さ:0.95m



※クリブは、オイルパンの上に組んだアングルの上に設置

図2 測定装置の配置



写真5 測定機器設置状況 写真6 熱流束計設置状況

ウ 実験手順

(ア) 熱流束の測定

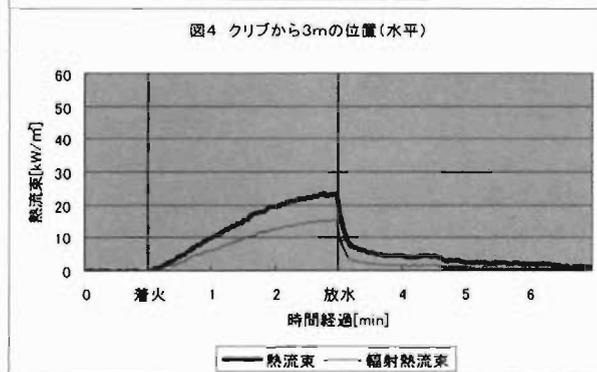
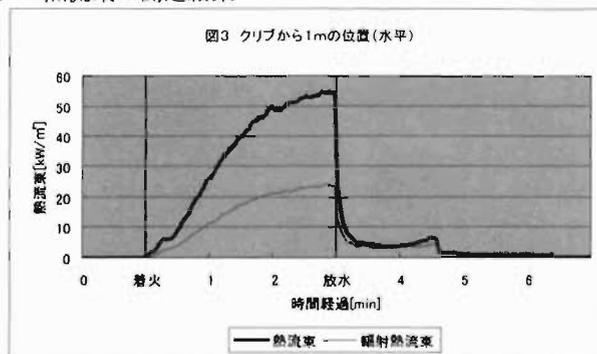
- ① 着火5分まえに測定を開始する。
- ② 水をはったオイルパンに着火材として300mlのガソリンを注ぎガソリンに点火し、クリブに着火させる。
- ③ 着火後、3分後に放水する。
- ④ 着火後、10分で消火して実験を終了する。

(イ) 温度の測定

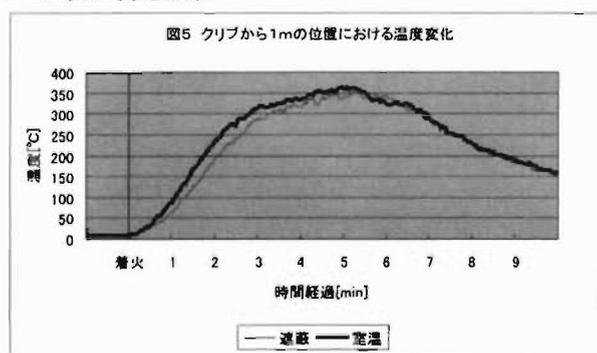
- ① 着火5分まえに測定を開始する。
- ② 水をはったオイルパンに着火材として300mlのガソリンを注ぎガソリンに点火し、クリブに着火させる。
- ③ 着火後、10分で消火して実験を終了する。

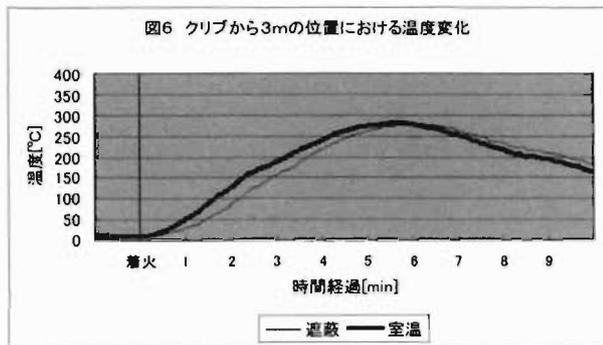
(4) 測定結果

ア 熱流束の測定結果



イ 温度の測定結果

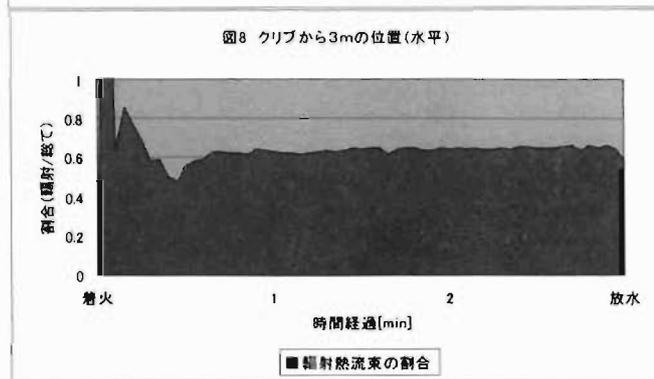
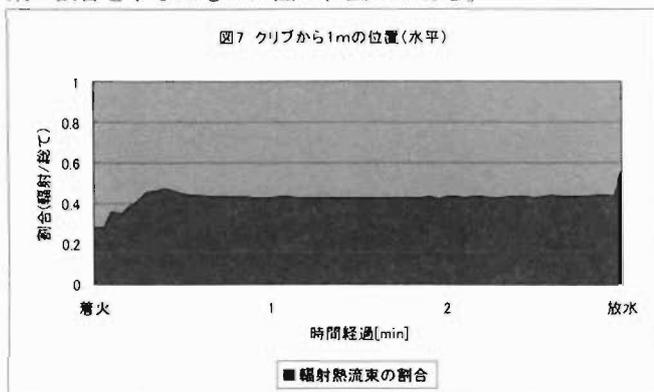




(5) 考察

ア 熱流束について

着火から放水までの熱流束に占める輻射熱による熱流束の割合を示したものが図7、図8である。



移動実験室内において、着火から放水までの間、クリブからの熱流束に対しての輻射熱流束の割合は、初期を除いて一定である。クリブからの距離が遠ざかれば、熱流束は、減少するが、輻射熱流束の割合は増加する。

イ 温度について

最初に、室温はクリブからの輻射熱を遮蔽した温度より先に温度上昇を見せ、1分後、1mの位置では、クリブからの輻射熱を遮蔽した温度との差は、約25°C、3mの位置では温度差約22.5°Cの差が生じている。

5 消防隊員が火災室から受ける熱について

(1) 実験目的

人間の形状(マネキン、人間)をしたものに防火衣を着装させ、形状を考慮した温度及び熱流束の測定を行う。

(2) 実験施設

実験施設は、消防科学研究所燃焼実験室内にある移動実験室を使用した。(前記4 (2)の実験施設参照)

(3) 実験設定

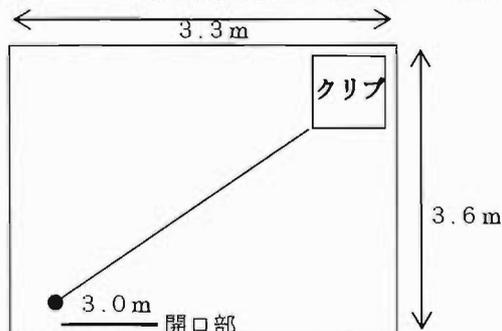
ア 測定機器等の設定

移動実験室開口部付近に、表7に示す測定機器を設定したマネキンに防火衣を着装させて図7の位置に設定した。

また、人体の胸部に温湿度計及び熱流束計を設置し、マネキンの横に立ち、各量の測定と熱を体感し、数値等の評価の参考とした。

表7 マネキンの測定機器設置状況

測定機器	場所	測定対象	写真
熱流束	首	熱流束	①
	胸部	熱流束	②
	手甲部	熱流束	③
温湿度計	首裏	温度、湿度	④
	上腕	温度、湿度	⑤
	胸部	温度、湿度	⑥
	背部	温度、湿度	⑦
熱電対	顔面	温度	⑧
	胸部表面	温度	⑨
	手甲部	温度	⑩



□: マネキン ○: 人体

※クリブは、オイルパンの上に組んだアングルの上に設置

図7 移動実験室内マネキン等設置図

イ 実験手順

- ① 着火5分まえに測定を開始する。
- ② 水をはったオイルパンに着火材として300mlのガソリンを注ぎガソリンに点火し、クリブに着火させる。
- ③ 着火後、3分後に放水する。
- ④ 着火後、10分で消火して実験を終了する。

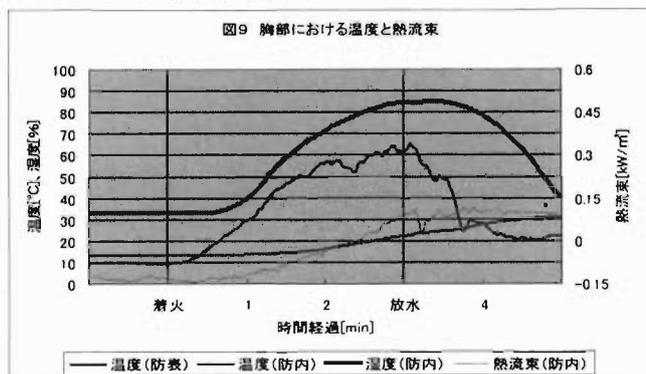
(4) 測定結果

ア 各部位の比較 (マネキンを使用した計測)

実験結果から、各部位の温度について比較すると、火炎を正面に受ける部分に高い温度上昇幅が見られる。また、湿度についても同様な状況が見られた。今回、マネキンを使用したことにより、マネキンに含まれる水分、防火衣の水分などの影響と考えられる防火衣内部の湿度変化が測定された。

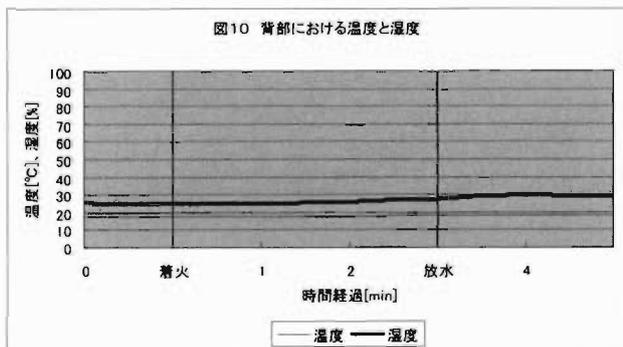
(ア) 胸部

胸部の防火衣内部の温度、湿度、熱流束及び防火衣表面の温度を示したものが図9である。温度、湿度及び熱流束は、着火から放水までの間、上昇し続けている。熱流束は、 0.1 kW/m^2 が最高値である。



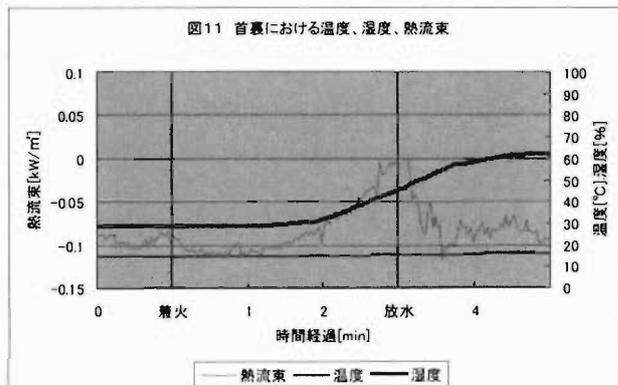
(イ) 背部

背部の温度及び湿度を示したものが図10である。背部は、クリブからの直接の輻射熱を受けることがなく、急激な温度上昇はなかった。また、胸部で受けた熱によって、上半身が一樣になるような温度状況は見られなかった。



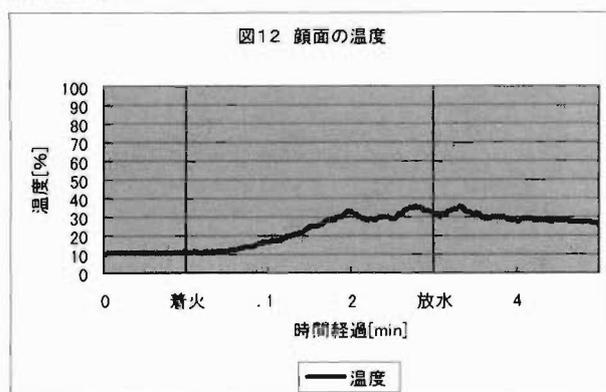
(ウ) 首裏

首裏の温度、湿度及び熱流束を示したものが図11である。首裏における、温度上昇は少ないが、湿度上昇は見られた。熱流束は、体に熱が流入する値には至らない。



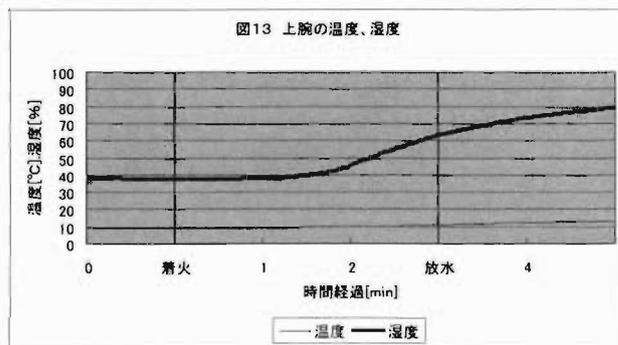
(エ) 顔面

顔面の温度を示したのが図12である。顔面については、フードを下し面体を付けずにフードと顔面との温度を測定した。温度は、最高 $35.6 \text{ }^\circ\text{C}$ である。



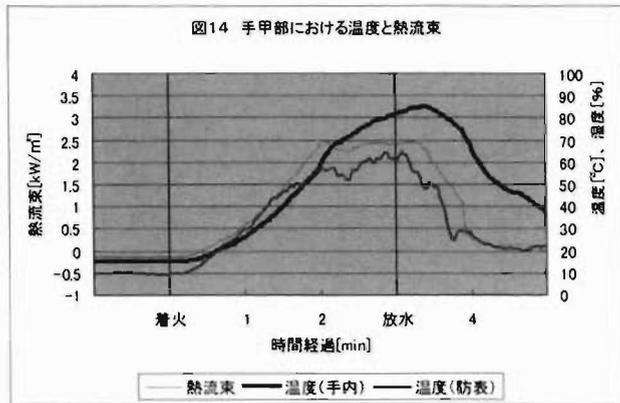
(オ) 上腕

上腕の湿度、温度を示したものが図13である。火炎に向いているので、湿度は、大きく変化する。温度は、約 $5 \text{ }^\circ\text{C}$ の上昇が見られる。胸部に比べ上昇幅は少ない。



(カ) 手甲部

温度と熱流束を示したものが図14である。参考の為、防火衣表面の温度を示した。手袋内での温度は、最高で $80 \text{ }^\circ\text{C}$ に達しており、熱流束は、約 2.5 kW/m^2 に達している。この数値は表1より、1分程度で苦痛を感じる値である。実験では、3分後に放水したが、この状況が持続すれば、熱傷となる可能性がある。

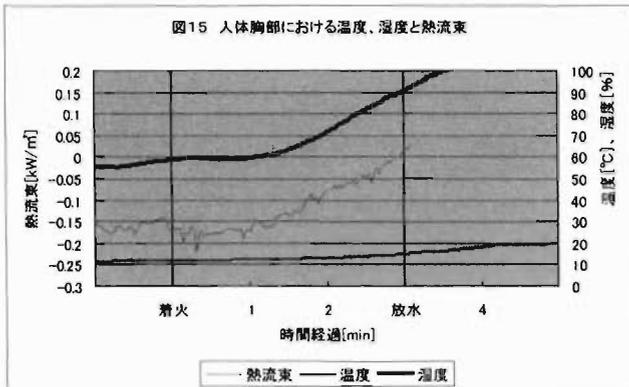


イ 人体で行った時の測定結果

(ア) 測定結果

人体で測定した湿度、温度及び熱流束を示したものが図15である。人体の防火衣内の湿度は、輻射熱を受けた時点で30ポイント程度上昇した。

また、温度は、ゆるやかに上昇している。放水前までの最高温度は15℃程度であった。熱流束は、放水までの間、上昇している。



(イ) 体感

- ① 防火衣を着た時点で内部の湿度状況の変化を感じた。
- ② 着火後、直ちに体の前面全体に受熱感を得た。
放水までの間その感覚は、維持された。背部には、同様の感覚はなかった。
- ③ 手甲部は、我慢できる程度の苦痛を感じられた。
- ④ 折膝した時は、膝の部分の防火衣が引っ張られているが、その部分が熱く感じられた。

ウ 人体とマネキンで行った時の考察

胸部について比較すると、温度は、マネキンよりも人間で測定した方が低い数値であり、熱流束についても、マネキン使用より低い数値であった。

実際に、人間で測定した数値は、マネキンで測定した数値より低く測定される。これは、人間の体温等の調整機能による影響だと考えられる。

(5) 考察

今回、燃焼物をクリブ1個としてマネキンを使用した実験を行ったが、1分程度で苦痛を感じる 2.1 kW/m^2 の値に到達したのは、手甲部しかなかったが、より多くの燃焼物があれば、それに準じて、多くの熱が流入し、防火衣内

部に温度上昇をもたらすとすれば、現在の測定結果から、大きな変化がある場所で多くの熱の流入があると考えられることができる。測定器を設置した箇所のなかでは、他の部分に比べて、胸部と手甲部に大きな変化が見られた。

胸部と手甲部では、同じ程度の熱（閉鎖空間における熱環境の測定より、輻射熱流束で、約 15 kW/m^2 ）を受けているにもかかわらず、生地の異なっている手甲部に、大きな変化が見られた。

手甲部の熱傷の事例からも検討すると、防火衣生地と手袋生地とでは、熱を遮断する能力や滞留させる能力が異なっていると考えることができ、防火衣内と手袋内とで熱さの感じが異なるならば、体では、熱さを感じなくても手甲部では、多くの熱を受け、熱傷に至ると考えられる。

また、手の部分は、防火衣内で感じる熱さを先行して、感じとることができるともいえる。

6 まとめ

今回の実験結果を以下のような結論を得た。

- (1) 消火活動時における熱傷については、輻射熱による熱伝達のみならず、対流による熱伝達においても、温度、湿度によって、熱傷となる可能性がある。
- (2) 火災室を想定した閉鎖空間において、火源から距離がある所では、全熱伝達に占める輻射熱の割合が多いので、消火活動時に火源からの輻射熱を遮蔽物により遮蔽することにより、消防隊員が受ける熱量を大幅に減少させることができる。
- (3) 防火衣部分と手袋部分においては、熱の内部へ伝わり方が異なる。防火衣部分の内部では、熱を感じていなくても、手袋内部では、多量の熱を受けていることがある。

謝辞

本調査研究にあたり、受傷事例の調査に協力して頂いた訓練課の皆様、防火衣の生地の使用に協力及び助言を頂いた第一研究室個人装備班の皆様、ここに感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 火災便覧第新版 日本火災学会編
- 2) 染谷茂美、正木豊、河田正：「高温・高湿度環境下における身体暴露に関する研究」消防科学研究所報第31号、P131-136
- 3) 山下邦博：「火災から発生する高熱に対する生命危険」消防研究輯報 第26号 (1973)

INVESTIGATION AND RESEARCH ON THE RADIANT HEAT AND TEMPERATURE IN FIREFIGHTING

Koichi TAMAKOSHI*, Shohei NEMOTO*, Isao TOMITA*

Abstract

With a simulated living room fire, we conducted investigation and research for the establishment of a standard for firefighters to act safely in firefighting, with the measurements of the radiant heat transmitted to the inside of an “on-scene” firefighter’s fire coat, the heat accumulated there, and the subject’s temperature at each spot of his body.

* First Laboratory