REPORT OF FIRE RESEARCH INSTITUTE OF JAPAN
Serial No.50 September 1980

消防研究所報告

通 巻 50 号 1980年9月

目 次

研 究

ハロン1301と二酸化炭素による特殊可燃物の消火……山鹿 修蔵……(1)
セルロース系防炎物質より発生する有毒ガス
——セルロースおよびリン酸二アンモニウム(DAP)処理セルロース——
……箭内 英治・斉藤 直……(8)
音による避難誘導についての研究(第1報)
——建物通路における一方向への避難誘導——……渡部 勇市……(18)
音による避難誘導についての研究(第2報)
——建物通路における二方向への避難誘導……渡部 勇市……(24)
火災上昇気流の傾きに関する一考察……山下 邦博……(34)
水溶性液体火災に対する各種泡消火剤の消火能力の評価(第2報)
……星野 誠・林 幸司……(44)

消 防 研 究 所
東 京 都 三 鷹 市

REPORT OF FIRE RESEARCH INSTITUTE OF JAPAN

Serial No. 50 September 1980

– Contents –

MEMOIR

Extinguishment of Deep-seated Fires by Halon 1301 and Carbon Dioxides
..... Shuzo Yamashika ..... (1)

Toxic Gases from Flame Retardant Cellulosic Materials – Untreated Cellurose and Diammonium Phosphate (DAP) treated Cellulose –
..... Eiji Yanai and Naoshi Saito ..... (8)

A Study on Sound Guidance for Evacuation (1) – Sound Guidance of One Direction in a Corridor –
..... Yuichi Watanabe ..... (18)

A Study on Sound Guidance for Evacuation (2) – Sound Guidance of Two Directions in a Corridor –
..... Yuichi Watanabe ..... (24)

An Approach to the Evaluation of the Bending of Upward Air Flow above Fires
..... Kunihiro Yamashita ..... (34)

Evaluation of Abilities of Fire-Fighting Foam Agents to Extinguish Polar Type Flammble Liquids (II.)
..... Makoto Hoshino and Koji Hayashi.... (44)

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

ハロン1301と二酸化炭素による特殊可燃物の消火

山鹿　修蔵

（昭和55年5月8日受理）

1．まえがき

ハロン1301や二酸化炭素のようなガス系の消火剤は，開放空間での一般火災に対し直接消火剤を振りかけても，一時的に炎が消えるだけであって，燻焼まで完全に消火することはできず，従って再び燃えだすことになる。それは開放空間ではガスが火災の周囲から直ちに飛び去ってしまう事に主な原因がある。

全城放出方式による消火は，上述のような欠点を無くしガスが飛び去らないようにするために，火災の周囲を不燃性の囲いで囲って，その中に消火剤を注入することによりガス系の消火剤で一般火災を確実に消火する方法である。そのため注入されたガスは長時間にわたり火災の周辺にあり，そのため再び炎を出すことはないので，一般火災であってもやがて内部の燻焼まで冷却し完全に消火してしまう。その場合に注入されるガス量は，当然炎を消すのに充分な濃度が必要であるばかりでなく，燻焼の継続を停止させるだけの濃度を保つに必要な量である。

筆者は，今までに行った各種の消火実験の経験から，炎を消す消火剤の濃度と，燻焼の継続を終らせる消火剤の濃度との間にはあまり相関がなく，特に一般火災のうちでも内部まで燻焼の進行し易い木材やプラスチック以外の特殊可燃物では，さらにこの相関性が少ないことに気付いた。ガス系の消火剤の代表として二酸化炭素とハロン1301を選んだが，この両者は消炎のみを目的としたガソリン火災を消火するに必要な設計濃度はそれぞれ34%と5%とされている。[1)2)] これは残存酸素濃度に換算するとそれぞれ14%と20%である。消防法施行規則ではこの設計濃度を重量に換算（以下これを設計重量と呼ぶ）し，それぞれ0.75kg/m³，0.32kg/m³としている。[3)]

Table 1　Design quantity of extinguishing agents in Japan

	Carbon dioxide kg/m³	Halon 1301 kg/m³
General	0.75	0.32
Cotton or the like	2.00	0.52
Rubber or the like	2.70	0.64

一方特殊可燃物のための設計重量は，現在のところTable1に示された値が採られているが，[3)] この値は設計濃度を換算した値ではあるが，実は消炎による量をそのまま何倍かした値であるために，特にハロン1301について見ると残存酸素濃度に更に開きが出て，燻焼の消火に重要であると見られる残存酸素濃度が二酸化炭素に比べて減少していないので，問題となると思われる。このような特殊可燃物に対しては，ハロン1301が5%や10%では消火できないという事実はWilliamson[4)]およびCholin[5)]により指摘されているので，筆者もまたそれが事実であることを確認するとともに完全消火に必要な量を知るため，特殊可燃物の模型をいくつか用いて消火を試みたので，その結果について報告する。

2．実験方法

ガス系消火剤の代表として二酸化炭素とハロン1301を選んだ。二酸化炭素は市販の消火設備用の液化炭酸で，ハロン1301は同じく市販の消火設備用の液化ハロンを窒素で42kg/cm²Gに加圧したものである。前者は68

ℓ容器に45kg，後者は13.7ℓ容器に10kg充塡したものを用いた。

特殊可燃物の代表として，木材，紙，綿およびゴムを選んだ。そしてこれらの火災模型は，木材クリブ，段ボール紙束，座ぶとんおよびラバーフォームを用いた**Fig.1**から**4**までに示すような形状構成とした。すなわち木材クリブは，4cm×4cm×50cmの日本杉の角材を1段に6cm間隔に5本並べて7段に積み上げた。段ボール紙束は，厚さ6mmの複両面段ボールを大きさ50cm×25cmに切断して60枚を束ねて用い，段ボールのすき間を垂直方向の通気となるようにした。座ぶとんは市販のほゞ50cm×50cmで厚さ10cmの木綿100%の綿をを詰めた木綿製布地の袋入りのものを2枚用いた。ラバーフォームは厚さ3cmで50cm×50cmの大きさのもの6枚を重ねて置いた。それぞれの模型の重量は，11.2kg，7.4kg，2.6kgおよび4.1kgであった。

全域放出方式で消火を行うための試験室は，内法が間口2m×奥行2m×高さ2.5mで厚さ15cmの鉄筋コンクリート製の箱である。手前と奥の2面には1.8m×1.8mのアルミサッシ製の引違戸があるので，内容積は約10.3m³と計算された。気密度の尺度となる換気量は約1.0回/hであった。

試験室の中に火災模型をいれ，模型をのせた台の下の皿にわずかに水を張り，その上にヘプタン1.5ℓを入れて点火した。点火後約2minでヘプタンは燃え尽きるがそのまゝ予燃を続け，合計6min後に消火剤を放出した。なお，消火剤の放出直前にサッシの扉を閉めることとし，予燃中は扉を開放して酸素濃度の減少を防いだ。消火剤の放出開始後10minたったた時に，再び扉を開け内容物を点検して消火の成否その他の観測をした。ハロン1301を用いた場合において，消火の成績の悪かったものだけは，上記の予燃条件のうち，ヘプタンを0.5ℓとし（約1min以内で燃料がなくなる），総予燃時間を合計3minにしたものもある。

消火剤の放出は試験室の側壁上部に取付けた噴射ヘッドから水平に放出した。予定量放出したところで元弁を閉めることにより必要量だけ放出できるようにし，消火剤の使用量は液化ガス容器を載せた秤の目盛から計算した。

試験室の中心線に沿って，上（天井面より1cm下），中，下（床面より1cm上）の3箇所でクロメルアルメル熱電対により温度を観測記録して，消火剤放出後の浸透期間中の様子を探った。また同じ場所から約8ℓ/minの能力のあるポンプで近辺のガスを吸い出して，

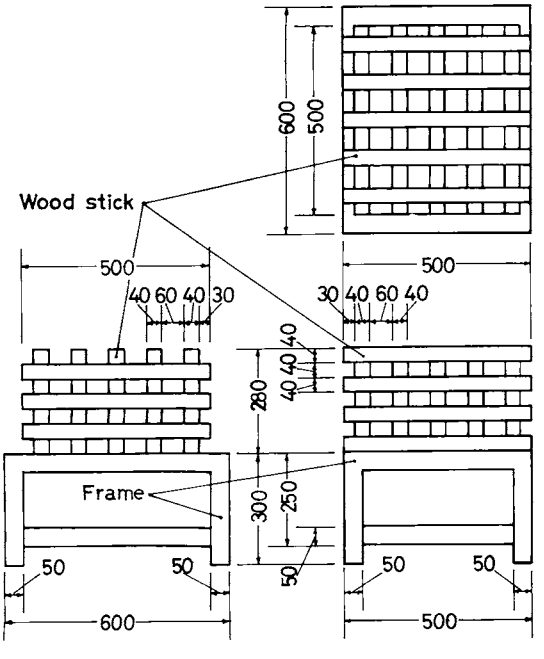


Fig. 1 Fire model of wood (Wood crib)

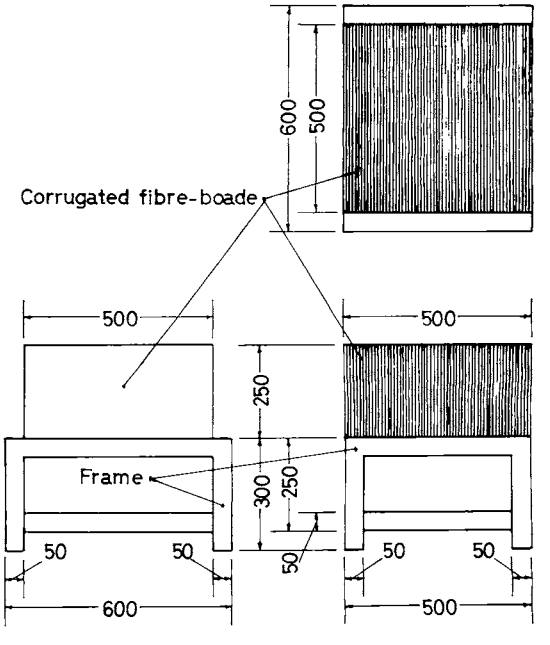


Fig. 2 Fire model of paper (Corrugated fibre-board)

サーミスター式およびラウター式（比重計式）のガス濃度計で消火剤ガス濃度を測定記録し，ガス濃度の変化を追った。ただしこのガス濃度計では，定量専用型であるため，いずれも消火剤ガスと燃焼ガスの区別がつかないので，全体の傾向は捕らえられるが，絶対値については相応の誤差が含まれるのは止むを得なかった。

3．実験結果と考察

消火実験の結果をTable2の (a) から (h) までに示す。各表の第1行は液化ガス容器の重量の減少量を，第2行はサーミスタ式ガス濃度計またはラウター式ガス濃度計の指度の最大値を示すが，ガスサンプリング管の目詰り等でやゝ値が不正確であると思われるもの，およびハロン1301において予想された濃度よりはるかに小さい値しか示されなかったものは括弧にいれて示した。また第3行には消火の成否を示したが，ここで○印は10min後に完全に消火していたものであり，△印はその時点においてまだ多少煙を上げていたものの，あと5minもすれば完全に消えていたと見なされるものである。一方×印のものは扉をあけた時点で直ちに炎を上げないまでも盛んに煙を出していたか，あるいは温度の記録が上昇傾向を示しているもの，全く可燃部分が炭化して未燃部分が残っていなかったもの等消火に不成功であったと見なされるものである。特にハロン1301におけるTable2の (f)，(g)，(h) においては，炎は見られなかったものの可燃部分が残らず炭化し，しかも著るしい分解ガスを含んだ煙が充満していた。これらのものについては上段4例は通常の予燃を経過したものであるが，下段4例は予燃条件をゆるくしてなおこのような結果であったものである。

表の最下段には○印と×印の予想される境界を推定して示して見たが，これは正確な値を求めることがこれらの火災の性質上できないので，ある範囲で与えたものである。なお二酸化炭素については全部示されているが，ハロン1301においては全部求められなかった。その理由は木材の場合については少な過ぎて計量できず（これ以下の量を放出する事は消火装置の作動装置と元弁の関係から不可能であった。），また他の3種については液化ガス容器1本の最大量10kgを超えていたためである。後者の場合は液化ガス容器を大型にするかあるいは2本用いて行ってみてもよかったのであるが，このようにガスの濃度を極端に大きくすることは，ハロン1301の安全性や経済性から実用性に乏しく，かつ分解ガスの発生から見ても無理と考え実験を行わな

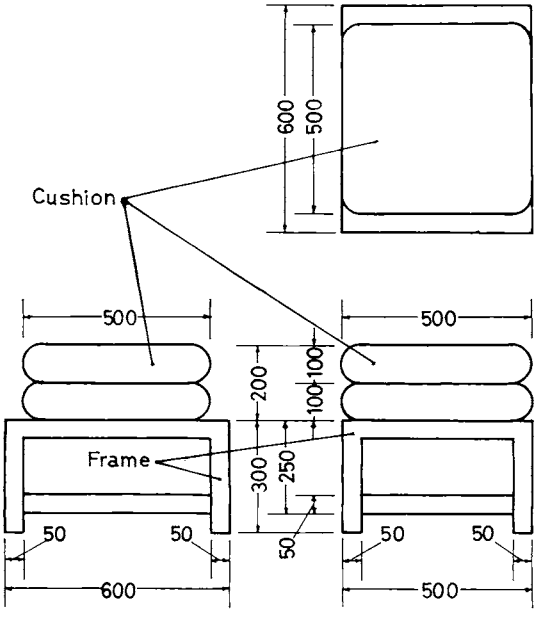


Fig. 3 Fire model of cotton (Cotton for cushion)

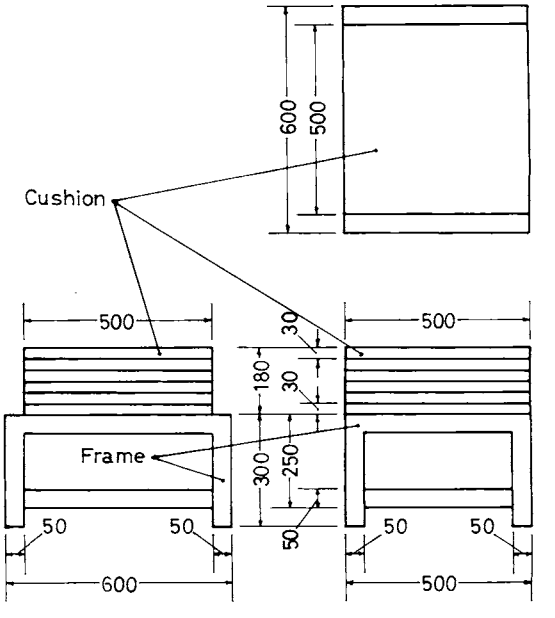


Fig. 4 Fire model of rubber (Foam rubber for cusion)

Table 2 Result of experiments

(a) Wood–Carbon dioxide

Weight of extinguishant (kg)	Maximum concentration of gas (%)	Result*
8.10	35.0	○
5.88	28.1	○
3.81	26.3	○
3.68	23.7	○
3.62	(18.8)	○
2.85	20.5	○
2.75	18.4	×
2.60	18.4	×
2.28	16.1	△
1.70	15.5	×
2.7 ~ 3.0	20 ~ 21	Boundary range

* ○ Completely extinguished
△ Barely extinguished
× Not extinguished

(b) Wood–Halon 1301

Weight of extinguishant (kg)	Maximum concentration of gas (%)	Result
2.22	5.58	○
2.14	4.40	○
1.89	5.02	○
1.89	7.15	○
1.84	4.78	○
1.84	4.73	○
1.58	4.37	○
1.46	3.03	○
1.24	3.50	○
1.01	3.05	○
<1.0	<3.0	Boundary range

(c) Paper–Carbon dioxide

Weight of extinguishant (kg)	Maximum concentration of gas (%)	Result
31.90	54.1	○
30.85	60.3	○
30.75	50.2	△
29.00	57.9	○
28.50	(39.8)	△
27.40	64.9	△
24.70	66.2	△
18.20	48.1	×
17.42	51.5	×
13.36	42.8	×
27 ~ 30	55 ~ 60	Boundary range

(d) Paper–Halon 1301

Weight of extinguishant (kg)	Maximum concentration of gas (%)	Result
9.70	(8.98)	×
8.58	(6.13)	×
7.79	(7.10)	×
4.03	(4.80)	×
>10	>(15)	Boundary range
9.00	(8.17)	×
8.98	(4.77)	×
8.20	(7.27)	×
8.00	(9.42)	×
>10	>(15)	Boundary range

かった。

分解ガスの定量は行わなかったが，ハロン1301で消火できなかった場合は，いずれも模型の可燃物の全部が炭化分解している位で煙が多量に生じ，それに刺戟臭の強い有害な分解ガスが混在していて，その中へはいる事はもちろん近づく事も困難な位であった。

以上の実験結果から見ると，特殊可燃物の消火には炎を消し去るだけではもちろん不十分であって，さらに長時間にわたり徐々に冷却して温度が下がり，もはや熱分解が行われなくなるまで燻焼を抑えて置かねばならない事がわかる。そしてその間ガスの漏出によりガス濃度が必要量より下がっては再出火するであろう。従って通常の放出濃度よりははるかに高濃度で放出しなければならない。

ハロン1301の場合には，この燻焼期間に問題のあることがわかった。ハロン1301は低濃度で炎を消す能力があり，それが酸素欠乏につながらないという点で人畜に害を与えることが少ないという特徴があった。しかしそれは燻焼まで消すということになると逆に不利な特性となって，酸素があまり減らないということが燻焼を抑えるのに役立たないということになり，しか

(e) Cotton–Carbon dioxide

Weight of extinguishant (kg)	Maximum concentration of gas (%)	Result
30.45	84.8	○
30.10	87.9	○
25.50	91.9	△
25.30	82.0	△
25.10	78.4	○
24.80	72.9	○
20.25	60.3	×
20.05	54.7	×
15.48	49.4	×
15.04	47.6	×
24 ~ 27	65 ~ 70	Boundary range

(g) Rubber–Carbon dioxide

Weight of extinguishant (kg)	Maximum concentration of gas (%)	Result
35.65	80.3	○
35.55	78.9	○
30.40	76.5	△
30.35	72.9	○
25.50	71.6	○
25.10	68.6	○
20.90	64.1	△
20.25	72.0	△
15.14	53.8	×
15.02	52.3	×
21 ~ 24	60 ~ 65	Boundary range

(f) Cotton–Halon 1301

Weight of extinguishant (kg)	Maximum concentration of gas (%)	Result
8.92	(10.10)	×
8.88	(9.46)	×
8.09	(8.58)	×
8.02	(8.94)	×
>10	>(15)	Boundary range
9.24	(9.48)	×
9.08	(10.69)	×
8.03	(9.53)	×
7.92	(10.47)	×
>10	>(15)	Boundary range

(h) Rubber–Halon 1301

Weight of extinguishant (kg)	Maximum concentration of gas (%)	Result
9.66	(5.95)	×
8.17	(9.15)	×
7.93	(9.46)	×
7.08	(8.15)	×
>10	>(15)	Boundary range
9.34	(7.93)	×
9.20	(11.83)	×
8.28	(6.36)	×
8.00	(8.06)	×
>10	>(15)	Boundary range

も燻焼中の熱でハロン1301が熱分解を起こすことになって，ハロンガスで早く消すことによってハロンの分解ガスの生成量もまた少なくて済むという事が満足されなくなる。

したがって以上の考察を要約すると，特殊可燃物の消火には通常の消炎におけるよりもはるかに多くのガス量が要り，しかも酸素濃度の低下を計らねばならない点で二酸化炭素による消火の方がハロン1301によるよりも優れ，しかもなお，もしハロン1301を用いるならば浸透期間中にハロンが分解するので分解ガスにも十分注意しなくてはならないであろう事が予測される。

4．結論

深部火災の消火には炎を消すだけでなく，内部まで冷却する間ガス濃度を保ち，その間酸素濃度の低下を計らねばならないので，ハロン1301は不向きで，二酸化炭素を用いる方が優れている。

引用文献

1) Standard on Carbon Dioxide Extinguishing Systems : *NFPA No.*12(1975)

2) Standard on Halogenated Fire Extinguishing Agent Systems—Halon1301 : *NFPA No.*12A(1975)

3) 消防法施行規則：昭和36年自治省令第6号（昭和36年4月1日）

4) Williamson, H.V. : *Fire Tech.* **8** 269-77(1972)

5) Cholin, R. : *Fire J.* **66** 〔2〕19-23(1972)

Extingishment of Deep-seated Fires by Halon 1301 and Carbon Dioxide.

(Abstract)

by Shuzo Yamashika

(Received May 8, 1980)

In case of extinguishing class A fires by using gaseous agents, total flooding systems is used. To extinguish the deep-seated fire, concentration of gaseous agents surrounding the fires must be kept long time to cool down. As there is a severe difference between the flame extinguishing concentration of Halon 1301 and that of carbon dioxide, the former has little effective decrease of oxygen concentration to stop the smoldering combustion. It is a question whether Halon 1301 can extinguish the deep-seated fires or not. The object of this study is to make clear the above.

The experiment was conducted by using wood crib, corrugated fibre-board, cotton for cusion, and foam rubber for cushion shown in from Fig. 1 to Fig. 4 as models of deep seated fires. After 6 min. preburn, the extinguishing agent was discharged. After 10 min. of discharging, the fire model in the enclosure was checked whether the fire was completely extinguished or not.

The result shows that the deep-seated fires can be extinguished by application of a large quantity of carbon dioxide and lacking oxygen as expected, but not Halon 1301 as a result of a large amount of smoke and decomposition gas of Halon 1301 except the case of wood crib.

Then it was concluded that carbon dioxide should be used to extinguish the deep-seated fires, and Halon 1301 should not be used.

セルロース系防炎物質より発生する有毒ガス

—セルロースおよびリン酸二アンモニウム(DAP)処理セルロース—

箭内英治・斎藤　直

(昭和55年5月16日受理)

1．はじめに

近年，建築材料や日用品に合成高分子物質が広く用いられるようになるにつれて，これらの物質が火災に遭遇した際に発生する有毒ガスにより犠牲者の数が増加し，有毒ガスの問題が重要視されるようになった。

今日の高層多密化建築の時代においては，建物本体の不燃化は進んでいるが，カーテン，内装材，家具などの不燃化は困難な面をもっている。それゆえ，これらの素材として防炎処理をほどこした材料や難燃性物質が多用されていく傾向にある。したがって，これらの物質の火災時における有毒ガスの発生性状に関して知見を得ておくことは重要である。

火災時に発生する有毒ガスによる危険性については，従来，発生する有毒ガスの総量のみが問題にされて来たが，避難を考慮する場合はガスの発生速度が重要であり[1]発生する有毒ガスの総量のみから火災時の有毒ガスによる危険性を論じるのは無理がある。

本研究では，古くから使用されている木材，綿などの主成分であるセルロースおよびリン酸二アンモニウム（DAP）で防炎処理したセルロースの空気中での熱分解による発生ガスの分析結果と最大重量減少速度より，それぞれの試料の火災時における危険性の検討を行なったものである。

2．実験方法

2.1.　試料

未処理セルロースは，市販のセルロース粉末（東洋沪紙K,K製,300メッシュ以上）を用いた。DAP処理セルロースは，1 mol/ℓのDAP水溶液を作り，この溶液でセルロース粉末を処理した後，約50℃の恒温槽で24時間乾燥させたものをデシケーターに保存して用いた。なお，リンバナドモリブデン酸法（比色法）によってリンの含有量を求めた結果，2.74%であった。

2.2.　装置

等温熱分解に用いた装置は，熱天秤，赤外線瞬間加熱炉および雰囲気調整装置より構成され，試料を急速に所定の温度へ上昇させ等温熱分解させる事ができるものである。なお，この装置の詳細は既に報告してある[2]。ここで，酸素濃度を調整した雰囲気の流量を，重量変化測定の場合には1.2ℓ/min.とし，ガス分析の場合には発生ガスの分析が困難となるため0.22ℓ/min.とした。

物質のおおまかな熱挙動を知るため，昇温法による熱重量曲線を求めた。ここで用いた熱天秤は真空理工製TGD－3000で，透明石英製の試料セルに10mgの試料を採取し，酸素濃度21%，空気流量50mℓ/min.,昇温速度10℃/min.で測定を行なった。

2.3.　測定

2.3.1.　重量変化の測定

等温熱分解による重量変化の測定において，前述の装置を用い，試料を50mgとし重量変化を測定した。加熱温度は250～550℃の範囲で25℃ずつ変化させ，15秒以内に試料温度が一定となるようにした。また，酸素濃度21%と15%の2通りの雰囲気について測定を行なった。

2.3.2. 熱分解ガスの分析

試料を100mg採取し，350～550℃の範囲で50℃毎に温度を変え，それぞれの温度で4分間試料の熱分解を行なった。分解生成ガスは，排出口から直接サラン製のサンプリングバッグに捕集し分析した。一酸化炭素および炭酸ガスは5cmの気体セルに入れ，日本分光K.K製DS－701G型赤外分光光度計で，その他の分解生成ガスは，日本電子K.K製JMS-D100型ガスクロマトグラフ—質量分析計（GC-MS）でそれぞれ分析した。また，ガスクロマトグラフに導入した気体量は2mℓである。カラムは2mのガラス製（内径2mm）のものに，ポラパックQS(80～100メッシュ)を充填し，昇温法によって分析を行なった。なお，ガス分析についても重量変化の測定の場合と同様に酸素濃度を21%，15%の2通りについて行ない酸素濃度の影響を調べた。

3. 実験結果

3.1. 昇温法による熱重量曲線

未処理セルロースおよびDAP処理セルロースの熱重量曲線を**Fig. 1**に示す。いずれの試料についても初めの3%程度の重量減少は水分の蒸発によるものである。未処理セルロースでは，280℃付近から熱分解による急激な重量減少を示し，次いで残渣の燃焼が500℃付近まで続く。一方，DAP処理セルロースは，未処理セルロースに比べ重量減少開始温度が低く，180℃付近から熱分解による重量減少が始まり，残渣の燃焼が240℃付近から600℃以上まで続く。なお，600℃での残渣量は約9%である。

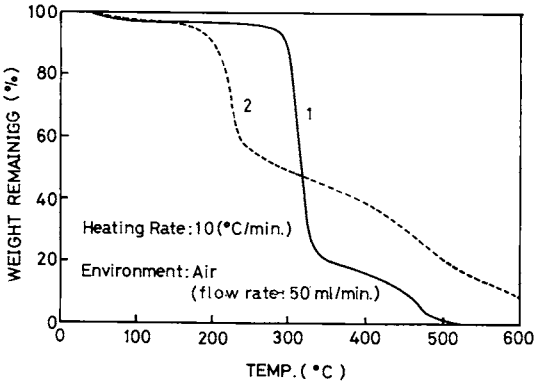


Fig. 1 Thermogravimetric curves in air flow.
1. Untreated Cellulose 2. 1 mol DAP treated Cellulose

3.2. 等温熱分解による重量減少曲線

酸素濃度21%の空気気流中で，温度範囲250～500℃まで50℃毎の等温熱分解曲線を未処理セルロースについて**Fig. 2**に，DAP処理セルロースについて**Fig. 3**に示す。初期の小さな重量減少は水分の蒸発と赤外線瞬間加熱による急激な加熱のために生じる試料表面の分解が含まれる。主要な熱分解は，初期の小さな重量減少に続く急激な重量減少であり，温度が高くなると急速に重量減少速度を増す。未処理セルロースとDAP処理セルロースを比べるとDAP処理セルロースの方が低温から分解を開始し残渣量が多い。

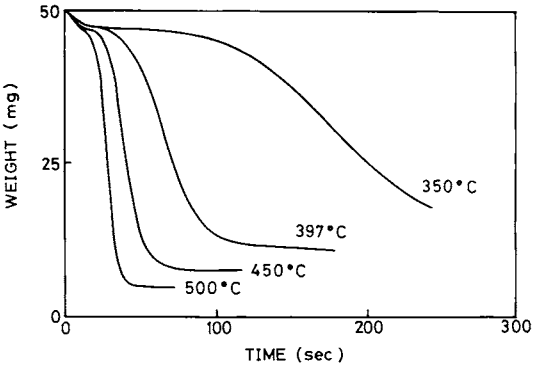


Fig. 2 Weight remaining of untreated cellulose pyrolized in air flow at temperature range 350 ~ 500°C.

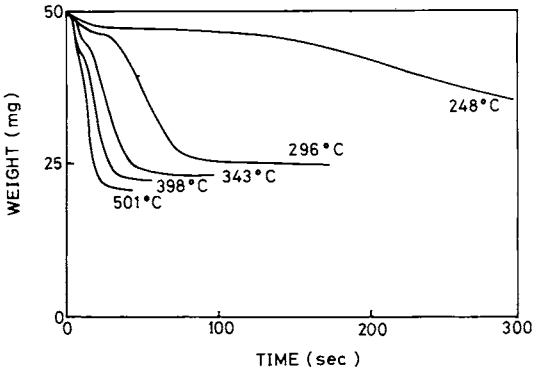


Fig. 3 Weight remaining of 1 mol DAP treated cellulose pyrolized in air flow at temperature range 248 ~ 501°C.

また，雰囲気の酸素濃度を15%に減じた場合の重量

減少曲線に与える影響を調べたが，酸素濃度21%の場合と大きな差は見られなかった。

3.3. 熱分解ガスの分析

未処理セルロースおよびDAP処理セルロースを500℃で熱分解した際に発生したガスのガスクロマトグラフを**Fig.4**に，その同定結果を**Table 1**に示す。熱分解

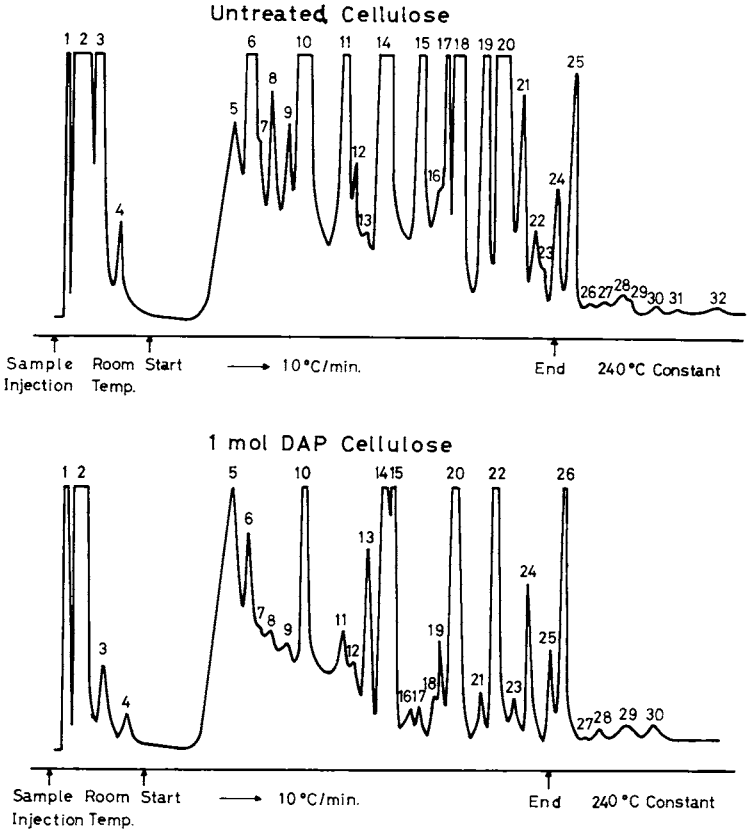


Fig. 4 Gas chromatograms of pyrolysis products. Decomposition temperature: 500°C Sample weight: 100 mg Air supply rate: 220 ml Gas chromatography column: 2 m, Porapak QS (80 ~ 100 mesh)

ガスの成分は約30種検出された。その中には，炭酸ガス，一酸化炭素，パラフィン系およびオレフィン系炭化水素，アルコール類，アルデヒド類，ケトン類，フラン類，芳香族化合物などが含まれていた。また，DAP処理セルロースの場合には，微量であるがシアン化メチルなどのシアン化合物も検出された。

熱分解ガスのうち主要な生成物について，単位分解量当たりの発生量を**Tables 2～3**に示す。さらに，**Figs. 5～6**には炭酸ガスおよび一酸化炭素の発生量の温度の関係を示す。炭酸ガスの発生量は分解温度が450℃までは未処理セルロースとDAP処理セルロースの差はほとんどないが，450℃以上になると未処理セルロースの方がDAP処理セルロースの約2倍になる。また，一酸化炭素の発生量は，分解温度が450℃まで未処理セルロースよりDAP処理セルロースの方がわずかに大きいが，450℃を越えると逆になる。

未処理セルロースからの分解生成ガスは，分解温度が450℃まではゆるやかに増加するが，その温度を越えると急激に増大し始める。それに対して，DAP処理セルロースからの分解生成ガスは温度の上昇と共に単調に増大する。

Table 1 Identification results of pyrolysis products by GC-MS

	Untreated Cellulose	1 mol DAP treated Cellulose
Peak No.	Compound	Compound
1	Air	Air
2	Carbon dioxide	Carbon dioxide
3	Ethylene + Acetylene	Ethylene + Acetylene
4	Ethane	Ethane
5	Water	Water
6	Propylene	Propylene
7	Propane	Propane
8	Methylacetylene or Allene	Methylacetylene or Allene
9	Methyl Alcohol	Methyl Alcohol
10	Acetoaldehyde	Acetoaldehyde
11	Butane + Butadiene	Butane + Butadiene
12		
13		Acetonitrile
14	Acrolein + Furan + Acetone + Propinaldehyde	Furan (contain a little Acrolein)
15		Acetone
16	Isoprene	
17	2,5-Dihydrofuran	
18	Methyl vinyl ketone + Methyl ethyl ketone + 2-Methylfuran + [86]*	Propionitrile
19	Crotonaldehyde	2,5-Dihydrofuran
20	Benzene + Cyclohexane	Methyl vinyl ketone + Methyl ethyl ketone + 2-Methylfuran + [86]*
21	2,5-Dimethylfuran + [100]*	Crotonaldehyde
22		Benzene + Cyclohexane
23		2,5-Dimethylfuran
24	Toluene	
25	Furfural	Toluene
26		Furfural
27		
28	Xylene	
29	Stylene + 2-Accetylfuran	
30	5-Methyl-2-furfural	5-Methyl-2-furfural
31		

* [ ] の分子量を持つ化合物を含むことを示す。

Table 2 Analysis of primary pyrolysis products from untreated Cellulose by infrared Spectroscopy and Gas chromatograph

	Cellulose (untreated)									
Decomp. Temp. (°C)	350		400		450		500		550	
Oxgen Conc. (%)	15	21	15	21	15	21	15	21	15	21
Carbon dioxide	41.6	33.3	73.8	70.0	94.9	90.3	179	222	202	261
Carbon monooxide	26.5	22.5	35.6	39.3	44.6	49.3	104	114	154	171
Methane	0.08	0.08	0.32	0.29	0.52	0.48	2.07	2.55	4.86	5.13
Ethylene, Acetylene	0.07	0.07	0.33	0.30	0.71	0.64	3.26	5.19	7.10	8.69
Ethane	0.01	0.01	0.12	0.13	0.20	0.19	0.54	0.71	1.13	1.26
Propylene	trace	0.03	0.18	0.18	0.32	0.30	1.15	1.24	2.19	2.14
Propane	trace	trace	0.04	0.04	0.06	0.06	0.12	0.15	0.21	0.23
Methylacetylene or Allene	trace	trace	0.02	trace	0.09	0.08	0.27	0.31	0.44	0.49
Methyl Alcohol	0.07	0.09	0.11	0.11	0.17	0.16	0.46	0.56	0.88	0.98
Acetoaldehyde	0.82	0.83	1.31	1.36	1.57	1.52	4.07	3.77	6.47	6.27
Butene	0.03	0.03	0.09	0.09	0.13	0.12	0.36	0.41	0.72	0.58
Acrolein	trace	0.27	0.42	0.42	0.79	0.70	2.18	1.71	2.72	2.65
Furan	1.26	1.87	1.35	1.64	1.00	1.86	1.33	1.34	1.44	1.41
Methyl Ethyl Ketone	0.74	0.74	0.87	0.81	0.55	0.53	0.62	0.56	0.50	0.52
Residue (%)	39.0	40.9	17.8	18.4	9.1	9.2	3.8	4.2	1.5	1.2

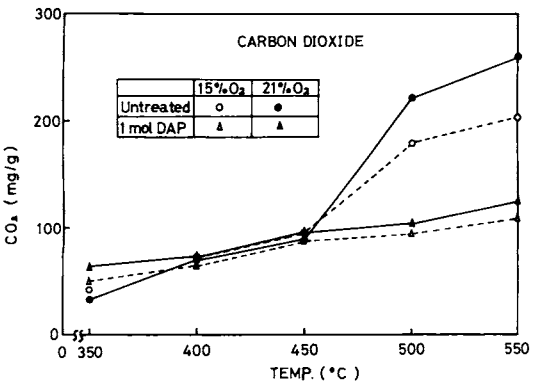


Fig. 5 Relation between temperature vs. evolution of carbon dioxide from untreated cellulose and 1 mol D A P treated cellulose.

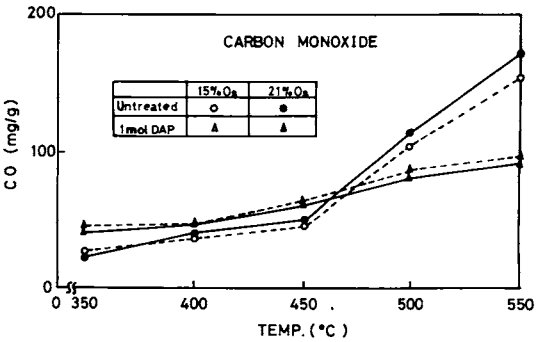


Fig. 6 Relation between temperature vs. evolution of carbon monoxide from untreated cellulose and 1 mol D A P treated cellulose.

Table 3 Analysis of primary pyrolysis products from 1 mol DAP treated Cellulose by Infrared Spectroscopy and Gas chromatograph

Cellulose (1 mol DAP)										
Decomp. Temp. (°C)	350		400		450		500		550	
Oxgen Conc. (%)	15	21	15	21	15	21	15	21	15	21
Carbon dioxide	49.8	63.5	66.8	73.8	88.4	95.9	95.7	104	109	126
Carbon monooxide	44.8	40.4	47.1	46.8	63.4	61.5	85.7	80.3	97.2	91.7
Methane	0.12	0.11	0.22	0.24	0.46	0.45	0.92	0.92	1.88	1.83
Ethylene, Acetylene	0.10	0.10	0.25	0.23	0.48	0.50	0.58	0.82	0.72	0.89
Ethane	0.02	0.02	0.04	0.04	0.09	0.10	0.15	0.15	0.25	0.22
Propylene	0.04	0.04	0.11	0.10	0.23	0.23	0.29	0.38	0.44	0.39
Propane	trace	trace	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.01	–	0.01
Methylacetylene or Allene	trace	trace	0.01	0.01	0.03	0.04	0.05	0.09	0.08	0.08
Methyl Alcohol	0.07	0.07	0.08	0.08	0.10	0.10	0.10	0.15	0.14	0.15
Acetoaldehyde	0.59	0.57	0.66	0.69	0.77	0.74	0.81	0.91	0.94	0.94
Butene	0.02	0.02	0.07	0.06	0.11	0.15	0.15	0.19	0.19	0.20
Acrolein	0.11	0.09	0.24	0.20	0.37	0.31	0.42	0.43	0.47	0.49
Furan	0.41	0.37	0.60	0.62	0.82	0.93	0.81	1.08	1.07	1.07
Methyl Ethyl Ketone	2.50	2.74	2.68	2.88	2.39	2.08	1.78	1.99	2.38	1.96
Residue (%)	47.7	46.8	44.2	42.8	40.5	39.5	36.1	36.4	35.6	34.3

4. 考察

未処理および処理セルロースの等温熱分解における最大重量減少速度を求め，これの対数と分解温度の逆数の関係を **Fig. 7** に示す。未処理セルロースでは400℃

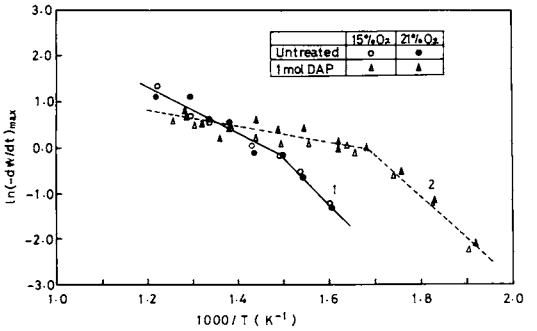


Fig. 7 $\ln(-dX/dt)_{max.}$ vs. $1/T$ plots.
1. Untreated Cellulose 2. 1 mol D A P treated Cellulose

で，処理セルロースでは325℃で折れ曲るそれぞれ２つの直線部分からなり，おのおの次式で示される。

未処理セルロース

$$\left(-\frac{dX}{dt}\right)_{max}=1.1\times10^{7}\exp\left(-\frac{10.5\times10^{3}}{T}\right)\ (350\sim400℃)$$

$$\left(-\frac{dX}{dt}\right)_{max}=9.3\times10^{3}\exp\left(-\frac{5.8\times10^{3}}{T}\right)\ (400\sim550℃)$$

1 mol DAP処理セルロース

$$\left(-\frac{dX}{dt}\right)_{max}=9.4\times10^{7}\exp\left(-\frac{10.5\times10^{3}}{T}\right)\ (250\sim325℃)$$

$$\left(-\frac{dX}{dt}\right)_{max}=82.3\exp\left(-\frac{2.23\times10^{3}}{T}\right)\ (325\sim550℃)$$

ただし，$X=\dfrac{W}{W_0}$

Wは時間tにおける残重量，W_0は初重量である。

温度範囲によって，それぞれ２本の直線関係が得られたのは，低温側と高温側で反応機構が変化したため

と思われる。秋田[3]は減圧下でのセルロースでの熱分解から活性化エネルギーを求め，270～340℃で36Kcal/mol，340～400℃で25Kcal/mol，となることを報告しており，我々の結果と傾向が一致している。しかし，我々の未処理セルロースの等温熱分解より得た活性化エネルギーは，350～400℃で約11Kcal/mol，400～550℃で約6Kcal/molとなり，前述した秋田のセルロースの活性化エネルギーやMadorsky[4]の綿に対する活性化エネルギーの50Kcal/molと比べて小さい。この理由については明確な原因がわからず，さらに検討する必要がある。

発生ガスの毒性に関する考え方は，いくつか提出されている。[5,6] Tsuchiya[5]はある毒性ガスの濃度Cがあるとき，その雰囲気の「毒性」Tを次のように定義した。

$$T = \frac{C}{C_f}$$

ここに，C_fは毒性ガスの30分致死濃度である。また，毒性ガスが二種類以上あるときは，近似的に相加性を仮定して，

$$T = \sum_i T_i = \sum_i \frac{C_i}{C_{f,i}}$$

となる。さらに，これを発展させるために，熱分解あるいは燃焼により，時間$t=t$において，試料単位重量当りに発生するi成分の毒ガス量を$q_i(t)$とし，これが体積Vに拡散したとすると，$C_i(t)=q_i(t)/V$となるから，(2)式は

$$T(t) = \frac{1}{V}\sum_i \frac{q_i(t)}{C_{f,i}}$$

で表わされる。

いま，試料より発生する毒性ガスの危険性を，

$$T(\tau) \geqq 1$$

となる時間$t=\tau$の逆数Hで表わせば，$H(\equiv 1/\tau)$は，30分致死濃度に至る相対的速さを示すことになる。ここで，$t=0$で$q_i(t)=0$であり，$q_i(t)$はtに複雑に関係すると考えられるが，熱分解あるいは燃焼により発生する毒性ガス量は試料減少量に比例すると仮定すれば，

$$q_i(t) = \alpha_i[1 - X(t)]$$

ここに，$X(t) = W(t)/W_o$，W_oは初重量，$W(t)$は時間tにおける試料残量であり，α_iは単位分解量当りに発生するi成分の毒性ガス量である。

さらに，この時期の重量減少を一次で近似できると仮定すると，

$$q_i(t) = \alpha_i \cdot \left(-\frac{dX}{dt}\right) \cdot t \qquad (6)$$

と書き表わせるから，(4)，(6)式より

$$H \equiv \frac{1}{\tau} \leqq \frac{1}{V}\left(\sum \frac{\alpha_i}{C_{f,i}}\right) \cdot \left(-\frac{dX}{dt}\right)$$

$$= \left(-\frac{dX}{dt}\right)\sum I_i \qquad (7)$$

となる。ここに，$I_i = \alpha_i/C_{f,i}$であり，I_iをi成分の毒性指数と呼ぶことにする。

また，Hの最大値H_{max}を危険指数と定義し，

$$H_{max} = \frac{1}{V}\left(\sum_i \frac{\alpha_i}{C_{f\,i}}\right)\left(-\frac{dX}{dt}\right)_{max}$$

により，発生する有毒気体の危険性を評価することにする。ただし，ここではα_iとして4分間等温熱分解した際の値，$(-dX/dt)_{max}$には等熱分解より求めた最大重量減少速度，Vには通常の住居の平均的火災荷重50kg/m²および部屋の高さを3mとして算出される60mℓを用いた。

我々の分析した熱分解生成ガスは，**Table 2～3** からわかるように未処理セルロースおよびDAP処理セルロース共に炭酸ガスと一酸化炭素を除く他の化合物の発生量は極めて少ない。しかし，微量でも毒性の高い化合物があれば考慮する必要がある。分析できた化合物の中で，これに相当する化合物はアクロレインである。したがって，未処理セルロースおよびDAP処理セルロースの熱分解生成ガスの全体的毒性を考える場合，炭酸ガス，一酸化炭素，アクロレインについて考慮すれば十分である。

しかし，アクロレインのC_f値が見あたらないので，未処理セルロースとDAP処理セルロースの各分解温度での毒性指数と危険指数を直ちに求めるわけにはいかない。炭酸ガス，一酸化炭素，シアン化水素のC_f値は，それぞれ，85000ppm，4000ppm，135ppmである。[7] シアン化水素とアクロレインの10分間で人に致命的な損傷を与える濃度の推定値は，それぞれ，350ppm，30～100ppmと報告されている。[8] これからアクロレインがシアン化水素の約3～10倍の毒性があることがわかる。シアン化水素とアクロレインの許容限界濃度TLVの比較では，それぞれ，10ppm，0.1ppmでシアン化水素の100倍の毒性を持つことになる。しかし，皮下投与ーラットでのLD_{50}をシアン化水素とアクロレインについて比べると，それぞれ，3.7mg/kg，50mg/kgとなり，[10] 逆にシアン化水

素の約1/10の毒性となる。このように，比較するデータによってアクロレインの毒性は，シアン化水素の1/10～100倍と広範囲な値をとる。これは，アクロレインの目，気管粘膜，肺などへの強い刺激作用のためと考えられ，アクロレイン本来の持つ毒性に比べ吸入毒性が大きくなる原因と思われる。火災時における有毒ガスの危険性を考える場合，短時間での吸入毒性が重要である。したがって，アクロレインの毒性を前述の10分間で人に致命的な損傷を与える濃度の推定値，すなわち，シアン化水素の約5倍の毒性と仮定すると，アクロレインのC_f値は，シアン化水素のC_f値135ppmの1/5の濃度である約30ppmとなる。これらの値を用いて，未処理セルロースおよびDAP処理セルロースの各分解温度における毒性指数と危険指数を求めたのがTable 4である。

各試料に対する毒性指数の内訳を見ると，未処理セルロースについては，炭酸ガスのそれは小さく，一酸化炭素とアクロレインが同程度である。また，DAP処理セルロースについては，一酸化炭素が最も大きく，次いでアクロレイン，最も小さいのが炭酸ガスである。いずれの試料についても炭酸ガスの全体的毒性への寄与は小さく，全体の5％以下である。結局，どちらの試料についても全体的な毒性を考える場合，我々の行なった測定条件下においては，一酸化炭素とアクロレ

Table 4 Toxicity index (I) and Hazard index (H_{max}) of untreated Cellulose and 1 mol DAP treated Cellulose

Untreated Cellulose										
Decomp. Temp. (°C)	350		400		450		500		550	
$-(dX/dt)_{max}$(1/min)	0.32		1.06		1.82		3.04		4.80	
Oxygen Conc. (%)	15	21	15	21	15	21	15	21	15	21
CO_2 (mg/g)	42	33	74	70	95	90	179	222	202	261
CO (mg/g)	27	23	36	39	45	49	100	110	150	170
Acrolein (mg/g)	trace	0.27	0.42	0.42	0.79	0.70	2.18	1.71	2.72	2.65
I_{CO_2}	4.6	3.6	8.1	7.6	10	9.8	20	24	22	28
I_{CO}	98	84	131	142	164	178	364	400	546	619
$I_{acrolein}$	–	66	102	102	192	170	529	415	660	643
ΣI_i	100	150	240	150	370	360	910	840	1200	1300
H	33	49	260	270	670	650	2800	2600	5900	6200
1 mod DAP treated Cellulose										
Decomp Temp. (°C)	350		400		450		500		550	
$-(dx/dt)_{max}$ (1/min)	1.38		1.80		2.26		2.78		3.30	
Oxygen Conc. (%)	15	21	15	21	15	21	15	21	15	21
CO_2 (mg/g)	50	64	67	74	88	96	96	104	109	126
CO (mg/g)	45	40	47	47	63	62	86	80	97	92
Acrolein (mg/g)	0.11	0.09	0.24	0.20	0.37	0.31	0.42	0.43	0.47	0.49
I_{CO_2}	5.5	7.0	7.3	8.1	9.6	10	10	11	12	14
I_{CO}	164	146	171	229	226	313	291	353	353	458
$I_{acrolin}$	27	22	58	49	90	75	102	104	114	119
ΣI_i	200	180	240	230	330	310	430	410	480	590
H	270	240	340	410	740	700	1200	1100	1600	2000

インを考慮すればよいことになる。しかし，実際の火災において，アクロレインが見出されたという報告は少ない[8]。これは，アクロレインが一酸化炭素に比べきわめて微量しか発生せず検出が困難であることや，守川が報告しているように[11] 500℃以上の空気中において，物質が有炎燃焼を起こすためにアクロレインが二次的に酸化分解することが考えられる。

未処理セルロースとDAP処理セルロースの危険指数を比べると，450℃以下の温度では，未処理セルロースよりDAP処理セルロースの方が大きいが，500℃から逆転し，550℃になると，未処理セルロースの方がDAP処理セルロースより約3倍も大きくなっている。

この原因として，

i）最大重量減少速度は，低温側においてDAP処理セルロースの方が未処理セルロースより大きいが，高温側になるとその関係が逆転する。

ii）高温側では，未処理セルロースの熱分解によって生成した中間生成物の二次的分解が急激に増大する。

の2つが考えられる。ii)については，次のようなことから明白である。それは，未処理の木材やセルロースは熱分解によって可燃性のタール状物質を生成し，DAPなどのリン酸系防炎剤で処理することにより可燃性のタール状物質を減じることが知られており[12]さらに450℃から500℃にかけての残渣量の減り方をみると，未処理セルロースの場合，約9％から約4％に減っているだけで，全体の分解量でみるとわずか5％程度増大しているにすぎない。しかし，炭酸ガスやその他の化合物が450℃から500℃にかけて急激に増大しており，このことは，残渣とならない中間生成物の二次的分解が高温側において急激に増大したためと考えられる。

我々の未処理セルロースおよびDAP処理セルロースの等温熱分解から発生する有毒ガスの評価は，岸谷ら[13]の無処理合板と難燃合板からの有毒ガスの危険性評価と逆になった。岸谷らは難燃合板の方が低温側（350℃）において，無処理合板より危険性が小さいが，高温側（500℃）になると，難燃合板の方が無処理合板より危険性が大きいという結果を出しており，我々の結果と異なった。また，上原ら[14]の行なった未処理レーヨンとDAP処理レーヨンに対する電気炉法による結果は，一酸化炭素の発生量が低温（400℃）において，未処理レーヨンよりDAP処理レーヨンの方が多量に発生しており，我々の結果と矛盾しない。しかし，より高い600℃でも未処理レーヨンよりDAP処理レーヨンの方が一酸化炭素を多量に発生しており，我々の高温側における結果と異なった。これらの原因については，材料や試験法の違いなど種々な要因が考えられるが明白ではなく，さらに検討する必要がある。

参考文献

1）牧　廣：化学と工業，**24**，1035(1971)

2）斎藤直，箭内英治：消防研究所報告，**42**，19(1976)

3）秋田一雄：消防研究所報告，**9**，1(1959)

4）S,L,Madorsky：*Thermal Degradation of Organic Polymers, John Wiley & Sons. Inc.*，P252(1964)

5）土屋能男：*Bulletin of Japanese Association of Fire Science and Emgineering*，**28**，1(1978)

6）斎藤文春：火災，**23**，25(1973)

7）K.Sumi and Y.Tsuchiya：*Journal of Fire & Flamability* **4**，15(1973)

8）J.B.Terrill，R.R.Montgomry and C.F.Reinhardt：*SCIENCE*，**200**，1343(1978)

9）須藤：安全工学，**16**，108(1977)

10）海外技術資料研究所編：4万2千種化学薬品毒性データ集成

11）守川時生：*Bulletin of Japanese Assciation of Fire Scienece and Engineering*，**26**，1(1976)

12）L.K.M.Lan，D.P.C.Fung，Y.Tsuchiya and K.Sumi：*Journal of Applied Polymer Science*，**17**，391(1973)

13）岸谷，中村：災害の研究Ⅷ，災害科学研究会，P210（1975）

14）Y.Uehara and E.Yanai：*Journal of Fire & Flammability*，**4**，23（1973）

Toxic Gases from Flame Retardant Cellulosic Materials
—Untreated Cellulose and Diammonium Phosphate (DAP) treated Cellulose—

(Abstract)

Eiji Yanai and Naoshi Saito

(Received May 16, 1980)

The measurement of the weight loss rates and the analysis of the decomposition products were carried out to estimate their toxicity of gases generated from untreated cellulose and cellulose treated with flame retardant (D A P) in fire. The relation between absolute temperature vs. maximum weight loss rate is expressed by the following equations,

Untreated Cellulose

$(-dX/dt)_{max.} = 1.1 \times 10^7 \exp(-10.5 \times 10^3/T)$ (350 ~ 400°C)
$(-dX/dt)_{max.} = 9.3 \times 10^3 \exp(-5.8 \times 10^3/T)$ (400 ~ 550°C)

1 mol D A P treated Cellulose

$(-dX/dt)_{max.} = 9.4 \times 10^7 \exp(-10.5 \times 10^3/T)$ (250 ~ 325°C)
$(-dX/dt)_{max.} = 82.3 \exp(-2.23 \times 10^3/T)$ (325 ~ 550°C)

where $W = W/W_0$, W is the residual weight at any time, t, and W_0 is the initial weight.

About thirty compounds of the decomposition products were identified by means of gas chromatograph–mass spectrometry (GC–MS) and infrared spectroscopy. Carbon monoxide and acrolein were found to be the key products in estimating the toxicity of fire gases. Other compounds are considered to be negligible in estimating their toxic effects because of their small evolution as long as the decomposition temperature is limited to 250 ~ 550°C. At low temperature, untreated cellulose is less hazardous than diammonium phosphate-treated cellulose but at high temperature, this relation is reversed.

音による避難誘導についての研究(第1報)
—建物通路における一方向への避難誘導—

渡部　勇市

(昭和55年5月29日受理)

1.　まえがき

火災時に避難通路を知らないため，どちらへ避難したらよいか判断がつかず，右往，左往してしまい，遂には，煙にまかれて逃げ遅れてしまうことが多くある。このような時，避難者に適切な情報を与え，速やかに避難誘導することは重要なことである。

避難誘導方法として視覚による方法，聴覚による方法があり，それぞれ特長[1]がある。視覚による方法は，誘導灯に関連して神[2]により多くの研究がなされている。しかし緊急時には比較的有効であると思われる聴覚を利用した避難誘導の研究は，まだなされていない。

聴覚には言葉による情報の伝達の他に，音の方向を認知させる働きがある。この音の方向は，建物通路を知らない人にとっては，避難するときの重要な手掛りになると思われる。

前報[3]では大きな空間を有する体育館で音の方向感覚による誘導実験を行い，音の方向通りにほぼ誘導することが出来ることを示した。本報は，音の反響が比較的多い建物通路内で，この誘導方法がどの程度有効であるか検討したものである。

実験は，建物通路内の両端の出口に取付けたスピーカのうちどちらか一方のスピーカを鳴らし，その鳴っているスピーカの方向が判断できるかどうかを，被験者の応答により求めた。この実験を，被験者の向き，発生音の種類等の条件を変えて行った。

2.　実験方法

2.1.　建物通路

実験に使用した建物通路を **Fig. 1**に示す。この通路は長さ45m，幅2.27m，高さ2.40mであり，通路の両端が出口となっている。側壁はコンクリート造り，床面はプラスチックタイル敷き，天井は石こうボード張りである。

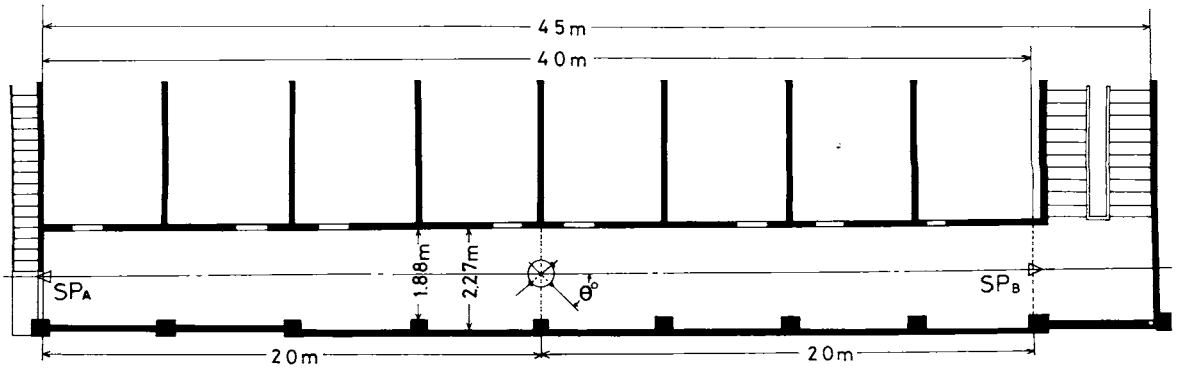


Fig. 1　Corridor used for the experiment
▷: Speaker　Q: Subject

2.2. スピーカ

スピーカは，**Fig. 1**に示すように両端の出口の床面から高さ2.0mの位置に取付けた。両スピーカの距離は40mとした。スピーカは，トランペット形で，口径21cm，定格入力10W，周波数特性300～7000Hzのものである。ここで，**Fig.1**の左側出口スピーカをSP_A，右側出口スピーカをSP_Bとする。

2.3. 音の発生と応答方法

音の発生は切換スイッチにより両端の出口のどちらかのスピーカをランダムに順次鳴らすようにした。被験者は，指定された位置におかれた椅子に座り，**Fig. 2**に示すような押しボタンスイッチを持って，どちら側から聞こえてくるか応答した。一試験につき，スピーカを鳴らす回数はスピーカSP_A，SP_Bそれぞれランダムに10回ずつとし，合計20回とした。

Fig. 2 Pushbutton switch

押しボタンスイッチの押し方は，右手方向から聞こえてきたら右手に持ったスイッチを押し，左手方向から聞こえてきたら左手に持ったスイッチを押すようにした。音の方向が分らない時には，両手に持ったスイッチを同時に押すようにした。押しボタンスイッチは分った時点で押すようにし，押す時以外は，あわてて押し間違いのないようスイッチボタンから親指を離すようにした。

また，音が鳴り始めてから音の方向が分るまでの反応時間も押しボタンスイッチにより測定した。

被験者は，実験本番前に10回程度練習を行ってから本番の実験を行った。目の開閉は，被験者の自由意志とした。

2.4. 発生音の種類

使用した発生音の種類は，代表的な音である人間の声(ニュース音で男の声)，正弦波の断続音，スイープ音，ホワイトノイズ，正弦波の連続音の5種類とし，その詳細を**Table 1**に示す。

2.5. 音の方向知覚の実験方法

2.5.1. 被験者の向きによる方向知覚の違い

被験者の向きによって方向知覚がどのように変わるかを調べる。被験者はスピーカSP_A，SP_Bの中央の位置で，スピーカSP_B方向に対して0°，15°，45°，90°に向いた椅子に座り実験を行った。被験者が椅子に座った時特に頭を動かさないように固定しなかったが，出来るだけ動かないように指示した。音は人間の声とし

Table 1 Kind of generated sound

Kind of generated sound	Frequency	Contents
Human voice	–	NHK radio news, Male voice
Beep sound	1.5 kHz	Repeated sound of 0.5 sec sinusoidal waves and 0.5 sec pause
	3.0 kHz	〃
Whoop sound	–	Repetition of sound increased linearly frequency from 1 kHz to 2 kHz in one second.
White noise	–	Continuous sound of white noise
Sinusoidal waves	0.375 kHz	Continuous sound of sinusoidal waves
	0.750 kHz	〃
	1.500 kHz	〃
	3.000 kHz	〃
	6.000 kHz	〃

た。音の大きさは指示騒音計で測定した。騒音レベルはスピーカSP_A, SP_Bの中央の位置で70dB(A)になるようにした。被験者は22, 23, 24, 32, 38, 40才の男性6人，20才の女性1人の合計7人である。

2.5.2. 発生音の種類による方向知覚の違い

発生音の種類によって方向知覚がどのように変わるかを調べる。**Table 1** に示した5種類の音について実験を行った。**2.5.1.**の被験者の向きによる違いの実験で，0°以外の向きでは，向きの如何に拘らず同じような傾向を示す結果が得られた。そこでこの実験では，被験者はスピーカSP_A, SP_Bの中央の位置で，スピーカSP_B方向に対して45°に向いた椅子に座り実験を行った。騒音レベルは前の実験と同じようにスピーカSP_A, SP_Bの中央の位置で70dB(A)になるようにした。被験者は23, 24, 32, 42才の男性4人であり，正弦波の連続音の時だけ被験者数は3人である。(24才の被験者を除く

2.5.3. 通路出口壁の反射音による方向知覚の影響

出口壁からの反射によって方向知覚がどのように変わるかを調べる。被験者はスピーカSP_Aの側の出口から3m離れた位置で，スピーカSP_B方向に対して45°に向いた椅子に座り実験を行った。音は人間の声とし，騒音レベルは前の実験と同じようにスピーカSP_A,SP_Bの中央の位置で70dB(A)なるようにした。被験者は**2.5.2.**の発生音の違いについての実験と同じ4人である。

3. 実験結果と考察

3.1. 被験者の向きによる方向知覚の違い

被験者の向きによって音の方向知覚がどのように変わるか **Table 2** に示す。通路方向に対して15°, 45°, 90°に向いている時は，音の発生した方向をほぼ正しく判断するが，通路方向を向いている0°の時は，音の発生した方向に答えている割合がかなり低く，音の方向を正確に判断できない。

よって，この実験から人間の声の場合，建物通路の反響によって音の方向知覚は影響を受けず，通路方向以外を向いている時は音の方向をほぼ正しく判断することができることが分った。通路方向を向いている時でも，実際の避難行動では頭を多少動して，音の方向を判断するので，音の方向を正しく認識することができると思われる。

被験者が通路方向を向いている時，**Table 2** から音源が被験者の前方にある場合8.6%，音源が被験者の後方にある場合27.1%の割合で，音源とは反対の方向に答えている。特に，音源が被験者の後方にある場合，前方から聞こえてくると答える割合が多くなっている。これは，スピーカの見える前方から音が聞こえてくるという先入観があるために，被験者は前方から聞こえてくると誤ってしまうようである。

反応時間は，**Table 2**に示すように通路方向に対して15°, 45°, 90°に向いている時は，約0.5秒であるが，通路方向を向いている0°の時は，その数倍の反応時間がかかっている。これは通路方向を向いている時，それだけ音の方向が分りにくいことを示している。

Table 2 Difference in the sensing of a sound direction due to the orientation of the subject

Sound direction	Identification of the sound direction	0°		15°		30°		90°	
		R %	T sec	R %	T sec	R %	T sec	R %	T sec
Generation of sound from SP_B	SP_B direction	82.8	1.33	100	0.51	100	0.47	100	0.48
	SP_A direction	8.6	2.71	0		0		0	
	N	8.6	4.60	0		0		0	
Generation of sound from SP_A	SP_A direction	58.6	1.52	97.1	0.56	100	0.48	100	0.45
	SP_B direction	27.1	1.52	2.9	1.12	0		0	
	N	14.3	3.55	0		0		0	

R: Percentages of response
T: Reaction time
N: The direction in which the sound is heard cannot be identified.

3.2. 発生音の種類による方向知覚の違い

発生音の種類によって方向知覚がどのように変わるか **Table 3, 4** に示す。**Table 3** から人間の声，ホワイトノイズ，正弦波の断続音，スイープ音のいずれも，

音の発生した方向をほぼ正しく判断するが，**Table 4** に示す正弦波の連続音だけは，音の発生した方向に答えている割合がかなり低く，音の方向を正確に判断できない。

音の方向の分り易すさを **Table 3** に示す反応時間の早さによって比べてみる。人間の声，ホワイトノイズ正弦波の断続音，スイープ音の順番で早く答えている。スイープ音になると人間の声に比べて反応時間が約2倍かかっていて，それだけ音の方向が分りにくい。音の周波数，音圧の変化が大きくなるに従い，音の方向が分り易く，人間の声が音の方向を判断するのに一番適していることが分った。

Table 4 に示す正弦波の連続音は側壁の反射による定在波等によって音の方向を分りにくくしていると考えられる。

周波数が6000Hzの場合には，音源の方向をある程度正しく答えているが，3000Hz以下になると音源の方向によらず，一定の方向に片よって聞こえる傾向がある。

Table 3 Difference in the sensing of a sound direction due to the kinds of generated sounds.

Sound direction	Identification of the sound direction	Human voice		White noise		Beep sound 1.5 kHz		Beep sound 3.0 kHz		Whoop sound	
		R %	T sec	R %	T sec	R %	T sec	R %	T sec	R %	T sec
Generation of sound from SP_A	SP_A direction	100	0.52	100	0.61	100	0.65	100	0.74	100	0.88
	SP_B direction	0		0		0		0		0	
	N	0		0		0		0		0	
Generation of sound from SP_B	SP_B direction	100	0.49	100	0.61	100	0.77	100	0.64	97.1	1.06
	SP_A direction	0		0		0		0		0	
	N	0		0		0		0		2.9	4.84

R: Percentages of response
T: Reaction time
N: The direction in which the sound is heard cannot be identified.

Table 4 Difference in the sensing of a sound direction due to sinusoidal waves.

Sound direction	Identification of the sound direction	Sinusoidal waves 0.375 kHz		0.750 kHz		1.500 kHz		3.000 kHz		6.000 kHz	
		R %	T sec	R %	T sec	R %	T sec	R %	T sec	R %	T sec
Generation of sound from SP_A	SP_A direction	56.7	0.93	60.0	1.34	16.7	1.19	23.3	0.88	53.3	0.98
	SP_B direction	17.6	1.03	10.0	0.91	80.0	0.85	46.7	1.38	10.0	1.02
	N	26.7	0.84	30.0	2.17	3.3	5.02	30.0	1.50	36.7	1.32
Generation of sound from SP_B	SP_B direction	26.7	0.89	6.7	0.92	86.7	0.93	53.3	0.88	40.0	1.06
	SP_A direction	43.3	1.06	63.3	1.41	3.3	1.81	16.7	1.10	16.7	1.16
	N	30.0	0.86	30.0	1.77	10.0	2.71	30.0	1.54	43.3	1.27

R: Percentages of response
T: Reaction time
N: The direction in which the sound is heard cannot be identified.

3.3. 通路出口壁の反射音による方向知覚の影響

通路出口壁から3m離れた位置での方向知覚がどのように変わるか **Table 5** に示す。**Table 5** から，出口壁の反射音によって影響されず，正しく音の方向を判断することが出来ることが分る。これは，反射壁の吸収率にも関係するが，今回の実験では反射音に比べて直接音が非常に大きいこと，直接音と反射音が分離したエコーにならずに，直接音の方が時間的に早く耳に

到達することなどによるものと考えられる。

Table 5 Influence by the echoes from the exit walls of the corridor.

Sound direction	Identification of the sound direction	P	
		R %	T sec
Generation of sound from SP_A	SP_A direction	100	0.56
	SP_B direction	0	
	N	0	
Generation of sound from SP_B	SP_B direction	100	0.76
	SP_A direction	0	
	N	0	

P: Position 3 m apart from the exit walls of the corridor.
R: Percentages of response
T: Reaction time
N: The direction in which the sound is heard cannot be identified.

4. 結　論

建物通路内でスピーカを1個鳴らした場合の音の方向知覚実験を行った結果，次のようなことが分った。

(1) 音源の方向は，周波数，音圧の時間的変化の大きい音ほど分り易い。人間の声がもっとも分り易く，正弦波の連続音が，もっとも分りにくい。

(2) 通路方向以外を向いている時には，音源の方向が分るが，通路方向を向いている時には音源の方向が分らなくなる。しかし通路方向を向いている時でも，少し頭を動かせば分るようになる。

(3) 今回の実験通路では，通路出口壁の反射音の影響をあまり受けなかった。

以上は長さ45mの **Fig.1** に示す通路での実験結果である。さらに音響特性の違う通路での実験データが必要と思われる。

終りに，この研究を手伝っていただいた明電舎の大川口郁夫氏に感謝します。

参考文献

1）森惣介，栗山好男，地下駅旅客誘導の考察その1 日本建築学会学術講演梗概集，p.589 10月(1974)

2）神忠久，煙中での誘導標識の見透し距離について（I）日本建築学会論文報告集NO.182 p.21(1971)

3）渡部勇市，音声による避難誘導についての研究 消防研究報告 NO.41 p.1(1976)

A Study on Sound Guidance for Evacuation (1) —Sound Guidance of One Direction in a Corridor—

(Abstract)

Yuichi Watanabe

(Received May 29, 1980)

Sound guidance by using the sensing of a sound direction was examined in a 45 m long straight corridor in a building. A speaker was set at each of both the exits of the corridor, and either speaker was sounded freely by a change-over switch. A subject sat down on a chair specified in the corridor, and replied by pressing the pushbutton switch, as to the direction in which he heard a sound. The pressing of the pushbutton switch enabled the direction of the sound heard and reaction time to be known. Experiments were made by changing such conditions as the kind of generated sound and orientation of the subject, and as a result, the following were found.

(1) In a corridor of a building, the more the frequency and the sound pressure are changed in relation with time, the easier the direction of sound source can be identified. Human voices are the most effective and sinusoidal waves are the least effective in the identification of the sound direction.

(2) When the face of a subject is in the corridor direction, the direction of sound source cannot be understand. But since the head is surmised to be moved frequently in actual evacuation behavior, the direction of sound will be able to be identified.

(3) In the present experiment, the direction of source is able to be identified without influence by the echoes from the exit walls of the corridor.

音による避難誘導についての研究(第2報)
—建物通路における二方向への避難誘導—

渡部　勇市

(昭和55年5月29日受理)

1.　まえがき

前報[1]では，建物通路の両端の出口に取付けたスピーカのどちらか一方のスピーカを鳴らし，音の方向感覚による一方向への避難誘導について検討した。

しかし建物構造によっては，二方向へ避難出来る場合も多くあると思われる。そこで本報では，音の方向感覚による二方向への避難誘導について検討した。二方向への誘導方法としては，両端の出口スピーカの音が重ならないように交互に出す方法と両端の出口スピーカの音が重なるように同時に出す方法がある。音を交互に出す方法は前報[1]で示した音の方向が交互に変わることであるので，ここでは両端の出口スピーカの音を同時に鳴らす方法についてのみ実験を行った。

実験は前報[1]と同じ建物通路内で，両端の出口に取付けたスピーカを同時に鳴らし，被験者の通路内の位置，向きによってどちらの出口方向から聞こえてくるかを，被験者の応答により求めた。この実験を，発生音の種類等の条件を変えて行った。

2.　実験方法

2.1.　建物通路の音圧分布

音は人間の声（ニュース音で男の声）を用い，測定は指示騒音計を用いた。**Fig. 1**に示すスピーカSP_ANO.6を鳴らした時と，スピーカSP_BNO.6を鳴らした時の建物通路のそれぞれの音の減衰特性を**Fig. 2**に示す。これは床面から高さ1mの通路中心における測定結果である。この実験に使用した建物通路の音の減衰値はスピーカSP_ANO.6を鳴らした時0.46dB(A)/m，スピーカSP_BNO.6を鳴らした時0.37dB(A)/mである。音の方向によって減衰値が異なっているのは側壁のスチール書庫，階段の配置等が影響していると思われる。

又両端のスピーカの中央の位置（**Fig. 1**の15m地点）における通路断面の水平方向，垂直方向の音圧分布をそれぞれ**Fig. 3 (a)**, **Fig. 3 (b)**に示す。通路断面の音圧分布は，ほぼ一様である。

2.2.　スピーカ

この実験では，被験者が通路内を移動する代りに，音源であるスピーカの発生位置を変えた。そのために**Fig. 1**に示すように両端の出口から1m間隔で床面から高さ2.0mの位置に11個ずつ取付けた。スピーカはそれぞれ重ならないよう，横方向に20cmずつ，ずらして取付け，直接音が通路に伝わるようにした。スピーカは前報[1]と同じトランペット形スピーカである。

音は30m離れた両端スピーカSP_AとSP_Bの同番号が同時に鳴るようにした。切換スイッチにより両端スピーカNO.1からNO.11まで任意のスピーカから音を出せるようにした。これにより見掛上，音の発生位置を10mの範囲で変えることができる。

2.3.　音の発生と応答方法

被験者は指定された椅子に座り，両端の出口の同番号スピーカSP_AとSP_BをNO.1からNO.11までランダムに鳴らし，前報[1]と同じ押しボタンスイッチを両手に持って，どちら側から聞こえてくるか応答した。一試験につき，被験者に鳴らす回数はスピーカ番号ごとに10回とし，合計110回である。

押しボタンスイッチでの応答方法は前報[1]と同じ要領である。

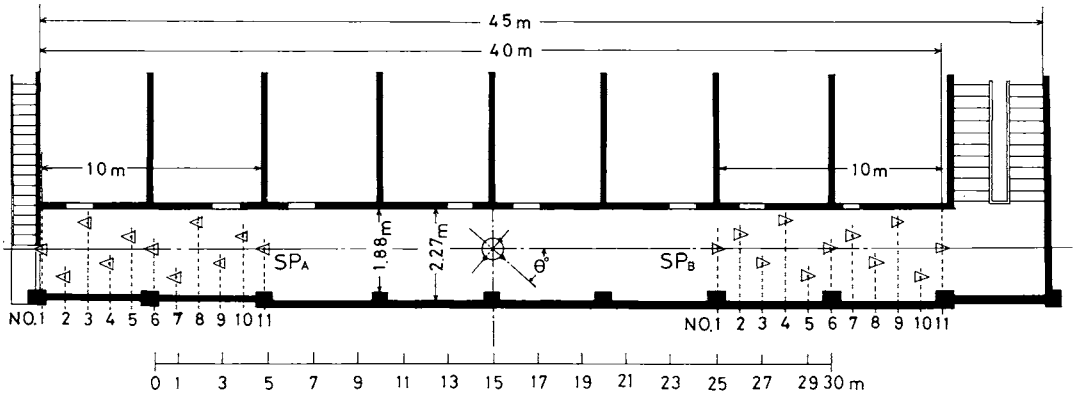


Fig. 1 Arrangement of speakers in a corridor
▷ : Speaker　　Q : Subject

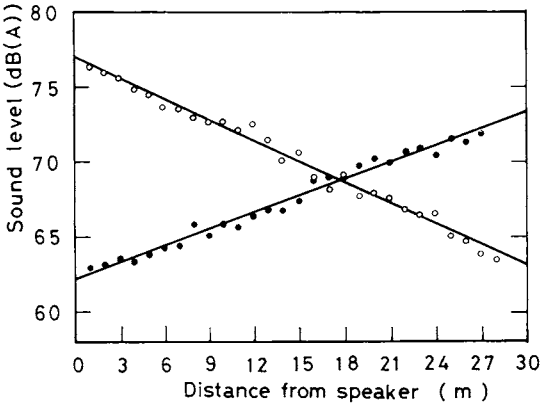
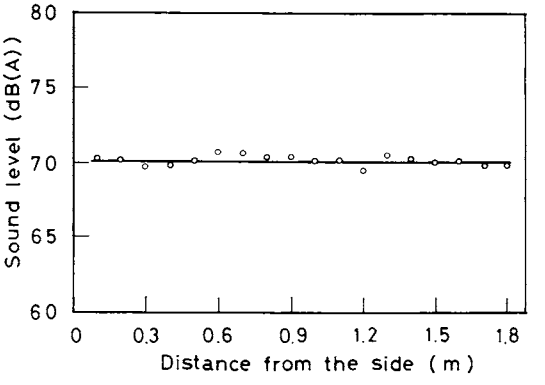
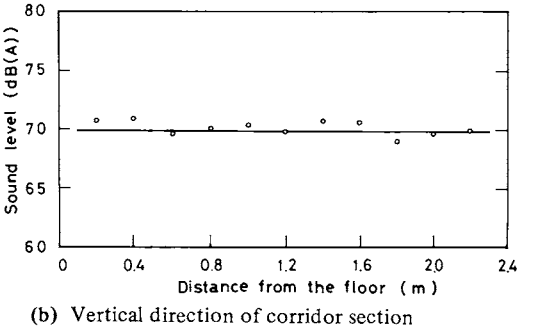


Fig. 2 Sound damping curve in a corridor
○ : SP_A　● : SP_B



(a) Horizontal direction of corridor section



(b) Vertical direction of corridor section

Fig. 3 Sound level distribution in a corridor

2.4. 発生音の種類

使用した発生音の種類は，前報[1)]と同様，代表的な音である人間の声(ニュース音で男の声)，正弦波の断続音，スイープ音，ホワイトノイズ，正弦波の連続音の5種類とした。

両端の出口スピーカを同時に鳴らした場合，スピーカと被験者間の距離の違いにより被験者に到達する音に時間差がある。特に音の出始めで，わずかな時間であるが被験者に近いスピーカからのみ聞こえる状態がある。この音の出始めが方向知覚に大きな影響を与える。この実験では連続的に音を出すホワイトノイズ，スイープ音，正弦波の3種類について，出始めの音が聞こえないようにした。この3種類の音の出始めの0.3秒間だけ被験者の前に置いたスピーカの音で両端の出口スピーカの音をマスクするようにした。

2.5. 音の方向知覚の実験方法

2.5.1. 被験者の向き，位置による方向知覚の違い

被験者の向き，位置によって方向知覚がどのように変わるか調べるために，被験者は両端のスピーカの中央の位置（**Fig. 1**の15m地点）で，スピーカSP_B方向

に対して0°，15°，45°，90°に向いた椅子に座り実験を行った。

音は人間の声とし，騒音レベル※1)はスピーカSP_A，SP_Bの中央の位置で70dB(A)になるようにした。両スピーカの音量※2)は同じになるようにした。

被験者は前報[1)]の**2.5.1.**と同じ被験者で，合計7人である。

2.5.2. 発生音の種類による方向知覚の違い

発生音の種類によって方向知覚がどのように変わるか調べるために，前報[1)]の**Table 1**に示した人間の声，正弦波の断続音，スイープ音，ホワイトノイズ，正弦波の連続音の5種類について実験を行った。**2.5.1.**の被験者の向きによる違いの実験で，0°以外の向きでは，同じような傾向を示す結果が得られた。そこでこの実験では，被験者は両端のスピーカの中央の位置(**Fig. 1**の15m地点)で，スピーカSP_B方向に対して45°に向いた椅子に座り実験を行った。騒音レベルは前の実験と同じように，スピーカSP_A，SP_Bの中央の位置で70dB(A)になるようにした。両スピーカの音量は同じになるようにした。

被験者は前報[1)]の**2.5.2.**と同じ被験者で合計4人であり，正弦波の連続音だけは合計3人である。

2.5.3. 音の大きさによる方向知覚の違い

音の大きさ※3)によって方向知覚がどのよう変わるか調べるため，騒音レベルをスピーカSP_A，SP_Bの中央の位置で60dB(A)，70dB(A)，80dB(A)になるようにして実験を行った。両スピーカの音量は同じになるようにした。

被験者は両端のスピーカの中央の位置(**Fig. 1**の15m地点)でスピーカSP_B方向に対して45°に向いた椅子に座り実験を行った。音は人間の声とし，被験者は**2.5.2.**の発生音の種類による違いの実験と同じ4人である。

2.5.4. 両端の出口スピーカの音量差による方向知覚の違い

両端の出口スピーカの音量差によって方向知覚がどのように変わるか調べるため，スピーカSP_AよりもスピーカSP_Bの音量を6，12，15.6，18dB大きくして実験を行った。騒音レベルはスピーカSP_A，SP_Bの中央の位置で70dB(A)になるようにした。

被験者はNO.6の両スピーカSP_A，SP_Bを鳴らした時，音が両方向からほぼ同じ割合で聞こえてくる位置で実験を行った。そのため音量差が6dBのとき**Fig. 1**の13m地点，12dBのとき11m地点，15.6dBのとき10m地点，18dBのとき9m地点の位置でスピーカSP_B方向に対して45°に向いた椅子に座った。

音は人間の声とし，被験者は**2.5.2.**の発生音の種類による違いの実験と同じ4人である。

3. 実験結果と考察

3.1. 被験者の向き，位置による方向知覚の違い

被験者の向き，位置によって音の方向知覚がどのように変わるか，被験者の向きごとに**Fig. 4 (a)**，**(b)**，**(c)**，**(d)**に示す。

通路方向に対して15°，45°，90°に向いている時には，ほぼ中央の15m地点を境にして音の方向が変わる。すなわちスピーカSP_Aに近い方に位置する被験者はスピーカSP_A方向から聞こえ，スピーカSP_Bに近い方に位置する被験者はスピーカSP_B方向から聞こえる。しかし両スピーカの中央附近に音の方向の分らない範囲が少しある。通路方向に対して0°，つまり通路方向を向いている時は**Fig. 4 (a)**に示すように，音の方向の分らない範囲が非常に大きい。

被験者の位置によって聞こえてくる音の方向がどのように変わるかを求めてみる。測定値は累積正規分布に従うと仮定して，最小自乗法を適用してみた。その結果，**Fig. 4 (a)**，**(b)**，**(c)**，**(d)**の実線のようになり，測定値は実線とよく一致している。従って，応答曲線はほぼ累積正規分布を示しながら変わることが分る。

反応時間は**Fig. 4 (a)**，**(b)**，**(c)**，**(d)**の点線で示すように，通路方向以外を向いている時には，音の方向の分りにくい中央附近だけが遅くなっている。その他の範囲では反応時間が早く，一定の値になっており，中央附近に比べて音の方向が分り易い。**Fig. 4 (a)**の通路方向を向いている時には，すべての範囲にわたって反応時間が遅くなっており，どの位置でも音の方向

※1)指示騒音計で測定した値
※2)スピーカから出る単位時間当りの音のエネルギー
※3)音の感覚上の大小

が分りにくくなっている。

音の方向が確実に分る範囲を求めてみる。本報告では，どちらかの出口方向に答えている割合が95%以上のところをもって，音の方向が確実に分るとした。この95%のところの位置は，**Fig. 4 (a), (b), (c), (d)** の実線から求めることができ，その位置を各図に一点鎖線で示した。この確実に分る範囲を被験者の向きごとに示すと**Fig. 5**になる。

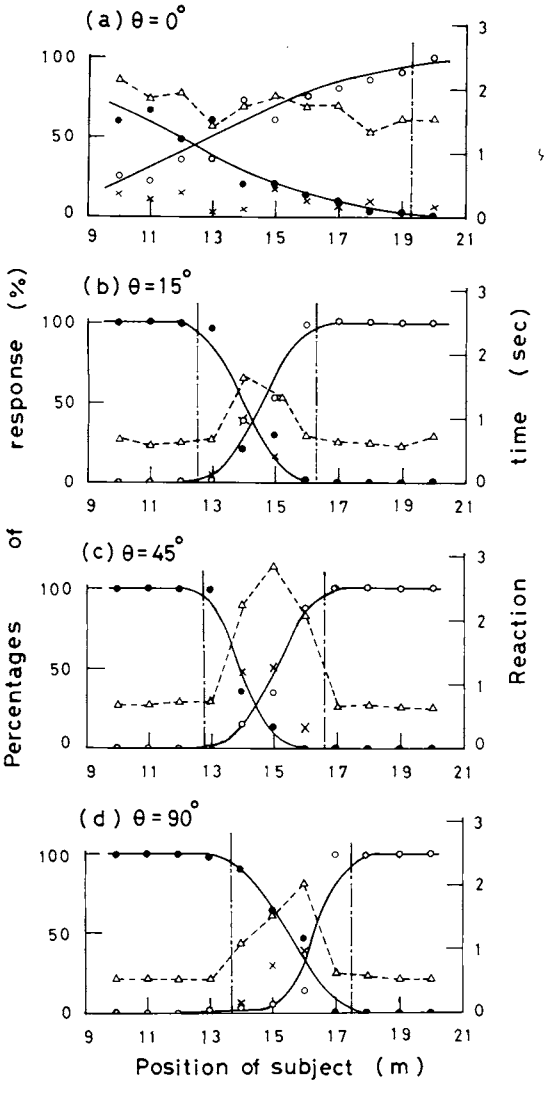


Fig. 4 Difference in percentages of response as to the sound direction and reaction time due to the orientation of the subject.
θ : Orientation of the subject
● : Percentages of response to SP_A direction
○ : Percentages of response to SP_B direction
△ : Reaction time
× : The direction in which the sound is heard cannot be identified.
—— - —— : See the presents.

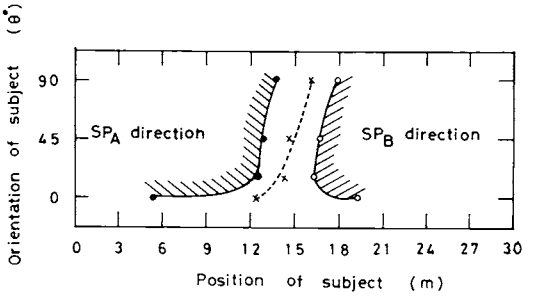


Fig. 5 Difference in the range where the sound direction can be identified, due to the orientation of the subject.
× : Point at which sounds can be heard in both directions at equal rates.

Fig. 5から，通路方向以外を向いている時には，両スピーカの中央附近，約4 mの範囲を除いて，スピーカの近い方向から聞こえてくる。両スピーカから同じ割合で聞こえてくる位置は，被験者が通路方向に向くほど，その向いた方向に移動する傾向がある。これは前報[1]と同様に音が前方から聞こえてくるという先入観があるためと思われる。

音の方向が95%以上の割合で確実に分る時の反応時間を**Table 1**に示す。前報[1]のスピーカ1個を鳴らした一方向への避難誘導に比べて多少，反応時間が遅くなっている。この反応時間の遅れは，スピーカ1個を鳴らすのに比べて，両端の出口スピーカ2個を同時に鳴らす方が音の方向を判断するのに少し分りにくいことを示している。

Table 1 Difference in the reaction time due to the orientation of the subject

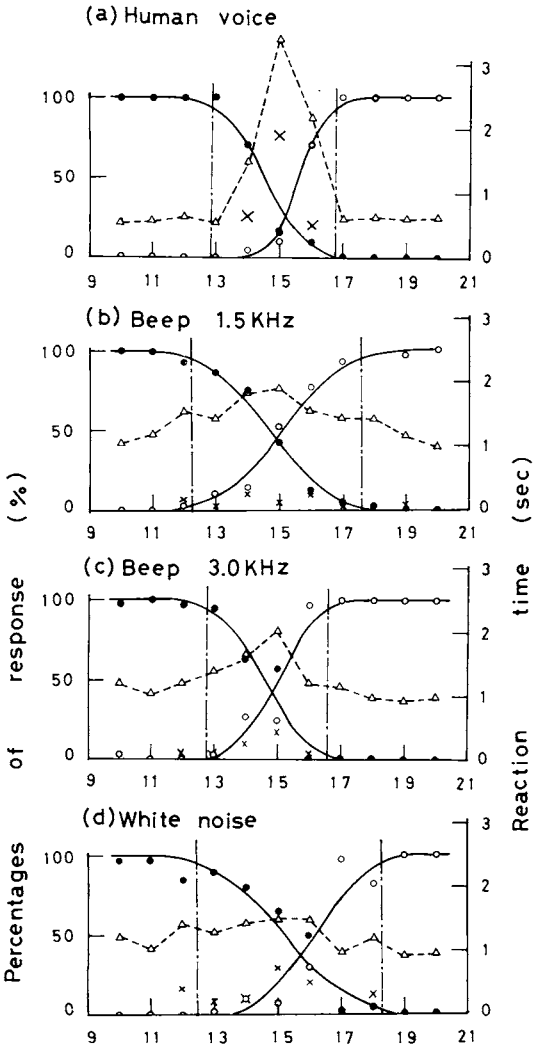
Orientation of the subject	0°	15°	45°	90°
Reaction time of SP_A direction (sec)		0.65	0.70	0.54
Reaction time of SP_B direction (sec)		0.67	0.67	0.56

3.2. 発生音の種類による方向知覚の違い

発生音の種類によって方向知覚がどのように変わる

か，音の種類ごとに **Fig. 6 (a), (b), (c), (d), (e), Fig. 7 (a), (b), (c), (d), (e)** に示す。**Fig. 6** から人間の声，ホワイトノイズ，正弦波の断続音，スイープ音のいずれの音も，ほぼ中央の15m地点を境にして，被験者に近いスピーカの方向から聞こえてくるが，**Fig. 7** に示す正弦波の連続音は，どの位置で聞いても，音の方向をあまり判断することが出来ない。

3.1. と同様，音の方向が確実に分る範囲 **Fig. 6 (a), (b), (c), (d), (e)** の一点鎖線から音の種類ごとに求めると，**Fig. 8** のようになる。**Fig. 8** から中央附近の音の方向の分らない範囲は，人間の声，正弦波の断続音，ホワイトノイズ，スイープ音の順に大きくなっている。人間の声はスイープ音に比べて約1/2，音の方向の分らない範囲が小さくなっており，その分だけ音の方向の分る範囲が大きい。



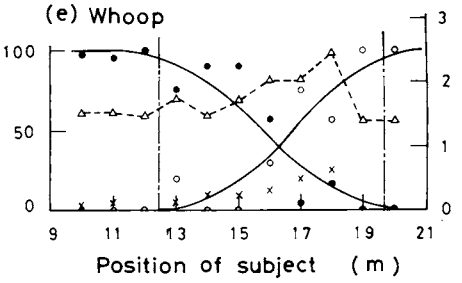
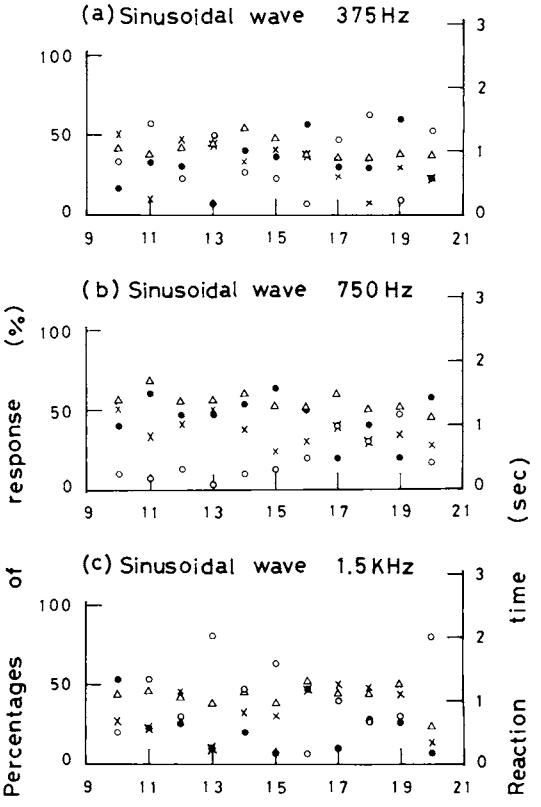


Fig. 6 Difference in percentages of response as to the sound direction and reaction time due to the kinds of generated sounds.
- ● : Percentages of response to SP_A direction
- ○ : Percentages of response to SP_B direction
- △ : Reaction time
- × : The direction in which the sound is heard cannot be identified.
- — — — : See the presents.



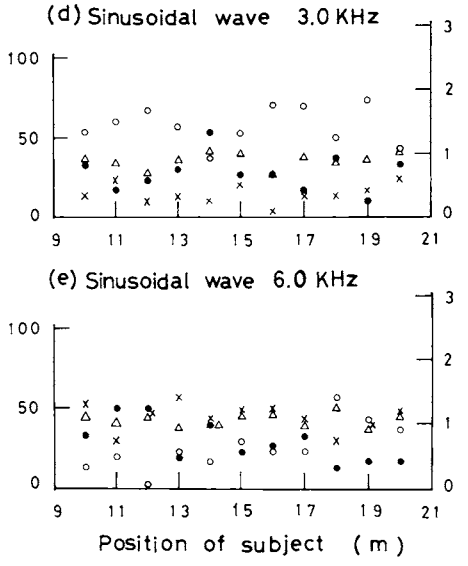


Fig. 7 Difference in percentages of response as to the sound direction and reaction time due to sinusoidal waves.
● : Percentages of response to SP_A direction
○ : Percentages of response to SP_B direction
△ : Reaction time
× : The direction in which the sound is heard cannot be identified.

反応時間を発生音の種類別に **Table 2** に示す。この反応時間は音の方向が95%以上の割合で確実に分った時のものである。反応時間の早い順番に並べると，人間の声，ホワイトノイズ，正弦波の断続音，スイープ

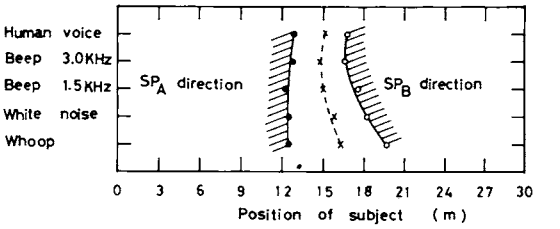


Fig. 8 Difference in the range where the sound direction can be identified, due to the kinds of generated sounds.

音の順になる。この順番で音の方向が分り易いことが分った。これは，前報のスピーカ1個を鳴らした一方向への避難誘導の時の実験結果と同じ順番である。反応時間はどの音の種類でも，前報[1]のスピーカ1個を鳴らした時に比べて，遅くなっている。両端の出口スピーカ2個を同時に鳴らす方が音の種類によらず，音の方向を判断するのに分りにくい。

このようにスピーカ1個を鳴らす方が分り易いが，両端の出口スピーカ2個を同時に鳴らす場合は人間の声が中央附近の分らない範囲が一番小さく，反応時間も一番早いので，人間の声がもっとも適していると思われる。

Fig. 7 に示す正弦波の連続音は側壁の反射による定在波等によって音の方向を分らなくしていると考えられる。スピーカ1個，鳴らした時と同じように，周波数が6000Hzの場合には，音の方向をある程度正しく答えているが，3000Hz以下では，被験者の位置によらず，一定の方向のみ答える傾向がある。

Table 2 Difference in the reaction time due to the kinds of generated sounds

Kind of generated sound	Human voice	White noise	Beep 3.0 KHz	Beep 1.5 KHz	Whoop
Reaction time of SP_A direction (sec)	0.60	1.15	1.21	1.32	1.51
Reaction time of SP_B direction (sec)	0.61	0.96	1.29	1.25	1.41

3.3. 音の大きさによる方向知覚の違い

音の大きさによって方向知覚がどのように変わるか，騒音レベルごとに **Fig. 9 (a), (b), (c)** に示す。この場合も**3.1.** と同様，音の方向が確実に分る範囲を **Fig.9 (a), (b), (c)** の一点鎖線から音の大きさごとに求めると **Fig. 10** のようになる。

Fig. 10 から，音が大きくなるに従い中央附近の音の方向の分らない範囲は多少狭くなるが，大きく変わることはない。

反応時間を音の大きさ別に **Table 3** に示す。この反応時間は音の方向が95%以上の割合で確実に分った時のものである。騒音レベルが一番大きい80dB(A)で，反応時間は一番早いが，騒音レベルによって大きく変わることはない。音の大きさは，音の方向知覚にそれほど影響しないことが分った。

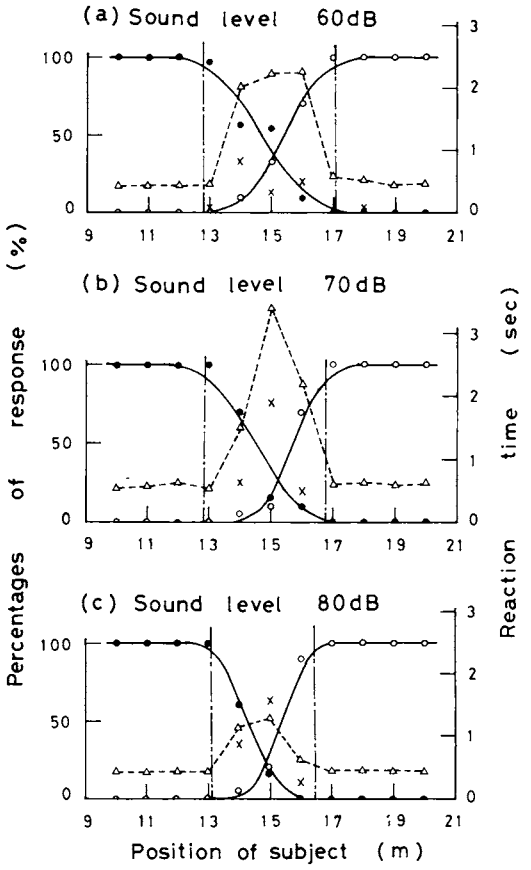


Fig. 9 Difference in percentages of response as to the sound direction and reaction time due to sound pressure level.

- ● : Percentages of response to SP_A direction
- ○ : Percentages of response to SP_B direction
- △ : Reaction time
- X : The direction in which the sound is heard cannot be identified.
- ——— : See the presents.

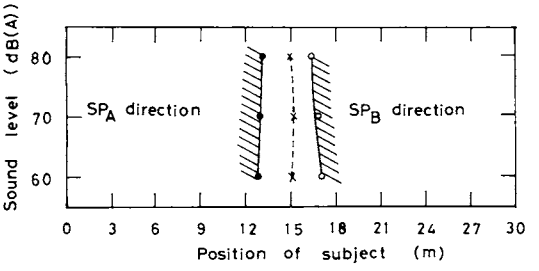


Fig. 10 Difference in the range where the sound direction can be identified, due to sound level.

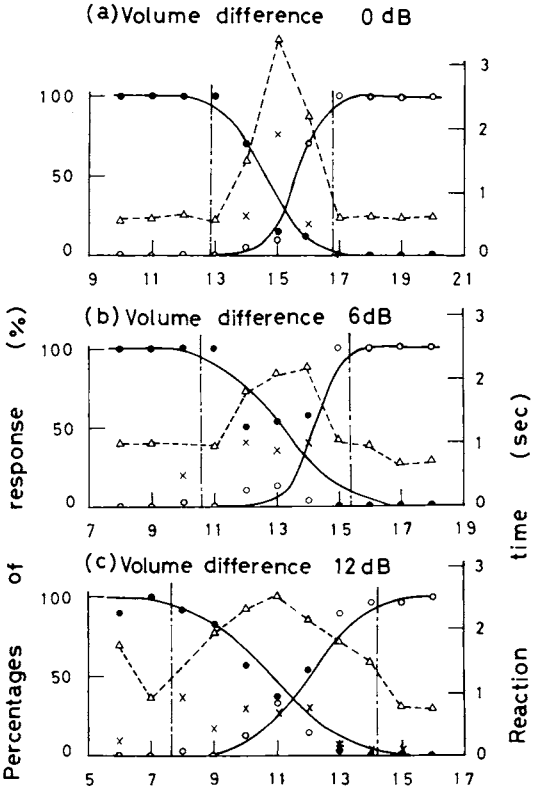
Table 3 Difference in the reaction time due to sound level.

Sound level (dB(A))	60	70	80
Reaction time of SP_A direction (sec)	0.46	0.60	0.45
Reaction time of SP_B direction (sec)	0.52	0.61	0.50

3.4. 両端の出口スピーカの音量差と方向知覚の関係

両端の出口スピーカの音量差によって方向知覚がどのように変わるかを音量差ごとに**Fig.11(a),(b),(c),(d),(e)**に示す。この場合も3.1.と同様，音の方向が確実に分る範囲を**Fig. 11 (a), (b), (c), (d), (e)**の一点鎖線から音量差ごとに求めると**Fig. 12**のようになる。

Fig. 12に示すように，両端の出口スピーカの音量が同じ時には，聞こえる音の方向の変わる位置は中央（**Fig. 1**の15m地点）であるが，スピーカSP_Aの音量をもう一方のスピーカSP_Bよりも小さくすると，聞こ



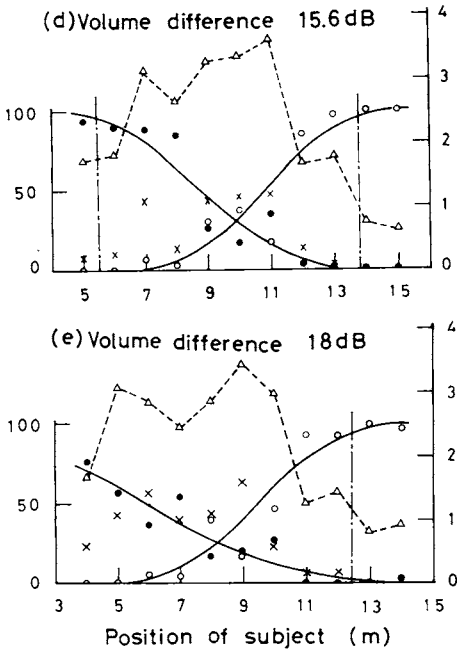


Fig. 11 Difference in percentages of response as to the sound direction and reaction time due to volume difference between the speakers set at both the exits.

- ● : Percentages of response to SP_A direction
- ○ : Percentages of response to SP_B direction
- △ : Reaction time
- × : The direction in which the sound is heard cannot be identified.
- — — — : See the presents.

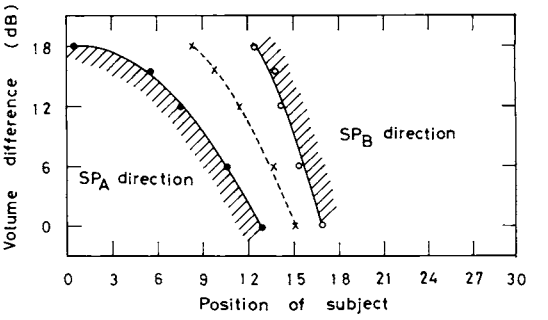


Fig. 12 Difference in the range where the sound direction can be identified, due to volume difference between the speakers set at both the exits.

えてくる音の方向の変わる位置は，音量の小さいスピーカSP_Aの方に移動する。音量差が大きくなるに従い，この傾向が強くなり，音の方向の分らない範囲も大きくなる。

両スピーカの音量差による反応時間の差を**Table 4**に示す。この反応時間は音の方向が95%以上の割合で確実に分った時のものである。音量差が大きくなるに従い，反応時間も遅くなり，音の方向は判断しにくくなる。

Table 4 Difference in the reaction time due to volume difference between the speakers set at both the exits

Volume difference (dB)	0	6	12	15.6	18
Reaction time of SP_A direction (sec)	0.60	0.99	0.92	1.68	
Reaction time of SP_B direction (sec)	0.61	0.84	1.01	1.06	

3.5. 方向知覚のための音の時間差と騒音レベル差の関係

Fig. 12の両スピーカの音量差と方向知覚範囲の関係を両スピーカから被験者に到達する音の時間差と被験者の位置における両スピーカからの騒音レベル差との関係に書き改めると**Fig. 13**のようになる。被験者の位置における両スピーカからの騒音レベル差は**Fig. 2**の音の減衰特性から求めた。

Fig. 13から，スピーカSP_Aからの騒音レベルが3dB(A)小さくてもスピーカSP_Aからの音が35m sec以上早く被験者に到達すれば，音の早く到達するスピーカSP_A方向から聞こえてくるように感じる。このように音が小さくても，音が早く到達する方向から聞こえてくるように感じる現象は第1波面効果[2)]として知られている。

又両スピーカの中央の位置で音の方向の分らないい範

囲を少なくするには中央の位置で6dB(A)以上の騒音レベル差を与えなければならないことが **Fig. 13**から分る。

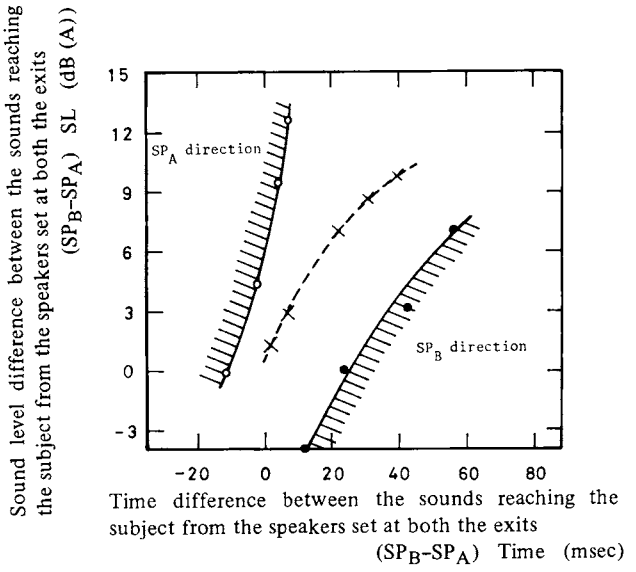


Fig. 13 Relation between the time difference and the sound level difference.

4. 結　論

建物通路内で両端の出口に設けたスピーカ2個を同時に鳴らした場合の音の方向知覚実験を行った結果，次のようなことが分った。

(1) 両端の出口に設けたスピーカを同音量で鳴らした場合，中央の位置を境にしてスピーカに近い方向から音が聞こえてくるが，中央の約4mの範囲は音の方向が分らない。

(2) 両端の出口に設けたスピーカ2個を同時に鳴らすのは，片側の出口に設けたスピーカ1個のみを鳴らすのに比べ，音の方向を判断するのに少し分りにくい。

(3) 両端の出口に設けたスピーカに音量差があった場合，音量の大きいスピーカの方向から聞こえてくる範囲は広くなり，音量の小さいスピーカの方向から聞こえてくる範囲は狭くなる。しかし両スピーカを同音量で鳴らした場合に比べ音の方向は判断しにくくなり，音の方向の分らない範囲も広くなる。

(4) 上記結論の他，前報[1]の結論(1)，(2)，(3)と同様な結論を得た。

以上，前報[1]と本報告で音の方向を判断するのに，人間の声がもっともよいことが分った。しかし人間の声による場合，言葉の内容によって心理的な影響を与えるので，言葉の内容については今後の研究課題である。

終りに，この研究を手伝っていただいた明電舎の大川口郁夫氏に感謝します。

参考文献

1) 渡部勇市　音による避難誘導についての研究
(第1報　建物通路における一方向への避難誘導)
消防研究所報告　NO.50 (1980) 投稿中

2) H. Haas. Über den Einfluss eines Einfachechos auf die Hösamkeit von Sprache, *Acustica*, 1.49, (1951)

A Study on Sound Guidance for Evacuation (2) —Sound Guidance of Two Directions in a Corridor—

(Abstract)

Yuichi Watanabe

(Received May 29, 1980)

In the previous report[1], the speaker of either exit of a corridor in a building was sounded, to examine the sound guidance in the direction of the speaker. However, it is surmised that there are many cases where people can evacuate in both directions depending on the structures of buildings. Therefore, in this report, sound guidance in two directions was examined, by sounding the speakers set at both the exits of a corridor of a building. As in case of the previous report, a subject sat down on a chair specified in the corridor, and replied by pressing a push-button switch, as to the direction in which he heard a sound. Experiments were made by changing such conditions as the kind of generated sound and orientation of the subject, and as a result the following were found.

(1) When the speakers set at both the exits are sounded at equal volume, the sound can be heard in the direction of the speaker which is nearer to the subject. There is a range of about 4 m in which sound direction cannot be identified at the center of both the exits.

(2) Simultaneous sounding of the speakers at both the exits makes it difficult to judge the sound direction, compared with the sounding of the speaker of either exit only.

(3) When there is a volume difference between the speakers of both the exits, the position at which the sound direction shifts moves toward the speaker with a lower volume. In this case, the range in which sound direction cannot be identified becomes large, and it is more difficult to judge the sound direction, compared with the simultaneous sounding of both the speakers at equal volume.

(4) In addition to the above-mentioned conclusions, the simultaneous sounding gives the same effects as the conclusions (1), (2) and (3) of the previous report[1] obtained by sounding the speaker of either exit only.

火災上昇気流の傾きに関する一考察

山下　邦博

（昭和55年5月31日受理）

1. まえがき

市街地火災の周辺における延焼危険性及び人命危険性等を算定するときには火災上昇気流の傾きも重要となる。これについては，横井[1]は風洞実験により線熱源からの上昇気流の傾きを無次元風速の関数として表わした。藤田[2]と佐賀[3]はそれぞれ強風下と弱風下を想定して線熱源を用いて行って得たデータを無次元風速の関数として求め，藤田は横井と同じ結果を，佐賀は若干異なった結果を得た。実際の火災は変動の著しい自然風下の現象であり，そのうえに火源が面熱源であるため，線熱源を用いた風洞実験の結果をそのままの形では市街地火災に適用できないと思われる。

近年，建築学会，消防研究所，及び建築研究所等を中心にして，比較的規模の大きい火災実験が行われるようになった。関根[4]は防災拠点に関する実験の結果より，上昇気流の傾きがフルード数に殆ど関係しない点を指摘した。このことは，火炎の傾きがフルード数に反比例するという浜田の関係式からは予測できないことである。

筆者は多数固のクリブが同時に燃焼しているときの物理量（燃焼幅，火炎占有面積など）を定義した上で，上昇気流の傾きA_1（$=\tan\theta$）と有効速度比の関係を13例の野外実験のデータから調べ，関根の指摘した点について考察した。また，今回得られた関係式と上昇気流の挙動に類似した現象（水平気流中の噴流の挙動など）の曲がりに関する関係式と比較した。

2. 資料及び解析方法

この研究の資料として，野外火災実験の報告書[6)~10)]及び記録写真を利用した。特に参考にしたものは，風向風速の記録と記録写真である。研究対象として実火災が望まれるが，実火災は一般に特定時刻の燃焼範囲，が不明確であり，かつ火災の風横からの記録写真がないため，利用できる事例が少ない。今回は比較のため昭和30年5月の大館市の火災と昭和51年10月の酒田市大火をとりあげた。

検討方法はパラメーターとして前報[5]のパラメーターの平方根を用い，かつ上昇気流の上昇速度の関係式及び密度比（ρ_f/ρ_∞）の値を修正して用いた。火災（または模擬火災）の中心を原点とし，風下方向にx軸，それと直角方向にy軸，鉛直方向にz軸をとる。上昇気流の主軸を燃焼域の幅（D）を用いて前報と同じように(1)式で近以する。

$$\frac{z}{D}=A\left(\frac{x}{D}\right)^{B} \qquad (1)$$

火災上昇気流の主軸は自然風速と上昇速度の変動に応じて変化し，風向または風速に急激な変動があるときには一般に**Fig. 1**に示すようなS字型の曲線になる。

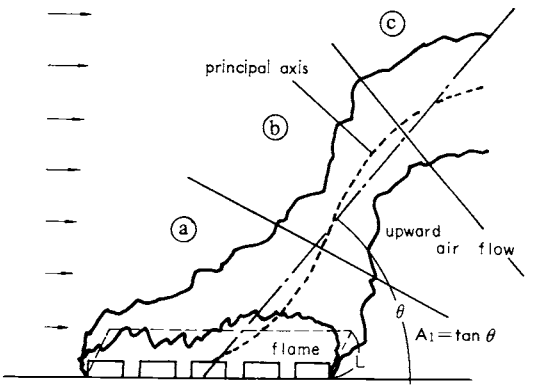


Fig. 1 Sketch of the upward air flow above fire in the wind. ⓐ contracting region, ⓑ contracted region, ⓒ diffusive region.

この曲線を上昇気流の外形から判断すると，ⓐ上昇気流の収束する領域，ⓑ収束した領域，ⓒ拡大する領域に大別できる。各領域においては温度と上昇速度の値及びそれらの減衰の度合が異なり，現象を支配する因子も変わる。実際の上昇気流の形状は様々であり，ⓐⓑ及びⓒのいずれかの領域が欠ける場合がある。ⓐとⓑの領域を対象にし，かつ風向風速の変動が少ない場合は，上昇気流の主軸は直線で近似できる。これは(1)式において，$B=1$で，$A=A_1(=\tan\theta)$となる。この直線の傾き（A_1）と(2)式で示される有効速度比（J）の関係を種々な実験の資料から求めた。有効速度比は上昇気流の動圧の代表値（炎の先端における値とする）と自然風の動圧との比の平方根であり，(3)，(4)式はそれぞれ上昇速度，平均風速を示す。

$$J=\frac{W_L}{\bar{U}_\infty}\sqrt{\frac{\rho_L}{\rho_\infty}} \quad \text{———}(2)$$

$$W_L=0.36\times\sqrt{\frac{2g(T_f-T_\infty)\bar{L}}{T_\infty}}\times\frac{S_f}{S_K+S_o} \quad \text{———}(3)$$

$$\bar{U}_\infty=\bar{U}_{Z=Z_0}\left(\frac{z}{z_0}\right)^n \quad \text{———}(4)$$

但しこれらの式で，W_L：火炎先端の上昇速度，$\bar{U}_\infty$：風速，ρ_L：火炎先端の密度，ρ_∞：火災周辺の密度，T_f：火炎温度，T_∞：火災周辺気の温度，$\bar{L}$：火炎長，S_f：火炎占有面積，S_k：可燃物の占有面積，S_o：空地面積，$\bar{U}_{Z=Z_0}$：高度z_0における平均的風速である。

多数個のクリブが同時に燃焼する場合の燃焼状況はクリブ間距離の大小によって異なり，クリブ間距離が小さい場合には火炎が合流して一つの大火炎になる。火炎の合流が生じるとクリブ間の空地にも火炎が充満して実際の火炎占有面積（S_f）はクリブ面積（S_k）よりも大きくなる。ここでは燃焼状況を合流燃焼，遷移状態，独立燃焼の三つに分類して燃焼域の幅（D）と火炎占有面積（S_f）を**Table. 1**の関係式で定義した。(3)

Table 1 Classification of multiple fires.

Classification of fire	S_f	D	$\frac{S_f}{S_k+S_o}$
Merged fire	S_k+S_o	$nd+(n-1)s$	1
Transition	$S_k+\frac{1}{2}S_o$	$nd\sqrt{\frac{S_f}{S_k}}$	$\eta\,[1+\frac{1}{2}(\frac{1}{\eta}-1)]$
Independent fire	S_k	nd	η

S_k : area covered by combustible matter
S_o : open area
S_f : area covered by flame
η $=S_k/(S_k+S_o)$
d : width of a crib
s : distance between cribs
n : number of cribs

式は燃焼範囲全体の平均上昇速度で，クリブ燃焼の火炎先端における上昇速度についての関係式[11]（P.H.Thomasの求めたもの）を拡張したものである。(3)式の$\bar{L}$は燃焼物の平均火炎長で，写真から燃焼状況を判断して求めた。(4)式は高さ$z=z_0$における値を基準にした風速プロフィールを表わすもので，(4)式から対象高度範囲における風速を求めた。風速は1分間または10数分間の平均値である。風向風速の詳細な記録がある場合には，上昇気流が燃焼区域から対象高度に達するまでの推定時間の平均値を採用した。市街地風に関する研究の結果により，(4)式のnの値として，火災実験の場合には1/7とし市街地火災の場合には1/4とした。(2)式から上昇気流の動圧を求めるとき，火炎の先端温度は500℃で$\rho_L/\rho_\infty=0.399$として計算した。また，火炎の平均温度は1000℃，上昇気流全体の平均温度は100℃として計算した。

3. 結果

上記の方法により，大規模火災実験の結果を整理したものが**Table 2**である。上昇気流の傾きが記録写真から求めたものと気流温度分布から求めたものと異なる場合には記録写真から得られた値を使った。また，**Table 2**の抗力係数C_fとパラメーター$K(=\tan\alpha/\cos\alpha)$の値は後に示す方法で計算した。

上昇気流の傾きと有効速度比の関係を**Fig. 2**に示した。この図の数字は**Table 2**の実験番号を示し，一点鎖線は$A_1=J$の直線であり，対象高度の上昇速度が火炎先端の上昇速度に等しい場合には$A_1=J$の関係が成立すると推定される。Jが0.5付近ではデータは一般に$A_1=J$よりも上側に集中したが，Jが1の近くでは，$A_1=J$よりも下側に集中した。火災実験(1)～(13)のデータからA_1とJの関係はほぼ(5)式になった。

$$A_1=0.87J^{\frac{3}{5}} \quad \text{———}(5)$$

Fig. 2の点線は室内実験の結果を一部修正して表現

Table 2 Data of experimental or actual fires.

Test Number	D_0 (m)	B_0 (m)	η	z_0 (m)	$\bar{U}_\infty(z_0)$ (m/s)	n	$\bar{z}$ (m)	$\bar{U}_\infty(z)$ (m/s)	S_f	$\frac{S_f}{S_k+S_0}$	D (m)	$\frac{\bar{U}_\infty^2}{gD}$
1	17.0	17	0.68	2	2.5	1/7	10	3.1	A_f+A_0	1.0	17	0.058
2	17.0	17	0.35	2	2.2	1/7	10	2.8	$A_f+\frac{A_0}{2}$	0.675	13.9	0.058
3	40.0	40	0.49	4	3.3	1/7	7	3.6	$A_f+\frac{A_0}{2}$	0.745	34.5	0.038
4	40.0	40	0.49	4	2.9	1/7	7	3.1	$A_f+\frac{A_0}{2}$	0.745	34.5	0.028
5	108	140	0.31	1.2	2.5	1/4	10	4.2	A_f	0.31	60.0	0.030
6	9.5	22	0.69	1.5	1.7	1/7	3	1.9	A_f+A_0	1.0	9.5	0.039
7	19.5	22	0.67	1.5	4.7	1/7	3	5.2	A_f+A_0	1.0	19.5	0.141
8	14.5	22	0.68	1.5	2.1	1/7	3	2.3	A_f+A_0	1.0	14.5	0.037
9	8.9	20.4	0.79	1.5	4.9	1/7	3	5.4	A_f+A_0	1.0	8.9	0.334
10	8.9	20.4	0.79	1.5	4.0	1/7	3	4.4	A_f+A_0	1.0	8.9	0.222
11	13.5	45.7	0.78	1.5	5.0	1/7	3	5.5	A_f+A_0	1.0	13.5	0.229
12	7.0	12	0.71	1.5	3.9	1/7	3	4.3	A_f+A_0	1.0	7.0	0.270
13	7.0	12	0.71	1.5	3.9	1/7	3	4.3	A_f+A_0	1.0	7.0	0.270
14	100.0*	80*	0.80	13.0	10.0	1/4	30	12.3	A_f+A_0*	1.0	100	0.154
15	150.0*	150*	0.68	13.0	11.7	1/4	30	14.4	$A_f+\frac{A_0}{2}$*	0.840	138	0.153

Note: 1. Umetatechi 1[6], 2. Umetatechi 2[6], 3. Nishinomiya 1[7], 4. Nishinomiya 2[7], 5. Matsuo 2[10], 6. Bōsaikyoten B[4),5)], 7. Bōsaikyoten D[4),5)], 8. Bōsaikyoten H[4),5)], 9. Bōsaikyoten H[4),5)], 10. Bōsaikyoten I[4),5)], 11. Bōsaikyoten M[4),5)], 12. Bōsaikyoten M[4),5)], 13. Bōsaikyoten N[4),5)], 14. Ōdate fire[21)], 15. Sakata big fire[22)]
* estimated values from fire reports.

したものでA1=0.88J^1.48である。上昇気流の傾きとフルード数の関係をFig.3に示した。関根のデータでは傾きA1はフルード数に殆ど依存しなかったが，この図は傾きがフルード数に弱く依存していることを示す。

今回提案したモデルでは，上昇速度のフルード数への依存が重要である。上昇速度は(3)式で近似されるように火炎長に依存する。P.H.Thomasにならって，有風下における無次元の火炎長とフルード数の関係を(6)式で表わしてR,p及びrを重回帰分析により計算した。

$$\frac{\bar{L}}{D}=R\times\left(\frac{\dot{m}''^2}{g\rho_\infty^2 D}\right)^p\times\left(\frac{\bar{U}_\infty^2}{gD}\right)^r \quad (6)$$

その結果，$R=0.56$, $p=0.10$, $r=0.14$になった。P.H.Thomasの得た値$R=70$, $p=0.43$, $r=-0.11$とは異なった。今回のrの値は正であり，火炎長が風速の増大とともに幾分増加する傾向を示した。

4. 検討

有風下における火災上昇気流及び火炎の傾きに関する研究として，横井[1),12),20)]浜田[13)]，O.A.Pipkin他[14)]J.R.

$\bar{L}$ (m)	$\frac{\bar{L}}{D}$	W_L (m/s)	$\dot{m}''$ (kg/m²・s)	Q' (Kcal/m・s)	$\frac{\dot{m}''^2}{\rho_a^2 gD}$	J	$\tan\theta$	$\frac{\tan\theta}{J}$	C_f	K	$\left(\frac{gQ'}{\bar{U}_\infty^3 \rho_C T_\infty}\right)^{\frac{1}{4}}$
2.4	0.141	4.51	0.085	5.29×10^5	2.56×10^{-5}	0.885	0.839	0.948	17.27	2.34	2.22
2.8	0.201	3.29	0.065	3.30×10^3	1.84×10^{-5}	0.713	0.600	0.842	9.59	1.30	2.12
2.6	0.075	3.49	0.072	9.47×10^3	9.07×10^{-6}	0.590	0.700	1.186	28.05	2.49	2.29
2.8	0.081	3.63	0.072	9.47×10^3	9.07×10^{-6}	0.710	0.930	1.310	24.00	1.57	2.56
7.0	0.117	2.38	0.046	1.01×10^4	1.61×10^{-6}	0.345	0.466	1.351	35.52	2.49	2.08
1.2	0.126	3.19	0.033	1.15×10^3	6.92×10^{-6}	1.021	0.932	0.913	17.23	1.57	2.19
2.4	0.123	4.51	0.083	5.90×10^3	2.13×10^{-5}	0.527	0.700	1.328	7.56	2.49	1.55
1.2	0.083	3.18	0.032	1.70×10^3	4.26×10^{-6}	0.840	0.650	0.774	32.62	2.82	2.09
1.4	0.157	3.45	0.050	1.58×10^3	1.69×10^{-5}	0.338	0.460	1.361	11.70	9.13	1.08
1.4	0.157	3.45	0.050	1.58×10^3	1.69×10^{-5}	0.476	0.470	0.987	9.64	5.00	1.25
1.4	0.104	3.45	0.050	2.45×10^3	1.12×10^{-5}	0.381	0.550	1.443	26.93	14.41	1.19
1.2	0.171	3.19	0.045	1.15×10^3	1.38×10^{-5}	0.451	0.550	1.220	5.98	3.77	1.19
1.2	0.171	3.19	0.045	1.15×10^3	1.75×10^{-5}	0.451	0.530	1.175	6.38	4.03	1.19
*20.0	0.200	13.01	*0.110	40.3×10^4	7.30×10^{-6}	0.643	0.700	1.089	6.98	2.49	1.31
*12.0	0.109	8.47	*0.090	6.19×10^4	3.54×10^{-6}	0.358	0.325	0.908	33.89	9.95	1.30

D_0: width of burning area, B_0: wind sideward width of burning area, η: $=S_k/(S_k+S_0)$, z_0: observational height, $\bar{U}_\infty(z_0)$: observed value of wind velocity, n: index, Z: average height of interest. $\bar{U}_\infty(z)$: average value of wind velocity, $\bar{S}_f$: area covered by flame, D: modified width of burning area, $\bar{U}_\infty^2/gD$: Froude number, $\bar{L}$: average flame length, W_L: upward air velocity at the flame tip, $\dot{m}''$: mass loss rate, J: effective velocity ratio, $\tan\theta$: bending of upward air flow, C_f: drag coefficient.

Welker他[15]藤田[2]佐賀[3]等によるものがある。それらの結果の代表的なもの及び基本となる関係式を**Table 3**に示す。火災上昇気流の傾きは，断面幅の増減，温度，速度分布，熱の伝達と損失速度，大気の安定度等に密接に関係するため複雑であり，上昇気流の傾きを単独に表す式の殆どが近似式である。

Fig. 2 の点線は前報の結果であり，傾きは今回の結果よりも有効速度比に強く依存していた。その実験は一辺が0.4mのクリブを用いたものであり，火源近くの主軸を直線で近似しかつ風速が変化しても火炎長が変わらないと仮定して求めたものである。火炎長に対する仮定はその値を数例しか観測していなかったことによる。

有風下における火災上昇気流の挙動に類似したものとして水平気流中に上（または下）向きに吹き出された噴流がある。この噴流の挙動については，V/S TOL機の研究等に関連してR.J.Margason等により活発に研究されてきた[16)~18)]。それらの研究の多くも噴流の主軸を(1)式で近似した。しかし，噴流速度の代表値として噴流の吹出口の値を使って有効速度比を求めた。噴流の湾曲に対するBの値及びAとJの関係を**Table 4**に示す。Bの値はいずれもほぼ⅓であるが，AとJの関係は

Table 3 Summary of the relation about the bending of the flame and upward air flow above fire.

	Form of burning area	Maximum width	Relations	Fuel	Investigators
Upward air flow above fire	Linear	0.5 m	$\tan\theta = \dfrac{W_f}{\bar{U}_\infty}$	Cedar	Yokoi
	Linear	1 m	$\tan\theta = \dfrac{K\sqrt[3]{D^2\dot{m}''}}{\bar{U}_\infty}$	Gasoline	Yokoi
	Linear	0.1 m	$\tan\theta = \dfrac{1}{10}\left(\dfrac{gQ'}{\bar{U}_\infty^3\rho c T_\infty}\right)^{\frac{1}{4}}$	Alcohol	Yokoi
	Rectangular	60 m	$\tan\theta = 0.87\,J^{\frac{3}{5}}$	Wooden crib	Yamashita
Flame	Circle rectangular	1.61 inches	$\tan\alpha = \dfrac{0.24\beta\bar{U}_\infty^2}{D}$	Natural gas	Pipkin et al
	Circle rectangular	2 ft	$\dfrac{\tan\alpha}{\cos\alpha} = 3.3\,R_e^{0.07}\,F_r^{0.8}\left(\dfrac{\rho_g}{\rho_a}\right)^{-0.6}$	Liquid fuel	Welker et al
	Rectangular	1 m	$\tan\theta = \dfrac{4D}{\bar{U}_\infty^2}$	Ceder	Hamada
	Circular	0.6 m	$\tan\alpha = 0.721\left(\dfrac{\bar{U}_\infty^2}{D}\right)^{0.553}$	n-hexane	Yumoto
	Circular	10 m	$\tan\alpha = 1.00\left(\dfrac{\bar{U}_\infty^2}{D}\right)^{0.380}$	Gasoline	Yumoto

R_e : Reynolds Number $\left(=\dfrac{\bar{U}_\infty D}{\nu}\right)$

F_r : Froude Number $\left(=\dfrac{\bar{U}_\infty^2}{gD}\right)$

θ : Angle of Tilt $\left(=\dfrac{\pi}{2}-\alpha\right)$

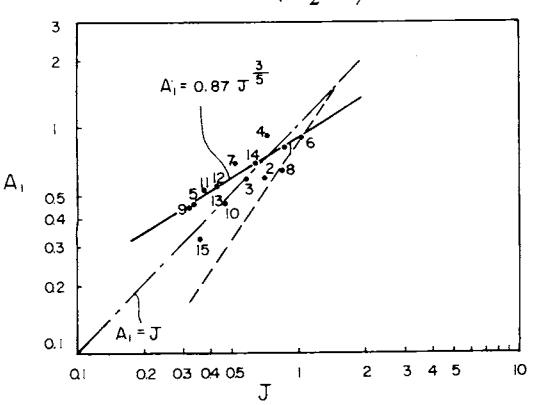


Fig. 2 Relation between A_1 and J. Numerical values are test number.

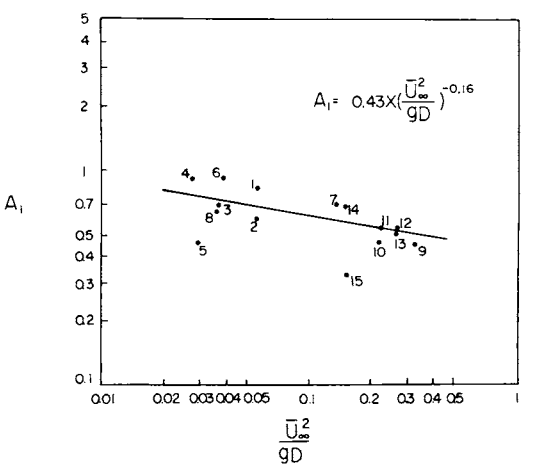


Fig. 3 Relation between the bending of the upward air flow and Froude number. Numerical values are test number.

Table 4 Values of B in Eq. 1 in text and relations between A and J.
(trajectory of jet in a cross wind)

A	B	J	Investigators
$A = 0.76J$	$\frac{1}{3}$	—	A.G. Hurn G.A. Akers
$A = J^{0.784}$	$\frac{1}{2.55}$	1.41 ~ 4.76	G.S. Shandrov
$A = J^{0.867}$	$\frac{1}{3}$	3.45 ~ 33.3	Yu. V. Ivanov
$A = 1.58J^{\frac{2}{3}}$	$\frac{2}{3}$	1.18 ~ 10.0	R.J. Margason
$A = 0.89J^{0.235}$	0.36	1.7 ~ 25	Y. Kamotani I. Grever
$A = KJ^{0.85} + 0.80$	0.38	–	M.A. Partrick
$A = 0.90J + 1.53$	0.385	2.37 ~ 6.35	P. Chassing et al
$A = 2.05J^{0.72}$	0.28	5 ~ 35	B.D. Pratte W.D. Baines

種々な式で近似された。火災上昇気流と噴流とで主軸の挙動が異なる理由は，データの範囲（J及びξ/Dの値の範囲）が異なるばかりでなく，気流の原動力と噴流速度の減衰の度合が相違することにもよる。(5)式に(2)～(4)式を代入すると(5′)式になるが，この式から上昇気流の傾きとフルード数の関係を検討する。

$$A_1=0.87\times\left(\frac{0.36}{\bar{U}_\infty}\times\sqrt{\frac{2g(T_f-T_\infty)L}{T_\infty}}\times\frac{S_f}{S_K+S_0}\times\sqrt{\frac{\rho_L}{\rho_\infty}}\right)^{\frac{3}{5}} \quad (5')$$

上昇気流の傾き(A_1)は，風速($\bar{U}_\infty$)と火炎長($\bar{L}$)に対し，それぞれ$\bar{U}_\infty^{-\frac{3}{5}}$と$\bar{L}^{-\frac{3}{10}}$に比例する。火炎長は一般に(6)式で近似されるから傾き(A_1)はフルード数（$F_r=\bar{U}_\infty^2/gD$）に対し，$F_r^{(-\frac{1}{2}+\frac{r}{2})\times\frac{3}{5}}$に比例する。このため(6)式の$r$の値が1に近くなるほど，傾きは$F_r$に依存しなくなり関根が指摘した結果になる。上昇速度が発熱速度だけに依存し，フルード数に関係しない場合すなわち$r=0$のときには傾きはフルード数の$-3/10$乗に比例することを示す。$r=0$で更に$A_1=J$が成立すれば，傾きはフルード数の$-1/2$乗に比例する。

これは以下に示すように，傾き角が比較的小さい場合の火炎の傾きの結果と一致する。このモデルでは，上昇気流の傾きの依存の仕方は上昇速度の代表値が，発熱速度，火災規模，風速にどのように関係しているかに強く支配されることを示す。

横井は線熱源からの上昇気流の傾きを無次元風速の関数として(7)式で表わした。

$$\tan\theta=\frac{1}{10}\left(\frac{gQ'}{\bar{U}_\infty^3\rho cT_\infty}\right)^{\frac{1}{4}}=\frac{1}{10}\times F_r^{-\frac{1}{4}}\times\left(\frac{\dot{q}_0\dot{m}''}{\rho cT_\infty\bar{U}_\infty}\right)^{\frac{1}{4}} \quad (7)$$

但し，gは重力加速度でcは比熱である。上昇気流の気流温度を100℃として密度を計算してから$\tan\theta/(gQ'/\bar{U}_\infty^3\rho cT_\infty)^{\frac{1}{4}}$の値の平均値を求めると0.38になり，(7)式の係数（0.1）と異なった。このことは，線熱源の実験から得られた結果を面熱源の上昇気流の傾きを求めるには少なくとも係数を変える必要があることを示唆している。

この実験で使った資料の火災実験では，火炎長が1～4 mで燃焼域の幅に対して非常に小さいため，火炎の傾きについては検討できなかった。火災上昇気流の対象範囲を限定すれば上昇気流の速度と気流温度が一定と見做せる区域が存在する。この区域については火炎の傾きを表す関係式において，密度を修正するだけで火災上昇気流の傾きを表わす近似式として適用できると思われる。J.RWelker等は矩形バーナーの火炎に対して，火炎の傾きを抗力係数（C_f）を用いて次式で示した。

$$\frac{\tan\alpha}{\cos\alpha}=\frac{C_f\bar{U}_\infty^2}{2\left(1-\frac{\rho_f}{\rho_a}\right)gD}\ (=K) \quad (8)$$

但し，$\alpha=\pi/2-\theta$で円形バーナーに対しては$\tan\alpha/\cos\alpha=C_f\bar{U}_\infty^2/\pi/2(1-\rho_f/\rho_a)gD$である。

この式を変形して$\tan\theta$とKの近似式を求める。その結果，$K\ll 1/2$の範囲では$\tan\theta=1/\sqrt{2}\times 1/K$となり，$K\gg 1/2$の範囲では$\tan\theta=1/\sqrt{K}$となる。これは傾き角$\theta$が大きい部分では傾き$A_1$はフルード数に反比例するが，傾き角$\theta$が小さい範囲ではフルード数の平方根に反比例することを示す。また，Pipkinらもこれと類似の結果を得ている。湯本は，n-ヘキサンの火炎の傾きが$K>\frac{1}{2}$の範囲ではフルード数の0.553乗に反比例する結果を得た。[19] これに対し，浜田は火炎の傾きを$\tan\theta=4D/\bar{U}_\infty^2$で示し，傾きがフルード数に反比例する結果を得た。[13] J.R.Welker等のデータでは，θが小さい範囲ではフルード数の$1/2$乗に反比例するという結果である。抗力係数自体がフルード数にも依存するため，傾きはフルード数に更に弱く依存する。

(6)式はいろいろな条件のデータから得られた結果で

あり，適用範囲を検討する必要がある。この式は主に燃焼規模が数メートルないし数十メートルのクリブを用いた火災実験で，火源に比較的近い部分の上昇気流で傾き角が25°ないし45°のものを対象にしたものである。(6)式を市街地火災へ適用する時の妥当性を判断するため，大館市の火災（昭和30年5月）の，出火約2時間後と酒田市大火（昭和51年10月）の出火約7時間後の火炎性状について，横風からの写真を中心にして検討した。火災荷重はいずれも推測で150kg/m²で，家屋の燃焼時間が25分として発熱速度等を計算すると **Table 1** の番号14，15の項目の通りである。但し，大館市火災では大気が乾燥しており湿度が低く木造住宅が密集していたので火炎が合流したと判断した。一方，酒田市大火では降雨があった上に外壁がトタンで覆われた家が多かったこと等により燃焼が弱められていたので，火炎の合流状態は遷移状態であったとして計算した。このようにして求めるとA_1とJの関係を **Fig. 2** の番号14，15に示す。大館市火災は(5)式とよく合っているが，酒田市大火ではそれよりも傾き角が小さくなった。但し，火災現場付近では測候所で観測した値よりも強い風が吹いた（その可能性は十分考えられる）とすればよく一致する。この二例では(5)式と比較的よく一致するが，市街地火災への妥当性を確認するには更に多くの事例と比較してみる必要がある。

このモデルを用いて市街地火災の上昇気流を考察するには，特に市街地火災の火炎長を正しく把握しなければならない。市街地の火炎長は，火災規模，風速，建物の種類（木造，防火造，耐火造）と大きさ，家屋間距離，火災荷重，家屋個数等の種々な組み合わせによって変わり，火炎の合流の度合にも左右される。しかし，現状では，この方面の研究が殆どなされていないので火災事例の検討方法を整理した上で研究を進めることが必要である。

5. まとめ

火災上昇気流の傾きを有効速度比（J)を用いて表す新しい手法を示した。まず，多数個のクリブが燃焼しているときの燃焼幅を定義した上で火炎先端における平均上昇速度を求めた。次いで，この上昇速度から有効速度を計算し，13例の野外実験の結果から上昇気流の傾き（A_1）と有効速度（J)について次の実験式を得た。

$$A_1=0.87J^{\frac{3}{5}}$$

この関係式で，有効速度（J）がフルード数（U_∞^2/gD）に依存するため傾きA_1（$=\tan\theta$）もまたフルード数に関係する。この場合，傾きとフルード数の関係は一意的に決まらず，(6)式のrの値が大きくなるほど傾きはフルード数に依存しなくなることが示された。

また，この手法は上昇気流の傾きばかりでなく，一部分を修正することにより火炎の傾きの解析にも適用できることを指摘した。

記　号

A_1 ： 主軸の傾き〔$=\tan\theta$〕

A, B ： 主軸の曲線を表わすパラメーター

B_o ： 燃焼域の正面幅〔m〕

c ： 比熱〔Kcal/°C·kg〕

d ： 単一クリブの幅〔m〕

D_o ： 燃焼域の幅（風向に平行な方向）〔m〕

D ： 燃焼域の補正幅〔m〕

g ： 重力加速度〔m/s²〕

J ： 有効速度比

$\bar{L}$ ： 火炎長〔m〕

$\dot{m}''$ ： 重量減少速度〔kg/m²·s〕

n ： x方向のクリブ数

q_o ： 発熱量〔Kcal/kg〕

Q' ： 発熱速度〔Kcal/m·s〕

s ： クリブ間の距離〔m〕

S_k ： クリブの占有面積〔m²〕

S_o ： 空地面積〔m²〕

S_f ： 火炎占有面積〔m²〕

T_∞ ： 周辺気の絶対温度〔°K〕

T_f ： 火炎の絶対温度〔°K〕

$\bar{U}_\infty$ ： 水平流速〔m/s〕

W ： 上昇速度〔m/s〕

x ： 風向に平行な方向の座標軸

y ： 風向に直角な方向の座標軸

z ： 鉛直軸

z_0 ： 観測高度〔m〕
α ： 鉛直軸と主軸のなす角
ρ ： 密度〔kg/m²〕
θ ： 水平面と主軸のなす角（$\alpha+\theta=\frac{\pi}{2}$）
ξ ： 主軸に沿った座標系でx方向に対応した軸
μ ： 主軸に沿った座標系でy方向に対応した軸
ζ ： 主軸に沿った座標系でξ，μ軸に直角な軸
η ： 建ぺい率

サフィックス

a ： 可燃ガス
f ： 火炎内部
L ： 火炎先端
∞ ： 火災の周辺

参考文献

1）横井鎮男：日本火災学会論文集 Vol.13, No.2, 49（1965）
2）藤田金一郎：日本火災学会研究発表会概要集，61（（1978）
3）佐賀武司，加藤武志：日本火災学会研究発表会概要集，54（1975）
4）関根 孝：日本建築学会大会学術講演梗概集，207,（1974）
5）山下邦博：消防研究所報告，No.39, 35（1975）
6）建築学会：防災拠点の安全性に関する火災実験（詳細編）（1973）
7）建築学会：防災拠点の安全性に関する火災実験（考察編）（1973）
8）消防研究所：大震火災の延焼状況に関する研究,（1973）
9）消防庁：飛行艇による空中消火実験（1979）
10）消防研究所：市街地火災の延焼性状等に関する研究（1975）
11）P.H.Thomas et al：*Tenth Symp.*（*Int.*）*on Comb.*, 983, The Comb. Institute,（1965）
12）横井鎮男：日本建築学会論文集，vol.46, 92(1953)
13）浜田 稔：日本火災学会論文集，vol.1, No.1, 41（1952）
14）O.A.Pipkin et al：*I & EC Fundamentals*; vol.3, No.2, 147（1966）
15）J.R.Welker and C.M.Sliepcevich: *Fire Tecnology* vol.12, No.2, 127（1966）
16）R.J.Margason：NASA TN-D 4919（1968）
17）J.W.William and M.N.Wood：*Zeitsch. Flugwiss.* vol.15, 237（1967）
18）P.Chassaing et al: *Journal of Fluid Mechanics* vol.62, part 1, 41（1974）
19）湯本太郎：安全工学，vol.16, No.1, 58（1977）
20）日本科学防火協会：名神高速道路トンネル内防火設備に関する実験報告書，41（1960）
21）亀井幸次郎：火災，vol.3, 122（1960）
22）消防研究所：酒田市大火の延焼状況等に関する調査報告書（1977）

An Approach to the Evaluation of the Bending of Upward Air Flow above Fires

(Abstract)

K. Yamashita

(Received May 31, 1980)

A simple model is presented to evaluate the bending of upward air flow above fires in terms of effective velocity ratio. The upward air flow velocity at the flame tip W_L is assumed to be equal to the characteristic velocity of upward air flow according to the following modified Thomas's formula.

$$W_L = 0.36 \times \sqrt{\frac{2g(T_f - T_\infty)\bar{L}}{T_\infty}} \times \frac{S_f}{S_k + S_o}$$

where g is gravitational acceleration, L the average flame length, S_k the total area of combustible material, S_o the open area, S_f the area covered by flame, T_∞ the absolute temperature of surrounding air and T_f the flame temperature.

In this model, the effective velocity ratio i.e., the root of the momentum ratio of upward air flow to wind, $J = \frac{W_L}{\bar{U}_\infty}\sqrt{\frac{\rho_L}{\rho_\infty}}$ is introduced as an important parameter to describe the phenomena of interest. The ratio directly represents the bending of upward air flow in case that the effective velocity at the flame tip is equivalent to the average value over the covering zone.

The correlation between the bending of upward air flow A_1 and the effective velocity ratio J has been investigated using the available data of thirteen fire experiments, and the following approximated relation has been obtained.

$$A_1 = 0.87 J^{\frac{3}{5}}$$

Besides, the dimensionless flame height L/D is expressed as a function of Froude number

$$\frac{\bar{L}}{D} = 0.56 \times \left(\frac{\dot{m}''^2}{\rho_\infty^2 g D}\right)^{0.10} \times \left(\frac{\bar{U}_\infty^2}{gD}\right)^{0.14}$$

where D is fire depth, $\dot{m}''$ the burning rate, ρ_∞ the density of surrounding air and $\bar{U}_\infty$ the wind velocity.

Extensive discussions are concentrated on the dependence of the bending of the upward air flow on the Froude number and the above relations are compared with the corresponding relations described by Yokoi and other authors. As a result of the present study, it has been clarified

that the bending of upward air flow is influenced by the upward air flow velocity which depends on the heat release rate, fire width and wind velocity, and the bending is a slowly varying function of Froude number when upward air velocity increases with wind velocity.

水溶性液体火災に対する各種泡消火剤の消火能力の評価（第2報）

星野　誠・林　幸司

（昭和55年6月6日受理）

1. 緒　言

この実験の主な目的は，(1)各種水溶性液体の大規模タンク火災に対して，従来の金属石けん型を含め，新規に開発された各種水溶性液体火災用泡消火剤（以下泡消火剤と呼ぶ）の消火性能を調べること。(2)現行泡消火剤規格（自治省令第26号）から適用除外されている水溶性液体用泡消火剤規格原案作成に役立つ基礎資料を得ること。(3)各種水溶性液体火災の消火機構を明らかにすることにある。前記目的(1)については，前報[1]に引続き親水性極性液体の代表としてメタノール，アセトンを，また新たに疎水性極性液体の代表としてイソブタノールを選び，その大・小規模消火実験を行った。(2)については，米国規格ノズル(Fed.Spec. OF－555C）を用いてメタノール，アセトン，イソブタノールに対する最適消火試験条件を検討し，さらに凝固点，変質試験後の沈殿量などの物性を調べた。(3)については，燃料温度，燃料中の水分量と引火点，燃料の水に対する溶解度などを調べた。この結果，前記目的(1)，(2)，(3)に関する有用な知見と今後の問題点が明らかになったので，ここに報告する。

2. 実験方法と測定事項

2.1. 燃焼容器

大規模消火実験用には，**Fig. 1**に示す前報[1]でも用いた一辺1.5m角の2重壁タンクと**Fig. 2**、**Fig. 3**に示す規格検討用として試作した各種燃焼皿を使用した。小規模消火実験用には，同じく前報[1]で用いた，一辺70.7cm角の燃焼皿を使用した。なお，規格検討用燃焼皿の寸法は，1辺2.13m，1.95m，1.80m角で高さがそれぞれ0.9mのもの3種と1辺2m角で高さ0.4mのもの1種であった。

2.2. 燃料

親水性極性液体としては，メタノール，アセトン，疎水性極性液体としては，N-ブタノール，イソブタノールを用いた。これらはいずれもJISKで定める1級品である。なお，疎水性極性液体のうち大規模消火実験用にはイソブタノールを用いた。イソブタノールを用いた理由は，N-ブタノールよりもイソブタノールのほうが引火点，水に対する溶解度が共に低かったこと，また0.7m角小規模消火実験でイソブタノールの方が消火しにくかったこと，価格もN-ブタノールより安価で，大量使用に適していることなどである。

2.3. 泡ノズル

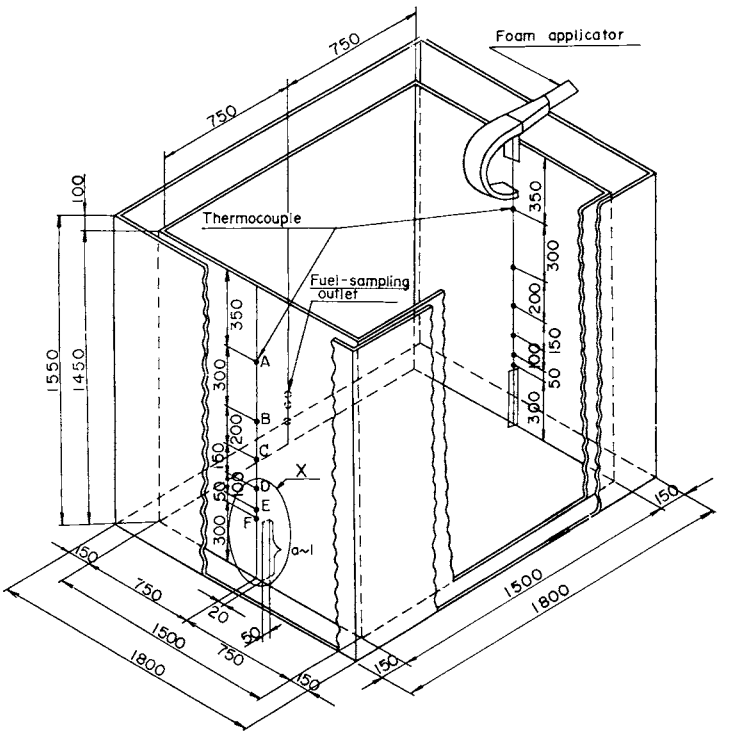
大規模消火実験用には米国規格ノズルを用いた。このノズルは放水圧力7.0kg/cm²のとき泡水溶液放水量が22.7ℓ/minとなるよう設計されている。小規模消火実験用には試作小型ノズル2本を一諸に用いた。このノズルは放水圧力7.0kg/cm²のとき泡水溶液放水量が1.25ℓ/minとなるよう設計されている。なお，これらのノズルはいずれも前報[1]で使用したものである。

2.4. 泡放出口

前記大・小の泡ノズルの先端には，泡の保水率が高くまた燃料による泡の汚染率が小さい逆U字形泡放出口（フオーム・アプリケーター）を取付けた。これらはいずれも前報[1]で使用したものである。

2.5. 泡消火剤

水溶性液体用合成界面活性剤泡消火剤（以下合成泡消火剤と略）は，アメリカのナショナル・フオーム社



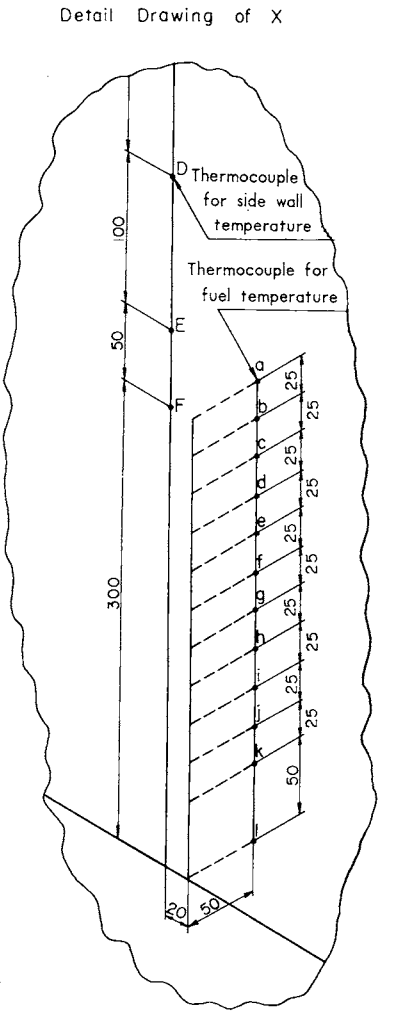


Fig. 1 Double-side wall tank used for a tank fire model

製 **AERO-WATER-PSL** 改良品（以下エアロウオーターPSL），住友3M社製ライトウオーター **FC-3035**（FC－600改良品），純国産品**A**，たんぱく泡消火剤は，非金属石けん型改良品**B**，**C**，従来の金属石けん型品**D**，このほか石油類火災用ライトウオーター **FC-3031**（国家検定品）も用いた。これらの泡消火剤はすべて国内泡消火剤メーカーにより提供され，金属石けん型たんぱく泡消火剤**D**以外は，すべてプレミックスした状態ならびに淡水および海水の使用が可能である。なお，改良型たんぱく泡消火剤**C**とライトウオーター **FC-3031** 以外は，すべて前報[1]で使用したものである。

2.6. 側壁温度，燃料温度の測定

2重壁タンクと規格検討用燃焼皿各種について，予燃時間中と消火開始以後の側壁温度，燃料温度を調べた。側壁温度用には助川電気工業社製シース型クロメル・アルメル熱電対（3.2ϕ），燃料温度用には同種熱電対（1.6ϕ）を用いた。これらの熱電対は小松エレクトロニクス社製冷接点補償器を介して，横河電気製作所製小型多点温度記録装置につないだ。**Fig. 1**に2重壁タンクに用いた熱電対，**Fig. 2**，**Fig. 3**に規格検討用燃焼皿に用いた熱電対の設置箇所を示す。

2.7. 燃料の厚みの測定

燃料の厚み，燃料量，燃焼速度の測定には総合計装社製 TAF－1型フロート式液面計を用いた。

2.8. 燃料中の水分量の測定

2重壁タンクと規格検討用燃焼皿について，消火開始後の各種燃料中の水分量変化を調べた。**Fig. 1**，**Fig. 3**に種々の高さの燃料サンプル採取位置を示す。水分量の測定には三菱化成工業社製 CA－02型デイジタル微量水分測定装置を用いた。

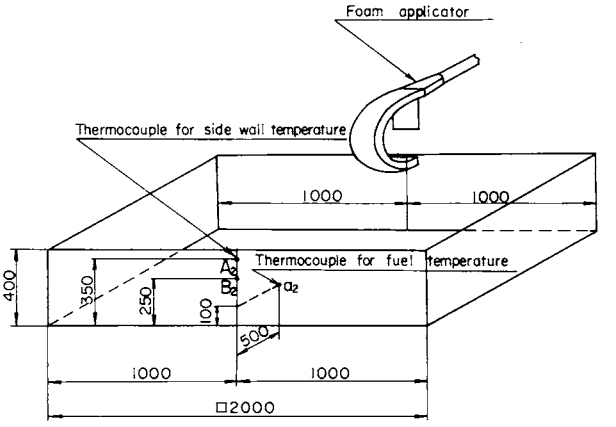


Fig. 2 Low wall square pan

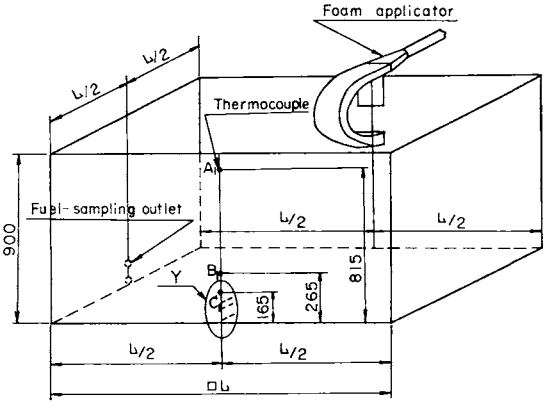
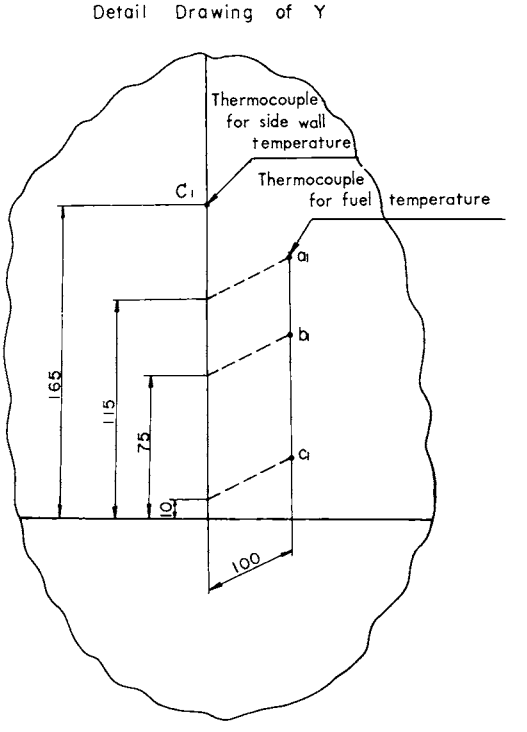


Fig. 3 High wall square pan



2.9. 引火点の測定

各種燃料の水希釈時における引火点を調べた。引火点は石油製品引火点試験方法（タグ密閉式，JISK 2539）に準じて測定した。

2.10. 沈殿量の測定

石油類用泡消火剤規格（自治省令第26号）第2条6項と第9条1項に規定している方法を用いて，変質試験後の供試泡消火剤原液の沈殿量を調べた。

2.11. 凝固点の測定

測定に当り，まず最初に助川電気工業社製銅・コンスタンタン熱電対(1.0ϕ) 各1本を挿入したコルク栓付試験管2本を用意した。その1本には，あらかじめおおよその凝固点を求めておいた泡原液を約15cmまで採り，他の1本には氷と水を入れた。つぎに前記の凝固点より−2〜−3℃低く設定した東洋製作所製KL−4H型低温恒温槽内に，これらの試験管2本を入れ，泡原液と氷水を凝固させた。その温度変化は銅・コンスタンタン熱電対によって調べた。泡原液の凝固点は，氷水の入った試験管内で示される氷点（0℃）を基準にして求めた。なお2本の熱電対間の温度表示は同一ではなかった。その温度差は低温恒温槽内で同時に測定した氷点表示の差によって求めた。

2.12. 消火実験方法

2.12.1. 小規模消火実験（燃焼面積0.5m²）

70.7cm×70.7cm×40cm^H の燃焼皿内に毎回各種燃料を深さ15cm（75ℓ）入れ，着火後5分，または10分間予燃し，消火を開始した。消火方法は，試作小型泡ノズル[1] 2本と逆U字形小型泡放出口[1] 二個を一緒に使用し，泡と泡とを接触させながら燃焼皿の壁面にそって静かに流下させるいわゆる側壁面流下方式によった。泡水溶液はあらかじめ所定の濃度にうすめるプレミックス方式で調製し，2台の耐圧容器に入れた。つぎにこれらの容器を圧縮空気（7.0±0.1kg/cm²）で同時に加圧することにより，泡水溶液を等量ずつ，したがって合計して 5ℓ/min・m² の供給率になるように送り出し，2本の試作泡ノズルを通して発泡させた。泡水溶液は消火するまで供給しつづけ，消火した場合にはさらに泡の再燃性能を調べるため，泡の供給は停止せず，消火後もさらに泡の供給を続けた（後述）。なお消火実験の直前に，室温，燃料温度，泡水溶液温度，泡の膨張率と25%ドレネジ時間を測定し，泡供給終了15分後（耐火性試験直前）に再び燃料温度の測定を行った。

2.12.2. 大規模消火実験（燃焼面積2.25～4.5m²）

1.5m 角2重壁タンクと規格検討用燃焼皿各種を用いて，各種燃料に対する供試泡消火剤の消火性能，再燃性能を調べた。消火実験に際し，まず2重壁タンク内にはアセトン，またはイソブタノールを深さ26.7cm（600ℓ）まで入れた。一方，規格検討用燃焼皿内にはメタノール，アセトン，イソブタノールをそれぞれ深さ15cm，または20cmまで入れた。この結果，着火開始前のフリーボード*1) の高さは，2重壁タンクでは，118.3cm，各種燃焼皿では20，25，75cmになった。予燃時間は，2重壁タンクについては30分，各種燃焼皿については5分，または10分とした。消火方法は，米国連邦規格ノズルと逆U字形泡放出口を使用し，**Figs. 1～3** に示すように泡を燃焼皿の壁面にそって静かに流下させる方式によった。逆U字形泡放出口の先端から放出された泡が燃焼面に到達するまでの距離は，2重壁タンクでは92.8cm，規格検討用燃焼皿では，1辺が2m角で側壁の高さが40cmのもの*2)については17.5（燃料の深さ20cmの時），22.5cm（同15cm），1辺が2.13m角，または1.95m角で側壁の高さが90cmのもの*3)についてはいずれも72.5cm，1辺が 1.8m角で側壁の高さが90cmのもの*3)については39.5cmであった。泡水溶液の調整は，金属石けん型たんぱく泡はラインプロポーション方式[1] で行い，その他の泡はすべてプレミックス方式によった。米国連邦規格ノズルによる泡水溶液の供給率は，2重壁タンクについては10ℓ/min・m²，規格検討用燃焼皿各種については燃焼面積に対応して，それぞれ 5，5.6，5.9，6.9ℓ/min・m²になった。この時の放水圧力はプレミックス方式の場合 7.0±0.1kg/cm²，ラインプロポーション方式の場合は 6.3±0.1kg/cm²であった。泡水溶液は消火するまで供給し続け，消火後も泡の再燃性を調べるため，泡の供給は続けた。泡供給停止後の再燃性試験のうち，2重壁タンクについては密封性試験（トーチ試験）のみ，規格検討用燃焼皿については密封性試験とそれに引続き耐火性試験を行った。なお，消火実験の直前に室温，燃料温度，泡水溶液温度，泡の膨張率と25%ドレネジ時間，着火開始後は燃焼容器の側壁温度，燃料温度，燃焼速度，燃料中の水分量，泡供給停止後の泡厚の測定を行った。

2.13. 再燃性試験

前報[1] において高温のメタノール，アセトンに対する各種泡の再燃性能を明らかにした。今回は水難溶性のイソブタノールに対する各種泡の再燃性能を明らかにするのと同時に，メタノール，アセトン，イソブタノール火災の再燃防止には，消火後の泡の厚みをどの程度に積み増しすれば可能であるかを調べてみた。

2.13.1. 密封性試験

0.5 m²小型燃焼皿と規格検討用大型燃焼皿各種を用いた消火実験では，泡供給停止後2分，10分毎に，2重壁タンクを用いた消火実験では泡供給停止後2分，10分，15分毎に，トーチ試験を行った。その方法は，泡層の表面近くを全面にわたって，点火棒にガソリンを浸して着火した炎を近づけて，再着火の有無を調べた。

2.13.2. 耐火性試験

2.13.1の密封性試験を行った後も全面火災に至らず泡が燃焼面を完全に覆っている場合には，0.5 m²小型燃焼皿と規格検討用大型燃焼皿を用いた消火実験においてのみ耐火性試験を行った。その方法は，泡供給停止15分後に，泡面のほぼ中央部の燃料面を1辺15cmの正方形となるように露出させ，まず露出した泡層の厚みと液温を測定し，つぎに5分間燃焼させた後の露出油面面積の広がりを測定した。

---

*1）燃焼容器の内壁の上辺のふちから燃料面までの路離
*2）Fig.2 参照
*3）Fig.3 参照

3. 結果と考察

3.1. 小規模消火実験（燃焼面積0.5m²）

3.1.1. 各種泡の消火性能

小規模消火実験ではブタノール(N，イソ)，特にイソブタノールに対する各種泡の消火性能を調べた。なお，今回新たに提供された改良型たんぱく泡Cについては，メタノール，アセトンに対する消火実験もあわせて行った。消火実験の結果をTable. 1に示す。泡消火剤の種類によって消火時間，ドレネジ時間に著しい差が見られた。イソブタノールに対する消火は，淡水（水道水），海水（合成海水）いずれの使用時も，ライトウオーター FC-3035 が最も速く，続いてエアロウオーターPSL，石油類用ライトウオーター FC-3031，改良型たんぱく泡C，B の順に遅くなった。純国産の合成泡Aと金属石けん型たんぱく泡Dは，泡水溶液をプレミックスにした場合，火災のコントロールが出来ず消火不能になった。N-ブタノールに対するライトウオーターFC-3035とたんぱく泡Cの消火は，イソブタノールに対する時よりもいずれも速かった。また，メタノール，アセトンに対する改良型たんぱく泡Cの消火性能を，同種燃料に対する他の泡の結果[1]と比べた場合，エアロウオーターPSL，ライトウオーター FC-3031に次いで優れていることがわかった。

3.1.2. 各種泡の再燃性能

消火後の各種燃料に対する各種泡の再燃性能をTable.1に示す。イソブタノールの消火が速かったライトウオーターFC-3035，同FC-3031，エアロウオーターPSLについて，そのイソブタノールに対する淡水，海水使用時の再燃性能を比較した。この結果，消火後の泡供給時間を5分間延長し，泡層を厚くしたのにもかかわらず，その15分後の耐火性試験においてエアロウオーターPSLは全面火災に移行した。これに対してライトウオーターFC-3035の消火後の泡供給時間は3分間と前者より著しく短縮されているが，耐火性試験では全面火災にはならなかった。石油類火災用ライトウオーターFC-3031は，淡水，海水いずれの場合でも耐火性試験で全面火災になり，水溶性液体火災用ライトウオーターFC-3035に比べ，泡の再燃性は著しく劣っていることがわかった。一方，イソブタノールの消火に時間を要した改良型たんぱく泡B，Cのイソブタノールに対する再燃性能を比較すると，たんぱく泡Cは淡水，海水いずれでも密封性・耐火性の両試験に合格しているが，たんぱく泡Bは密封性試験で着火しており，また海水を使用した一例では耐火性試験で全面火災に移行した。以上の結果，小規模消火実験におけるイソブタノールに対する泡の再燃防止能力は，淡水，海水いずれの場合でも，ライトウオーター FC-3035，改良型たんぱく泡Cが最も優れ，続いてエアロウオーター PSL，改良型たんぱく泡 B，石油類用ライトウオーター FC-3031 の順に低下した。またN-ブタノールに対するライトオーター FC-3035と，改良型たんぱく泡Cの再燃防止能力は，淡水使用時ではいずれも優れていた。メタノール，アセトンに対する改良型たんぱく泡Cの再燃防止能力は優れており，その性能は前報[1]で得られた同種のたんぱく泡Bのそれによく類似していた。なお，弗素系界面活性剤が添加されているライトウオーター FC-3035，エアロウオーター PSL，改良型たんぱく泡B，Cのブタノール（N，イソ）に対する耐火性試験の特徴は，着火後露出ブタノール面の周囲からフィルム状の薄膜が押し寄せ，露出面を覆いながらその火炎を消して行くのがしばしば目視されたことである。このことから露出ブタノール面上には燃料ガスの発生を抑制する弗素系分子膜いわゆる水成膜があきらかに形成されているのが認められる。この結果，表面張力低下作用の著しい弗素系界面活性剤は，水に難溶性のブタノールの消火に対しては極めて効果があるものと思われる。

3.2. 大規模消火実験

3.2.1. 規格検討用消火実験（燃焼面積3.2～4.5m²）

3.2.1.1. 規格検討のための前提条件

国家規格用消火試験方法を検討するのに際し，まず泡ノズルについては国内には適当なものが見当らず，やむを得ず国際的に通用している米国規格ノズルを用いることにした。泡放出方法は，タンクの固定消火設備と消防隊用にも併用可能ないわゆる燃焼面中央打ちあて方式が最善と思われたが，燃料による泡の汚染で消火性能の低下が著しい供試泡の現時点の技術水準では，この方式を採用することは困難であると思われた。したがってこの実験では，前報[1]の結果から燃料による泡の汚染が少ない逆U字形アプリケーターを使用し，泡を壁面にそって流下させる側壁面流下方式によることにした。燃料は，親水性極性液体の代表としてメタ

ノール，アセトン，疎水性極性液体の代表としてイソブタノールを選んだ。これらは引火性，粘性，毒性などの点で，比較的消火作業のしやすい液体である。泡水溶液供給率の決定に当っては，水溶性液体タンクの泡消火設備基準の下限値として，すでにわが国の損害保険料率算定会規則（損保規格）とアメリカ防火協会規格（NFPA－11）において定められている供給率8ℓ/min・m²と，アメリカ工場災害保険規則(U.L.162)の水溶性液体火災用消火試験中に規定している値2.44ℓ/min・m²とを考慮した。すなわち，泡水溶液供給率は2.44～8ℓ/min・m²の範囲内に入るように配慮した。さらに，これらの供給率を用いた時の消火時間を含めた泡供給時間は，わが国の石油類用泡消火剤規格の規定時間*4)を参考にして，その上限は10分位が適当であると考えた。消火試験用燃焼皿としては，小量の燃料で供試泡に対する厳しい消火性能評価が得られるようなものが望ましい。その基準となる燃焼皿の形状としては，前述U.L.162と米国規格(Fed. Spec. OF－555C)において用いられているそれぞれ 7feet×7feet×12inch(2.13m×2.13m×0.3m^{H})と10feet×10feet×3feet^{H}(3.04m×3.04m×0.91m^{H})のサイズ，自治省令規格で用いられている2m×2m×0.3m^{H}のサイズを考慮に入れた。予燃時間は各燃料の燃焼速度，側壁温度，燃焼温度の分析から，各燃料の燃焼強度が最大に達するとみなされる10分を基準にすることにした。泡消火剤は，小規模消火実験において消火性能の優れていたエアロウオーター **PSL**，ライトウオーター **FC-3035**，改良型たんぱく泡 **B**，**C** とこれらに加えて従来の金属石けん型たんぱく泡**D**の合計5種類を用いた。なお，泡水溶液の調製は，従来のたんぱく泡**D**のみがラインプロポーション方式でその他の泡はすべてプレミックス方式によった。

3.2.1.2. 消火試験用燃焼皿の最適形状

前述**3.2.1.1.**の諸条件を考慮し，試作した各種燃焼皿を用いた消火実験の結果を**Table. 2 (a),Table. 2(b)**に示す。この結果，この実験に用いた泡消火剤5種のうち，その大部分が前述**3.2.1.1.**の泡供給時間の上限値10分を満足すると共に，再燃試験にも合格することが出来た燃焼皿のサイズは，1.8m×1.8m×0.9m^{H}であった。また，この時の泡水溶液供給率は 6.9ℓ/min・m²になった。

3.2.1.3. 各種泡の消火性能

Table. 2 によれば，規格検討用の火災規模がいずれでも，メタノール，アセトンに対する消火は淡水，海水いずれの使用の場合も，非希釈型合成泡であるエアロウオーター **PSL** が最も速く，続いて同種泡のライトウオーター **FC-3035**，非希釈と希釈型の中間のタイプに属する改良型たんぱく泡 **C**，**B**，最後に希釈型の従来たんぱく泡**D**の順に遅くなった。一方，イソブタノールに対する消火は，ライトウオーター**FC-3035**が最も速く，続いてエアロウオーター **PSL**，改良型たんぱく泡 **C**，**B** の順に遅くなった。なお，イソブタノール火災に対する従来型たんぱく泡**D**は，泡水溶液の貯蔵全量を放出し続けても，火災のコントロールが出来ず，消火不能であった。以上の各泡消火剤の消火結果は，前回[1]と今回の小規模消火実験において得られた傾向とよく一致している。

3.2.1.4. 各種泡の再燃性能

火災規模が異なった時の各種泡の密封性，耐火性試験結果を**Table. 2(a),Table. 2(b)**に示す。メタノール，アセトンの消火が最も速かったエアロウオーター**PSL**とライトウオーター **FC-3035** の再燃性の特徴は，この種の泡が水に希釈されにくいタイプであるため，泡中に高濃度の可燃性水溶性液体が保持され易く，したがって極めて引火しやすい状態にあったことである。すなわち，これらの泡は消火が速かったため，消火後の泡供給時間も他の泡に比べて長く，その結果消火後の泡厚は他の泡消火剤に比べて著しく増加していた。それにもかかわらず，泡供給停止2分後の密封性試験においてしばしば急速かつ広範囲に燃え広がった。しかし，燃焼は一時的で継続せず，泡中に含まれた引火性蒸気濃度が低下するにしたがって自然消火した。さらにこれに続く10分後の第2回密封性試験ではその多くが再着火しなかった。この現象は燃料温度と引火性ガス濃度の低下によるものと思われる。また，第2回密封性試験に続く，15cm角の耐火性試験において泡の流動性が良いエアロウオーター **PSL** は，泡の厚み，(25cm以上)が十分な時は，燃料面を露出することが出きず，着火不可能であった。反面，泡の厚み(約5cm)が薄く燃料面の露出が可能な時は，全面火災に移行し

*4）たんぱく泡，水成膜泡（ライトウオーター）にあっては5分間，合成泡消火剤にあっては8分間。

Table 1 Details of the relative fire extinguishing ability, fuel vapor sealability, burnback

Foam agent	Water used	Fuel used	Preburn time (min)	Properties of the foam: Expansion ratio	Properties of the foam: 25% drainage time (min·sec)	Temperature of fuel: before burning (°C)	Temperature of fuel: after extinguishing (°C)	Temperature of foaming solution (°C)	Room temperature (°C)
Modified National Aero-Water PSL	Fresh water	Isobutanol	10′	4.6	13′50″	15.0	33.5	23.1	16.1
〃	〃	〃	〃	4.6	9′41″	19.0	30.5	25.0	19.9
〃	Synthetic sea water	〃	〃	4.3	7′05″	18.0	30.8	25.0	16.8
Light Water FC-3035	Fresh water	〃	〃	4.6	9′10″	14.1	30.0	25.0	14.9
〃	〃	〃	〃	5.3	7′45″	22.0	31.0	25.0	23.4
〃	Synthetic sea water	〃	〃	4.1	4′46″	15.0	28.3	25.0	14.9
〃	〃	〃	〃	3.8	4′38″	19.5	31.0	25.0	20.9
Hydrocarbon type Light Water FC-3031	Fresh water	〃	〃	5.7	2′49″	21.0	31.0	23.0	21.0
〃	Synthetic sea water	〃	〃	4.6	3′14″	15.9	28.1	25.0	17.1
Synthetic-A	Fresh water	〃	〃	4.5	3′10″	15.0	–	25.0	18.3
〃	Synthetic sea water	〃	〃	5.0	2′31″	19.0	–	25.0	19.9
New type protein-B	Fresh water	〃	〃	5.0	3′59″	21.9	35.9	20.3	20.3
〃	〃	〃	〃	4.9	3′45″	13.5	34.0	25.0	13.9
〃	Synthetic sea water	〃	〃	4.6	3′58″	22.0	45.5	21.8	22.8
〃	〃	〃	〃	4.8	3′28″	15.9	42.5	25.0	15.4
New type protein-C	Fresh water	〃	〃	4.8	3′07″	18.2	34.1	25.0	20.8
〃	Synthetic sea water	〃	〃	4.3	5′41″	22.0	41.0	24.0	24.1
Conventional protein-D	Fresh water	〃	〃	4.1	<1′00″	19.1	–	25.0	20.0
Light Water FC-3035	Fresh water	n-Butanol	〃	4.3	11′11″	22.0	34.0	20.5	23.4
New type protein-C	〃	〃	〃	4.8	3′37″	22.5	37.5	20.0	25.0
〃	〃	Methanol	5′	4.9	3′55″	22.1	37.0	20.0	24.6
〃	Synthetic sea water	〃	〃	5.1	5′58″	23.2	35.9	20.0	24.9
〃	Fresh water	Acetone	〃	4.6	3′45″	21.0	35.8	19.0	20.5
〃	Synthetic sea water	〃	〃	4.7	5′51″	23.0	32.0	20.0	21.6
Conventional protein-D	Fresh water	〃	〃	4.7	2′55″	18.0	–	16.2	19.1

Light water FC-3035: modified FC-600
Synthetic-A: a detergent-based foam liquid
Concentration of foam solution: 6 vol%; The foam solution was premixed.
Pan: 70.7 cm square and 40 cm high; Fuel depth: 15 cm, amount: 75 ℓ
Application rate: 5±0.1 ℓ/min·m^2

resistance, and foaming properties of seven foam agents. (Gentle application method)

Extinguising time*		Foam application period	Fuel vapor sealability and burnback resistance			
			Sealability test**		Burnback test***	
total (min·sec)	per unit area (min·sec/m²)	(min·sec)	2 min after foam application	10 min after foam application	Thickness of foam blanket (cm)	Burnback area (cm X cm)
1'05"	2'10"	2'05"	No ignition	Full fire	–	–
0'59"	1'58"	5'59"	"	No ignition	7.0	Full fire after about 4'50"
1'23"	2'46"	4'23"	"	Ignition partially → self extinguishing	3.0	Full fire after about 30"
0'50"	1'40"	3'50"	"	No ignition	5.0	25 X 25
0'50"	1'40"	5'50"	"	"	8.0	25 X 25
0'58"	1'56"	3'58"	"	"	5.0	33 X 33
1'02"	2'04"	6'02"	"	"	8.0	31 X 30
1'10"	2'20"	6'10"	"	"	9.0	Full fire after about 3'45"
0'59"	1'58"	5'59"	"	"	8.0	Full fire after about 5'
No control after 15'00" foam application	–	15'00" foam application stopped	–	–	–	–
No control after 24'00" foam application	–	24'00" foam application stopped	–	–	–	–
5'04"	10'08"	6'04"	No ignition	Ignition partially (immediately extinguishing)	3.0	35 X 35
5'14"	10'28"	6'14"	"	Ignition partially (subsequently small edge fire continued)	3.0	23 X 25
13'14"	26'28"	14'14"	"	"	3.5	Full fire after about 3'30"
12'40"	25'20"	13'40"	Ignition partially (immediately extinguishing)	"	2.5	30 X 30
6'07"	12'14"	9'07"	No ignition	No ignition	6.5	20 X 20
8'56"	17'52"	11'56"	"	"	9.0	20 X 20
No control after 9'00" foam application	–	9'00" foam application stopped	–	–	–	–
1'00"	2'00"	4'00"	No ignition	No ignition	6.0	34 X 34
4'49"	9'38"	7'49"	"	"	6.5	21 X 21
5'43"	11'26"	6'43"	"	"	5.0	34 X 34
5'44"	11'28"	6'44"	"	"	6.5	20 X 20
7'41"	15'22"	8'41"	"	"	5.5	25 X 25
3'50"	7'40"	4'50"	Ignition partially (immediately extinguishing)	Ignition → self extinguishing	7.5	20 X 20
No control after 11'00" foam application	–	11'00" foam application stopped	–	–	–	–

* : Two small scale foam nozzles used together, each capable of a solution rate of 1.25 ℓpm at a discharge pressure of 7.0±1 kg/cm².

** : Lighted torch was applied over the foam blanket 2, or 10 min after the foam application period.

***: 15 min after the foam application period, a foam blanket of 15 cm X 15 cm was cut off, the thickness of foam blanket was measured, continuously, the cut area was ignited. 5 min after the cut area was ignited, the burn area was measured.

Table 2 (a) Details of the relative fire extinguishing ability, fuel vapor sealability, fuel burning rate,

Foam agent	Solution mixing	Fuel used	Fuel depth (amount)	Pan*[1] (m×m ×mH)	Properties of the foam		Application rate (ℓ/min ·m²)	Discharge pressure (kg /cm²)	Temperature of fuel		Temperature of foaming solution (°C)
					Expansion ratio	25% drainage time (min·sec)			before burning (°C)	after extinguishing (°C)	
Modified National Aero-Water PSL	Premix -Fresh water	Methanol	20 cm (800 ℓ)	2 × 2 × 0.4	6.8	7'17"	5.6	7.0	8.0	15.4	25.0
New type protein-B	"	"	15 cm (600 ℓ)	"	5.7	1'51"	"	"	10.1	24.5	25.0
Conventional protein-D	Line proportioning -Fresh water	"	"	"	5.5	<1'00"	"	6.3	8.1	23.6	25.0
Light Water FC-3035	Premix -Fresh water	"	15 cm (680 ℓ)	2.13×2.13 ×0.9	7.0	2'55"	5.0	7.0	23.0	34.3	20.9
New type protein-C	"	"	"	"	5.4	2'07"	"	"	23.0	37.3	20.6
Modified National Aero-Water PSL	"	"	15 cm (570 ℓ)	1.95×1.95 ×0.9	7.0	12'21"	5.9	"	22.6	34.2	21.1
Light Water FC-3035	"	"	"	"	6.7	4'22"	"	"	23.0	36.7	21.2
New type protein-C	"	"	"	"	5.5	2'00"	"	"	21.2	36.7	21.1
Light Water FC-3035	"	Acetone	"	"	6.4	4'15"	"	"	18.0	47.4	20.6
New type protein-C	"	"	"	"	5.7	1'51"	"	"	21.0	48.5	23.2
Modified National Aero-Water PSL	"	Methanol	15 cm (480 ℓ)	1.80×1.80 ×0.9	7.0	10'52"	6.9	"	32.2	37.1	28.2
"	Premix-Synthetic sea water	"	"	"	7.8	11'03"	"	"	20.0	26.8	20.8
Light Water FC-3035	Premix -Fresh water	"	"	"	6.7	3'32"	"	"	26.9	38.9	26.9
"	Premix-Synthetic sea water	"	"	"	7.6	1'49"	"	"	25.2	36.2	22.0
New type protein-B	Premix -Fresh water	"	"	"	5.3	2'05"	"	"	26.1	35.7	24.5
New type protein-C	"	"	"	"	6.3	1'22"	"	"	30.9	40.2	26.9
"	Premix-Synthetic sea water	"	"	"	5.4	2'37"	"	"	23.7	35.4	24.1
Conventional protein-D*	Line proportioning -Fresh water	"	"	"	6.8	<1'00"	"	6.3	22.0	35.5	19.9

Light Water FC-3035: modified FC-600
Concentration of foam solution: 6 vol% (* 6.1 vol%)
Preburn time: 10'00"
Foam nozzle: U.S. standard nozzle (Fed. Spec. O-F-555C)
*[1] Single side wall square pan

water content in fuel, and foaming properties of five foam agents. (Gentle application method)

Room temperature (°C)	Fuel burning rate (mm/min)	Extinguishing time: total (min·sec)	Extinguishing time: per unit area (min·sec/m²)	Foam application period (min·sec)	Fuel vapor sealability and burnback resistance: Sealability test*2: 2 min after foam application	Sealability test*2: 10 min after foam application	Burnback test*3: Thickness of foam blanket (cm)	Burnback test*3: Burnback area (cm × cm)	Water content of fuel at extinguishment (%): 11.5 cm	Water content of fuel at extinguishment (%): 1.5 cm*4
10.9	–	1′22″	0′21″	2′22″	No ignition	No ignition	5.5	Full fire after about 3′26″	–	–
14.6	–	4′13″	1′03″	5′13″	〃	Ignition partially (subsequently small edge fire continued)	4.0	35 × 35	–	–
11.7	–	7′45″	1′56″	8′45″	〃	No ignition	10.0	13 × 13	–	–
24.0	2.0	7′11″	1′35″	10′00″	Flash at ignition over whole surface → self extinguishing	〃	15.0	Full fire	15.6	20.0
22.0	2.5	15′32″	3′25″	15′32″	No ignition	〃	20.5	18 × 18	31.0	32.3
24.9	2.1	7′05″	1′52″	10′00″	Flash at ignition over whole surface → self extinguishing	〃	25.0	Foam surged, not ignited	14.1	16.0
23.8	1.9	7′35″	2′00″	10′00″	No ignition	〃	23.5	Full fire	24.7	27.7
24.0	2.0	10′35″	2′47″	10′35″	〃	〃	17.5	19 × 19	29.5	30.8
22.0	2.7	13′06″	3′27″	15′00″	Flash at ignition over whole surface → self extinguishing	Ignition → self extinguishing after 2′	20.0	Full fire after about 2′40″	48.2	49.4
24.0	3.2	11′47″	3′06″	11′47″	No ignition	Ignition → full fire	–	–	47.0	49.5
31.1	2.0	1′40″	0′31″	8′00″	Flash at ignition over whole surface → self extinguishing	No ignition	31.0	Foam surged, not ignited	2.5	1.8
20.2	1.9	1′11″	0′22″	8′00″	〃	〃	31.5	〃	–	–
28.8	2.0	3′40″	1′08″	8′00″	No ignition	〃	26.5	35 × 35	–	–
25.2	1.9	2′40″	0′49″	8′00″	〃	〃	27.0	45 × 52	–	–
27.3	1.8	5′26″	1′41″	8′00″	〃	〃	13.0	19 × 20	–	–
30.1	2.0	5′34″	1′43″	8′00″	〃	〃	12.0	26 × 26	16.3	19.8
26.1	1.9	4′30″	1′23″	8′00″	〃	〃	17.0	18 × 18	–	–
22.9	1.8	8′44″	2′42″	8′44″	Ignition partially → self extinguishing	〃	10.0	28 × 28	–	–

*2 Lighted torch was applied over the foam blanket 2, or 10 min after the foam application period.
*3 15 min after the foam application period, a foam blanket of 15 cm × 15 cm was cut off, the thickness of foam blanket was measured, continuously, the cut area was ignited, 5 min after the cut area was ignited, the burn area was measured.
*4 Level of fuel sampling (distance from the pan bottom).

Table 2 (b) Details of the relative fire extinguishing ability, fuel vapor sealability, fuel burning rate,

Foam agent	Solution mixing	Fuel used	Properties of the foam		Application rate	Discharge pressure	Temperature of fuel		Temperature of foaming solution	Room temperature
			Expansion ratio	25% drainage time (min·sec)	(ℓ/min·m²)	(kg/cm²)	before burning (°C)	after extinguishing (°C)	(°C)	(°C)
Modified National Aero-Water PSL	Premix -Fresh water	Acetone	6.6	14'43"	6.9	7.0	23.0	35.9	26.3	26.9
"	Premix-Synthetic sea water	"	7.7	8·28"	"	"	24.2	33.7	21.4	28.0
" *	Premix -Fresh water	"	7.6	11'49"	"	"	25.0	30.9	25.9	29.9
Light Water FC-3035	"	"	6.7	3'53"	"	"	22.0	38.6	24.5	26.8
"	Premix-Synthetic sea water	"	7.8	1'48"	"	"	22.3	38.0	23.5	24.1
" *	Premix -Fresh water	"	6.7	3'49"	"	"	19.2	32.0	20.4	23.9
New type protein-B	"	"	5.6	1'51"	"	"	23.8	45.7	25.4	29.1
" *	"	"	5.1	2'03"	"	"	23.7	44.5	25.4	29.6
New type protein-C	"	"	6.0	1'37"	"	"	25.7	38.9	24.3	28.7
"	Premix-Synthetic sea water	"	5.1	2'28"	"	"	23.5	41.0	23.2	27.3
" *	Premix -Fresh water	"	5.7	1'43"	"	"	23.1	37.0	24.0	27.0
Conventional** protein-D	Line proportioning-Fresh water	"	7.0	<1'00"	"	6.3	18.8	41.6	20.8	22.3
Modified National Aero-water PSL	Premix -Fresh water	Iso-butanol	6.8	10'07"	"	7.0	27.8	28.0	27.7	29.9
"	Premix-Synthetic sea water	"	8.1	9'32"	"	"	21.0	32.5	22.3	21.7
Light water FC-3035	Premix -Fresh water	"	7.0	3'33"	"	"	25.6	35.1	25.9	32.0
"	Premix-Synthetic sea water	"	8.1	1'59"	"	"	18.9	29.9	21.0	20.1
New type protein-B	Premix -Fresh water	"	5.4	1'35"	"	"	27.0	38.4	24.9	28.6
New type protein-C	"	"	5.9	1'46"	"	"	28.0	39.2	28.9	31.0
"	Premix-Synthetic sea water	"	5.1	2'43"	"	"	16.1	29.4	20.1	18.0
Conventional protein-D	Line proportioning-Fresh water	"	6.9	<1'00"	"	6.3	21.3	–	20.8	21.9

Light Water FC-3035: modified FC-600
Preburn time: 10'00" (*5'00")
Concentration of foam solution: 6 vol% (**6.1 vol%)
Foam nozzle: U.S. standard nozzle (Fed. Spec. O-F-555C)
Pan: Single side wall-type, 1.8 m square and 0.9 m high
Fuel depth: 15 cm, amount : 480 ℓ

water content in fuel, and foaming properties of five foam agents, (Gentle application method)

Fuel burning rate (mm/min)	Extinguishing time: total (min·sec)	Extinguishing time: per unit area (min·sec/m²)	Foam application period (min·sec)	Fuel vapor sealability and burnback resistance: Sealability test*1: 2 min after foam application	Sealability test*1: 10 min after foam application	Burnback test*2: Thickness of foam blanket (cm)	Burnback test*2: Burnback area (cm × cm)	Water content of fuel at extinguishment (%): 11.5 cm	Water content of fuel at extinguishment (%): 1.5 cm *3
4.0	1'39"	0'31"	10'00"	Flash at ignition over whole surface → self extinguishing	No ignition	37.5	Foam surged, not ignited	–	–
3.5	1'16"	0'23"	10'00"	"	"	43.0	Not ignited	–	–
3.4	1'25"	0'26"	8'00"	"	"	24.0	Foam surged, not ignited	2.2	1.6
3.6	3'50"	1'11"	10'00"	"	Flash at ignition over whole surface → self extinguishing	31.5	45 × 40	–	–
3.5	2'49"	0'52"	10'00"	No ignition	No ignition	34.5	Full fire after about 5'	–	–
3.8	3'33"	1'06"	10'00"	Flash at ignition over whole surface → self extinguishing	"	38.0	35 × 35	–	–
3.2	12'45"	3'56"	12'45"	No ignition	Ignition partially (immediately extinguishing)	11.0	22 × 22	–	–
3.8	11'39"	3'36"	13'39"	"	No ignition	14.0	20 × 19	27.6	34.9
3.3	5'44"	1'46"	10'00"	"	"	22.0	22 × 24	–	–
4.1	7'01"	2'10"	10'00"	"	"	20.0	18 × 17	–	–
3.4	8'18"	2'34"	10'00"	"	"	15.0	22 × 23	23.2	24.5
3.7	12'01"	3'43"	13'01"	"	Ignition partially (subsequently small edge fire continued)	9.0	30 × 35	–	–
2.7	1'32"	0'28"	8'00"	"	No ignition	23.0	Foam surged, not ignited	2.7	0.8
3.4	1'03"	0'19"	8'00"	"	"	27.0	"	–	–
3.0	1'10"	0'22"	8'00"	"	"	27.0	35 × 35	2.5	0.8
3.3	0'51"	0'16"	8'00"	"	"	31.0	Aqueous film formed, not ignited	–	–
2.9	8'26"	2'36"	10'00"	"	"	6.0	28 × 30	–	–
3.1	4'31"	1'24"	8'00"	"	"	15.0	24 × 23	6.0	7.1
2.5	4'32"	1'24"	8'00"	"	"	14.0	23 × 21	–	–
3.1	No control after 12'00" foam application	–	12'00" foam application stopped	–	–	–	–	–	–

*1 Lighted torch was applied over the foam blanket 2, or 10 min after the foam application period

*2 15 min after the foam application period, a foam blanket of 15 cm × 15 cm was cut off, the thickness of foam blanket was measured, continuously, the cut area was ignied. 5 min after the cut area was ignited, the burn area was measured.

*3 Level of fuel sampling (distance from the pan bottom)

た。一方，エアロウオーター PSL に比べ泡が固く，流動性が劣るライトウオーターFC-3035は，燃料面の露出はすべて可能であった。しかし，この場合泡厚(25cm以下)が薄いと全面火災に移行した。改良型たんぱく泡 B，C と金属石けん型たんぱく泡Dのメタノール，アセトンに対する再燃防止能力は優れていた。すなわち，アセトンに対して消火後の泡の積み増しを行わなかったたんぱく泡 C の一例を除いて，すべて密封性，耐火性試験に合格している。なお，メタノール，アセトンに対する淡水，海水使用時の再燃性能は，エアロウオーター PSL と改良型たんぱく泡 B，C はいずれも変らなかった。しかし，海水使用時のライトウオーター FC-3035 は，淡水使用時よりもその再燃性能は劣った。以上の結果，メタノール，アセトンに対する淡水，海水使用時の再燃性能は，密封性，耐火性両試験のいずれも改良型と従来型たんぱく泡が優れ，つぎにエアロウオーター PSL，ライトウオーター FC-3035 の順に低下した。この結果は小規模消火実験結果とよく一致している。一方，イソブタノールに対するライトウオーター FC-3035 とエアロウオーター PSL の再燃性能は，メタノールとアセトンの場合とは異なり，著しく向上していた。すなわち，メタノール，アセトンの密封性試験では両者はしばしば燃え広がったが，イソブタノールの密封性試験では，淡水海水いずれの使用の場合も着火しなかった。またイソブタノールの耐火性試験において，エアロウオーター PSL は，淡水，海水使用の場合，泡除去の際，周囲から泡が押し寄せ，燃料面を露出させることが出来ず，着火不可能であった。この現象は泡の厚みが十分な時のメタノール，アセトンのそれと同様であった。ライトウオーター FC-3035 の耐火性試験では，燃料面の露出は可能であった。その際，小規模消火実験時と同様に露出イソブタノール面上にフイルム状の薄膜が見られた。特に海水使用時には，着火直後の露出面に周囲から薄膜が押し寄せ，瞬時に消火した。その後この膜にトーチを数回近づけても再着火しなかった。改良型たんぱく泡 B，C のイソブタノールに対する再燃性試験では，淡水使用時のたんぱく泡Bと淡水，海水使用時のたんぱく泡Cのいずれも密封性，耐火性試験に合格していた。なお，Table. 1 に示すイソブタノールの小規模消火実験結果から，海水使用時のたんぱく泡Bのイソブタノールに対する再燃性能はよくなかったので，今回の規格検討用実験においてはたんぱく泡Bについては海水を使用しなかった。以上の結果，供試各泡のイソブタノールに対する再燃性能の間には，メタノール，アセトンに対する場合とは異なり，著しい差は見られなかった。この原因としては泡層の厚みの影響が考えられる。すなわち，この実験では消火後の泡供給時間が長かったため，十分な厚みの泡層（15cm以上）が形成されており，その結果，泡から還元された泡水溶液の冷却効果（Fig. 14 参照）と燃料面をおおう弗素系分子膜の厚みの増加により，燃料面上からの引火性蒸気の発生が大幅に抑制されたためと思われる。

3.2.2. 2重壁タンク消火実験(燃焼面積2.25㎡)

前報[1]においてはこの規模の厳しい消火実験は主としてメタノールに対して行ったが，今回はアセトン，イソブタノールに対して行うことにした。使用した泡消火剤は前述規格検討用消火実験において，消火性能が特に優れていたエアロウオーター PSL，ライトウオーター FC-3035，改良型たんぱく泡Cの3種類であった。泡水溶液の調製は，水道水のみを用いたプレミックス方式によった。

3.2.2.1. 各種泡の消火性能

消火実験結果をTable 3 に示す。小規模消火実験及び規格検討用消火実験の場合と同様に，泡消火剤の種類によって消火時間，ドレネジ時間に差が見られる。アセトンに対する消火は，エアロウオーター PSL が最も速く，続いてライトウオーター FC-3035，改良型たんぱく泡Cの順になった。イソブタノール火災に対して，泡水溶液貯蔵液量内で完全消火が可能であったのは，ライトウオーター FC-3035 とエアロウオーター PSL のみで，改良型たんぱく泡Cは火災をコントロールする迄には至らなかった。ライトウオーター FC-3035 とエアロウオーター PSL のうち，イソブタノールの消火が速かったのは前者で，メタノール，アセトンの消火が速かったのは後者であった。この傾向は，小規模消火実験および規格検討用消火実験時においても変らなかった。このように燃料の種類によって，泡消火剤の消火速度の順序が変る要因には，燃料の極性，燃料の水に対する溶解度，各種燃料に対する泡消火剤の消火特性などが考えられる。すなわち，極性が高く，親水性のメタノール，アセトンに対してはエアロウオーター PSL が適し，極性が低く，水に難溶性の点ではむしろ石油類に近いイソブタノールには

表面張力低下作用が著しいライトウオーター FC-3035 が適しているものと思われる。なお，中間型[1]の改良たんぱく泡B，Cは0.7，1.8m角規模のイソブタノール消火実験においては，非希釈型のライトウオーター FC-3035，エアロウオーター PSL に比べ，消火時間は遅かったが，完全消火は可能であった。したがって改良型たんぱく泡B，Cを用いたイソブタノールの2重壁タンク火災を完全消火させるためには，この実験に用いた泡水溶液供給率（10ℓ/min・m²）より，もっと高める必要があるものと思われる。つぎに，大・小規模消火実験における各泡消火剤の消火時間を，単位燃焼面積(m²)あたりで表した結果を Tables. 1～3 に示す。Tables. 1～3によれば，アセトンの消火において最も速かったエアロウオーター PSL とそれに続く速さのライトウオーター FC-3035 間の消火時間の開きは，0.7m角規模では1.5倍，1.8m角規模では，2.5倍，2重壁タンクでは3.8倍と消火条件がきびしくなるにつれ，その開きは増加した。一方，アセトンに対するエアロウオーター PSL とたんぱく泡C間の消火時間の開きは，1.8m角規模と2重壁タンクでは共に5倍と同じであった。また，イソブタノールの消火が最も速かったライトウオーターFC-3035とそれに続く速さのエアロウオーターPSL間の消火時間の開きは，0.7，1.8m角規模，2重壁タンクのいずれも1.2～1.3倍で，火災規模の拡大にともなう消火時間の差異は見られなかった。さらにイソブタノールに対するライトウオーターFC-3035と改良型たんぱく泡C間の消火時間の開きは，0.7，1.8m角規模ではそれぞれ8.0，4.5倍となり，改良型たんぱく泡Cに関しては，後者の大規模に比べ，前者の小規模消火実験のほうが消火困難であった。このように泡消火剤の種類，燃焼容器の形状，火災規模によって，同一燃料に対する泡消火剤間の消火時間に種々の差異が見られた。この原因は明らかではないが，泡水溶液供給率，各種燃料に対する供試泡の消火特性などが関係しているものと考えられる。(後述3.7.)

3.2.2.2. 各種泡の再燃性能

2重壁タンクの構造上，消火後の可燃性ガスの密封能力を調べるいわゆるトーチ試験は可能であるが，油面を露出し，着火する耐火性試験は不可能であった。Table. 3に各種泡の密封性試験の結果を示す。アセトン蒸気に対する非希釈型のエアロウオーター PSL とライトウオーター FC-3035 の密封能力は，小規模消火実験，規格検討用消火実験の場合と同様に，相変らずよくなかった。たとえば，消火の最も速かったエアロウオーター PSL の場合，消火後10分以上も泡を供給し続け，泡層の厚みは約70cmにもなるのにもかかわらず，泡供給停止2分後の密封性試験では急速かつ広範囲に燃え広がった。しかし，燃焼は一時的で全面火災にはならず，自然消火した。また，これに続く10，15分後の密封性試験では再着火しなかった。改良型たんぱく泡Cの場合は，貯蔵泡水溶液のすべてを消火に費やしたため，消火後の泡の積み増しが出来なかった。このため泡層中にアセトンが大量に含まれており，トーチによりただちに着火した。しかし，着火し，それが燃え広がる様相は，ゆるやかで，前述のエアロウオーター PSL やライトウオーター FC-3035 の様な急速な燃え広がりは示さなかった。イソブタノール蒸気に対するエアロウオーター PSL とライトウオーター FC-3035 の密封能力は良くなかった。この結果は，イソブタノールの0.7，1.8m角規模消火実験におけるこれらの泡消火剤の優れた密封性能とは異っている様に思われる。この原因としては，消火後の泡供給時間が2分間と短かかったため泡層の厚みの形成が十分でなく，したがって燃焼条件のきびしい2重壁タンク内のイソブタノール蒸気を確実に密封できなかったためによるものと思われる。

3.3. 各種燃料の燃焼性

火災規模の異なる各種燃焼容器におけるメタノール，アセトン，イソブタノールについて，予燃時間中の燃焼速度，最高側壁温度，最高燃料温度を調べた。その結果をTable. 4, Figs. 4～14に示す。Table. 4 によれば燃料の種類，燃焼容器の形状によって，燃焼速度，側壁温度，燃料温度に差が見られる。すなわち，最高側壁温度はアセトンよりイソブタノールの方がやや高いが，燃焼速度，燃料温度の点からみて，消火に影響する燃焼条件のきびしさは，アセトンが最高で，つぎにイソブタノール，メタノールの順に低下した。なお，Table. 4 中の側壁温度は側壁最高部，燃料温度は燃焼容器最下部の測定点における値で，いずれも各消火実験の平均値である。

3.4. 予燃時間と消火性能

燃料(アセトン)，泡消火剤，火災規模などがすべて同一で，予燃時間(5，10分）のみを変えて消火実験を行った。その結果をTable. 2(b)に示す。4例のうち一

Table 3 Details of the relative fire extinguishing ability, fuel vapor sealability, fuel burning rate,

Foam agent	Fuel used	Properties of the foam		Temperature of fuel		Temperature of foaming solution	Room temperature	Fuel burning rate	Extinguishing time	
		Expansion ratio	25% drainage time (min·sec)	before burning (°C)	after extinguishing (°C)	(°C)	(°C)	(mm/min)	total (min·sec)	per unit area (min·sec /m²)
Modified National Aero-Water PSL	Acetone	6.2	17′07″	19.0	35.5	21.1	21.6	3.2	4′22″	1′56″
Light Water FC-3035	〃	6.8	4′28″	16.0	42.6	21.0	19.6	3.6	16′24″	7′17″
New type protein-C	〃	5.6	2′03″	17.3	–	20.0	19.1	3.6	19′25″ self extinguishing	8′38″
〃	〃	6.0	1′55″	17.0	41.8	21.0	16.9	3.1	23′52″ self extinguishing	10′36″
Modified National Aero-Water PSL	Iso-butanol	6.2	17′27″	20.0	47.5	20.3	20.3	3.0	15′52″	7′03″
Light Water FC-3035	〃	6.8	4′18″	20.1	45.6	21.9	21.5	2.8	13′18″	5′55″
New type protein-C	〃	5.7	1′57″	19.0	–	22.0	19.8	2.7	No control after 21′40″ foam application	–
* 〃	〃	5.7	2′00″	17.1	–	23.0	19.0	2.9	No control after 21′30″ foam application	–

Light Water FC-3035: modified FC-600
Concentration of foam solution: 6 vol%
Preburn time: 30′00″ (*31′30″)
Foam nozzle: U.S. standard nozzle (Fed. Spec. 0-F-555C)
Tank: Double side wall-type, 1.5 m square and 1.45 m high
Fuel depth: 26.7 cm, amount : 600 ℓ

例を除いて，すべて予燃時間が長くなれば消火時間も長くなった。この結果は予想された通りであった。

3.5. 沈澱量

Table. 5 に変質試験後の供試泡原液の沈澱量を示す。自治省令第26号（第９条３項）では，変質試験後の許容沈澱量は 0.2vol％以下と規定されている。供試泡原液６種のうち，この許容量内に含まれるものは２種類のみであった。したがって，この点での泡消火剤の改質がもっと必要になるものと思われる。

3.6. 凝固点

低温時の泡消火剤の貯蔵性（凍結性）を調べるのに自治省令第26号第７条では流動点を用いているが，本実験では凝固点を用いることにした。なお，耐寒用，超耐寒用を除く通常製品については，この７条に定める流動点は－7.5℃とされている。**Table. 6** に供試泡原液の凝固温度を示す。各泡原液の凝固温度は－10°～－22℃とかなりの差が見られる。この結果，流動点，凝固点の測定方法上の相違を別にすれば，凝固温度から推定し，各供試泡消火剤の流動点はすべて －7.5℃以下になっているものと思われる。したがって，すべ

water content in fuel, and foaming properties of three foam agents. (Gentle application method)

Foam application period (min·sec)	Fuel vapor sealability test**				Water content of fuel at extinguishment (%)			
	2 min after foam application	10 min after foam application	15 min after foam application	Thickness of foam blanket (cm)	25 cm	20 cm	10 cm	*** 5 cm
15′00″	Flash at ignition over whole surface → self extinguishing after 20″	No ignition	No ignition	69.0	–	13.7	14.0	–
18′00″	Ignition → self extinguishing after 2′40″	Ignition → self extinguishing after 50″	Ignition → self extingushing after 2′25″	29.0	–	51.3	51.2	–
19′10″ foam application stopped	Ignition → full fire	–	–	–	–	57.2	53.1	–
23′10″ foam application stopped	Ignition → self extinguishing after 1′50″	Ignition → self extinguishing after 2′05″	Ignition → self extinguishing after 2′25″	62.0	–	51.9	51.0	51.7
17′52″	Flash at ignition over whole surface → self extinguishing	Fuel surface immediately exposed, no further test	–	–	12.6	13.3	95.7	–
15′18″	Ignition → self extinguishing after 4′15″	Ignition → self extinguishing after 30″	Ignition → self fire after about 13′	21.0	11.6	11.6	36.6	–
21′40″ foam application stopped	–	–	–	–	–	–	–	
21′30″ foam application stopped	–	–	–	–	–	–	–	

** : Sealability test: Lighted torch was applied over the foam blanket 2, 10, or 15 min after the foam application period.
***: Level of fuel sampling (distance from the tank bottom)

ての供試泡消火剤は，前記第7条の規定に関しては合格しているものと思われる。

3.7. 燃料の希釈と消火性能

3.7.1. 燃料中の水分量

Figs. 17～21 に1.8m角燃焼皿，2重壁タンクにおける消火開始後の各種燃料中の水分量変化を示す。**Figs. 17～21**によれば，燃料，泡消火剤，消火の難易によって，水分量変化はそれぞれ異なっていた。一連の大・小規模消火実験を通じて，消火が特に易しかった 1.8m角規模消火実験においては，泡消火剤の種類によって燃料層上下2ヶ所の水分量は著しく異なった。すなわち，下層より上層の水分量のほうが多かったのは燃料非希釈型のエアロウオーター **PSL** とライトウオーター **FC-3035** で，反対に下層の水分量の方が多かったのは中間型の改良たんぱく泡**C**であった。泡の流動性が良くかつ燃料に分散しにくい前者の場合，燃焼面上には水分を十分に含んだ泡層が急速に形成される。一方，泡が燃料中に分散しやすい後者の場合，消火開始の初期は，放出された泡は燃料下部まで急速に拡散するため，下層の水分量が多くなる。その結果，

Table 4 Details of burning conditions and characteristics of fuels

	Burning vessel (m×m×mH)	Fuel burning time (min)	Fuel burning rate* (mm/min)	Maximum temperature of side wall* (°C)	Fuel temperature (°C)*	
					Before burning	After burning
Methanol	Single side wall type 1.8×1.8×0.9	10	1.9	516	20.7	21.0
Acetone	〃	〃	3.6	643	18.5	26.5
Isobutanol	〃	〃	3.0	657	23.6	27.1
Methanol	Double side wall type 1.5×1.5×1.45	30	2.4	578	21.6	22.9
Acetone	〃	〃	3.4	706	16.6	27.3
Isobutanol	〃	〃	2.9	720	18.5	23.5

* The fuel burning rate, the maximum temperatures of side wall and fuel temperatures are the average of the results of the tests repeatedly conducted.

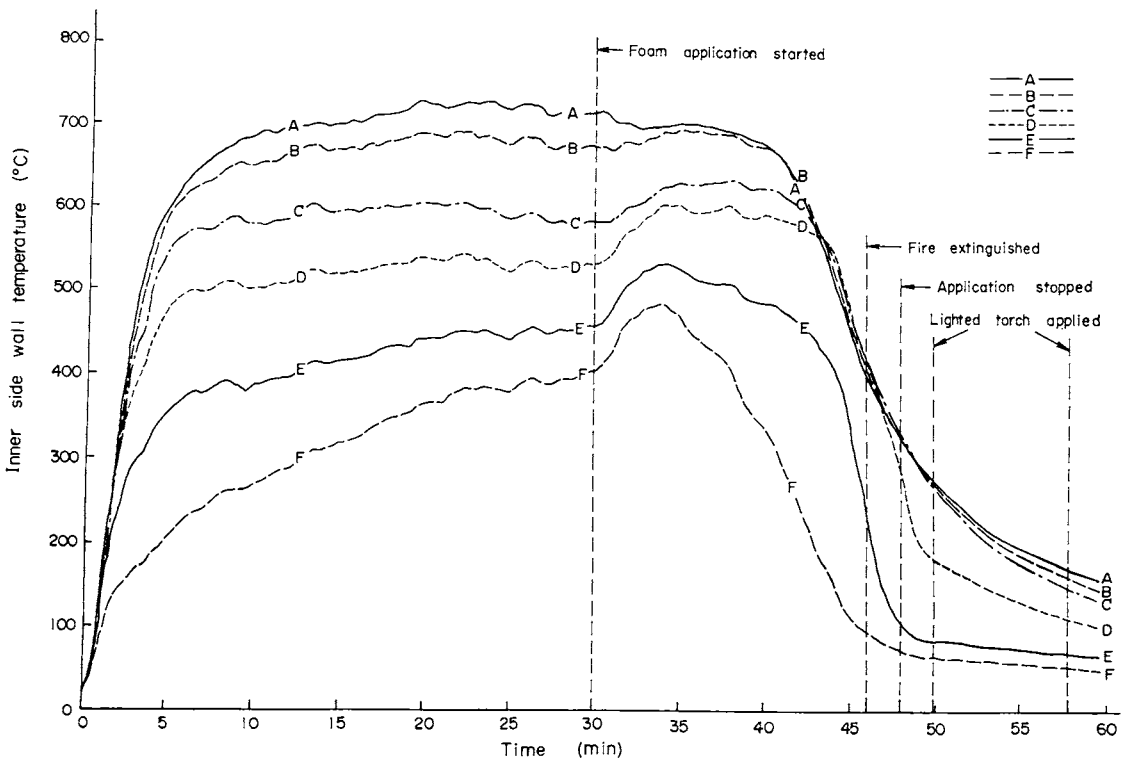


Fig. 4 Variation of inner side wall temperature with time at the alphabetical points indicated in Fig. 1

Foam agent: Modified National Aero-Water PSL, USA

Tank: Double side wall-type (size, 1.5 m × 1.5 m × 1.45 mH)

Fuel: 600 ℓ of isobutanol (26.7 cmH)

Solution mixing: Premix-Fresh water

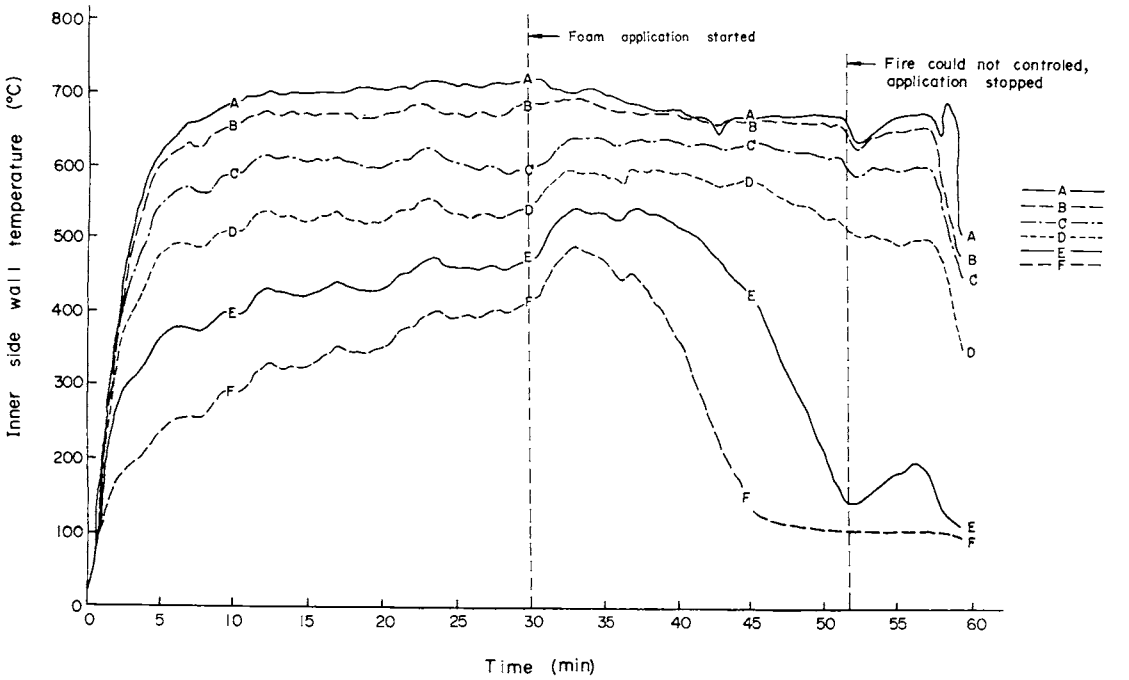


Fig. 5 Variation of inner side wall temperature with time at the alphabetical points indicated in Fig. 1

Foam agent: New type protein-C
Tank: Double side wall-type (size, 1.5 m X 1.5 m X 1.45 mH)
Fuel: 600 ℓ of isobutanol (26.7 cmH)
Solution mixing: Premix-Fresh water

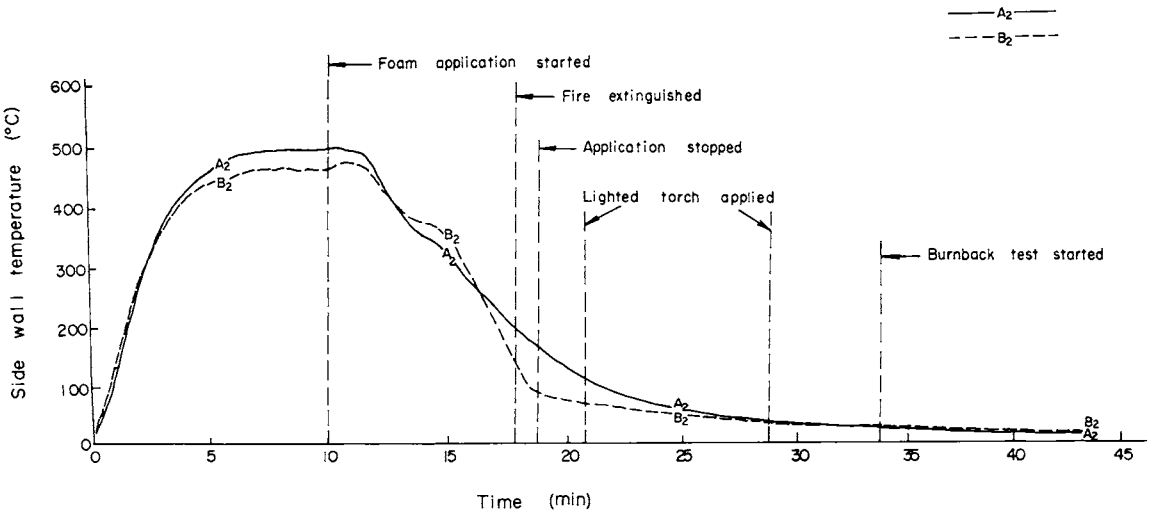


Fig. 6 Variation of side wall temperature with time at the points of A_2 and B_2 indicated in Fig. 2.

Foam agent: Conventional protein-D
Square pan: Single side wall-type (size, 2 m X 2 m X 0.4 mH)
Fuel: 600 ℓ of methanol (15 cmH)
Solution mixing: Line proportioning-Fresh water

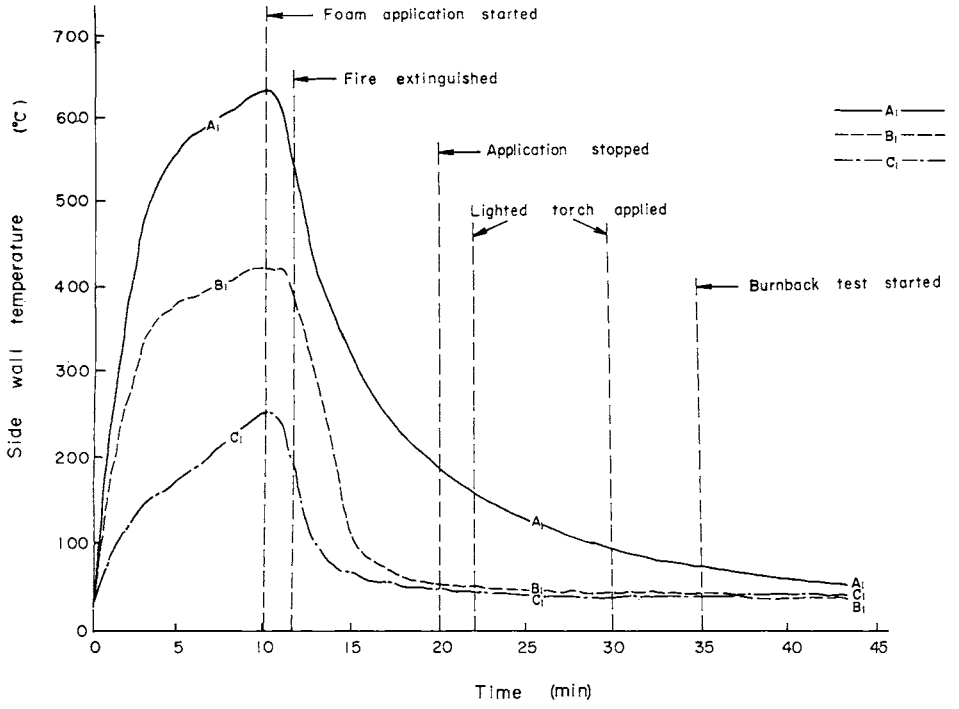


Fig. 7 Variation of side wall temperature with time at the alphabetical points indicated in Fig. 3

Foam agent: Modified National Aero-Water PSL, USA

Square pan: Single side wall-type (size, 1.8 m × 1.8 m × 0.9 mH)
Fuel: 480 ℓ of acetone (15 cmH)
Solution mixing: Premix-Fresh water

後者の泡層が形成される迄には時間がかかり，消火も前者より著しく遅くなったと考えられる。しかし，親水性のメタノール，アセトンにおいては，泡の注入開始初期に見られた燃料層上下の水分量の差は，前者，後者ともに燃料層のかくはんと対流が進むにつれ，減少した。一方，消火が困難であった2重壁タンク消火実験では，**Fig. 1** に示すような泡供給時の大きな泡落差により，泡消火剤の種類にかかわらず，消火初期には放出された泡はタンク下部まですでに達しているものと考えられる。このため消火初期には，すべての泡の燃料中の水分量はタンク下層の方が多くなっている(**Fig. 17**,**Fig. 18**参照)。**Fig.17**, **Fig.18**によれば，親水性のアセトンと水に難溶性のイソブタノールの上下2ヶ所の水分量は，アセトンの場合，1.8 m角規模消火実験時と同様に消火の進行につれてその差は減少し，消火終了時には認められなくなった。一方，イソブタノールの場合，消火が長引き泡水溶液量が増加するのにしたがい，燃料層は上下2層に分離するようになった。すなわち，タンク上部には水飽和状態のイソブタノール相，下部にはイソブタノール飽和水相が形成された。なお，各温度における水－イソブタノールの飽和に関しては，**Fig. 16**の水－イソブタノールの溶解度曲線で示されている。**Fig. 16**によれば25℃，90℃におけるイソブタノールに対する水の溶解度は，それぞれ12.6，20.8wt/vol%であった。以上水分量の変化から，水溶性液体火災の消火で重要なことは，燃料表層中に消火に必要な有効成分の濃度をできるだけ速く，効率的に増大させることであり，それによって燃焼面上の泡膜形成を促進させることである。そのためには，保水性が良く，燃料中への分散性の悪い泡消火剤の開発を図るとともに，保水性が良く，発泡性能の最適な泡ノズル，泡放出口（フオーム・アプリケーター）などの泡放出方法自体の改良が必要になるものと思われる。なお，燃料表層中の有効成分の濃度に関する例として，メタノールに対する0.7，2.13 m角の大・小規模消火実験があげられる。この実験条件は，泡消火剤（改良

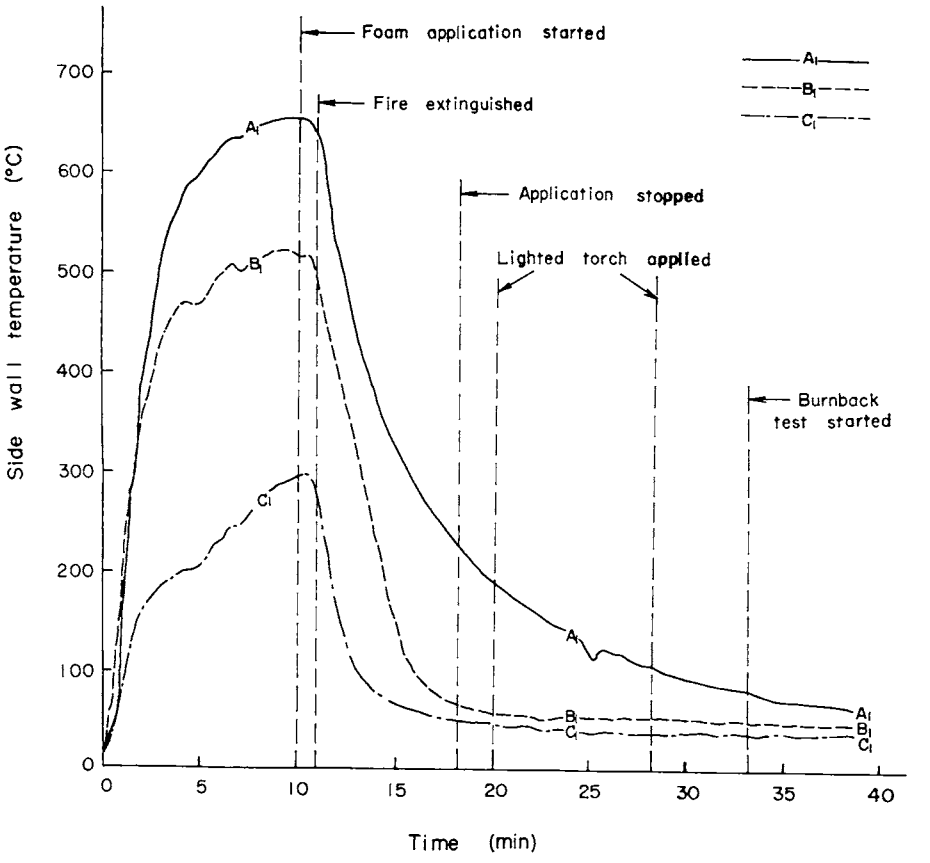


Fig. 8 Variation of side wall temperature with time at the alphabetical points indicated in Fig. 3

Foam agent: Light Water FC-3035

Square pan: Single side wall-type (size, 1.8 m × 1.8 m × 0.9 mH)
Fuel: 480 ℓ of isobutanol (15 cmH)
Solution mixing: Premix-Sea water

型たんぱく泡C)，泡水溶液供給率(5ℓ/min・m²)，泡放出方法がすべて同一で，燃焼容器の形状が異なっていた。しかし，**Table.1**，**Table. 2(a)** で示される単位面積当りの消火時間は2.13m角規模消火実験の方が著しく短縮されていた。このように 0.7，2.13m角の大・小規模消火実験において，単位面積当りの消火時間に著しい差が見られた主因は，燃料表層中の有効成分の濃度にあるものと思われる。つまり，メタノール表層における単位時間，単位面積当りの消火に関する有効成分濃度（mol/min・m²）は，小規模実験時に比べ，大規模実験時の方が著しく高くなっているものと推定される。したがって，小規模消火実験時における改良型たんぱく泡Cの単位面積当りの消火時間を，2.13m角消火実験時のそれに近づけるためにはもっと泡水溶液供給率を増加させる必要があると思われる。また，一連の大・小規模消火実験を通じて，2重壁タンクの消火が最も困難であったが，その主因には，各燃料表層中の消火に必要な有効成分が泡膜形成濃度に達するまでに時間がかかったこと，これに加えてきびしい燃焼条件のため泡の可燃性蒸気密封能力が低下し，同時に泡の燃料による大量汚染が生じたことなどが挙げられる。

3.7.2. 引火温度の影響

Fig. 15に各種燃料の水溶液濃度と引火点の関係を示す。この結果から明らかなように，水溶性可燃性液体は水により希釈されてゆくにつれ引火温度は上昇する。もはや引火しなくなる水溶液濃度の下限値(実測値)は，メタノールでは 2.9vol%(引火点62.0℃)，アセトン

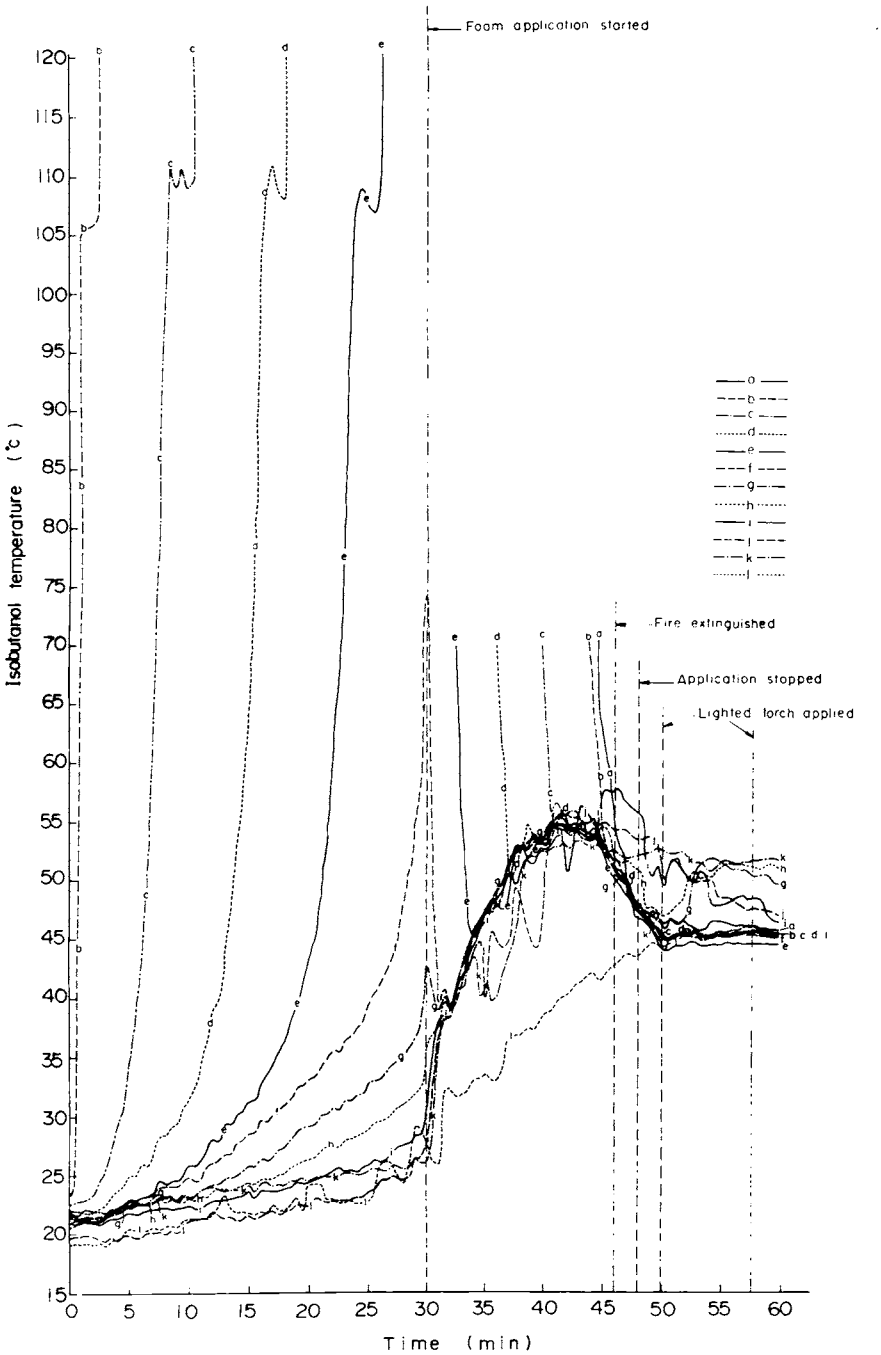


Fig. 9 Isobutanol temperature variation with time at the alphabetical points indicated in Fig. 1

Foam agent: Modified National Aero-Water PSL, USA
Tank: Double side wall-type (size, 1.5 m × 1.5 m × 1.45 mH)
Fuel: 600 ℓ of isobutanol (26.7 cmH)
Solution mixing: Premix-Fresh water

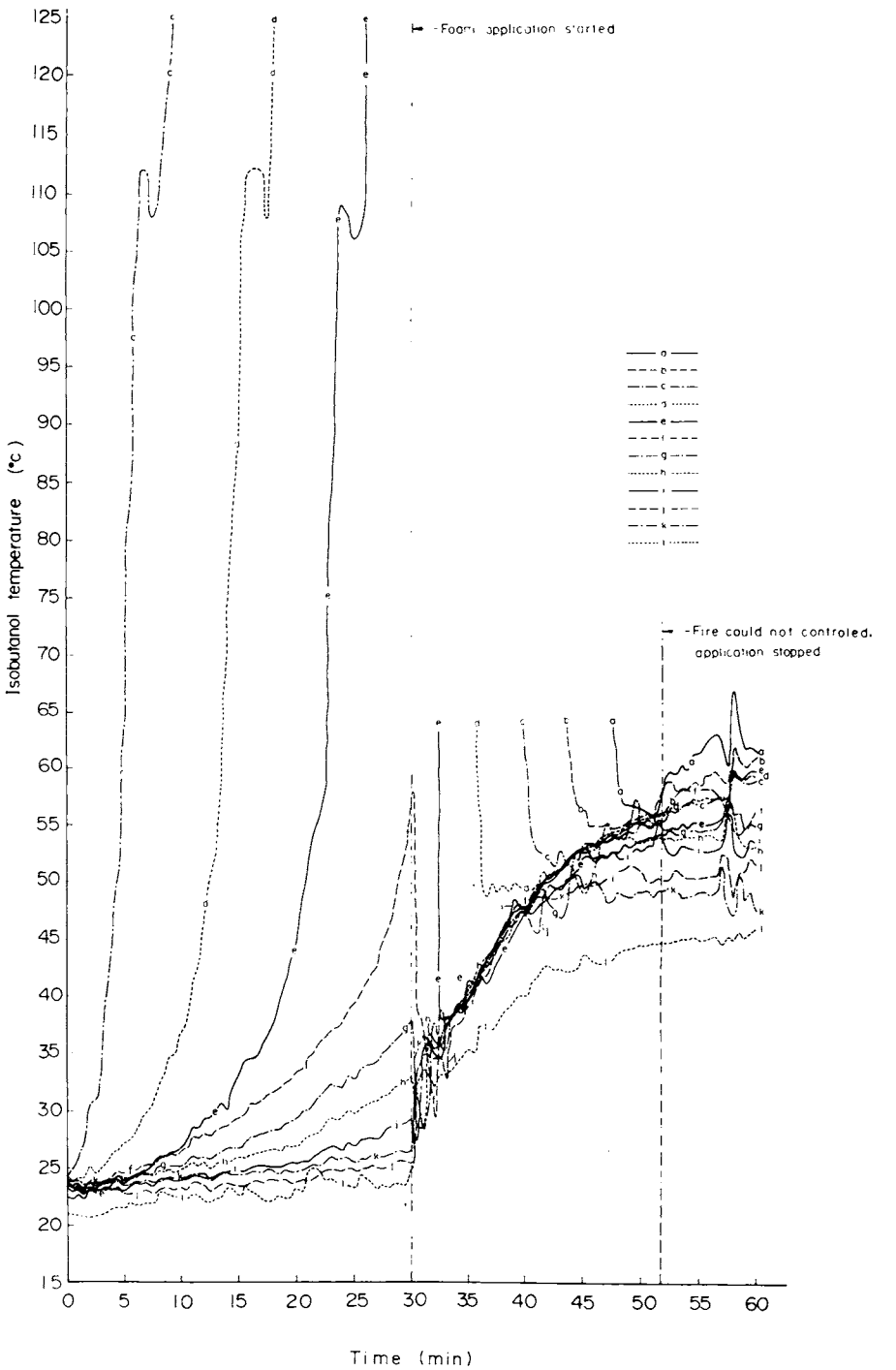


Fig. 10 Isobutanol temperature variation with time at the alphabetical points indicated in Fig. 1

Foam agent: New type protein C

Tank: Double side wall-type (size, 1.5 m × 1.5 m × 1.45 mH)

Fuel: 600 ℓ of isobutanol (26.7 cmH)

Solution mixing: Premix-Fresh water

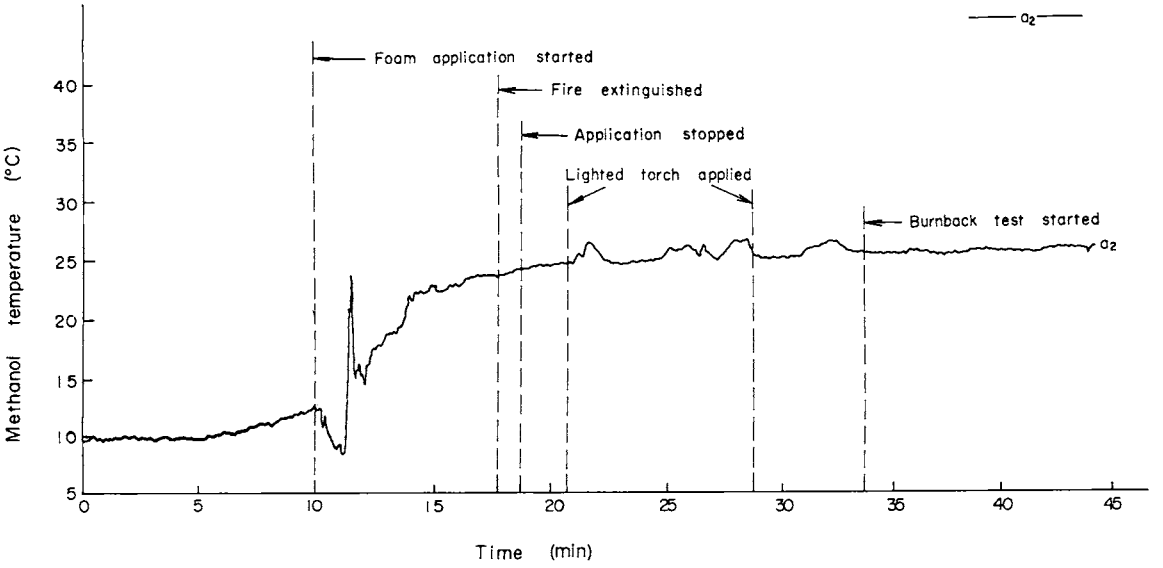


Fig. 11 Methanol temperature variation with time at the point of a_2 indicated in Fig. 2

Foam agent: Conventional protein-D

Square pan: Single side wall-type (size, 2 m × 2 m × 0.4 mH)
Fuel: 600 ℓ of methanol (15 cmH)
Solution mixing: Line proportioning-Fresh water

では 0.5vol%(51.5℃) であった。しかし，水に難溶性のイソブタノールについてはこの下限値は認められなかった。したがって無水のイソブタノールに比べ引火性は減少するが，消火中はたえず引火性は認められることになる。**Fig. 15**からその引火温度は30～40℃にあるものと推定される。また**Fig.15**から無水の場合では，メタノール，アセトンに比べイソブタノールの方が著しく引火危険性は少ないことがわかる。しかし，消火の進行にともない燃料が希釈されることにより，反対にイソブタノールのほうがメタノール，アセトンよりも引火危険性は大きくなり，その結果消火も困難になって行くものと思われる。つぎにイソブタノールの大規模火災の消火の困難性を示す一例としては，改良型たんぱく泡C使用時の 1.8m角燃焼皿と2重壁タンクの消火実験が挙げられる。すなわち，前者の実験ではイソブタノールの消火は比較的容易であった。一方，後者においては火災をコントロールする迄には至らず，消火不能であった。

3.8. 燃料温度と消火性能

Figs. 9～14に示されている通り，予燃時間の増加にともない炎からの放射や側壁からの熱伝導によって，予燃焼中の燃料温度は上昇している。しかし，予燃時間中の燃料温度の上昇率に比べ，消火初期から中期にかけてのそれは著しく高かった。[1] しかもその温度は燃料全体にわたって急速に均一化し，一定値に達している。目視と写真による消火時の観察結果によれば，消火開始後の液温が急速に一定値に達する時間は火災のコントロール時間（抑制時間）にほぼ対応していた。**Table. 7** に消火開始から火災をコントロールする迄の各泡消火剤の燃料温度上昇値とその上昇率を示す。**Figs.9～14**から明らかなように，消火中の液温の変化は，目視によらずに燃焼面上の泡の展開，消火のコントロール状態を知る上で重要な手がかりになることがわかった。[1] 特に**Table. 7**に示す消火開始から火災をコントロールする迄の燃料温度上昇値とその上昇率は，各種燃料に対する泡消火剤の消火性能の優劣を示しているものと思われる。なお，**Table. 7** 中のコントロール時間は，消火開始時の側壁温度をT_1，消火終了時の側壁温度をT_2とし，$T=T_1-0.8(T_1-T_2)$になる時の時間で表わした。この時の側壁温度測定点は燃料面の近く，すなわち，**Fig. 1**の**F**，**Fig. 2**のB_2，**Fig. 3**のC_1である。**Fig.9**に示される消火開始後のイソブタノール温度の変化から，消火が長びくにしたがい，分離したイソブタノールの上下2層間に温度差が認められるようになった。

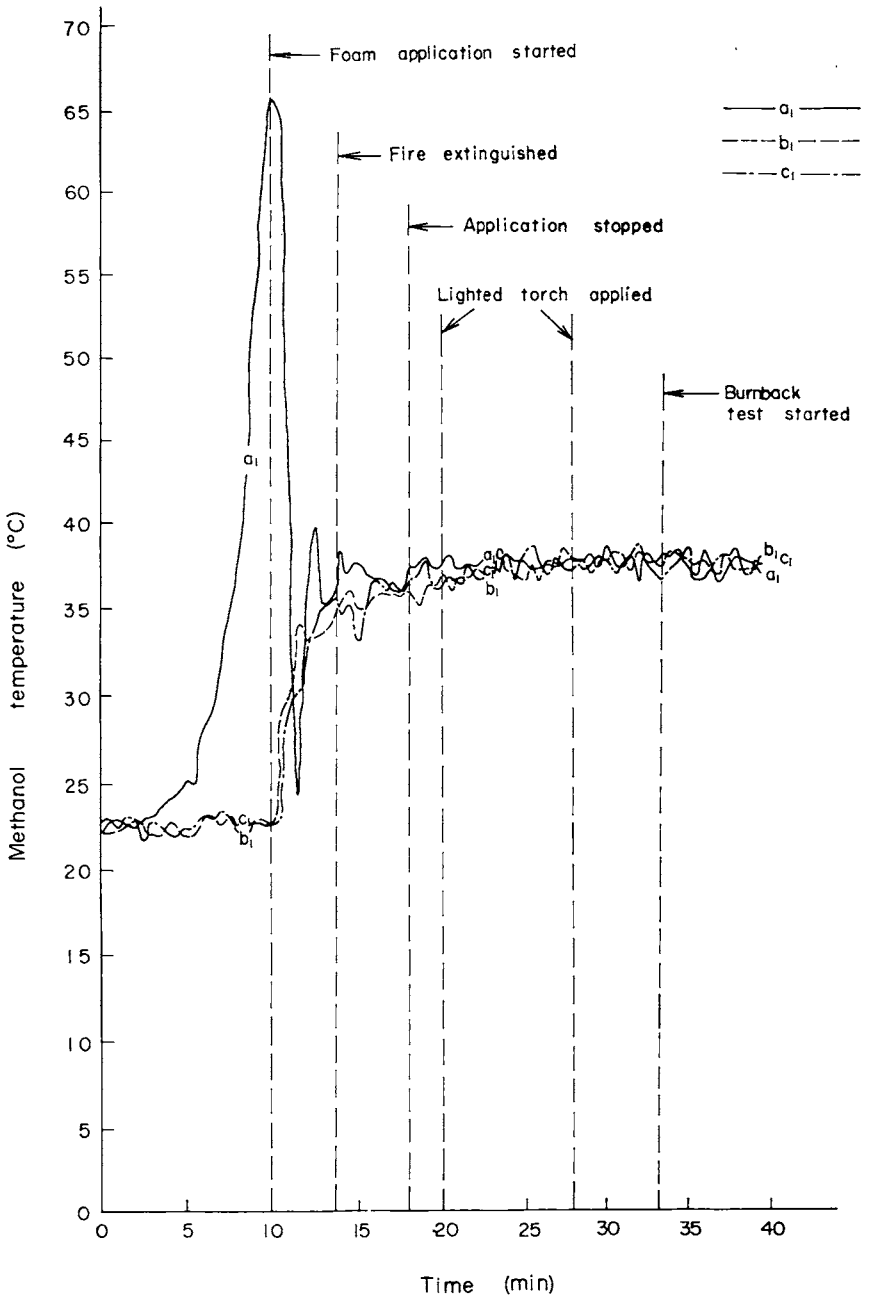


Fig. 12 Methanol temperature variation with time at the alphabetical points indicated in Fig. 3

Foam agent: Light Water FC-3035

Square pan: Single side wall-typed (size, 1.8 m × 1.8 m × 0.9 mH)
Fuel: 480 ℓ of methanol (15 cmH)
Solution mixing: Premix-Fresh water

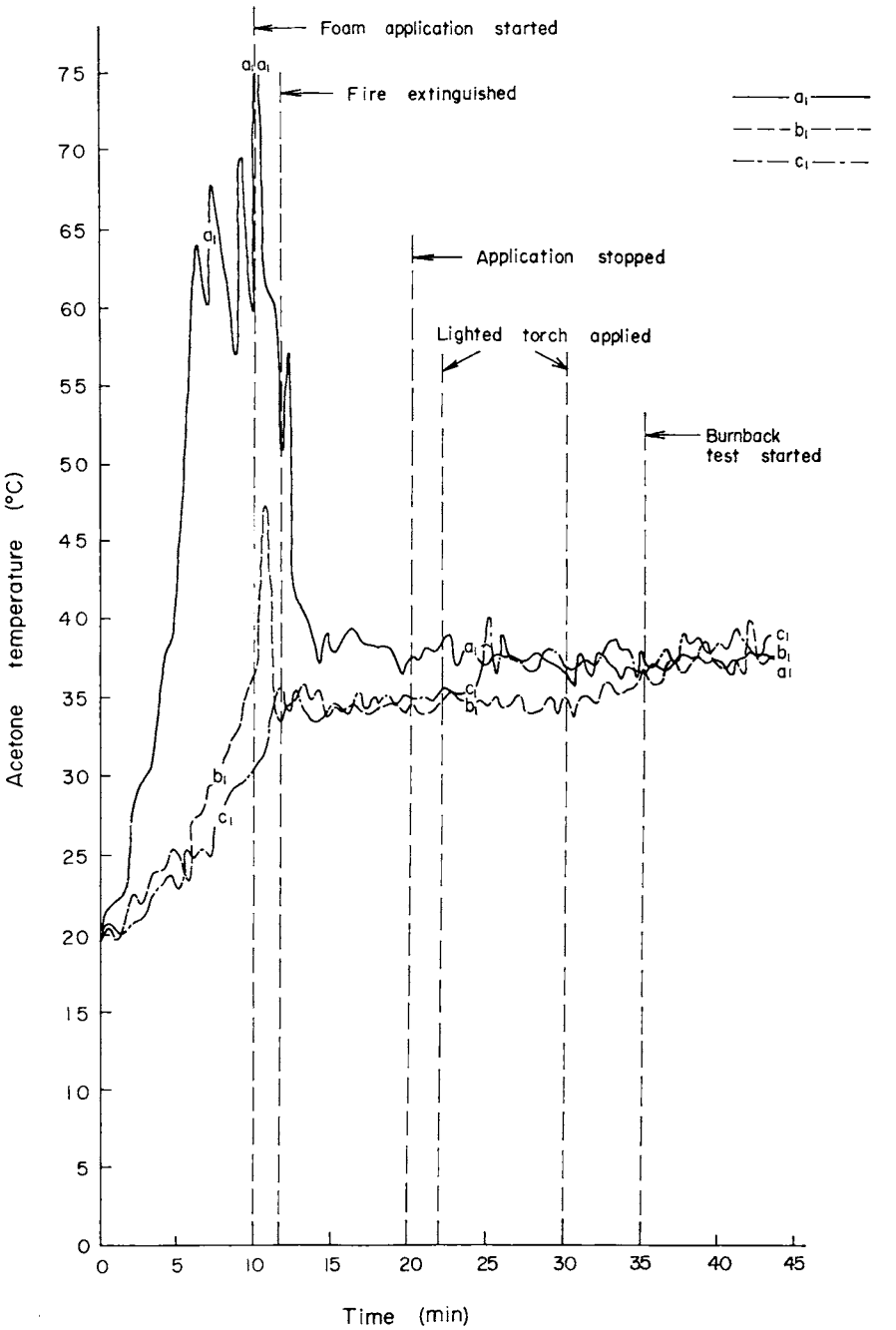


Fig. 13 Acetone temperature variation with time at the alphabetical points indicated in Fig.3

Foam agent: Modified National Aero-Water PSL, USA

Square pan: Single side wall-type (size, 1.8 m × 1.8 m × 0.9 mH)

Fuel: 480 ℓ of acetone (15 cmH)

Solution mixing: Premix-Fresh water

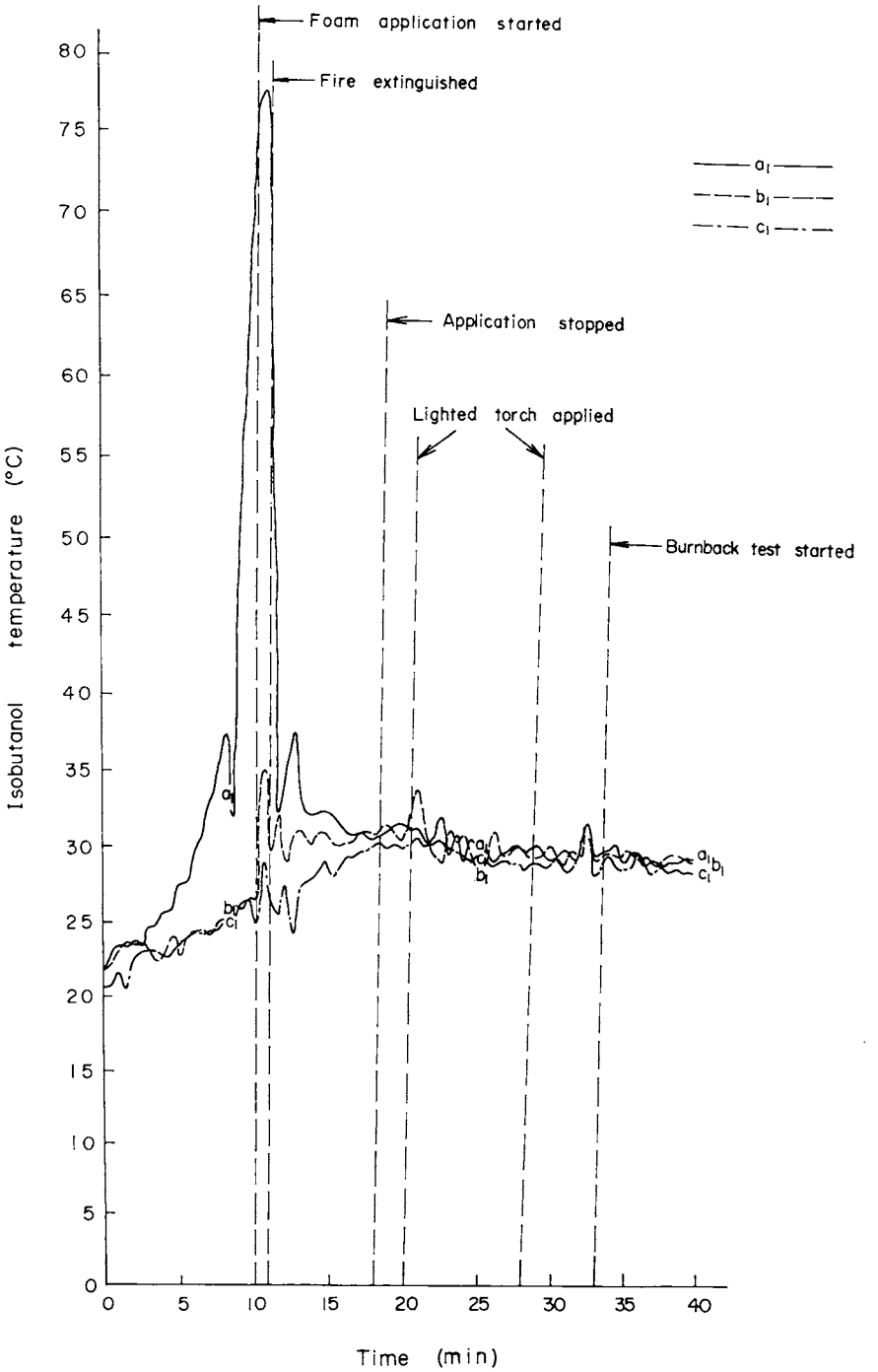


Fig. 14 Isobutanol temperature variation with time at the alphabetical points indicated in Fig. 3

Foam agent: Light Water FC-3035

Square pan: Single side wall-type (size, 1.8 m × 1.8 m × 0.9 mH)
Fuel: 480 ℓ of isobutanol (15 cmH)
Solution mixing: Premix-Sea water

すなわち，消火終了時には，上層（イソブタノール相）の温度は下層（水相）のそれよりも低くなる傾向が見られた。この現象は供給された泡水溶液の冷却効果によるものと思われる。また**Table. 2(a), Table. 7, Fig. 11**に示される通り，燃料温度，室温，消火開始から火災をコントロールする迄の温度上昇値とその上昇率のいずれも低かった冬期中の2m角規模メタノール消火実験と，これらの値がいずれも高かった夏期中の1.95, 2.13m角メタノール消火実験結果から，実験時期以外は火災規模，泡消火剤，燃料などすべて同一条件の場合，燃焼条件のきびしい夏期の方が著しく消火は困難になることが確かめられた。

Table 5 Sediment of foam concentrates after aging

Foam agent	Amount of sediment (% by volume)
Modified National Aero-Water PSL	0
Light Water FC-3035	1.0
Synthetic-A	0.2
New type protein-B	0.7
New type protein-C	0.6
Conventional protein-D	0.6

Aging procedure: A foam concentrate sample was maintained at 65°C for 216 hours, then cooled at −18°C for 24 hours.

Table 6 Freezing point of foam concentrates

Foam agent	Freezing point (°C)
Modified National Aero-Water PSL	−10
Light Water FC-3035	−13.5
Synthetic-A	<−22
New type protein-B	−18
New type protein-C	−20
Conventional protein-D	−19

Freezing point: Measured by using 2 C-C thermocouples, one for foam concentrate the other for ice water as a reference material.

Table 7 Fuel temperature increase up to fire control during foam application

Foam agent	Fuel	Burning vessel (m×m×mH)	Pre-burn time (min)	Fire control time (1)*** (min·sec)	Extin-guishing time (min·sec)	Fuel temperature (°C) Before burn-ing	At the end of pre-burn (2)	At fire control (3)	Tempera-ture difference (3)-(2) (°C)	Average temperature increase rate up to fire control (3)-(2)/(1) °C/min
Conventional* protein-D	Methanol	Single side wall-type 2×2×0.4	10′	6′55″	7′45″	9.6	12.5	23.5	11.0	1.6
Light Water FC-3035	〃	Single side wall-type 2.13×2.13×0.9	〃	5′33″	7′11″	16.0	16.0	31.8	15.8	2.8
New type protein-C	〃	〃	〃	8′12″	15′32″	17.7	17.7	36.7	19.0	2.3
Modified National Aero-Water PSL	〃	Single side wall-type 1.95×1.95×0.9	〃	4′04″	7′05″	19.1	19.5	29.9	10.4	2.6
Light Water FC-3035	〃	〃	〃	5′10″	7′35″	19.8	20.4	35.1	14.7	2.8
New type protein-C	〃	〃	〃	5′39″	10′35″	20.0	20.0	35.3	15.3	2.7
Light Water FC-3035	Acetone	〃	〃	10′55″	13′06″	15.2	29.8	49.7	19.9	1.8
New type protein-C	〃	〃	〃	10′52″	11′47″	15.6	31.2	49.3	18.1	1.7
Modified National Aero-Water PSL	Methanol	Single side wall-type 1.80×1.80×0.9	〃	1′28″	1′40″	24.7	25.4	29.3	3.9	2.7
Light Water FC-3035	〃	〃	〃	3′14″	3′40″	22.5	22.6	35.3	12.7	3.9
New type protein-C	〃	〃	〃	5′00″	5′34″	24.2	24.8	38.6	13.8	2.8
Conventional* protein-D	〃	〃	〃	7′01″	8′44″	17.1	17.9	32.4	14.5	2.1
Modified National Aero-Water PSL	Acetone	〃	〃	1′25″	1′39″	20.0	30.4	35.4	5.0	3.5
Light Water FC-3035	〃	〃	〃	3′31″	3′50″	18.1	27.5	36.5	9.0	2.6
New type protein-C	〃	〃	〃	4′35″	5′44″	22.9	28.7	37.4	8.7	1.9
Conventional*,** protein-D	〃	〃	〃	10′35″	12′01″	14.3	21.9	41.3	19.4	1.8
Light Water FC-3035	Iso-butanol	〃 〃	〃	1′03″	1′10″	30.5	33.5	36.1	2.6	2.5
New type protein-C	〃	〃	〃	4′07″	4′31″	29.5	31.7	39.4	7.7	1.9
Modified National Aero-water PSL	Acetone	Double side wall-type 1.5×1.5×1.45	30′	1′58″	4′22″	20.0	31.3	37.2	5.9	3.0
Light Water FC-3035	〃	〃	〃	8′41″	16′24″	15.7	30.2	49.8	19.6	2.3
New type protein-C	〃	〃	〃	10′59″	23′52″	15.3	26.2	46.9	20.7	1.9
Modified National Aero-Water PSL	Iso-butanol	〃	〃	7′52″	15′52″	21.3	27.6	55.0	27.4	3.5
Light Water FC-3035	〃	〃	〃	7′31″	13′18″	21.9	26.2	55.0	28.8	3.8

Solution mixing: premix-Fresh water (* : Line proportioning – Fresh water)
Concentration of foam solution: 6.0 vol% (** : 6.1 vol%)

*** : The time required for the temperature at the lowest point on the side wall to decrease to $T_1 - 0.8\ (T_1 - T_2)$ where T_1 is the temperature at the start of foam apllication, and T_2 the temperature at the fire extinction. The lowest point corresponds to F, B_2, and C_1 marked respectively in Figs. 1, 2, and 3.

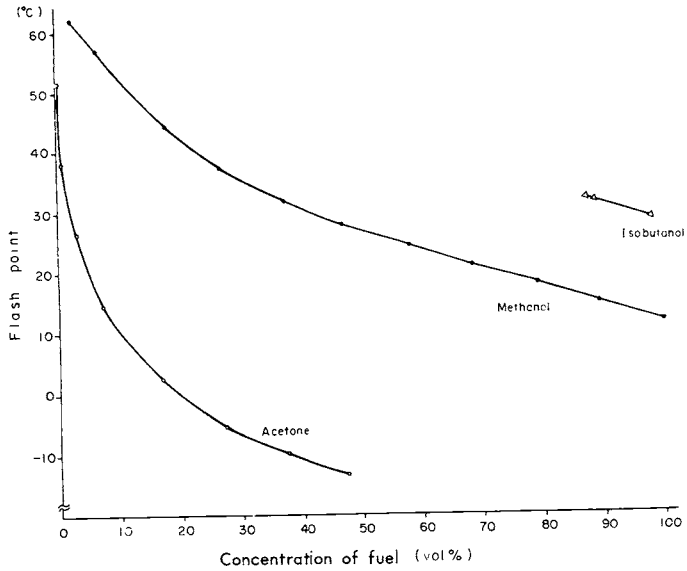


Fig. 15 Variation of flash points of aqueous fuel solutions with fuel concentration

Flash point: measured by the tag closed cup flash point tester

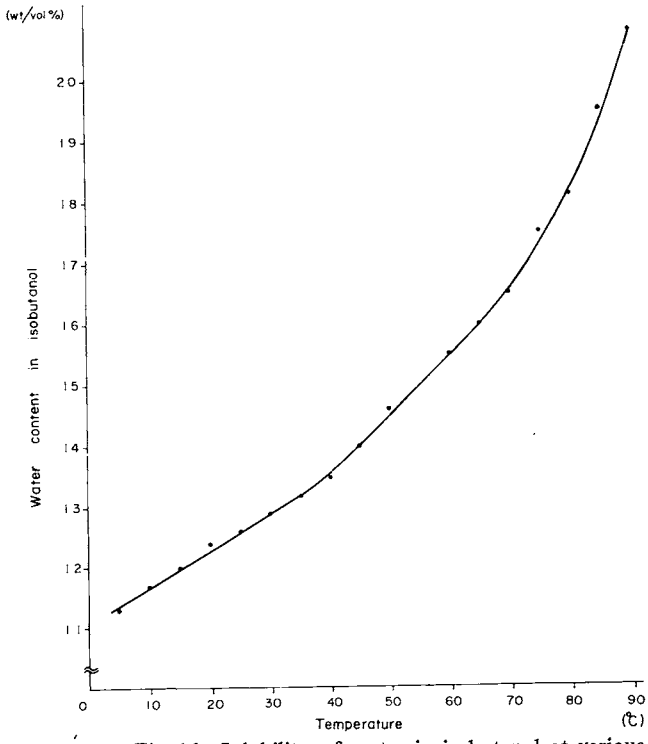


Fig. 16 Solubility of water in isobutanol at various temperatures. The value is expressed in grams of water in saturated solutions.

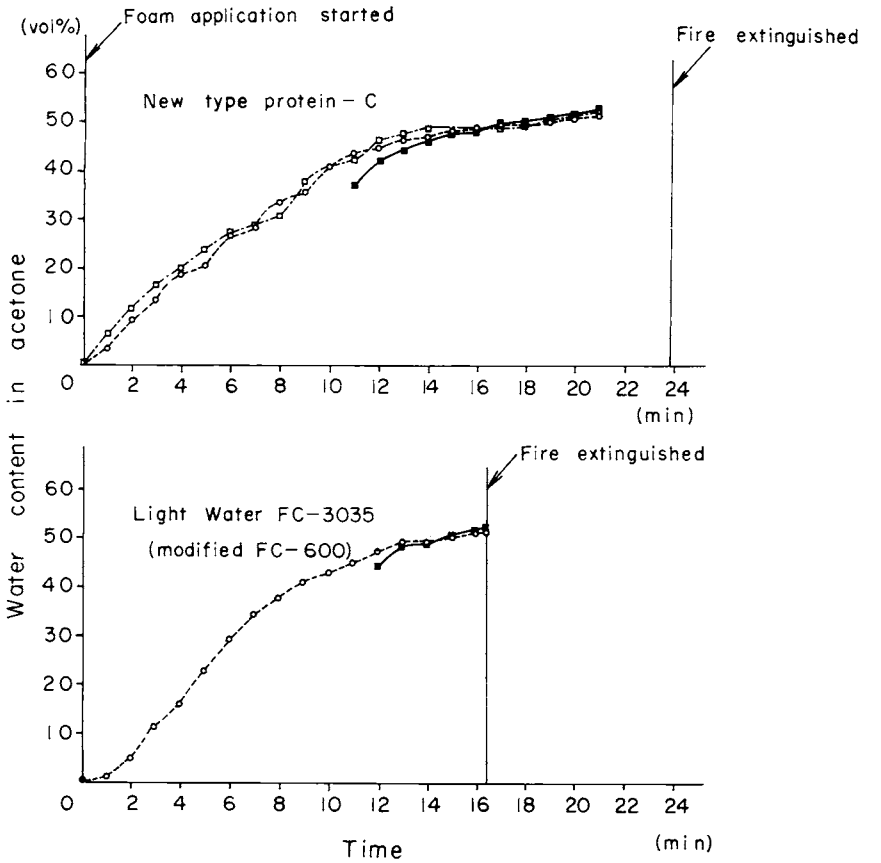


Fig. 17 Variation of water content in acetone with time after foam application

- ■ 20 cm above the bottom of the tank as shown in Fig. 1
- ○ 10 cm above the bottom of the tank as shown in Fig. 1
- □ 5 cm above the bottom of the tank as shown in Fig. 1

Tank: Double side wall-type (size, 1.5 m × 1.5 m × 1.45 mH)

Fuel depth: 26.7 cm (600 ℓ)

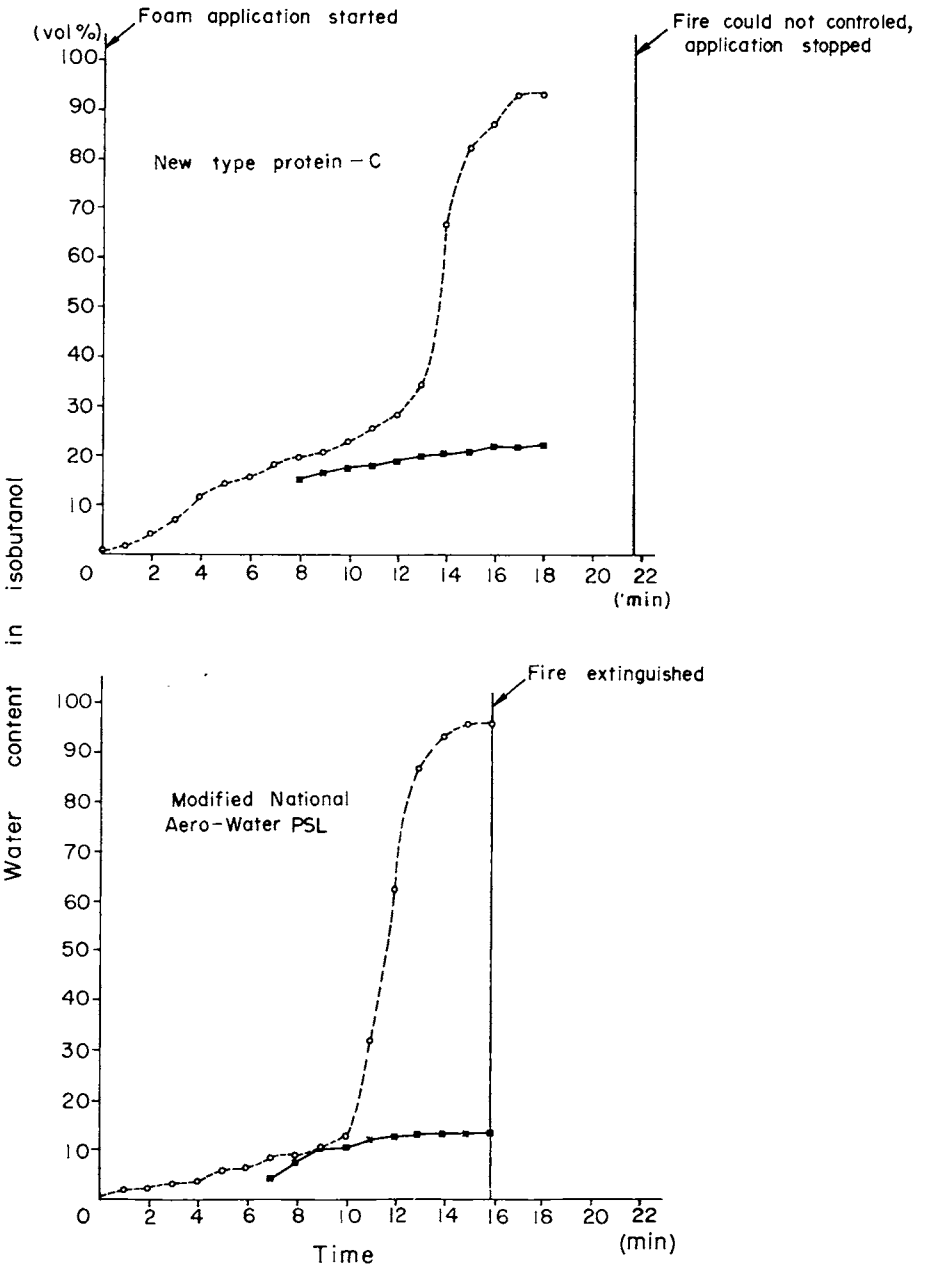


Fig. 18 Variation of water content in isobutanol with time after foam application

- ▪ 20 cm above the bottom of the tank as shown in Fig. 1
- ○ 10 cm above the bottom of the tank as shown in Fig. 1

Tank: Double side water-type (size, 1.5 m × 1.5 m × 1.45 mH)

Fuel depth: 26.7 cm (600 ℓ)

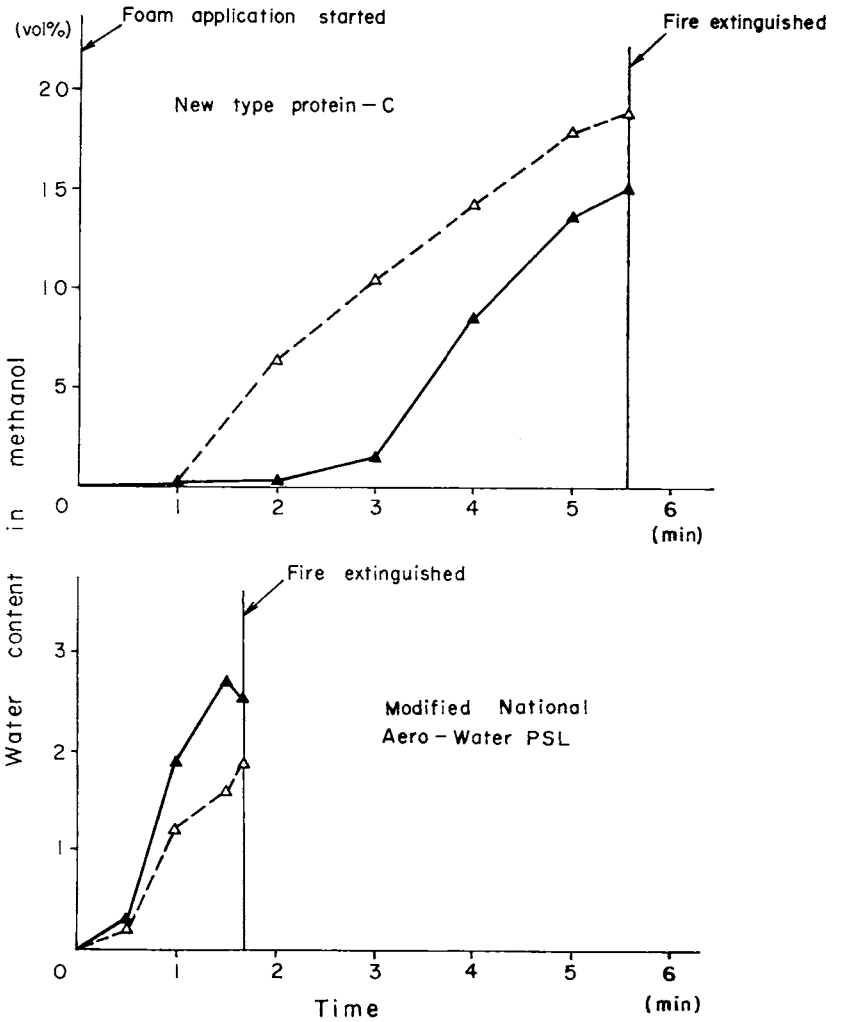


Fig. 19 Variation of water content in methanol with time after foam application

▲ 11.5 cm above the bottom of the square pan as shown in Fig. 3

△ 1.5 cm above the bottom of the square pan as shown in Fig. 3

Square pan: size, 1.8 m × 1.8 m × 0.9 mH

Fuel depth: 15 cm (480 ℓ)

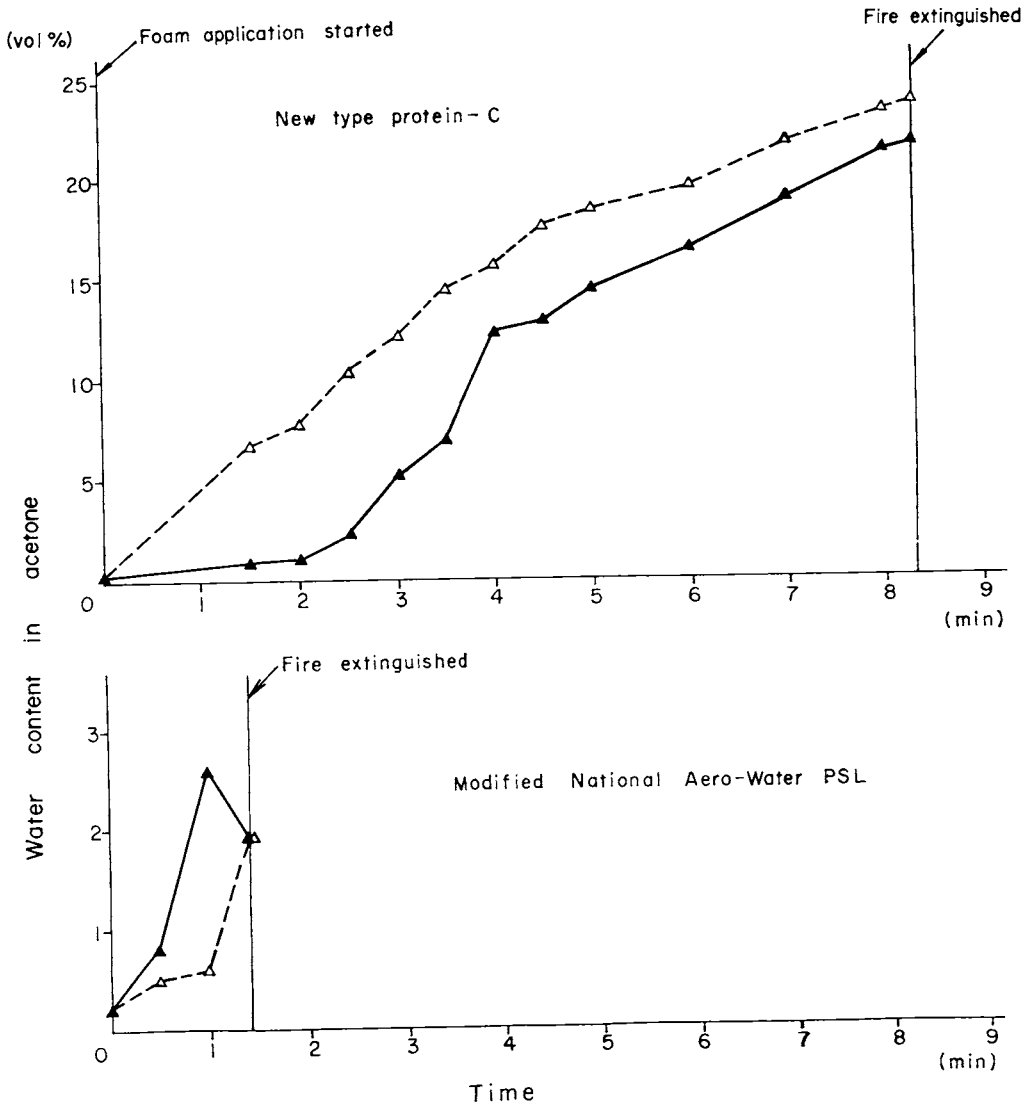


Fig. 20 Variation of water content in acetone with time after foam application

▲ 11.5 cm above the bottom of the square pan as shown in Fig. 3

△ 1.5 cm above the bottom of the square pan as shown in Fig. 3

Square pan: size, 1.8 m × 1.8 m × 0.9 mH
Fuel depth: 15 cm (480 ℓ)

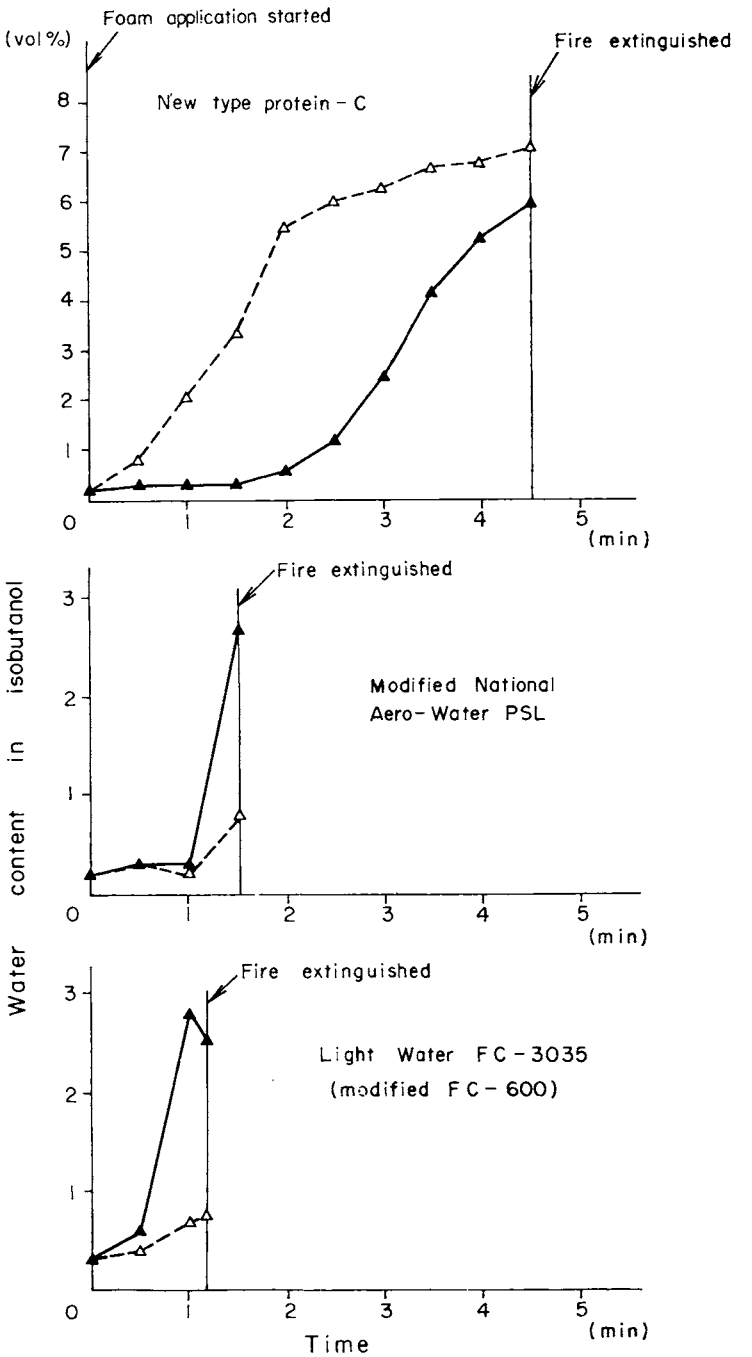


Fig. 21 Variation of water content in isobutanol with time after foam application

▲ 11.5 cm above the bottom of the square pan as shown in Fig. 3

△ 1.5 cm above the bottom of the square pan as shown in Fig. 3

Square pan: size, 1.8 m × 1.8 m × 0.9 mH
Fuel depth: 15 cm (480 ℓ)

4. 結　論

以上，述べてきたことを要約すると，次のようになる。

(1) 前報[1]でも述べたように，親水性極性液体のメタノール，アセトンに対する消火効果は，主として燃料の希釈と表面張力低下作用に負うものと考えられる。一方，疎水性極性液体のブタノール（N，イソ）に対する消火効果は，表面張力低下作用に負うものと考えられる。その結果，供試泡消火剤は非希釈型（表面張力低下型）のエアロウオーター PSL，ライトウオーター FC-3035，同FC-3031（石油類用），中間型の合成泡A，新規のたんぱく泡改良品 B，C，希釈型のたんぱく泡従来品Dの三つのタイプに分類される。

(2) 長時間燃焼を続けている大規模タンク火災を想定し試作した 1.5m角2重壁タンクにおける消火実験の結果から，プレミックス型供試泡消火剤中タンク火災に使用可能と思われる泡消火剤として，メタノール，アセトンに対してはエアロウオーター PSL，ライトウオーター FC-3035，改良型たんぱく泡B，Cである。そのうち，前2者については，消火後の再燃防止に特に注意を要する。イソブタノールに対してはライトウオーター FC-3035 とエアロウオーター PSL のみである。そのうち，消火，再燃性能のいずれも前者が優れていた。なお，従来の非プレミックス型金属石けん－たんぱく泡Dについては，水と泡消火剤原液との混合時間いわゆるトランジットタイム（Transit time）が2～3分以内であれば，メタノール，アセトンのタンク火災に使用できる可能性はあるが，イソブタノールのタンク火災には適さないものと思われる。

(3) 今回の実験では，逆U字形アプリケーターを用いることによって燃料による泡の汚染を極力防止した。このため，消防隊が高所放水車などを使って外部から燃焼油面に直接泡放射を行ういわゆる実戦的な消火法に対する供試泡の消火性能に関しては未確認である。しかし，燃料による泡の汚染が比較的著しかったと考えられる2重壁タンクの消火実験結果から，イソブタノールに対してこのような実戦的消火法を行う場合には，非希釈型のエアロウオーター PSL とライトウオーター FC-3035 の使用が適しているものと思われる。

(4) イソブタノール火災に対して石油類火災用ライトウオーター FC-3031 による消火は速かったが，耐再燃性は劣っていた。この結果，この泡はイソブタノールの流出火災には適していると思われるが，消火後の再燃防止を重視するタンク火災には適さないものと思われる。

(5) 前報[1]で行った消火実験も含めた一連の大・小規模消火実験の結果から，水溶性液体の種類によって，供試泡の消火，耐再燃性に優劣が認められた。すなわち，淡水，海水使用時においてメタノール，アセトンに対して最も消火が速かったのはエアロウオーター，PSL で，つぎにライトウオーター FC-3035，改良型たんぱく泡 B，C，最後にラインプロポーション供給方式の従来型たんぱく泡Dの順に遅くなった。一方，イソブタノールに対して最も消火が速かったのはライトウオーター FC-3035 で，つぎにエアロウオーター PSL，改良型たんぱく泡 B，C の順に遅くなった。またメタノール，アセトンに対する再燃防止能力において最も優れていたのは，改良型たんぱく泡 B，C とラインプロポーション供給方式の従来型たんぱく泡Dで，つぎにエアロウオーター PSL，ライトウオーター FC-3035 の順に悪くなった。一方，イソブタノールに対する再燃防止能力において最も優れていたのはライトウオーター FC-3035 で，つぎにエアロウオーター PSL，改良型たんぱく泡 B，C の順に悪くなった。

(6) 使用した燃料の燃焼性はアセトンが最もきびしく，つぎにイソブタノール，メタノールの順に弱くなった。

(7) 燃料中の水分量，燃料温度を調べることによって，目視によらずに消火過程を追跡できることがわかった。また消火開始から火災をコントロールする迄の燃料温度の上昇値とその上昇率は，水溶性液体火災の消火の困難性を示す尺度になりうることがわかった。

(8) 水溶性液体の消火の難易に及ぼす因子として，その燃焼性，極性，官能基，水に対する溶解度，燃料とその水溶液の引火点などが関係していることが明らかになった。

(9) 供試泡消火剤の凍結温度はすべて－10℃以下であった。したがって低温時の貯蔵性については特に問題はないものと思われる。しかし，変質試験後の泡消火剤原液に沈澱が認められるものがあり，今後この点

での改良が望まれる。

(10) 規格用泡ノズルとして米国規格ノズルを用いた場合，次のような規格用消火実験条件が得られた。すなわち，燃焼皿の形状は 1.8m×1.8m×0.9m^{H} アプリケーターの形状は逆U字形，燃料はアセトンとイソブタノール，燃料の厚みは15cm(480ℓ)，予燃時間は10分，泡水溶液の調製はプレミックス，泡水溶液の濃度は 6vol%以上，泡水溶液供給率は 7ℓ/min・m^{2}，消火時間を含めた泡供給時間は10分，泡水溶液温度は20±2℃，燃料温度は25±5℃などである。なお，水溶性極性液体を親水性と疎水性に分類する必要がある場合には，前者を代表するものとしてはアセトン，後者を代表するものとしてはイソブタノールが適しているものと思われる。

今後，水溶性液体火災用泡消火剤について検討すべき問題点としては，次のようになる。

(1) 前述(3)の実戦的消火法に関連して，燃焼面中央打ちあて方式による消火を行い，その消火性能と再燃性能を調べること。

(2) 成分の異なる2種類の泡消火剤を泡の状態で併用させ，その消火性能と再燃性能を調べること。

(3) 今回用いた燃料以外の類を別にする水溶性液体のうち，代表的なもの，たとえば酢酸，エチルエーテル，モノエタノールアミンなどを選択し，これらに対する泡消火剤の適用範囲を明確にさせること。

本研究は消防研究所における「石油コンビナート等災害防止に関する研究」の一環として，昭和53－54年度の2年計画で行った「水溶性液体タンク火災の消火に関する研究」の一部をなすものである。

引用文献

1) 星野，林，消防研究所報告，No.48，P.1(1979)
2) L.R.DiMaio, P.J.Chiesa, and M.S.Ott., *Fire Technology* 11, 164(1975)

Evaluation of Abilities of Fire-Fighting Foam Agents to Extinguish Polar-Type Flammable Liquids (II)

(Abstract)

Makoto Hoshino and Koji Hayashi

(Received June 6, 1980)

This study has the following three major objects. First is to evaluate the extinguishment ability, fuel vapor sealability, and burnback resistance of various polar-solvent type foam concentrates for large scale polar-solvent tank fires. Second is to obtain basic data necessary to prepare the draft standard for polar-solvent type foam concentrates. Third is to clarify the mechanism of extinguishment of polar-solvent fires by these concentrates.

The foam concentrates used in this study were on the Japanese market and were as follows: A conventional protein-based foam concentrate containing metal soaps, two new type protein-based foam concentrates containing fluorochemicals, a synthetic foam concentrate containing detergent, a modified National Aero-Water PSL, an alcohol type light water FC-3035 (modified FC-600), and a hydrocarbon type light water FC-3031.

All the foam concentrates but the first one have no limitation to premix and transit time.

Methanol, acetone, n-butanol and isobutanol were selected from among polar solvents.

The experiments and their results are outlined below.

(1) A series of tests were conducted where square-shaped fires of 3.2 m^2 to 4.5 m^2 were extinguished by means of the fixed top gentle application using a U.S. standard nozzle (OF-555C) coupled with a ⊂-shaped applicator. From the results of above tests, the following fire test procedure recommendable for a new draft standard for polar-solvent concentrates were obtained: test tray; 1.8m×1.8m× 0.9m^H, fuels; acetone and isobutanol; the former was selected as the representive of water soluble polar solvents and the latter as the representive of less water soluble ones, fuel depth; 15cm, preburn time; 10min, nozzle; U.S. standard nozzle (OF-555C), applicator; ⊂-shaped used succeedingly in the previous paper[1], application method; gentle application, foam solution; premixed type, rate of application; 7ℓ/min・m^2 at 7.0 ± 0.1kg/cm^2; solution temperature; 20±2°C; fuel temperature; 25±5°C.

(2) Concerning the first object, the following results were obtained: The modified National Aero-Water PSL and light water FC-3035 were most suitable for extinguishing tank fires on isobutanol because of their rapid extinguishment ability, excellent fuel vapor sealability,

and burnback resistance, but had limitation to their application to tank fires on both methanol and acetone, owing to their poor fuel vapor sealability. The hydrocarbon type light water FC-3031 quickly extinguished isobutanol fire, but had poor burnback resistance. So, light water FC-3031 will be more suitable for extinguishing spill fires on isobutanol. The new type protein-based foams containing fluorochemicals were suitable for extinguishing tank fires on methanol and acetone, but had limitation to tank fires on isobutanol because of the possible fuel saturation in the case of plunging application. The conventional proportioning type protein-based foam was successfully applied to tank fires on methanol and acetone, but not to isobutanol fires, and their extinguishing times of both methanol and acetone were the longest among modified Aero-Water PSL, light water FC-3035, and two new type protein-based foams. The synthetic foam concentrate containing detergent was found to be usable for spill fires on methanol and acetone, but not for isobutanol fires.

(3) From the analyses of water content in fuel, flash points of aqueous fuel solutions, and side wall and fuel temperatures, the extinguishing process was estimated without relying on visual observation. It was also found that the fuel temperature increase after foam application was closely related to both fire control and extinguishing times.

(4) Polar-solvent fires were mainly controlled by the formation of less polar-solvent soluble film or blanket on the fuel surface. The formation of the film or blanket was accelerated by (1) the effect of fluorochemical on reducing the surface tension of aqueous fuel solutions, and (2) the effect of fuel dilution. It is considered that for water-soluble polar solvents such as methanol and acetone, both effects, (1) and (2), were responsible for the film formation, while for less water-soluble polar solvents such as isobutanol, the former effect (1) was.

(5) The three burning characteristics, i.e. burning rate, fuel temperature rise, and maximum side wall temperature had a correlation with each other regardless of the kind of fuels. This correlationship showed that the burning of acetone was the severest followed by isobutanol and methanol.

消防研究所報告

通巻 50 号

昭和55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)