REPORT OF FIRE RESEARCH INSTITUTE OF JAPAN
Serial No. 44 September 1977

消防研究所報告

通巻 44 号 1977年 9 月

目　次

研　究

石油タンク火災の底部泡注入による消火……中久喜　厚…(1)
国産飛行艇改装機による消火液の空中散布実験……渡辺彰夫・笠原保信・金田節夫…(13)

消　防　研　究　所
東　京　都　三　鷹　市

REPORT OF FIRE RESEARCH INSTITUTE OF JAPAN

Serial No. 44 September 1977

— Contents —

MEMOIR

Extinguishment of Oil Tank Fires by Base Injection of Foams
.....Atsushi Nakakuki···(1)

Test on Aerial Fire Attack using Four-Engined Flying Boat
..... Akio Watanabe, Yasunobu Kasahara and Setsuo kaneda···(13)

Published by
Fire Research Institute of Japan.
14-1, Nakahara 3-chome, Mitaka, Tokyo, Japan.

石油タンク火災の底部泡注入による消火

中久喜　厚

（昭和52年6月18日受理）

1. まえがき

石油タンク消火用の固定設備としては，発泡器をタンク側壁頂部に取付ける方式が採用されているが，この方式では発泡器とこれに連結する配管がタンクの火災や爆発によって破壊されることが多い。また消火のために，モニターノズルなどで泡をタンク壁をこえてタンク内に投入する方式もよく使われるが，この方式では泡が風または熱気流によって運び去られ，泡を効果的に燃焼油面上に送ることができないことがしばしばある。そこで，底部に近いタンク下部から泡を注入する底部泡注入法が多くの利点をもつ消火方法として古くから検討されてきたが，最近になって高背圧下で発泡倍率の低い，ドレネジ時間の適当な泡を発生できる発泡器と油に汚染されても燃えにくい泡を作るふっ素系界面活性剤が開発されるに及んで，底部泡注入による消火法は世界的に注目を浴び実用化に向いつつある。従来，底部泡注入による石油タンク火災の消火実験は，直径35 m[1] までのタンクについて，各種燃料，泡消火剤を用いて行われてきたが，まだ泡の油による汚染の機構，消火の確実性などについて明確な結論をえていない。これらの点を解明するため，比較的小型のタンクを用いて底部泡注入に関連する諸実験すなわち高背圧発泡器から発生する各種泡消火剤の泡の性質，油面上の泡の展開状況，泡の油による汚染の測定や消火試験を行ったので，その結果を報告する。

2. 実験の方法

実験用タンクには，$1.5^m \times 1.5^m \times 1.45^{mH}$の二重壁の直方体のもの，$1.2^m\varphi \times 1^{mH}$，$2^m\varphi \times 1.5^{mH}$の円筒形のものが使用された。また，泡の噴出後の状況を横方向から観察できるように，相対する二面がガラス張りの$0.45^m \times 0.45^m \times 2^{mH}$の直方体容器が使用された。一辺1.5 mの正方形断面の二重壁タンクの形状・寸法の詳細については別の報告[2] を参照されたい。燃料には，ガソリン，軽油，B重油が，泡消火剤にはたんぱく3％型，6％型，ふっ化たんぱく3％型，水成膜6％型が用いられた。高背圧発泡器には，Table 1 に示される

Table 1　Performance of foam generators used.
Application pressure ：10 kg/cm^2 .

Foam generator	Mean solutin flow rate 1/min	Expansion at back pressure 1 kg/cm^2	Maximum allowable back pressure kg/cm^2
No. 1	9	3 − 4	1.3
No. 2	11.5	2 − 3	2.3

仕様性能をもつ2種のものが使用された。実験装置の系統図をFig. 1に，また発泡器とその周辺の配管の状況をFig. 2に示す。泡溶液予混合タンク内の圧力は10.5 kg/cm^2 までの範囲で変られる。発泡器の両側にはバルブV_1とV_2を置き，V_2にはボールバルブを使用しバルブの開度を微調整できるようにした。発泡器の背圧は，圧力計P_2に示されるが，V_2を調整することにより任意の圧力に設定された。各種泡消火剤について，発泡倍率，還元時間及び流量が測定されたが，その場合にはV_4は閉じられ，V_3を通して泡を流し泡試料を採取した。タンクを用いる実験は，コールドテストと消火実験とに分けられる。コールドテストとは，油を燃焼させないで泡をタンク底部から油内に注入し，泡の油面上の展開や油による汚染を調べる実験である。これらの実験では，V_3は閉じられV_4が開かれるが，タンクへの流量を減少させる必要のあるときは，V_3を適度に開き余分の泡をV_3の方向に流出させるようにした。消火実験では，燃料や泡消火剤の種類，予燃時間，泡溶液供給率を種々に変化させた。消火実験の結果から，90%コントロール時間と消火時間が求められた。90%コントロール時間は泡適用開始から，ふく射照度が泡適用前の10%に低下するまでの時間とした。また，泡をタンク側壁頂部から燃焼油面上に流下させる方式で消火実験を行い，底部泡注入法の結果と比較した。

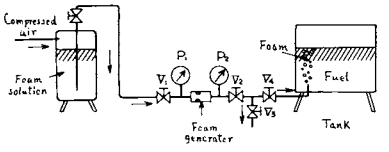

Fig. 1　Schematic view of experimental apparatus.

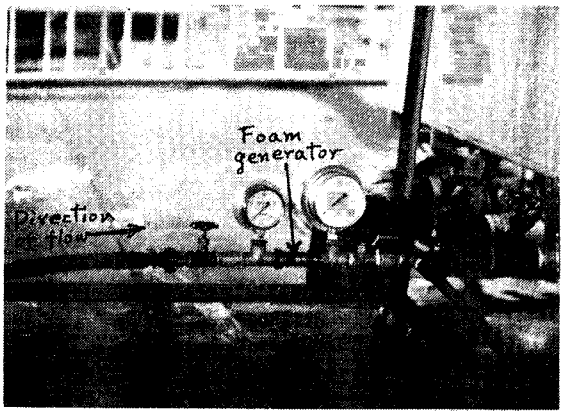

Fig. 2　Foam generator and pipe-line.

3. 結果と考察

3.1　泡の性質

発泡器の入口圧力が9.6 kg/cm^2 であるときの種々の泡消火剤から作られた泡の発泡倍率と背圧との関係をFig. 3に示す。同じ発泡器から得られる泡の発泡倍率は，泡消火剤の種類により多少変化し，また背圧の増加とともにわずかながら減少する傾向を示す。入口圧力を変化させたときの各発泡器からえられる各種泡の発泡倍率と背圧の関係をFigs. 4～8に示す。入口圧力を低くすると，発泡倍率は低下する。還元率すなわち泡から還元した液体の体積のその泡を作った液体の体積に対する比(%)は，時間とともにFig. 9のように増加する。25%還元時間と発泡器の入口圧力，背圧との関係は，やはりFigs. 4～8に示されている。25%還元時間は背圧の上昇とともに，初めは増大し，最大値に達した後減少し，また入口圧力の低下とともに急激に減少する傾向を示している。発泡器を通過する泡溶液流量の背圧による変化をFig.10に，入口圧力による変化をFig.11に示す。背圧による流量の変化は，測定された背圧の範囲でほとんど認められなかった。

3.2　コールドテスト

(1)　泡の展開　　泡が油中に放射され浮上する際には，放出口から10 cm位までは泡は塊りになっているようにみえるが，さらに浮上したところでは微細な泡の小片に分裂している。泡の注入開始と同時にタンク内の油は底部から油面にかけて大きな対流を形成することが知られている[3]。泡の浮上部では，油面の盛上りのために，比較的広い油面で乱れている。油面の乱れて

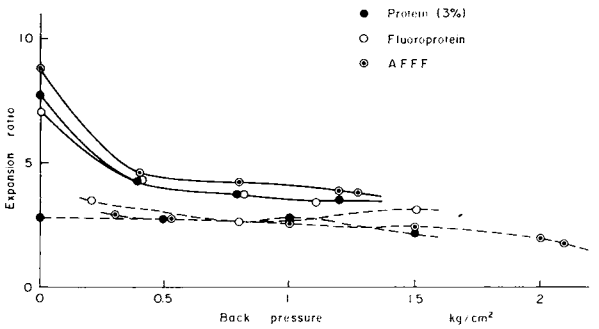

Fig. 3 Expansion vs. back pressure for various foams. Real line : foam generator No.1 ; broken line : foam generator No.2 ; application pressure: 9.6 kg/cm^2.

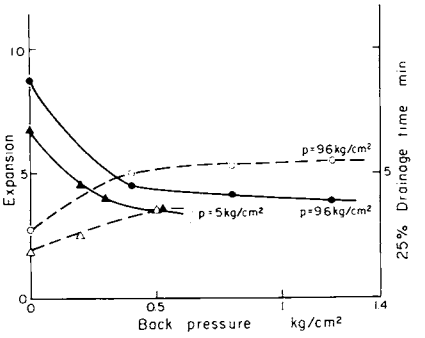

Fig. 6 Expansion and 25% drainage time vs. back pressure for AFFF (6%) foams. Foam generator : No.1.

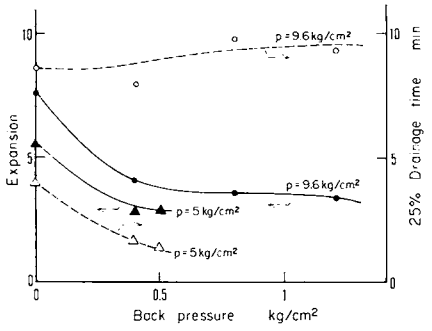

Fig. 4 Expansion and 25% drainage time vs. back pressure for protein (3%) foams taking the application pressure as the parameter. Foam generator : No.1.

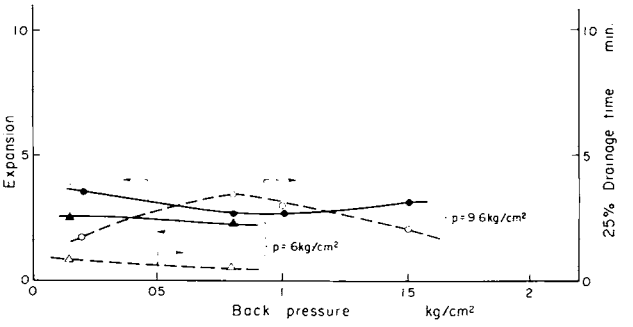

Fig. 7 Expansion and 25% drainage time vs. back pressure for fluoroprotein (3%) foams. Foam generator : No.2.

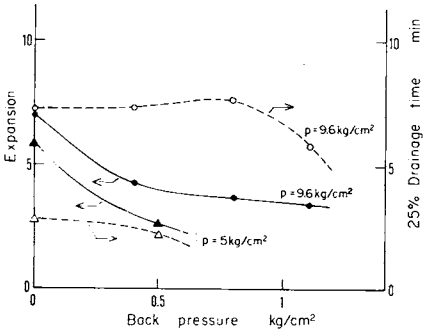

Fig. 5 Expansion and 25% drainage time vs. back pressure for fluoroprotein (3%) foams. Foam generator : No.1.

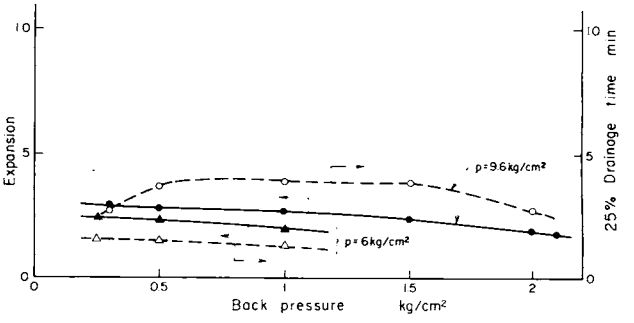

Fig. 8 Expansion and 25% drainage time vs. back pressure for AFFF (6%) foams. Foam generator : No.2.

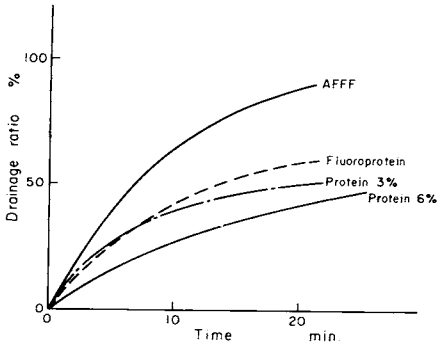

Fig. 9 Drainage curves for various foams. Application pressure : 9.6 kg/cm^2 ; expansion 2.8-3.3.

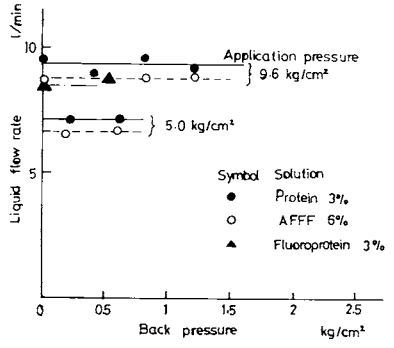

Fig.10 Flow rate of foam solutions vs. back pressure for the foam generator No.1.

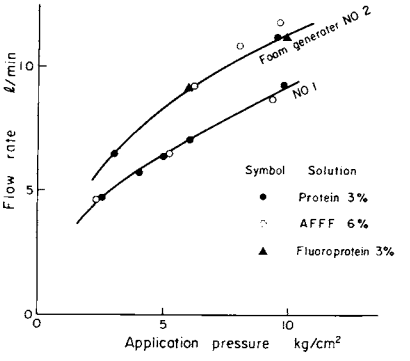

Fig.11 Flow rate of foam solutions vs. application pressure for various foam generators.

いる領域を乱流域とよぶ。油面に浮上した微細な泡の小片は，乱流域内で合体し，平べったい泡の塊りとなる。泡の塊りは油面の流れに乗って乱流域から放射状に拡がる。最初にできた泡の塊りが油面上を拡がってゆく状況をFig.12に示す。底部泡注入による火災のコントロールの遅速は，最初の泡の塊りが泡浮上部から最も遠い壁面に到達するまでの時間に依存する。Fig.13は直径1.2mのタンク内の重油面上を最初にできた泡の塊りすなわち泡先端が展開してゆくときの泡先端で包まれた部分の展開面積速度の経時的変化を示しているが，粘度の低い水成膜泡の方がたんぱく泡より展開の速いのがわかる。最初の展開速度の大きいのは，乱流域で油面の流れが速いためであろう。泡先端の展開面積速度は，乱流域を離れると一定になるが，泡先端が乱流域から最も遠い壁面に近づくと減少する傾向を示す。泡の先端が壁面に達した後は，後から来た泡の塊りが次第に蓄積されてゆき，泡層を形成する。泡層の範囲はFig.12のように次第に乱流域の方向に拡大し，露出油面はしたがって縮少する。浮上した後油面上を流動してゆく泡の塊りが泡層に衝突する際には，泡層の下側に吸収されてゆくようにみえる。

油面に浮上後の泡の性質（発泡倍率，25%還元時間，臨界せん断応力）と泡注入部のそれとの間には一般に大きな差のあることが指摘されてきたが[1,4]，今回の実験ではTable 2 に示す通り，油層が1.1 m と薄いためか，その差はほとんど認められなかった。

(2) 泡の油による汚染　一辺 0.45 mの正方形断面のタンクを用いて，厚さ1.1 mの燃料層を上昇した後の泡の油による汚染率を測定した結果がFigs.14, 15である。燃料がガソリンの場合にはFig.14，軽油の場合にはFig.15のようになる。これらの図から，汚染率は発泡倍率の増大とともに急激に増大するのがわかる。ガソリンの場合，水成膜泡の汚染率は，ほかの泡に比べ発泡倍率の高いところでは大きいが，発泡倍率が2.5位になるとむしろ小さくなる傾向を示す。軽油の場合の泡の汚染率は，ガソリンの場合に比べ明らかに高くなる。以上の結果は，Evans et al. によりたんぱく泡とふっ化たんぱく泡について既に得られている結果とほぼ一致している[4]。泡の通過する油層の厚さhの汚染

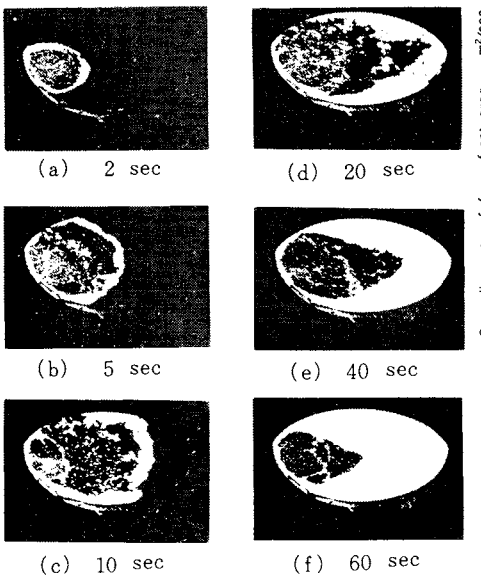

Fig.12 Developement of protein foams on the liquid surface. Time after the appearence of initial foams on the liquid surface is indicated in each photograph. Tank diameter : 1.2m ; fuel: gasoline ; expansion : 3.5 ; solution flow-rate ; 9.4 l/min.

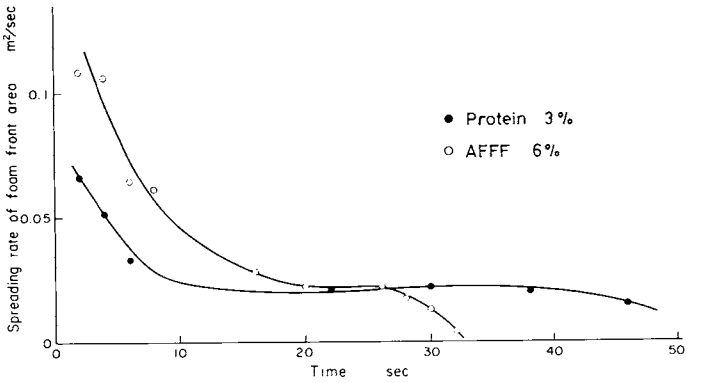

Fig.13 Spreading rate of area enclosed by the initial foam front from the time of appearence of initial foams on the fuel surface. Fuel : B-heavy oil; tank diameter: 1.2m; foam solution application rate : 5.0 l/min.m^2;expansion : 4.0 ; 25 % drainage time : 2 min

Table 2 Comparison of properties of foams sampled on the fuel surface and at the inlet of the tank. Fuel : gas oil ; fuel thickness : 112 cm.

Foaming agent	Sampling position	Application pressure kg/cm^2	back pressure kg/cm^2	Expansion	25% drainage time min : sec
Protein(3%)	Fuel surface	6	1	2.8	2 : 48
	inlet	6	1	2.6	2 : 10
AFFF(6%)	Fuel surface	9.6	0	3.8	3 : 17
	inlet	10	0	3.8	3 : 57
	Fuel surface	9.6	1	3.0	4 : 55
	inlet	9.6	1	2.4	5 : 06

率への影響は，h の変化が少なかったためか，はっきりしなかった。泡の油中への噴出中の状況をFigs.16～18に示す。同じ泡溶液流量では，たんぱく系の泡の分裂後の泡の小片の大きさは，発泡倍率に余り影響されない。このように分裂後の泡の小片の大きさが発泡倍率に依存しないならば，発泡倍率の高いほど泡溶液の単位体積当たりの泡の全表面積すなわち泡と油との接触面積は大きくなり，汚染率もしたがって増大するものと考えられる。また，Fig.16とFig.17の比較からもわかる通り，水成膜泡はたんぱく泡よりも細かく分裂するのがわかる。水成膜泡は疎油性がほかの泡に比べ大きいといわれるが，ガソリンの場合の汚染率が比較的高い発泡倍率(3.5以上)でほかの泡より高いのは，泡の小片がより細かくなるために，それだけ油との接触面積が大きくなるからであろう。

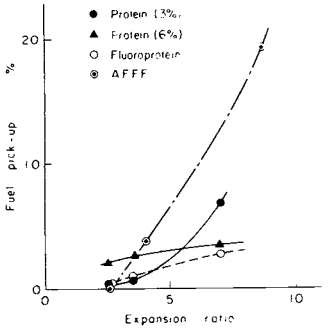

Fig.14 Fuel pick-up vs. foam expansion ratio for various foams injected vertically upward into gasoline. Foam solution flow rate : about 9.0 l/min ; nozzle diameter : 19mm ; fuel thickness : 1.1m.

軽油の場合の汚染率がガソリンの場合に比べ一般に大きくなるのは，軽油の粘度がガソリンよりも高いためとする説もある。[4] しかし，泡と油との親和性の泡や油の種類による違いなども考慮に入れなければならないであろう。

泡が油面に浮上してから油面に沿って移動するときの泡の油による汚染もありうる。泡粒同志が乱流域で合体するとき，またこの合体した泡の塊りが既に形成されている泡層に衝突するときの勢いで燃料が泡中にすくい上げられるといわれている。[5] 泡の塊りが泡層に蓄積されてゆく過程で生じた泡層のアコーディオン状のしわの谷に燃料の溜りのできているのがしばしば観

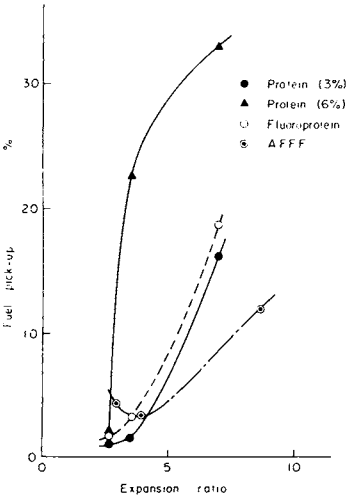

Fig.15 Fuel pick-up vs. foam expansion ratio for various foams injected vertically upward into gas oil. Foam solution flow rate : 9.0 l/min ; nozzle diameter 19mm ; fuel thickness : 1.1 m.

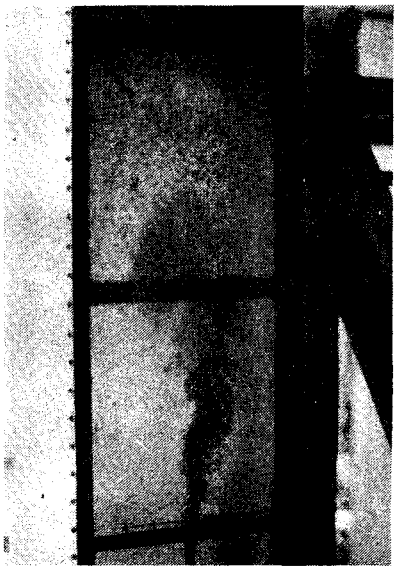

Fig.16 Protein foams injected into gasoline. Solution flow rate : 9.4 l/min ; expansion:3.5.

Fig.17 AFFF injected into gasoline. Solution flow rate : 8.8 l/min ; expansion : 3.9.

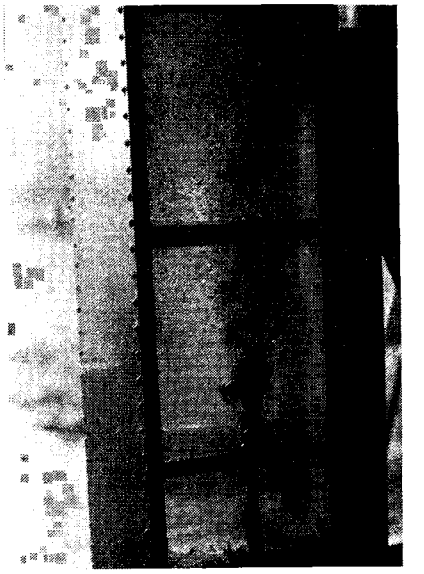

Fig.18 Protein foams injected into gas oil. Solution flow rate : 9.4 l/min ; exqamsion :3.5.

察された。

3.3 消火実験

3.3.1 ガソリン火災の消火実験

消火実験の結果の一部をTable 3 に示す。また，タンクから一定の距離におかれたふく射計により測られた火炎からのふく射照度の予燃焼中および送泡後の変化をFig.19に示す。ふく射照度は送泡開始後しばらくは予燃焼中と変化ないが，その後急激に低下し始める。炎も急激に小さくなり，乱流域の露出油面およびタンク壁面と泡層の隙間に小さな火炎(リム火炎)が残るが，しばらくしてリム火炎は消滅し，乱流域だけに火炎が残る。コールドテストの泡展開試験の結果との比較から，ふく射照度の急激な低下は，最初に浮上した泡の先端が泡浮上部の反対側の壁面にほぼ到達した時点に相当するのが知られる。

乱流域は，油面の盛上りのために，周囲の泡層が相当厚くなってからでないと泡層でおおわれない（Fig. 12参照)。したがって比較的大規模なタンク火災の消火の場合には，乱流域の露出油面の面積がある一定値以下，または泡層の厚さがある一定値以上になったときに，泡の放出を停止し，泡の戻りによって露出油面を完全に泡層でおおい消火させるのが普通である。今回の実験では，タンクの直径が小さいために，泡放出停止のタイミングの判定が困難であったため，泡層が厚くなって乱流域の油面が完全に泡でおおわれるまで泡の放出を継続して，消火させるようにした。このような消火判定方法は，泡消火剤の消火性能を調べる試験方法としては，次に述べる実験例からもわかる通り厳し過ぎると思われる。

一辺が1.5mの正方形断面の二重壁タンクを用いたガソリン火災の消火実験(Table 3 参照)の場合に，泡放出開始後3分30秒頃にはリム火炎は消滅し，泡浮上部の露出油面に小さな残炎があっただけなので，このときに泡放出を停止すれば，泡の戻りによって油面はおおわれ消火されたであろうと考えられる。しかし，泡放出開始後4分10秒頃突然泡放出部の反対側の壁面で

Table 3 Extinguishment of oil fires by base injection of foams.

Vessel	Fuel	Fuel thickness cm	Foaming agent	Preburn time min	Free-board cm	Expansion	25% drainage time min : sec	solution application rate 1/min².	90% control time min : sec	Extinction time min : sec
1.5×1.5 m	gas oil	70	Fluoroprotein	10	65	2.4	0:45	2	2:05	5:20
			AFFF	10	65	2.7	1:00	2	1:10	6:00
	gasoline	37	Fluoroprotein	10	65	3.5	6:44	3.8	1:05	4:45
			AFFF	10	65	3.9	5:25	3.9	0:55	N.E.
2 mφ	gasoline	10	Protein3%	3	30	5.5	9:30	3.0	2:00	6:00
	B-heavy oil		〃	6	30	4.4	3:00	2.2	3:30	4:28
1.2mφ	gasoline	40	Protein3%	20	40	5.5	8:00	4.5	0:40	N.E.
			〃	20	40	3.5	9:30	4.5	0:55	2:49
			Protein6%	10	40	5.5	7:12	4.5	1:55	N.E.
			Fluoroprotein	10	40	5.5	7:10	4.5	0:40	2:22
			AFFF	15	40	5.5	4:20	4.5	0:30	1:11

Notes: N.E. means that a fire is not extinguished

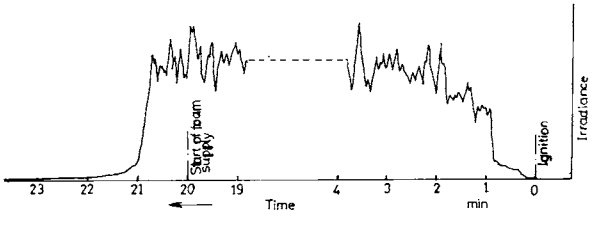

Fig.19 Irradiance from 1.2 m diameter gasoline fire in extinguishment tests with fluoroprotein [3%] foams of expansion 2.0 and foam solution flow rate 4.1 1/min which is injected at the base of the tank 20 minutes after igniting the fuel.

リム火炎が現われ，泡層の上を放出部の方向に間けつ的に火炎が流れるようになり，泡の放出を継続しても消火は無理と判断されたので，二酸化炭素消火器により消火した。

各種泡の消火性能を比較するために，直径1.2mのタンクを用いたガソリン火災を発泡倍率5.5の泡で消火する実験を行ったが，その結果がTable 3 に示されている。たんぱく泡は，ふっ化たんぱく泡や水成膜泡に比べ消火性能の劣ることが分る。しかし，この実験条件では，たんぱく泡でも発泡倍率を3.5にすれば，消火は可能となる。

水成膜泡の場合，展開速度が大きいために，コントロール時間はほかの泡に比べやや短かくなる傾向を示した。

泡の燃料による汚染を少なくするためには発泡倍率を低くすることが大切であるが，余り低くするとかえって消火性能は低下する[5]。したがって底部泡注入に適

する発泡倍率の範囲としては，たんぱく系の泡で2.5～4[6]，水成膜泡で2～3[7]とされているが，還元時間を一定にし発泡倍率だけを広範囲に変えることは，今回の実験では不可能だったので，適当な発泡倍率の範囲を正確に求めることはできなかったが，ほぼ上記の範囲が適当であることを示唆する結果を得た。発泡倍率は大きくても3.5位に抑えることが必要である。泡の汚染率が高くなると，消火が不可能になるが，消火可能の限界汚染率は泡消火剤の種類によって異なり，ガソリン火災の消火の場合には，たんぱく泡で約8[4]～10[5]%，ふっ化たんぱく泡でその約2倍[4]と報告されている。今回の実験では，約20%の汚染率で，ふっ化たんぱく，水成膜いずれの泡の場合も消火不能であった。

3.3.2 軽油火災の消火

消火実験の結果の一部がTable 3に示されている。軽油火災の消火されてゆく状況も，ガソリン火災の場合とほぼ同じであるが，消火はより容易であることが分った。コントロール時間はガソリンの場合に比べ短かくなるが，消火時間にはそれほどの違いはなかった。軽油火災の消火では，タンク壁面で油面が多少露出していても消火してしまうことがしばしば観察されたが，これは泡層による油面の冷却効果が大きく影響することを示すものといえる。

3.3.3 重油火災の消火

直径1.2mのタンクによる重油火災の泡消火実験の結果をTable 4に示す。底部泡注入による消火実験の結果と比較する目的で，タンク側壁頂部からの泡注入による消火実験も行ったので，その結果も同表に示してある。油層の深さは50～55cm，フリーボードは40～45cmとし，予燃時間は30分とした。このB重油の火災では，高温層の厚さの増大速度は約20cm/hであった。高温層に泡が注入されると，泡中の水分が蒸発して油泡を発生し，泡溶液供給率がある一定値以上になると油泡の厚さは急激に増大する[8]。側壁頂部注入では，たんぱく泡の場合でも油泡の厚さはFig.20のように30cmにとどまったが，底部泡注入ではスロップオーバーが起こり，炎はタンク直径の約8倍の高さに達した。ふっ化たんぱく泡による消火実験は，側壁頂部注入による実験だけを行ったが，油泡の形成はみられず，消火とほとんど同時に泡は消滅していた。水成膜泡の場合，側壁頂部注入，底部泡注入のいずれの場合にも，泡は膨脹したが，油泡の形成はみられず，消火後泡はそのままの形で油面上に残り，Fig.21のように盛んに対流が行われ，また泡内に重油の小粒の点在するのが観察された。

各種泡水溶液を重油火災に適用した場合におけるス

Table 4 Extinguishment of heavy oil fires by air-foams.
Tank diameter: 1.2m; preburn time: 30 min.

Method of injection	Fuel thickness cm	Free-board cm	Foaming agent	Expansion	25% drainage time sec	Solution application rate l/min.m²	90% control time min:sec	Extinction time min:sec	Oil froth thickness cm
Base	60	40	Protein(3%)	2.5	<30	4.5	Slop over occurred 30 sec after start of foam injection		
	54	46	AFFF	2.9	<30	4.9	1:00	1:00	N.F.
Top side	60	40	Protein(3%)	2.5	<30	4.5	2:10	2:25	30
	55	45	Fluoroprotein	2.8		4.9		1:00	Foams dis-appeared
	55	45	AFFF	2.9	<30	4.9	1:15	1:11	N.F.

Notes: N.F. means that oil froth wasn't formed and foams remained on the oil surface after extinguishment as shown in Fig.21.

ロップオーバー発生の可能性を試験するために，直径30cm，高さ30cmの容器の下方に泡溶液を入れ，その上に重油を入れて燃焼させ，油泡の発生状況を観察した。高温層の下端が下層の泡溶液面に到達した時点で油泡が発生し，Fig.22のような穏やかなボイルオーバーまたはスロップオーバーを起こした。重油の層が5cm，フリーボードが10cmの場合には，点火後約20分でこの現象が起こった。水成膜(6%型)泡溶液でも，発生した泡の膨脹による溢出があるが，ほかの泡溶液(たんぱく3.6%型，ふっ化たんぱく3%型)または水のように容器外にこぼれた油泡が激しく燃えるFig.22のような現象はみられなかった。

3.3.4 実験結果のMeldrum式による整理

ガソリン，原油などの蒸発性燃料の火災をたんぱくまたはふっ化たんぱくの泡の一点放出で，直径が1.5m

Fig.20 Oil froth immediately after B-heavy oil fire(1.2mφ) is extinguished by protein foams injected at the top side of the tank.

Fig.21 AFFF foams immediately after B-heavy oil fire (1.2mφ) is extinguished by base injection. Vigorous convection is obseved in foams which contain small particles of oil.

Fig.22 Slop over test of various foam solutions with a vessel of diameter 30cm and height 30 cm. B-heavy oil is flóatèd as a layer 5 cm deep on the foam water solution or water. This photograph shows the instant of slop over.

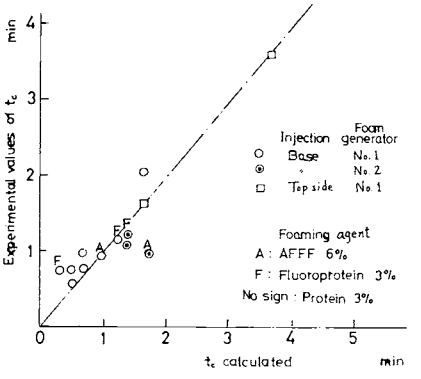

Fig.23 90% control time vs. the right hand side of Equ.1 for the results of extinguishment of gasoline fires.

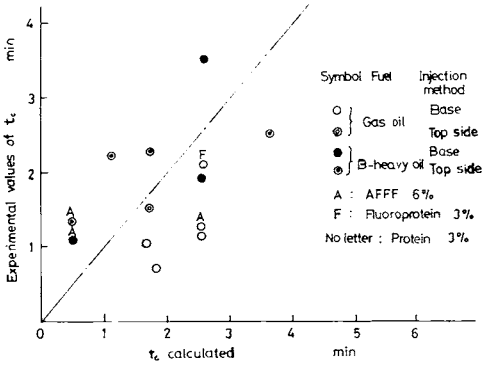

Fig.24 90% control time vs. the right hand side of Equ.1 for the results of extinguishment of gas oil and B-heavy oil fires.

から35mまでのタンクを用いて行った消火実験(底部注入,側壁頂部注入の両方を含む)の結果から，Meldrum[9]はコントロール時間 t_c(min) を次式で表わした。

$$t_c = 3.415 + 0.3613D + 0.03817t_p - 0.8856Q \cdots\cdots (1)$$

ここで，D：タンク直径 (m)

t_p：予燃時間 (min)

Q：泡溶液供給率 (l/min.m^2)

である。今回の消火実験の結果から，ガソリンの場合および軽油と重油の場合の t_c の実験値をたて軸に，(1)式による計算値を横軸にとり図示するとそれぞれFigs. 23, 24のようになる。Fig.23から，底部注入，側壁頂部注入の何れの場合，また水成膜泡適用の場合にも，式(1)の関係をほぼ満足している。しかし，タンク直径がさらに大きくなった場合に，底部泡注入による t_c が式(1)の関係を満足するかどうかは疑問と思われる実験結果が最近得られている。[10] 軽油と重油の場合の t_c (Fig. 24)は，ガソリンの場合より点がバラついている。この図から，軽油の場合の t_c は，(1)式の右辺よりも小さくなり，また重油の場合の t_c は(1)式の右辺より大きくなることも小さくなることもある。

4. 結　論

実験室的な規模で，石油タンク火災の底部泡注入による消火実験を行った。この結果，次のような結論がえられた。

(1) 同一の発泡器と発泡条件の下で得られる泡の性質は泡消火剤(たんぱく，ふっ化たんぱく，水成膜)の種類により一般に異なる。発泡倍率と流量にはそれほどの違いはないが，還元時間は大きく異なる。

(2) 最初に油面に浮上した泡の先端の展開速度は，消火のさいの炎のコントロールに関係する。展開速度は，水成膜泡の方がたんぱく系の泡より大きくなるようである。

(3) 泡が油内を上昇するときの泡の油による汚染率は，発泡倍率が高くなるにつれて急激に増大する。この場合の汚染率の増大は，泡と油との親和性よりも，油内に放出されたときに分裂する泡の小片が小さくなるほど，泡の表面と油との接触面積が大きくなるためと考えられる。

(4) ガソリン火災の消火実験の結果は，Meldrunの式によく合う。消火性能は，ふっ化たんぱく泡と水成膜泡の方がたんぱく泡より優れていることが確かめられた。ガソリンのような蒸発性液体燃料火災の底部泡注入による消火では，発泡倍率，還元時間の適当な泡を送るようにすれば，消火は可能であることがわかった。

(5) 軽油の消火実験では，予燃時間が短かかったために，油泡の発生はほとんどみられず，油の対流と泡の油面に対する冷却効果によって比較的容易に消火できることがわかった。たんぱく泡でも，油泡の発生に注意すれば，軽油火災の消火に十分使えよう。

(6) 重油の消火実験では，予燃時間が長くなるほど油泡の発生量は増加し，フリーボードの大きさによってはスロップオーバーが起こりうる。しかし，水成膜泡(6%型)の場合，油泡は発生せず，タンク外での燃焼を伴うスロップオーバーは起こらなかった。一方，水成膜泡(3%型)でスロップオーバーを起こした報告例もあるので，この件についてはさらに実験条件を変えて確認する必要があろう。

引用文献

1) Culbertson, T.L., Large Scale Fire Test —— Subsurface Foam Injection, ESSO Res. Eng. Co. (Oct. 1967)
2) 星野，林，消防研究所報告，No.37，P.49(1975)
3) Evans, E.M., and Nash,P., *Fire Prev. Sci. Tech.*, No.14, 18(197)
4) Evans, E.M., and Whittle,J., *Fire Prev. Sci. Tech.*, No.8, 21(1974)
5) Nash,P., Inst. *Fire Eng. Quarterly*, **21**, 14(1961)
6) Tuve, R.L., and Peterson, H.B., NRL Rep. 3725 (Aug. 1950), PB 103775
7) NFPA, Nat'l Fire Code No.11B-1974
8) Burgoyne, J.H., and Richardson, J.F., *J.Inst. Pet.*, **35**, 805(1949)
9) Meldrum, D.H., Rep. U.S. Naval Academy Operations Analysis Study Group(May 1973)
10) 矢野，梅津，三宅，火災，**27**，(3)，25 (1977)

Extinguishment of Oil-Tank Fires by Base Injection of Foams

Atsushi Nakakuki

(Abstract)

(Received June 18, 1977)

The extinguishment tests of oil - tank fires by base injection of foams have been carried out in a laboratory scale. In addition, various factors affecting the foam property, the development of foams on the fuel surface, and the amount of fuel pick-up by the foam have been investigated. The fuels used are gasoline, gas oil and B-heavy oil, and the foaming agents used are protein(3 and 6%), fluoroprotein(3%) and AFFF ——Aqueous Film Forming Foams(6%). Cylindrical vessels of diameters 1.2 and 2 m, and square vessels of side lengths 0.45 and 1.5 m are used. For all types of foams used, the use of very low expansions below about 3.5 at the largest is necessary to minimize the fuel pick-up to such degree that the foam fire can not be sustained. It is seen from the photographs of foams injected into oil that the smaller the size of the foam distorted when it is injected into oil, the more is the fuel pick-up. Fluoroprotein and AFFF foams exhibit better performances on tank fires than protein foams. In extinguishment tests of B-heavy oil fires by AFFF (6%) foams, the oil froth is not formed. The effects of foam solution application rate, preburn time and tank size on the 90% control time are expressed well by the equation proposed by Meldrum in the case of extinguishment of gasoline fires.

国産飛行艇改装機による消火液の空中散布実験

渡辺彰夫　笠原保信　金田節夫

（昭和52年7月13日受理）

1. まえがき

航空機利用による大震火災及び林野火災の消火法についての研究は，当消防研究所において昭和39年より現在まで行なわれてきた。すなわち，小型固定翼航空機から消火液を直接散布したり，ヘリコプターから消火液内蔵容器を投下して，地表面における消火液散布密度の測定，模型火災の消火実験を行い，その実用性について検討してきた。[1,2,4] その結果，ヘリコプター吊下げ式容器による空中散布間接消火法は，林野火災に利用できることが実験的に認められた。[3,7] この消火法のための機材は林野火災の頻発が予想される地域にすでに配備され，昭和50年度より陸上自衛隊の協力を得て実施段階に入っている。しかし，これらの機材は，林野火災に対応するためのものであり，消火剤搭載量も最大1800ℓである。

大震火災においては，火災荷重が著しく大きく，飛行も制約され，その上，消火液の補給が非常に困難となることが予想されるので，消火液の搭載量はできるだけ多く，消火液補給方法はできるだけ簡単なものとすることが期待されるわけである。なお，火災上空では乱気流の発生のために，火点に消火液を散布しようとするヘリコプターの飛行は困難であると考えられる。以上のことから，消火用の水を一時に大量に補給，かつ輸送できる固定翼の飛行機を必要とするが，カナダではこのような機能をもつCL-215消防用飛行艇がすでに実用化されている。[5] そこで消防庁として昭和49年度にこの飛行艇を借りて各種実験を行ってみた。水の搭載量は5400ℓで，飛行性能も優れており，消火用にも有力な戦力となり得ることが確かめられた。[6]

ここでさらに多量の消火液が搭載できる大型消防飛行艇の必要性とその国産化が痛感された。そこで，防衛庁の協力を得てPS-1型飛行艇(新明和工業製)を改装し，実験機1号とした。今回，この飛行艇を使用して，消火液の空中散布実験及び模型火災の消火実験を行ったので，その結果を報告する。

2. 実験に使用した飛行艇

本機は，海上自衛隊で対潜哨戒用に使用している飛行艇であるが，消火液を容易に充塡でき，また空中散布を可能とするために昭和50年9月から昭和51年6月にかけて，次のような改装を行った。

(1) 重心近くにある後部艇底燃料タンクを水タンクとする。

(2) 滑走中に海水又は湖水がすくい上げられるような取水口と，これに連結する配管を設ける。

(3) 消火剤混合装置を上記取水系統に設ける。

(4) 1m×0.7mの放水扉を2個新設する。

この結果，改装機は滑走中に艇内の水タンクに海水を取水し，また目標上空から2個の放水扉を一斉または連続して開いてタンク内の水を投下できるようになった。

本機の主要諸元はTable. 1に示すとおりである。改装後，安全性確認のため昭和51年7月から3ヶ月間にわたり，海上自衛隊第51航空隊岩国航空分遣隊によって飛行性能が試験された。

Table. 1 New Type Fire-fighting Flying Boat
PS-1 No.5801

DIMENSION	
Overall Length	33.5m
Wing Span	33.2m
Overall Height	9.8m
WEIGHT	
Empty Weight	25206kg
Maximum Take Off Weight	43000kg
Maximum Landing Weight	40900kg
PERFORMANCE	
Maximum Speed	490km/h
Range	2120km
Water Tank Capacity	8400l
Scooping Distance	below 2000m
(From 15m approach altitude to 15m climb-out altitude)	
Scooping Speed	56km/h
Scooping Time	15s
Water Discharge Rate	3000l/s

3. 実験方法

実験は，昭和51年10月22日より同年11月11日まで，兵庫県西宮市鳴尾浜埋立地において実施した。散布時の飛行高度は約15～135m，速度は約150～230km/hの範囲とし，種々の高度，速度の組合せ条件下で消火液を散布した。地上では水塊の落下状況，地表面及び建物の壁など垂直面に対する到達水量（以下散布量という），垂直面に対する散布液付着量（残留量），及び模型の木材火災に対して直接消火液を散布した場合の放射照度の変化などが観測・測定された。

実験に当り，散布液には海水又は海水に糊剤として繊維素グリコール酸ナトリウム（CMC）を1％添加したものが使用された。

3.1 散布液の落下状況観察

散布液の落下状況は地上の16mmシネカメラ及び35mmスチールカメラを用いて飛行方向と直角方向より連続撮影された。

3.2 地表面に対する散布量測定

実験場内に，縦225m，横100mの測定区域を設けて，その中に縦15m，横10m間隔で176の測定点が配置された。測定点には，口径21.5cm，深さ30cmのプラスチック製円筒容器が散布量測定のため置かれた。実験機は，測定区域の中心を目標に散布し，散布後直ちに測定容器に入った散布液量がメスシリンダーで計量された。実験場内の配置図は**Fig. 1**に示す。

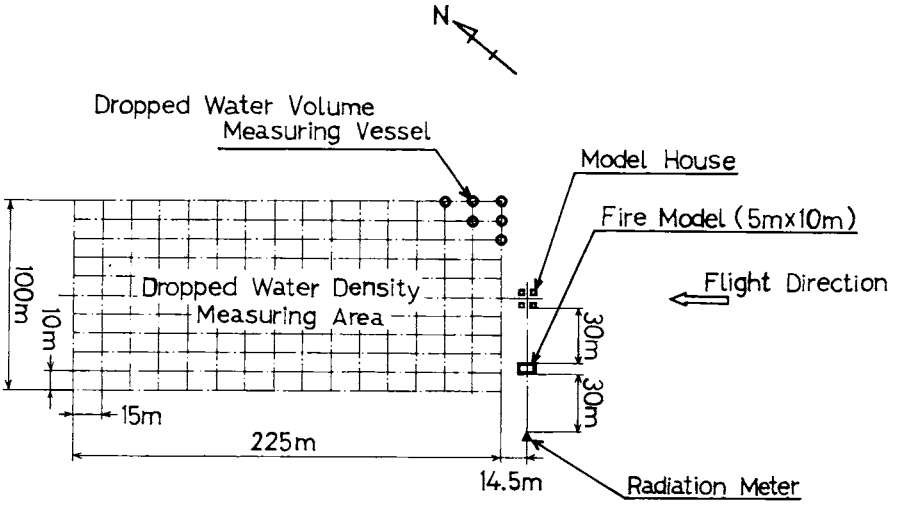

Fig. 1 Plan of experimental field.

3.3 垂直面に対する散布量及び付着量測定

4畳半（2.7m×2.7m）相当の平家の実験家屋4棟が各棟の間隔3mで配置された。12mm厚の合板壁には地上より1.8mの高さに20cm×20cmの穴を開け，その穴の屋内側にビニール袋を取りつけて，垂直面に対する散布量ないしは垂直開口部から屋内に入る散布液が測られた。測定点は，実験家屋の各壁面に2点，各棟あたり8点設けられた。散布目標は4家屋の中心とし，散布後ビニール袋を消火液の入ったまま取外し，その重量を吊下げ式ばね秤で計量し，散布密度が求められた。

消火液が散布10～20分後に付着残留している量は，上述の垂直面散布測定開口部直上及び屋根中央の9個所(棟当り)に，壁と同じ材料の20cm×20cmの試験片を取付けて測られた。この場合も垂直面散布測定と同様に，試験片を吊下げ式ばね秤で計量し，付着量が求められた。

実験家屋壁面開口部，及び付着量試験片を取付けた状態をFig. 2に示す。

3.4 直接消火における放射照度測定

大震時倒壊した木造家屋の火災に消火液を空中から散布する場合の消火効果等について資料を得るため，模擬火災主燃料として縦10m，横5mの区域に家屋解体木材をほぼ均等に積上げた。 火災荷重は40kg/m^2であった。この主燃料に助燃材として布切れ10kg，灯油40ℓ，ガソリン10ℓを加え，一斉に点火した。消火液は点火5分後より5分間隔で8400ℓずつ4回散布された。この間，火災模型の風上側30m，地上1mの位置に置いた輻射計により放射照度の連続記録を行った。

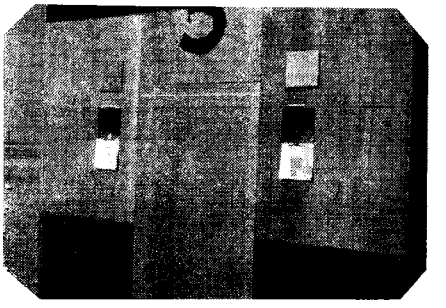

Fig. 2 External view of the openings to measure the density of water received by the vertical plane of model house and the test pieces to measure the density being attached to wall.

4. 結果と考察

4.1 散布液の落下状況観測

飛行機から投下された水塊の変化はFig. 3 に示すような各種写真記録からFig. 4 に例示するように求めることができ，また比較的密度の濃い部分をたどれば，水塊の軌跡をFig. 5 のようにうることができる。図より放水扉から出た水塊は形を変えながら放物線に近い軌跡を描き落ちてゆき，水平速度の減少とともに水塊の大部分は急激に雨滴状に分裂する。このような現象は崩壊（*Break-up*）として知られている。放水扉の開き始めから崩壊までの時間は速度148 *km/h* の場合2.8秒，215 *km/h* の場合2.1秒であり，速度の減少とともに長くなった。また崩壊までの垂直落下距離は30～45 *m* であり，この間における落下軌跡の地表面に対する角度は約45度で，以後急激に90度に近づいた。

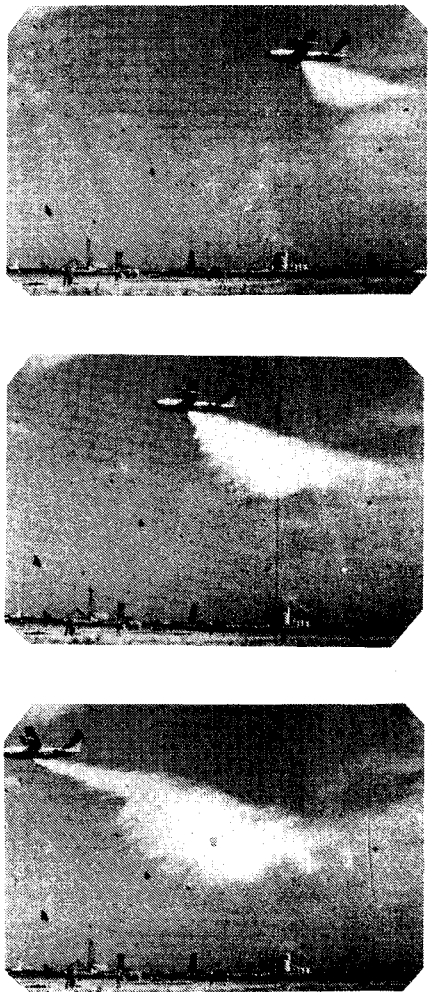

Fig. 3 View of dropped water.
H = 79.2*m* V = 166.7*km/h* where H and V are the altitude and speed of aircraft.

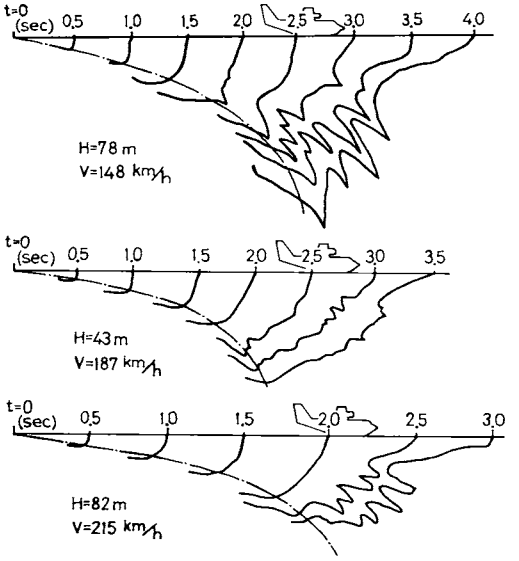

Fig. 4 Example of the dropping water front line obtained from films.
H and V are the altitude and speed of aircraft, respectively.

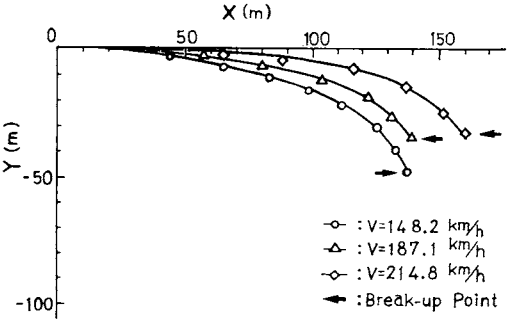

Fig. 5 Loci of dropped water.
X and Y : horizontal and vertically downward distances from the start point of water drop, respectively.
V is the speed of aircraft.

4.2 地表面における散布量

メスシリンダーで計量した散布液量 $V_d(ml)$ から Eq (1)を用いて $1m^2$ 当りの散布密度 $Dg(l/m^2)$ が求められた。

$$Dg = (4V_d/\pi d^2)\times 10^3 \qquad (1)$$

ここで，d は容器の口径(mm)である。

得られた散布密度から等散布密度線図を描くと，Fig. 6 に示すような散布パターンが得られる。このような等散布密度線図から散布密度ごとの面積 $As(m^2)$ をプラニメーターで求めれば，Eq. (2)から地表面への到達率 $R(\%)$ が算出できる。

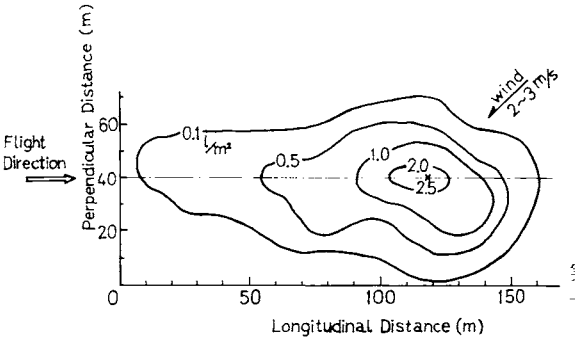

Fig. 6 An example of dropped water density contour on the ground.

$$R = (\Sigma Asi\times Dgi)/Q \qquad (2)$$

ここで Q は全投下水量(ℓ)である。

これより50%以上の到達率の場合について放水時の速度 V と高度 H との積と散布面積の関係を示したものがFig. 7 である。Fig. 7 から $1.5l/m^2$ の散布密度を境にして，それより散布密度の大きい場合の散布面積は $V\times H$ の増大とともに減り，小さい場合の散布面積は $V\times H$ の増大とともに増大することがわかる。従って，$V\times H$ 及び散布密度を与えれば，その散布密度以上になる散布面積を推定することができる。なお，海水と海水に糊剤を添加したものとの散布密度の差は，今回の実験の添加率程度では見出せなかった。

4.3 垂直面に対する散布密度及び付着量

ビニール袋に入った散布液量から Eq. (3)により垂直面に対する散布密度 $Dv(l/m^2)$ が算出された。

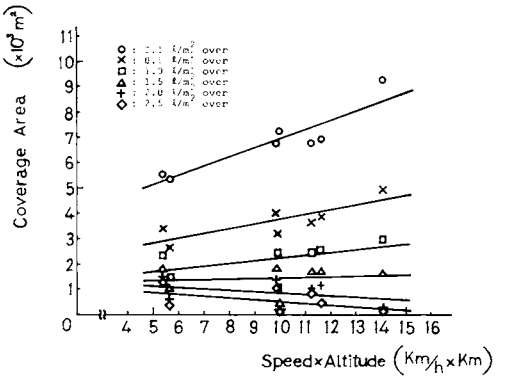

Fig. 7 Area receiving concentration in excess of a certain value.

$$Dv = \{(W_1 - W_0)/A\gamma\}\times 10^3 \qquad (3)$$

ここに　A：開口部面積(mm^2)

W_1：散布液の入ったビニール袋の重量(g)

W_0：散布前のビニール袋の重量(g)

γ：散布液の単位体積当りの重量(g/ml)

垂直面に対する散布密度は，高度45m 以上の場合，実験機進入側，反対側，風下側でいずれも $0.1l/m^2$ 以下で非常に少ないが風上側では $0.8l/m^2$ 以上であった。これに対し高度45m以下の散布密度は，実験機進入側の壁面では $2.0l/m^2$，風上側では $1.6l/m^2$ 以上であったが，風下側，反対側では $0.1l/m^2$ と少なかった。すなわち，高度45m 以上では，3～5m/s の風の影響を受けて，ほとんどが風上側壁面に衝突するのに対し，高度45m 以下では，風の影響も受けるが，実験機進入側に最も多くの散布液が衝突した。

付着量は，高度45m 以上の場合，実験機進入側では $0.04l/m^2$ と最も多く，ついで風上側で $0.02l/m^2$ であり，他の面では測定値は0であった。高度45m 以下の場合，風上側で最も多く $0.11l/m^2$ で，ついで実験機進入側で $0.08l/m^2$，反対側で $0.04l/m^2$ であり，風下側は0であった。この結果は垂直面に対する散布密度測定の傾向と異り，低高度の時のほうが風の影響を受けやすいように見えるが，その差は小さく，今後さらに実験の必要があろう。

散布液の最大付着量は，海水の場合 $0.16l/m^2$ であった。なお，室内実験では，試験片に水道水をつけた直後が $0.14l/m^2$ であったが，5分後には $0.06l/m^2$，10分後には $0.05l/m^2$ 以下となった。

4.4 直接消火による放射照度測定

火災模型に対する消火液の散布は，4回とも低空から同一飛行条件で行い，Fig. 8 に示す散布前後の放射照度の変化から，火災抑制効果が評価された。

Table. 2 は，散布前の放射照度と，散布後の最小放射照度及び放射照度の減少率を各散布毎に Fig. 8 から求めたものである。

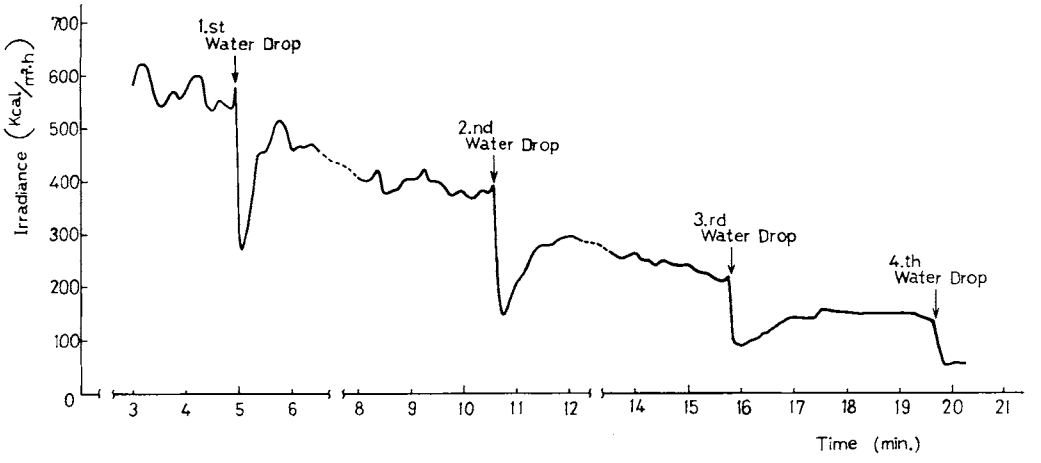

Fig. 8 Change of irradiance from model fire with time when water is dropped from the flying boat.

Table 2 Rate of irradiance decrease by a series of water-drops.

Water drop	Irradiance before drop ($kcal/m^2\ h$)	Minimum irradiance after drop ($kcal/m^2\ h$)	The rate of irradiance decrease
first	580	271	0.53
second	391	143	0.62
third	218	87.5	0.60
fourth	140	52.4	0.63

5. 結　論

実験結果より，次のことがわかった。

(1) 本実験で実験機における最も望ましい散布時の飛行条件は，高度60m，速度170km/hであり，この条件下で一斉投下したとき0.5l/m^2以上の散布密度域は，長さ100～150m，幅40～50m，面積約4000m^2で，投下水量の3／4が地表面に達することがわかった。

(2) 地表面に対する散布密度0.1l/m^2以上の面積に対する2.5l/m^2以上の面積の割合は，大略10%以下と，少なく，散布密度の集中化を計る意味からも，より高粘度の糊剤の使用が望まれる。

(3) 直接消火による火勢抑制効果については，1回の散布で放射照度が半減したことにより，実用面においてはより多くの水量を，散布間隔を短かくして，少なくとも2回以上散布することが望ましい。

6. あとがき

本実験で機体の運用，支援をして頂いた海上自衛隊第51航空隊をはじめとする海上自衛隊の各部隊，また消防庁防災課の各位，林野庁林業試験場の本木室長はじめ各種支援御協力頂いた兵庫県及び西宮市並びに西宮消防局の方に深甚なる謝辞を表します。さらに実験企画，地上計測をはじめ実験全般にわたり適切なる御指導をして頂いた熊野所長，名雪前第三研究部長に心から感謝の意を表します。

参考文献

(1) 熊 野 他：昭和41年度春季日本火災学会学術講演会概要集，P.6（1966）

(2) 名 雪 他：昭和46年度秋季日本火災学会学術講演会概要集，P.51（1971）

(3) 名 雪 他：林野火災の消火に関する特別研究，P.3（1972）科学技術庁

(4) 熊野陽平：第22回全国消防技術者会議資料 P.25（1974）

(5) 名 雪 他：昭和50年度日本火災学会研究発表会概要集，P.90（1975）

(6) 笠原保信：火災，Vol.25，No.4，P.44(1975) 日本火災学会

(7) 名 雪 他：大震時における都市防災に関する研究（追報），P.63（1976） 科学技術庁

Test on Aerial Fire Attack using Four-Engined Flying Boat

(Abstract)

by A.Watanabe, Y.Kasahara and S.Kaneda

(Received July 13, 1977)

In succession to the preceding experiments on water drop using fixed wing aircrafts and helicopters which showed that aerial attack would be effective for forest fire figting, the possibility that water drop from a huge flying boat can be used against urban fires accompanied with earthquake is considered, in cooperation with the Japan Maritime Self Defence Force.

A PS-1 antisubmarine flying boat has been converted into an air-tanker with the water tank capacity of 8400 l.

The coverage area received density of 0.5 l/m^2 would be 100-150m long and 40-50m wide when the water is dropped at the speed of 170km/h and altitude of 60m.

From the experimental results, the effective area can be estimated, if the speed and altitude of the air tanker at the water release are given.

消 防 研 究 所 報 告

通 巻 44 号

昭和52年9月30日発行

編 集
発 行　自治省　消防庁　消防研究所

〒181 東京都三鷹市中原3丁目14番1号
電 話 (0422) 44－8331 (代表)