

火災周辺温度分布の研究

松 川 渉*
未 吉 道 生**

1. はじめに

大震災時の火災は、広域にわたって一挙に各地で発生することが予想され、また密集市街地にあつてはそれらのいくつかが合流して大火災になることが当然考えられる。過去の震災記録を見ても合流した大火災から放出される放射熱や熱気流が、延焼速度を極度に早くし、それが多数の避難者に大きな障害となった実例が少なくない。

広域にわたる多発合流火災下にあつては、避難者の安全を図ることが最も優先されねばならないが、適切な誘導をするためには、合流火災の大局をは握ることが重要であろう。

しかし、地上において広域火災の大勢をは握することは限界があるため、より広範な観測視野を得るためには機上からの航空観測がもっとも有効な手段であると考えられる。そこで当研究所では、機上から火災周辺温度分布をとらえる手段として、赤外線撮像装置を取り上げ、震災対策研究の一環として、その消防的応用の研究に着手した。初年度は赤外線撮像装置による基礎実験として、各種温度物体及び燃焼炎の测温撮像と遠隔地からの実験火災の温度分布撮像実験を実施したのでその結果を報告する。

2. 赤外線撮像装置について

(1) 物体と赤外線の放射

物体の表面はその温度が絶対温度零度($0^{\circ}\text{K} = -273^{\circ}\text{C}$)以上であれば、どんな物質の物体でも原子・分子の振動・回転により電磁波を放射している。この電磁波の放射エネルギーは物体の温度 $T(^{\circ}\text{K})$ により大きく異なり、またこの電磁波は単一波長ではなく物体の温度 $T(^{\circ}\text{K})$ により異なる波長帯域をもっており、波長によっても放射エネルギー(単色放射発散度)が異

なる性質をもっているが、簡単に述べると絶対温度零度以上の物体より放射される電磁波の全放射エネルギー $W(W/\mu\text{m}^2)$ は、絶対温度 $T(^{\circ}\text{K})$ の4乗に比例して変化し、単色放射発散度 $W_{\lambda}(W/\mu\text{m}^2)$ が最大となる波長 $\lambda\text{m}(\mu\text{m})$ は、赤外線の領域にあり、通常温度測定範囲においては、その放射エネルギーのほとんどが赤外線領域に属する波長 $\lambda(\mu\text{m})$ の電磁波である。

(2) 赤外線撮像装置の原理

赤外線撮像装置は、前述したように物体が温度に応じて赤外線(エネルギー)を放射していることを利用して、物体の温度分布の表示及び温度測定を行なう装置(写真1)である。

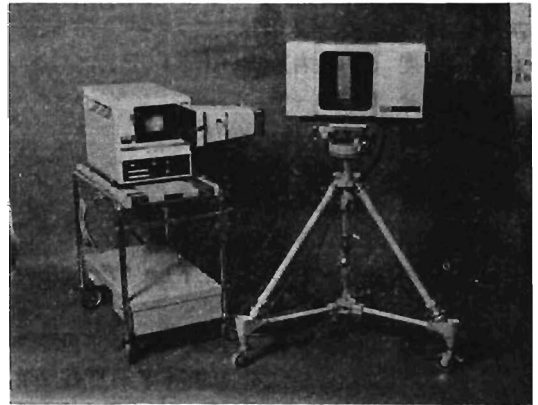


写真1

機構原理は図1に示すように、ミラー光学系の作動により被写体面を走査し、チョッパーにより被写体面の各スポットから放射される赤外線の熱エネルギーと比較しながら、随時検出器の検出素子に集束し、この半導体の検出素子により熱エネルギーを電気エネルギー(ビデオ信号)に変換し、電子回路によりこの信号を所要の電圧・波形に整形してブラウン管に伝え、ブラウン管上に被写体の温度分布を輝度の相異による熱像図として表示するとともに、温度を読みとれるように

*研究所付 **第一研究室

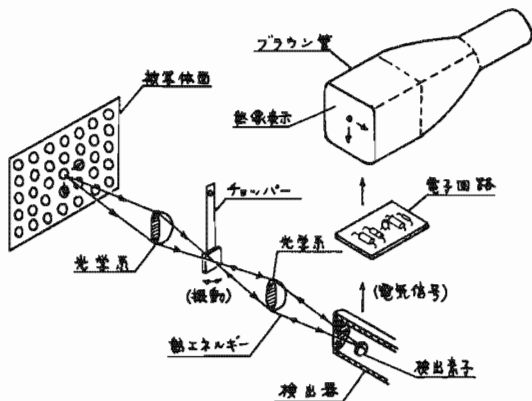


図1 赤外線撮像装置原理図

したものである。

(3) 赤外線撮像装置CT-4Bの性能

今回の実験で使用した赤外線撮像装置(C T-4 B型)の性能は次のとおりである。

用途	産業用
測定温度範囲	-20°C~1850°C
上記切換範囲	-20~40, 30~120, 100~250, 200~440, 400~850, 800~1850°Cの6段階
黒白温度範囲	各測温範囲切換段の温度差の2, 10, 50, 100%
検出器	InSb
基準温度源	液体窒素
走査角度	30°(左右)×18°(上下)
焦点合わせ	0.12m~
水平走査線数	60本(1秒), 300本(5秒)
水平分解能	400画素(TV表示方式)
画素数	120,000(5秒写真のとき)
画像走査時間	1秒, 5秒
表示サイズ	130(左右)×100(上下)mm(データ部含む)
表示画像	白黒熱像図, 等温線熱像図, 5段階等濃度線熱像図, 10段階等濃度線熱像図, 水平温度波形図, 垂直温度波形図
記録方式	写真撮影, 記録計・計算機及び面積計算機接続
消費電力	AC100V, 120W, 50/60Hz
重量	撮像部30kg, 表示部25kg

3. 基礎実験

(1) 実験方法

各物質(物体)の放射率は各物質毎に異なり, 金属物質にあっては同一金属であっても研磨面と腐蝕面で異なる。また, 物質の状態(氷・水等)によっても異

なり, さらに黄銅・赤レンガ・雲母等例外を除いて当該物質の温度によっても放射率が異なるため, 赤外線撮像装置には放射率補正装置が組み込まれている。すなわち, 被写体(測温すべき物体)の温度を測定するためには, 被写体の放射率に等しく赤外線撮像装置の放射率補正ダイヤル(εダイヤル)を合わせることによって, はじめて熱像図及び温度波形図から被写体の真の温度を解読できるものである。

そこで基礎実験においては, 赤外線撮像装置の測温精度を確認するため, 前2(3)に示した赤外線撮像装置の測定温度範囲選択レンジ, 測定温度範囲温度差のパーセントレンジ及び測温範囲最低温度の高低移動レベルの組み合わせを種々変え, かつ放射率の補正については, 下記物質について別途計器により真の温度を測定し当該物体の当該温度における放射率(表1)に, 赤外線撮像装置のεダイヤルをセット(燃焼炎は除く)した上で, 赤外線撮像装置の熱像図解読温度と被写体物体の真の温度の比較実験を実施した。燃焼炎及び熱気流については, 真の温度に最も近い熱像図を得たときの赤外線撮像装置のεダイヤルの補正指示値を測定した。なお, 被写体は燃焼炎(燃焼炎については燃焼時の温度)を除き, 各被写体を50°C, 100°C, 150°C, 200°C, 250°C(紙・木等については表1に示す被写体温度)にそれぞれ加熱して用いた。

(2) 温度測定被写体

ア 黒体

- (ア) 黒球
- (イ) 石綿板(ペルベットコートブラック塗布面)
- (ウ) アルミ()
- (エ) ガラス()
- (オ) 銅板()
- (カ) 木材()
- (キ) 赤レンガ()

イ 灰色体

- (ア) ガラス
- (イ) 赤レンガ
- (ウ) 雲母
- (エ) アスベスト
- (オ) 酸化銅
- (カ) 暗色塗装面
- (キ) 紙
- (ク) 木材
- (ケ) ゴム
- (コ) 都市ガス燃焼炎及び上昇熱気流
- (カ) アルコール燃焼炎
- (シ) 白灯油燃焼炎
- (ス) ガソリン燃焼炎

- (e) 各種木材燃焼炎
- (f) その他

表1 赤外線撮像装置の補正放射率

物質名	被写体温度	赤外線撮像装置の補正放射率
ガラス	50°C~250°C	0.88~0.90
赤レンガ	50°C~250°C	0.93
雲母	50°C~250°C	0.75
アスベスト	50°C~250°C	0.93~0.96
酸化銅	50°C~250°C	0.57
暗色塗装面	常温 540°C	0.95 0.85
紙	95°C	0.89
木材	70°C	0.91
ゴム	23°C	0.95
黒体(黒球, ベルベットコート塗布面)	50°C~250°C	1.00
各種燃焼炎及び上昇熱気流	当該温度	解説温度が当該真の温度に等しいときの放射率補正值をみる

4. 実験結果

(1) 物体の真の温度と赤外線撮像装置による被写体熱像図の解説温度を比較した結果、前3(2)アに示した黒体については、各素材塗布面とも50°C, 100°C, 150°C, 250°Cの各温度について温度誤差は最高5°C, 誤差率

表2 被写体: アルミ(黒体塗料塗布) $\epsilon = 1.0$

真の温度(°C)	赤外線撮像装置による解説温度(°C)	温度差(°C)	差率(%)
50	52.0	2.0	4.0
100	102.0	2.0	2.0
150	152.5	2.5	0.5
200	205.0	5.0	2.5
250	255.0	5.0	2.0

4%以内であった。第2表は、測定温度差の最も大きかったアルミ金属表面にベルベットコートブラックを塗布した被写体の実験結果を示したものである。

(2) 被写体が前3(2)イに示した灰色体(燃焼炎を除く)について測定した結果、赤外線撮像装置の熱像図による解説温度は、おおむね真の温度に近似した値を示したが、最大10%の温度誤差がみられた。

1例として測定被写体がガラス、赤レンガ、酸化

銅、アスベストについてみると次の通りであった。

表3 被写体: ガラス $\epsilon = 0.9$

真の温度(°C)	赤外線撮像装置による解説温度(°C)	温度差(°C)	差率(%)
50	49.7	0.3	0.6
100	96.0	4.0	4.0
150	137.0	13.0	8.6
200	191.0	9.0	4.5
250	229.0	21.0	8.4

表4 被写体: 赤レンガ $\epsilon = 0.93$

真の温度(°C)	赤外線撮像装置による解説温度(°C)	温度差(°C)	差率(%)
50	54.0	4.0	8.0
100	106.0	6.0	3.0
150	147.0	3.0	2.0
200	218.0	18.0	9.0
250	270.0	20.0	8.0

表5 被写体: 酸化銅板 $\epsilon = 0.57$

真の温度(°C)	赤外線撮像装置による解説温度(°C)	温度差(°C)	差率(%)
50	55.0	5.0	10.0
100	106.0	6.0	6.0
150	148.0	2.0	1.3
200	192.0	8.0	4.3
250	235.0	15.0	6.0

表6 被写体: アスベスト $\epsilon = 0.94$

真の温度(°C)	赤外線撮像装置による解説温度(°C)	温度差(°C)	差率(%)
50	54.0	4.0	8.0
100	103.0	3.0	3.0
150	158.0	8.0	5.3
200	215.0	15.0	7.5
250	223.0	23.0	9.2

表3, 4, 5, 6は、各被写体の放射率に赤外線撮像装置の補正放射率を一致させて撮像(测温)した場合の真の温度との比較実験結果を表わしたものであるが、赤外線撮像装置の放射率補正值を0.1から1.0で

表7 補正放射に対する温度変化 (被写体: ガラス)

真の温度(°C)	赤外線撮像装置の補正放射率(ε)	左記補正值での解読温度(°C)	温度差(°C)	差率(%)
50	1.0	46.6	3.4	6.8
	0.9	49.7	0.3	0.6
	0.8	54.5	4.5	9.0
	0.7	59.9	9.9	19.8
	0.6	68.0	18.0	36.0
	0.5	76.0	26.0	52.0
	0.4	86.0	36.0	72.0
	0.3	103.0	53.0	106.0
	0.2	120.0	70.0	140.0
0.1	139.0	89.0	178.0	
100	1.0	97.0	3.0	3.0
	0.9	104.0	4.0	4.0
	0.8	109.0	9.0	9.0
	0.7	115.0	15.0	15.0
	0.6	124.0	24.0	24.0
	0.5	128.0	28.0	28.0
	0.4	136.6	36.6	36.6
	0.3	142.0	42.0	42.0
	0.2	155.2	55.2	55.2
0.1	231.1	131.0	131.0	
150	1.0	129.4	20.6	13.7
	0.9	137.0	13.0	8.6
	0.8	144.0	6.0	4.0
	0.7	152.0	2.0	1.3
	0.6	160.0	10.0	6.6
	0.5	171.2	21.2	14.1
	0.4	190.0	40.0	26.6
	0.3	208.0	58.0	38.6
	0.2	244.0	94.0	62.6
0.1	285.0	135.0	90.0	
200	1.0	175.0	25.0	12.5
	0.9	191.0	9.0	4.5
	0.8	192.0	8.0	4.0
	0.7	204.0	4.0	2.0
	0.6	213.0	13.0	6.5
	0.5	226.0	26.0	13.0
	0.4	245.0	45.0	22.5
	0.3	266.0	66.0	33.0
	0.2	288.0	88.0	44.0
0.1	313.0	113.0	56.5	
250	1.0	219.0	31.1	12.4
	0.9	229.0	21.0	8.4
	0.8	239.0	11.0	4.4
	0.7	252.0	2.0	0.8
	0.6	261.0	11.0	4.4
	0.5	272.0	22.0	8.8
	0.4	283.0	33.0	13.2
	0.3	297.0	47.0	18.8
	0.2	308.0	58.0	23.2
0.1	325.0	75.0	30.0	

逐次切り替えて、撮像した場合の熱像図の解読温度がどのように変化するかをみるため、ガラス被写体を同じように50°C~250°Cまで加熱し、それぞれの温度について測定した結果は表7の通りである

(3) 前3(2)イに示した各燃焼炎の撮像(測温)実験については、各燃焼炎の放射率が解らないため、表1で示した通り解読温度が当該燃焼炎の真の温度に等しい(又は近似値)ときの赤外線撮像装置の補正放射率を究明することにした。一例を都市ガス炎(1050°C)に

被写体真の温度 ●: 250°C

□: 200°C

△: 150°C

○: 100°C

×: 50°C

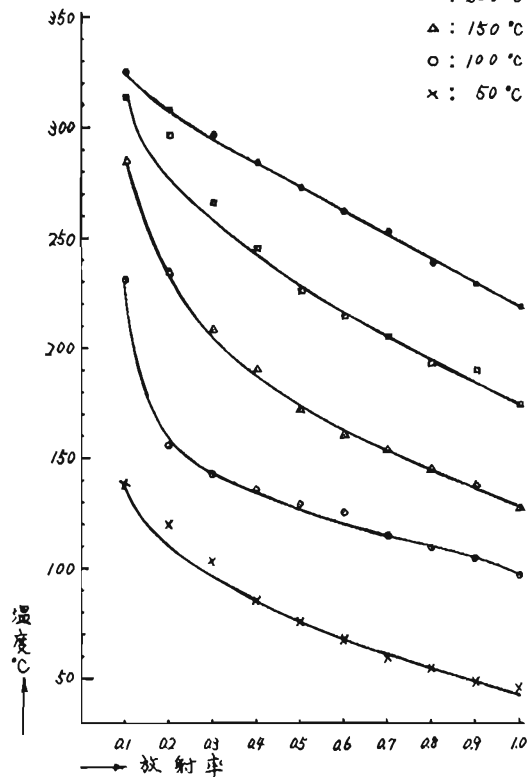


図2 補正放射率に対する温度変化

ついてみると、補正放射率は0.12~0.15、上部熱気流(150°C)については0.4であった。

表8 被写体: 都市ガス炎及び上部熱気流

真の温度(°C)	赤外線撮像装置の補正放射率(ε)	左記補正值での解読温度(°C)	温度差(°C)	差率(%)	
1050°C	1.0	490.0	560.0	53.3	
	0.9	512.0	538.0	51.2	
	0.8	535.0	515.0	49.0	
	0.7	603.0	447.0	42.5	
	0.6	625.0	425.0	40.4	
	0.5	692.0	358.0	34.0	
	0.4	760.0	290.0	27.6	
	0.3	800.0	250.0	23.8	
	0.2	905.0	145.0	13.8	
	0.12~0.15		1050.0	0	0
	0.1		1167.0	117.0	11.1
150°C	0.4	A点 160.0	10.0	6.6	
		B点 152.0	2.0	1.3	
		C点 149.0	1.0	0.6	

5. 基礎実験の考察

(1) 本実験で使用した赤外線撮像装置CT-4B型は、測温被写体の放射率基準源に黒体炉をとり、黒体炉を放射率1としている。すなわち黒体炉を測温する場

合、赤外線撮像装置の放射率補正ダイヤルを1にセット(補正)すれば、熱像図の解読温度が黒体炉の真の温度と一致する。従って黒体(被写体)を測温する場合、補正放射率を1以下にすると解読温度は真の温度より高い値を示す。逆に灰色体を測温する場合補正放射率を灰色体の真の放射率より大きな値、もしくは1に近い値に合わせると解読温度は真の温度より低い値で表われ、真の放射率より小さな値に合わせるほど高い値で表われる(表7、図2)。すなわち赤外線撮像装置による被写体の測温には、放射率の補正が極めて重要な要素となる。

(2) 基礎実験においては黒体に相当するものとして、黒球及び黒体に最も近似した表面(放射率)を形成するベルベットコートブラック塗布面を用いた。

表2は塗布素材がアルミの場合について赤外線撮像装置による測温結果を示したものであるが、50°C~250°Cの被写体各温度についていずれも真の温度よりわずかに高い値を示した。

理論的には、ベルベットコートブラック塗布面は完全黒体ではないので、前(1)で述べた通り補正放射率が1の場合の解読温度は、真の温度より低い温度値を示すべきであると考えられるが、その原因が赤外線撮像装置の精度にあるのか、被写体真の温度の測定誤差に起因するものであるのか定かではない。

しかし、50°C~250°Cの温度範囲における温度差が最大で4%以内にとどまったことは、当研究の目的からみて満足すべき精度であると考ええる。

(3) 灰色体の測温実験については、実験の便宜上如何なる温度においても放射率がほぼ一定の値をもつものを主に選定した。

表3、4、5、6に示す各被写体の真の温度は、ガラスと金属については容器を用い、容器内に水及び食用油を入れそれぞれの温度に加熱した液の温度を真の温度とした。また、ガラス及び金属以外の被写体については裏面から加熱し、表面温度をサーモカップルと表面温度計で測定した値の平均値をもって真の温度としたが、高温になるほどサーモカップルと表面温度計の値にわずかな差異があった。従って各表の真の温度には若干の誤差が含まれると思われる。

(4) 表8は都市ガス炎を放射率を変えて撮像したものであるが、前3(2)イに示した各燃焼炎及び上昇熱気流の放射率を測定した結果、①燃焼物質、②燃焼温度、③燃焼炎及び熱気流の位置、④燃焼の状態・発煙の状態等によって放射率は逐次異なる値をとった。大略について述べると、都市ガス・アルコール燃焼炎(無色・淡青色炎)及び上昇熱気流の放射率は0.15以下の値をとり、白灯油・ガソリン燃焼炎(赤色炎)は0.6前

後、炎直上の黒煙の部分は0.9以上の値を示した。

木材の燃焼炎については発煙状態等によって異なるが、杉材を室内で燃焼させ炎がほぼ安定した状態で火炎を測定した結果0.4~0.8の値を示した。

(5) 本研究の終局の目的は、人体に障害を与える熱気流の上限温度とされている50~100°C付近の熱気流最大拡散帯域(地表面上)の分布をとらえることにあるため、各種燃焼源から発生する熱気流(50~100°C)の正確な温度を解読できる赤外線撮像装置の補正放射率を究明することが最底の条件となる。したがって各燃焼炎・熱気流(50~100°C)の放射率については、今後多くの実験を重ねて究明しなければならないと考える。

6. 屋外実験

(1) 松尾鉱山火災実験

昭和49年8月28・29日、岩手県岩手郡旧松尾鉱山住宅跡で実施された火災実験(消防庁消防研究所主催)に参加し、大規模火災における熱気流分布の状態を把握するため、火点建物の西側200mの位置から赤外線撮像装置を用いて実験火災の撮像実験を実施した。

火災規模は8月28日、木造2階建住宅6棟(1棟:347㎡)、8月29日、木造2階建住宅16棟(1棟:347㎡)であった。

(2) 自動車火災実験

昭和49年12月12日、当庁消防科学研究所が江東区辰己三丁目12号埋立地で実施した自動車火災実験にあわせて、車両及び市街地建物の燃焼時における熱気流分布の性状を把握するため、実験場中央交差点から東側150mの位置、地上高10m(空中作業車上)の場所に赤外線撮像装置を設置し、実験火災の撮像実験を実施した。

火災規模は車両(10ℓ型タンクローリー車含む)36台、木造プレハブ建物2棟(延39.6㎡、収容廃材4t)集積木材40tであった。

7. 実験結果

(1) 松尾鉱山火災実験結果

点火から鎮火まで1分経過毎に、モータードライブカメラと赤外線撮像装置で同一場所同一方向から撮影・撮像実験を実施したが写真はその一例である。写真2は点火15分後にカメラで赤外線撮像装置と同一場所(火点西側200m)から実験火災を撮影したもので、写真3は同時刻に赤外線撮像装置でとらえた熱像図である。図3は写真3の熱像図を温度解読したものである。

実験火災から200m隔てて撮像したものであるが、

写真2 点火15分後



写真3 点火15分後の熱像図

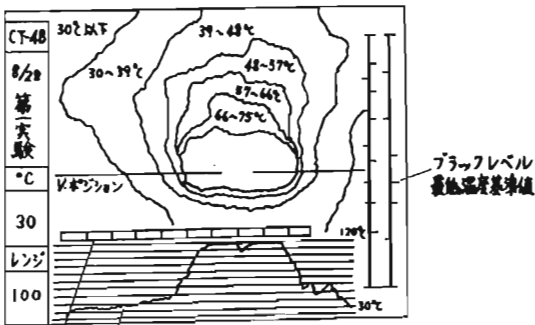
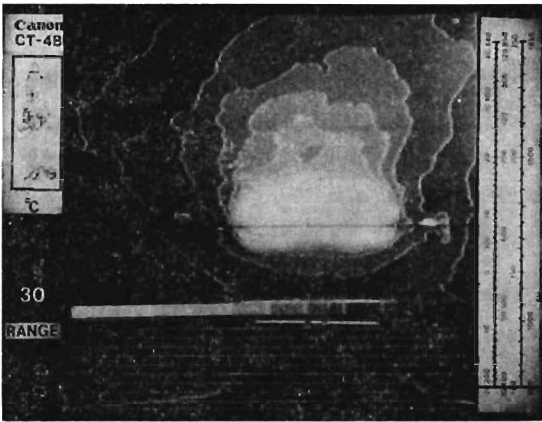


図3 写真3の温度解読図

写真でみる通り鮮明な熱像図を得た。

熱像画郭の示す被写体(実験火災)の実際の大きさは、赤外線撮像装置の視野範囲が次の関係で求められるので、この求めたVを尺度として、各熱像図から熱気流の高さを求めた結果は次の通りである。

← H ₁ →	→ H ₂ →	H ₁ = 0.17L + 101.6
視野 範囲		H ₂ = 0.268L + 41.8
		V = 2(0.16L + 52)
		L : 被写体との距離(mm)

表9 熱像図に基づく解読値(補正放射率0.4の時)

経過時間	熱気流温度	熱気流の上昇高さ
点火1分後	30℃	33m
" 2 "	30℃	35m
	40℃以上	29m
" 3 "	30℃	39m
	75℃以上	25m
" 4 "	30℃	47m
	75℃以上	25m
" 5 "	30℃	43m
	75℃以上	25m
" 6 "	30℃	53m
	75℃以上	31m
" 7 "	30℃	53m
	75℃以上	30m
" 8 "	30℃	55m
	75℃以上	32m
" 9 "	30℃	47m
	120℃以上	30m
" 10 "	30℃	47m
	120℃以上	30m
" 12 "	30℃	60m以上

(2) 自動車火災実験結果

写真4 点火15分後



写真5 点火15分後の熱像図



点火から実験終了まで30秒経過毎に、カメラと赤外線撮像装置で撮影・撮像実験を実施した。写真はその一例である。写真4は、火災実験場交さ点中央部から東側80mの位置において、点火15分後に撮影したものである。写真5は、交さ点中央部から東側150mの位置において、赤外線撮像装置で写真4と同時にとらえた熱像図である。なお、写真5のVポジション(図3参照)の位置は、写真4のポール頂部(地上高13m)に合わせた。したがって写真5下方の罫線上の波形は、地上高13mの水平方向の温度絶対値を示すものである。

撮像した熱像図すべての解説結果を記載することは略すが、75°C、120°C、200°Cの熱気流の上昇高さを簡記すると次の通りである。

- ア. 75°C以上の熱気流の上昇高さは、点火直後48mに達した。
- イ. 120°C以上の熱気流の上昇高さは、点火2分30秒後に40mに達した。
- ウ. 200°C以上の熱気流の上昇高さは、点火10分後には24mに達した。

8. 屋外実験の考察

(1) 屋外実験火災の撮像実験では、乾燥杉材燃焼炎の基礎実験で得た放射率0.4をもとに、赤外線撮像装置の補正放射率を0.4にした。従って屋外実験結果は、すべて補正放射率0.4で撮像した熱像図の解説値であって、熱気流の温度、上昇高さが各実験火災の正確な値を示しているとは限らないことをまず付言しておく。

(2) 松尾鉦山の実験建物は、斜面上のひな段地(4段)に並んでおり、それぞれの段差は約2mであった。

撮像位置からみると、最もカメラに近い建物が最下段で、遠方建物は2階の一部と屋根だけが3・4層に重なって視認できた。表9の熱気流の上昇高さは、最下段建物のG・Lを0mとして解説したものである。

燃焼の状態は、実験前日雨が降ったため緩慢であった。実験途中濃霧が発生したが、この時の熱像図は霧発生前が、4.5°C~9.0°Cの温度差をもつ温度帯域毎の不規則な楕円状の熱像図であったのに対して、4.5°Cの温度差を持つ温度帯域毎の円に近い大きな熱像図で表示された。これは、モータードライブカメラの同時刻の写真では火勢が強まり煙が拡大しているため、火勢による影響も考えられるが、火災周辺の霧が熱を受けたために撮像装置の感知被写体(蒸気)となったものと思われる。

赤外線は大気組成成分の共鳴吸収帯(炭酸ガス・オゾン・水蒸気等)によって減衰し、なかでも水蒸気は赤外線の主要な減衰器であるが、実験においては、撮像装置と実験火災の中間にある霧による障害は明確ではなかった。

実験2日目は撮像位置が風下になったため、煙が撮像装置の後方まで達し、実験火災が全く視認できない時もあったが、鮮明な熱像に変化はなく、確たる煙の障害はみられなかった。

しかし撮像装置と火災被写体間の煙は、火源から放射する赤外線を当然に減衰させるものであるため、煙濃度に対する減衰量は、今後継続実験して究明したい。

(3) 自動車火災実験は、赤外線撮像装置の測温範囲の各レンジ、表示温度階調、走査時間及び熱像表示形式等を種々切り替えて、温度解説に最も有効な熱像図を得る各レンジの組み合わせを究明することを主眼としたため、時間経過毎の比較による温度の読みは省略した。

(4) 松尾鉦山火災実験においては、別途に建物内(1階及び2階)と建物外棟間(6mポール頂部)の温度を測定した。

自動車火災実験においては、前にも述べた通り地上高13mのポール頂部のサーモカップルの位置に、赤外線撮像装置のVポジション(写真5)を一致させたが、サーモカップルはその設置点の温度を測定するのに対し、赤外線撮像装置のVポジションの波形は、火災及び熱気流を地上高13mで地上に平行に切断した火災及び熱気流面の最高温度を撮像するため、温度の比較はできなかった。

9. おわりに

今回の実験に使用した赤外線撮像装置は、産業用温度パターン計測(研究用・現業用)、自然科学用温度パターン計測あるいは医学研究用として開発されたものであるため、消防目的に応用していくためには、緊急時の取扱・撮像ができるように、測温レンジ及び

測温範囲%レンジの簡素化,あるいはファインダー機構の付加等幾点かの機構改造が必要である。さらに本研究の将来目標が,上空からの機上撮像によって熱気流温度分布をとらえることにあるため,それに伴う航空機搭載用防振装置,安定装置等の開発あるいはヘリテレビ等との連結機構等の開発がなされねばならず,残された課題がまだ少なくないため,今後引き続き研究を進めていくことが必要である。

参 考 文 献

和田 正信 共 訳 赤外線工学 (近代科学社)
中野 朝安