

機関室火災探知器の作動特性

桑田正明*、佐々木千一*、鎌田 実**、岩上 健**

1. はじめに

船舶の機関室には、火災の発生を初期の段階で探知できるような火災探知器の設置が義務づけられている。火災探知器としては、光電式またはイオン化式の煙探知器が一般に採用されており、特に光電式探知器の採用比率が高い。一方、煙探知器を配置する場合は、機関室内の気流を十分考慮すべきである¹⁾と指摘されているが、火災の発生率が高いM/E、G/E、ボイラの周辺や清浄機室等^{2) 3)}では、ダクトから多量の空気が供給されて複雑な気流分布となっているので、適切な配置を決定するのは非常に困難である。気流の状況によっては煙探知器が有効に作動しない場合が考えられる。

本研究は、通風条件下にある機関室内で煙探知器の最適な配置を行うための手法や指針を提示することを目的とする。本報では、発火源のほとんどが可燃性油であることから、探知器高さや気流の影響を考慮して、重油燃焼時の煙探知器の作動特性を明らかにする。将来、煙流動の数値シミュレーションにより探知器配置の検討を行う予定であるが、この重油燃焼データはそのための基礎データにもなりうる。

また、探知器配置の確認という点に目を向けると、火災探知器の効力試験は、通常は船舶の海上試運転時に実施されている。このとき、試験時の発煙方法として、重油を燃焼させる方法の他に、市販の自動車用緊急保安炎筒（以降、便宜的に発煙筒と呼ぶ）を用いる場合があるが、発煙筒と重油燃焼とでは発生する煙の性質（煙粒子の種類、粒子サイズ等）が基本的に異なり、また、発煙筒の本数（発煙量）に関しても、特に基準がなく経験的に決められているため、現行の発煙筒による試験が適切であるかどうか判定できないのが実状である。

そこで、本報では発煙筒を使用したときの実験結果についても併せて報告し、重油燃焼の場合と同等と見なせる発煙筒を用いた効力試験の方法についても述べることにする。

2. 実験環境

模擬火災実験は、能美防災（株）妻沼工場の実験設備を利用して実施した。本実験場の寸法は縦×横×高さ=14m×14m×12mであり、実験場には、不燃材のケイ酸カルシウ

ムを材料とする厚さ25mmの移動天井（12m×12m）が設置されているので、この移動天井に煙探知器を取り付け、天井を上下させることにより探知器高さを調整した。また、移動天井と側壁との間には隙間があるので、火災実験で発生した煙は、この隙間を通り、上方にある排煙口へと流れれる構造となっている。

なお、火災実験は4日間に渡って実施されたが、4日間とも天候は晴れ時々曇りであり、気象条件にはほとんど変化はなかった。（平均：気温24°C、湿度48%、気圧1015Hpa）

3. 実験方法

計測項目を表1に、使用した煙探知器の種類を表2に示す。煙探知器としては、能美防災（株）製のイオン化式及び光電式探知器（船用）を使用し、また、煙濃度変化を測定する目的で、同社製の光電式アナログセンサを使用した。

表1 計測項目

計測項目	計測機器
1. 警報時間	煙探知器
2. 煙濃度	アナログセンサ
3. 上昇気流の速さと温度	風速計
4. 上昇気流の温度分布	熱電対
5. 火源の温度	熱電対
6. 煙拡散の状況	ビデオカメラ

表2 使用した煙探知器の種類

探知器の種類	型式	個数
イオン化式探知器	FDS512	5
光電式スポット型 (散乱光式) 探知器	FDK512	5
光電式スポット型煙濃度 アナログセンサ	FDK038X	5

実験での計測状況を図1、図2に示す。火源の上方2~5mの高さに複数の煙探知器と煙濃度アナログセンサを設置し、発煙開始から警報発生までの時間と、その過程における煙濃度変化を計測した。両図においてH1は移動天井と煙探知器高さ、H2は上昇気流の速さ・温度計測点の高さを示す。

* 技術研究所 ** 東京大学

本論文は、平成13年日本マリンエンジニアリング学会春季講演会にて、「船舶機関室の火災探知器配置に関する研究（第1報）」として発表されたものである。

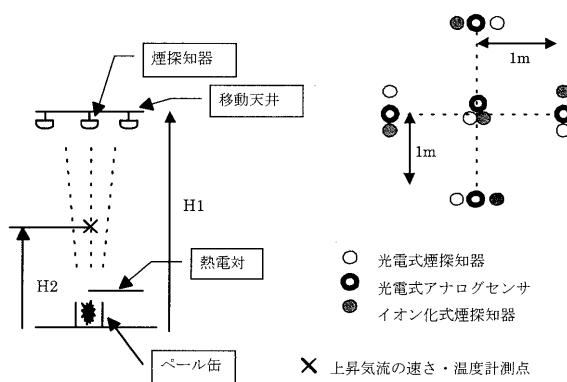


図 1 煙探知器の配置

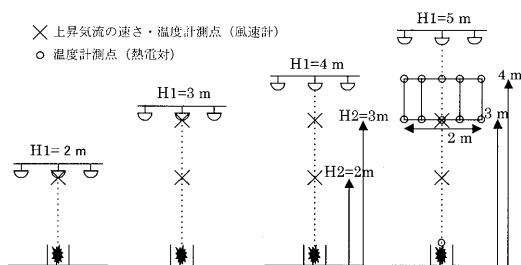


図 2 上昇気流の速さと温度の計測

実験の詳細を次に述べる。

(1) 火源

初期火災が比較的小規模であることを前提に、重油燃焼による方法として以下の(a)と(b)を、また、発煙筒による方法として(c)を検討した。重油燃焼と発煙筒との同等性に関しては、警報発生時間がほぼ同じになるときに同等と見なすことにした。

(a) A 重油 250cc+C 重油 250cc+ウエス 500g

A 重油 250cc と C 重油 250cc をブレンドした油を綿 100% 白色のウエス 500g に浸し、そのウエスを $\phi 30\text{cm}$ のペール缶で燃焼させた。

(b) A 重油 125cc+C 重油 125cc

A 重油 125cc と C 重油 125cc のブレンド油を $\phi 20\text{cm}$ の円形皿に入れ、燃焼させた。参考として A 重油 250cc のみ、C 重油 250cc のみの燃焼も実施したが、結果はほぼ同様であった。

(c) 発煙筒

国際化工株式会社製の自動車用緊急保安炎筒（商品名：サンフレイヤー、燃焼時間：5 分）を使用した。この発煙筒は、日本国内では容易に入手できるが、国外では一般的でなく、発煙筒に関する基準は国によって異なるようである。今回の実験では、とりあえず国内基準とすることを前提に、自動車用発煙筒を採用した。発煙方法に関しては、まず 1 本を垂直に立てて発煙させたところ、発煙筒の上向きの初速によってイオン化式、光電式とともに瞬時に警報を発し、この方法では重油燃焼の実験との同等性を見出せなかった

ので、発煙筒を $\phi 30\text{cm}$ のペール缶の中に横置きにする方法とした。また、発煙筒の本数で発煙量を制御し、ペール缶の周りにガスコンロを設置して上昇気流を与えることにした。

(2) 煙探知器の配置

図 1 のようにイオン化式煙探知器、光電式煙探知器及び光電式アナログセンサをそれぞれ 5 個配置し、移動天井の下約 10cm の位置に固定した。探知器を固定した移動天井の下側は平らな面であり、梁等はない。

(3) 上昇気流の速さと温度の計測

図 2 のように $H2=2\text{m}$ (または 3m) の高さにおいて、風速計を用いて上昇気流の上向き速さと温度を計測した。また、煙の広がりを計測する目的で、 $H1=5\text{m}$ の場合のみ、図 2 のように熱電対を配置して温度を計測した。熱電対は、3m と 4m の高さで、火源中心から横方向 $-1.0, -0.5, 0, +0.5, +1.0\text{ m}$ の位置と火源の近く（合計 11 箇所）に平面的に配置した。

(4) 横風の設定

$H1=3\text{m}$ のときに、 $\phi 56\text{cm}$ のファンを用いて横向きに気流を与えて実験した。その状況を図 3 に示す。火源上高さ 1.5m の位置で、横方向の気流速度が以下の(a)～(c)となるようにファンの調整を行った。

(a) 0.5 m/s

(b) 0.8 m/s

(c) 1.0 m/s

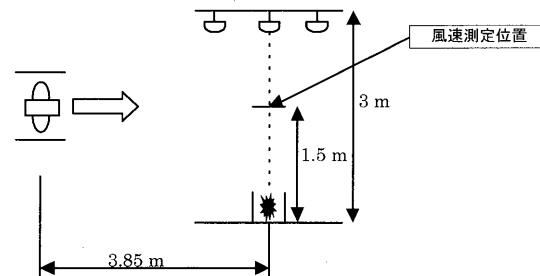


図 3 横風の測定

天井から見た光電式とイオン化式の煙探知器番号とファンの位置関係を図 4 に示す。この場合、横風は探知器番号 ⑤ → ① → ③ の方向に流れることになる。

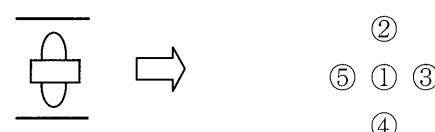


図 4 探知器とファンの位置関係

(5) 発煙筒使用時における熱源

(a) 热源の必要性

重油燃焼の場合は、火炎すなわち高温熱源によって上昇

気流が発生し、煙はこの気流に乗って上方に立ち登る。それに対して発煙筒の場合は高温熱源が存在しないので、初速はあるが重油燃焼ほどの上昇気流はないと考えられる。従って、発煙筒を用いるときには、重油燃焼の場合と同等の熱源を用意して実験する必要がある。

(b) 発熱量の決定

今回の実験では、市販のカセット式ガスコンロを用いて熱源とした。発熱量 2.1kW (1.800kcal/h) の小型ガスコンロを数台用意し、台数で発熱量を制御した。最初は、上昇気流の速さが重油燃焼の場合とほぼ同じになるように台数を決める予定だったが、重油燃焼の上昇気流の速さはかなり不安定で特定することができなかつた。そこで、重油と発煙筒とで煙の流れや警報時間がほぼ同じになるように、試行錯誤でガスコンロの台数を決めることにした。

(c) ガスコンロの上昇気流

ガスコンロの台数とコンロ上 2m の高さで計測した上昇気流の速さ・温度との関係を参考として表 3 に示す。コンロが複数の場合、上昇気流は図 5 のように互いに近づけた状態で測定を行つた。なお、ガスコンロの燃焼だけでは、煙探知器は警報を発しなかつた。

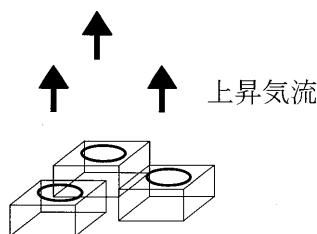


図 5 ガスコンロを用いた上昇気流の生成

表 3 ガスコンロが発生する上昇気流

ガスコンロの台数	速さ [m/s]	温度 [°C]
1	0.40	32.4
2	0.50	38.8
3	0.60	46.4

4. 実験結果

本研究では、火災を比較的短時間 (3 分以内) のうちに感知して消火活動を行えるように検討しているので、実験においては発煙開始から約 3 分間の計測を行つた。

4.1 発煙状況

それぞれの火源の発煙状況を以下に示す。

(a) A 重油 250cc+C 重油 250cc+ウエス 500g

3 分程度で燃焼するのは上部の油とウエスだけであり、下部には未燃焼の油やウエスがかなり残る。従つて、発煙量は、最上部のウエスをどれだけ重油に浸したかで決められる。煙の色は灰色であり、重油の燃焼による煙とウエス

の燃焼による煙とが混在しているように思われる。発煙にはムラがあり、また、重油のみの場合と比較すると発煙量は少ない。

(b) A 重油 125cc+C 重油 125cc

発煙量は油量ではなく、皿に重油を注いだときの燃焼面積 (この実験では $\phi 20\text{cm}$) で決められる。ウエスを用いたときと比較すると、煙の色は黒に近く、発煙量も多い。

A 重油 250cc、C 重油 250cc を単独で燃焼させた場合もほぼ同様の状況であったが、発煙量は C 重油のみより A 重油のみのほうが若干多く、煙の色はほぼ同様で黒に近い色であった。

(c) 発煙筒

発煙筒 1 本の場合、発煙量は A 重油+C 重油の場合と同程度であったが、発煙開始時には多量の煙が発生した。煙の色は白である。また、目視による観察では、重油燃焼のときよりも濃度が低いように見える。発煙筒 2 本の場合は、当然のことながら発煙筒 1 本のときよりも発煙量が多く、濃度も高かった。

以降、火源の種類を以下のように略す。

- A 重油+C 重油+ウエス ----- A+C+ウエス
- A 重油+C 重油 ----- A+C
- A 重油のみ、C 重油のみ ----- A のみ、C のみ

4.2 警報時間

一例として、A+C の警報時間を表 4 に示す。表中の①～⑤は図 4 で示した探知器番号である。H1=3m の場合は、0.5、0.8m/s の条件で横風を与えたときの結果についても示した。上昇気流は H2=2m で計測したが、予想以上に不安定で、上昇気流の値にはあまり信頼性がない。実験では表 4 のようなデータを各火源別に計測した。

警報時間に関しては、考察のところで整理した結果を示し、詳細に検討する。

4.3 アナログセンサによる煙濃度の計測

A+C で探知器高さ 5m のときの煙濃度変化を図 6 に示す。今回使用したアナログセンサは光電式スポット型であり、煙濃度によって変化する電圧を 120 段階のレベルとして出力するタイプである。実際の煙濃度 (減光率: [%/m]) は煙感知器感度試験機を使って得られたセンサ出力 [V]-減光率 [%/m] 曲線 (校正カーブ) から求めることになるが、本報では煙濃度の相対的な変化を求めるため、センサ出力のままの表示とした。

例えば出力レベル 40 は減光率 8%/m に相当し、この値は探知器メーカーによる舶用の警報設定と一致する。つまり、レベル 40 に達した時点で警報が発生する。図 6 で、5 箇所で測定した煙濃度変化を比較すると、全てのセンサ出力がほぼ同様の変化傾向を示しており、(H1=5m の高さでは) 2 分程度でレベル 40 すなわち警報レベルで安定となっていることがわかる。ただし、安定状態でのばらつきが大きく、このことは、表 4 の H1=5m における警報時間

がばらついていることからも理解できる。

表 4 A+C の警報時間

H1 [m]	警報時間 [sec]					上昇気流 風速 温度 [m/s] [°C]		
	上: イン化式、下: 光電式		①	②	③	④	⑤	
2	6 34	13 70	6 55	10 65	20 90			0.05 30.0
2	6 13	11 24	7 14	7 17	11 25			0.22 39.0
3	13 55	15 34	13 32	13 42	15 69			0.13 27.8
3	13 34	13 32	13 31	13 58	12 72			0.20 30.9
3	21 107	25 76	12 37	12 41	20 113	横風 0.5m/s		
3	25 69	28 41	14 22	12 29	16 139	横風 0.5m/s		
3	38 133	37 106	20 42	26 58	37 -	横風 0.8m/s		
3	54 76	50 105	20 54	30 71	45 -	横風 0.8m/s		
4	16 38	22 45	16 45	15 38	22 93			0.18 31.6
4	28 52	28 48	29 47	30 74	29 90			0.14 29.9
5	20 111	26 189	24 233	20 64	24 106			0.18 32.8
5	24 83	32 -	28 88	22 57	24 115			0.19 28.5

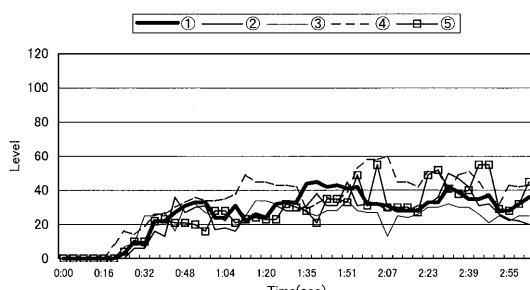


図 6 計測位置別の煙濃度変化 (A+C)

● 煙濃度変化と探知器高さとの関係

図 7 は、A+C の火源において、火源直上にある探知器(探知器番号①)の煙濃度変化を探知器高さごと (H1=2, 3, 4, 5m) に示したものである。H1=2m の場合、煙濃度が急上昇してすぐに警報が発生する様子が明らかであるが、探知器が高い位置に設置されるほど煙濃度は低くなり、警報が発生する限界高さは約 5m となっている。また、どの高さにおいても、煙濃度は 3 分以内にほぼ安定の状態となっている。

● 横風の影響

図 8 は、探知器高さ 3m、A+C の火源において、火源

直上にある探知器の煙濃度変化を、横風 (0.8m/s) ありとなしの場合で比較したものである。横風がある場合には、目視による観察で煙が探知器③の方向に逸れていることが確認されたため、火源直上では煙濃度が当然低いと予想されたが、濃度低下の様子は図 8 で顕著に現れている。この状況は、表 4 の光電式探知器においても明らかであり、③以外の探知器においては警報時間がかなり遅くなり、警報が発生しない場合もある。

● 煙濃度変化と火源の種類との関係

図 9 は、探知器高さ 4m、火源が A+C、A のみ、C のみ、A+C+ウエスの場合で、火源直上にある探知器の煙濃度変化を比較したものである。4m の探知器高さにおいては、ウエスを使用しない火源のいずれもが、3 分程度で煙濃度が安定となっているのに対して、A+C+ウエスの場合は、1 分以内に安定状態となり、かつ、この例のように警報レベルに達しない場合がある。A のみ、C のみをそれぞれ単独に燃焼させた場合は、A+C のブレンド油の燃焼とほぼ同じ傾向となっている。

また、図 10 は探知器高さ 4m、火源として発煙筒 1 本と 2 本を使用した場合で、火源直上にある探知器の煙濃度変化を示したものである。発煙筒 2 本の場合、煙濃度は 3 分後においてもやや上昇の傾向を示しているが、1 本の場合は、1 分程度で安定となっている。図 9 と図 10 を比較すると、無風状態においては、(ウエスを使用しない) 重油燃焼と発煙筒を 1、2 本程度使用した場合がほぼ同等と見なすことができる。

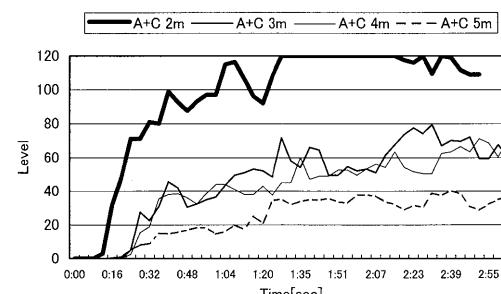


図 7 探知器高さ別の煙濃度変化 (A+C)

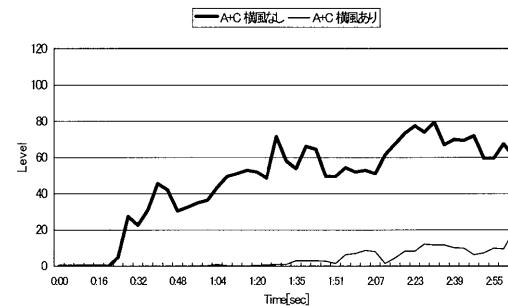


図 8 横風がある場合の煙濃度変化 (A+C)

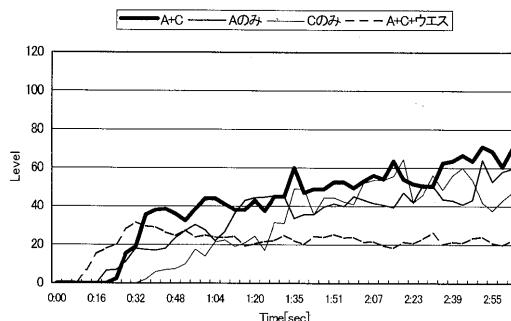


図 9 火源別の煙濃度変化

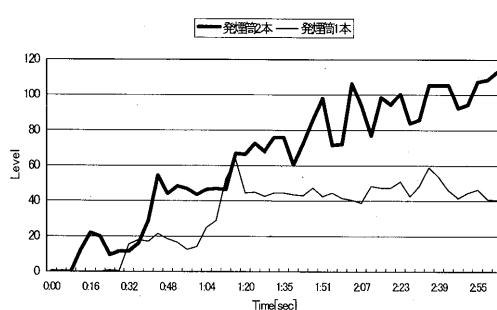


図 10 発煙筒の煙濃度変化

4.4 上昇気流温度

熱電対による上昇気流温度の計測結果について以下に述べる。図 11 に熱電対のチャンネル番号と配置との関係を、表 5 と図 12 に計測結果を示す。表 5 によれば、火源の違いによる上昇気流の温度差はほとんどなく、火源上 4m の高さにおいて、中心部温度と周囲温度との差は 10~13°C 程度となっている。

図 12 では、上昇気流が若干右側に寄ってはいるがほぼ対称であり、同図より煙の水平方向への拡散の幅は、高さ 3m で 0.5~1m 程度、高さ 4m で 1~1.5m 程度となっている。また、この幅は目視による煙の広がりとも大体一致しており、無風状態での煙の拡散はこの程度と考えられる。

表 5 上昇気流と火源の温度

	A+C	A+C+ウエス	発煙筒 1 本 コンロなし
CH1	17.0	16.7	17.4
CH2	22.3	22.3	22.6
CH3	28.1	30.1	27.0
CH4	23.4	26.7	22.8
CH5	20.0	20.8	19.9
CH6	17.5	17.6	18.6
CH7	19.2	19.4	20.4
CH8	22.0	27.1	21.2
CH9	21.0	23.6	21.5
CH10	19.3	19.9	21.2
CH11	104.9	206.7	46.3

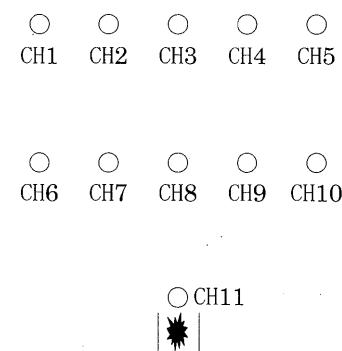


図 11 热電対の配置

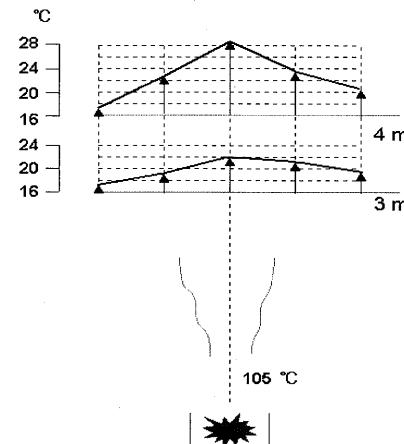


図 12 A+C の場合の温度分布

5. 考察

5.1 警報時間

イオン化式及び光電式探知器で計測した警報時間に関する全てのデータを表 6 の基準に従って整理し、煙探知器の作動特性を調査する。

表 6 警報時間の判定基準

判定	警報状況
◎	1 分以内に警報が鳴る
○	3 分以内に警報が鳴る
△	警報が鳴らない場合がある
×	ほとんど警報が鳴らない
-	実施せず

無風状態で、探知器高さを変化させたときの警報状況を表 7 に示し、探知器の種類別に考察する。

● イオン化式

火源の種類や探知器高さによらず、1 分以内に警報が発生している。

表 7 無風状態における警報状況

	火源	探知器高さ (H1)			
		2m	3m	4m	5m
イオン化式	A+C+ウエス	◎	◎	◎	◎
	A+C	◎	◎	◎	◎
	発煙筒1本 コンロなし	◎	◎	◎	◎
	発煙筒2本 コンロ3台	-	◎	◎	◎
光電式	A+C+ウエス	◎	◎	△	×
	A+C	◎	◎	◎	○
	発煙筒1本 コンロなし	◎	○	○	△
	発煙筒2本 コンロ3台	-	◎	◎	○

● 光電式

火源の種類や探知器高さにより警報時間が異なる。特に、A+C+ウエスの場合は発煙量が少ないため、5mの高さになると警報が発生しない。発煙筒1本(コンロなし)の場合も同様の傾向が見られ、5mになると警報が鳴らない場合がある。表7の中では、A+Cと発煙筒2本(コンロ3台)のケースが比較的良好であり、5mの高さにおいても3分以内に警報が鳴っている。

次に、探知器高さ3mで、横風がある状態での警報状況を表8に示す。

● イオン化式

発煙筒1本(コンロなし)の場合を除き、良好な結果を示している。

● 光電式

発煙筒1本の場合は、ガスコンロを数台設置しても警報が鳴らない。発煙筒1本程度では元々煙濃度が低く、ガスコンロを設置しても煙が横風で流れ拡散してしまうので警報点に達しないものと考えられる。発煙筒2本の場合は、ガスコンロの有無で警報状況が異なるが、A+Cのケースと概ね同じ傾向である。

5.2 煙の流動状況

横風と煙の流れとの関係を考察するため、図13に各実験における煙の流動状況の概略を示す。横風が0.5m/sのときには、風速がそれほど速くないため煙が大きく曲がることはなく、探知器③の方向にはほぼ真っ直ぐ拡散しながら流れている。それに対して0.8m/sの風速のときには、A+C、発煙筒1本、発煙筒2本(コンロなし)の実験において、煙が大きく曲がる様子が観察される。最も大きく曲がるのは発煙筒2本(コンロなし)の場合であり、煙が③の探知器を覆うことはほとんどない。

表8 横風状態 (H1=3m) における警報状況

	火源	横風 [m/s]		
		0.5	0.8	1.0
イオン化式	A+C+ウエス	◎	-	◎
	A+C	◎	◎	-
	発煙筒1本 コンロなし	-	△	-
	発煙筒1本 コンロ2台	-	◎	-
	発煙筒2本 コンロなし	◎	◎	-
	発煙筒2本 コンロ3台	◎	◎	-
光電式	A+C+ウエス	○	-	△
	A+C	◎	○	-
	発煙筒1本 コンロなし	-	×	-
	発煙筒1本 コンロ2台、 3台、4台	-	×	-
	発煙筒2本 コンロなし	◎	○	-
	発煙筒2本 コンロ3台	◎	◎	-

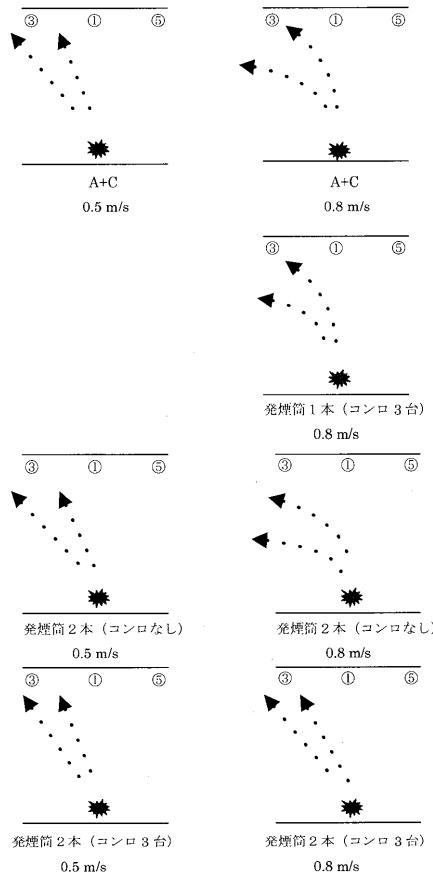


図13 煙の流れ

ガスコンロの上昇気流の影響は、0.8m/s の風速のときに顕著に見られる。発煙筒 2 本の場合、ガスコンロなしの状態で大きく曲がっていた煙は、ガスコンロ 3 台の上昇気流によって押し上げられ、ほぼ真っ直ぐ③の探知器に向かっている。

5.3 同等性の検討

警報時間のデータから判断すると、重油燃焼の場合と発煙筒を使用した場合とで、同等と見なせるのは

重油燃焼	発 煙 筒
A+C	発煙筒 2 本 (コンロなし)
	発煙筒 2 本 (コンロ 3 台)

の組み合わせである。重油燃焼のケースとして、A のみ、C のみの場合も同等と見なせる可能性があるが、本実験ではデータ数が少ないので除外することにする。

また、上記の組み合わせで煙の流れの状況を考慮すると、5.2 より発煙筒 2 本 (コンロなし) のケースは煙が横風の影響で大きく曲がっていたことから、一般には、ガスコンロのような熱源を設置したほうが A+C の発煙状況に近くなると考えられる。今回の横風の実験では、探知器高さ 3m のケースしか確認できなかったが、4m 以上の高さでも同様と考えられ、機関室内の気流分布を無視できない場合には、熱源を設置して上昇気流を与えた方が、より現実の火災に近くなると思われる。従って本研究では、

$$\begin{array}{l} \text{A 重油} + \text{C 重油} = \text{発煙筒 2 本} \\ (\text{燃焼面の直径: } 20 \text{ cm}) \quad (\text{熱源付き}) \end{array}$$

を同等性に関する結論としたい。

発煙筒使用時の熱源としては、今回の実験では 3 台のガスコンロ (合計発熱量: 6.3kW、5,400kcal/h) で実施したが、一般に市販されているガスコンロの発熱量は 1 台あたり 3kW~3.5kW なので、市販のガスコンロを 2 台程度設

置すれば同等の熱源を確保できると考えられる。

6. まとめ

船舶の初期火災 (油火災) を想定して重油を用いた燃焼方法を検討し、火災探知器を適正に配置するための基礎データを得るため、重油燃焼による模擬火災実験を行った。実験の結果、火源の種類や煙探知器の作動特性に関して以下の知見を得た。

- ウエスに重油を浸して燃焼させるよりも、重油のみ (A 重油、C 重油またはブレンド油) で燃焼させる方が煙濃度が高い。
- 重油を燃焼させた場合、光電式探知器はイオン化式探知器よりも感度が劣る。
- 光電式探知器の場合、探知器設置位置が高いほど煙を感知し難くなる傾向が顕著であり、設置高さとしては火源上 5m が限度である。
- 光電式探知器は気流の影響を受け易く、0.8m/s 程度の横風でも煙は大きく横に逸れるので、火源直上の煙濃度は極端に薄くなり警報が作動しない場合がある。
- 梁等がない平らな天井に探知器を取り付けた場合、探知器位置での煙濃度は 3 分以内に安定となる。

また、船舶の火災試験において、重油の替わりに自動車用発煙筒を使用する場合を考慮し、同等性に関する実験を行った。その結果、重油のみの燃焼と発煙筒 2 本を使用したとき (熱源付き) とがほぼ同等と見なせることがわかった。

参考文献

- 1) 太田, 日本舶用機関学会誌, 32-6 (1997), 450
- 2) (財)日本海事協会, 機関室火災の防止指針, (1994), 7-23
- 3) 山本, 日本海事協会誌, 252 (2000), 1-21