REPORT OF FIRE RESEARCH INSTITUTE OF JAPAN
Serial No. 30 December 1969

消防研究所報告

通巻 30 号 1969年12月

目　次

研　究

煙中の視程について（1）……神　忠久……(1)

RI施設火災の消火（1）
フード内における液体火災の炭酸ガスによる消火
……守川時生，島田裕久，守屋忠雄……(11)

水噴霧による液体燃料火災の消火
……中久喜　厚，高橋　正一……(19)

赤外共鳴放射を利用した火災検知……中島　清……(55)

消防水利としての不圧水井戸の水文学的研究……細野　義純……(63)

消　防　研　究　所
東　京　都　三　鷹　市

REPORT OF FIRE RESEARCH INSTITUTE OF JAPAN

Serial No. 30 December 1 9 6 9

——Contents——

MEMOIR

Visibility through Fire Smoke (1) ..... Tadahisa Jin.... (1)

Fire Extinguishing Measures for Radioisotope Facilities
(1) Extinguishing Effect of Carbon Dioxide on Liquid Fires in Hoods
.... Tokio Morikawa, Hirohisa Shimada and Tadao Moriya.... (11)

Extinction of Liquid Fuel Fires with Water Sprays
..... Atsushi Nakakuki and Masaichi Takhashi.... (19)

Fire Detection by Infrared Resonance Radiation
..... Kiyoshi Nakajima..... (55)

Hydrological Investigation on Unconfined Water as a Source for Fire-Fighting
..... Yoshizumi Hosono.... (63)

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

煙中の視程について（I）

神　忠　久

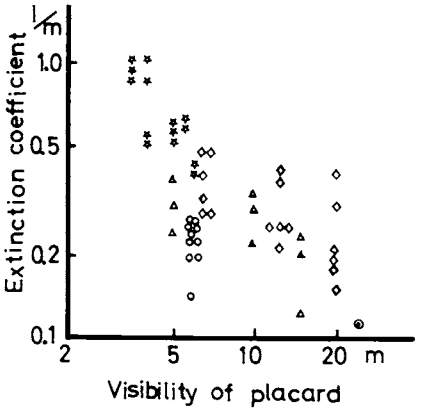
（昭和44年11月17日受理）

1．まえがき

火災時の避難のさい，あるいは火災時の救助活動を行なうさいには，火災煙を透しての見透し距離が重要な問題になる。このため数多くの人によって煙濃度と見透し距離との関係が研究されてきた。しかし厳密にはこの見透し距離は煙濃度だけでは定まらず，そのほかに廊下または室内の明るさ，物体およびその背景の輝度などに大きく左右される。また同じ濃度でも煙質（例えば白煙か黒煙か）によって見透し距離はかなり異なる。そこで筆者は標識の輝度や照明光が煙中での標識の見透し距離にどのような影響をおよぼすかを調べるための煙箱を作り，内部には明るさが変えられる照明設備を設け，また標識には電球を内蔵した発光形標識および反射板形標識の2種類のものを用いて，種種な照明状態，観測距離の下で煙濃度とその濃度における標識の視認限界の輝度との関係を調べた。また同時に理論的検討をも行なってみた。

2．煙濃度と見透し距離

煙中での見透し距離（主に反射板形標識について）に関して，最近までに国内で行なわれた実験結果をFig. 1に示す。煙濃度と見透し距離との間にはある程度の相関関係が見られるが，かなりデーターがばらついている。特に実験場所の違いによるものが大きい。この原因としては観測者と標識の間の煙濃度の不均一性などによる測定誤差や観測誤差などが主に考えられるが，その他に実験場の照明状況，実験に用いられた標識や煙質の違いによるものなどが考えられる。



☆ Fire smoke; Building of Yamaichi Security CO. at Shibuya (T. Moriya)
⊙ 〃 ; Building of Daiun CO. at Yokohama (F. Saito)
○ Smoke Bomb; Laboratory of Nohmi Bosai Kogyo CO. LTD. (F. Saito)
△ 〃 ; Underground park at Ikebukuro (Tokyo Metropolitan Fire Board)
◇ 〃 ; Underground park of Imperial Theater (Tokyo Metropolitan Fire Board)

Fig. 1. Relation between visibility of the placard and extinction coefficient by the experiments performed in Japan.

煙が存在すると物体が見えにくくなるのは第1には物体からの光が途中の煙粒子にさえぎられ目に到達する光量が減少するためと，第2には照明光が煙粒子により散乱させられ，これが目に入るので物体からの光との間のコントラストが弱くなるためである。煙中で物体が確認できるのは観測点における見かけの物体の輝度をB_E，その背景のみかけの輝度をB_Bとすれば輝度対比（B_E-B_B）/B_Bについて

$$|(B_E-B_B)/B_B| \geqq \delta_C \qquad (1)$$

ここでδ_C；視認限界輝度対比

が成立するときである。また物体の輝度をB_{E0}，その背景の輝度をB_{B0}とすれば

$$B_E=B_{E0}\exp(-\sigma V) + (\textit{Intensity of scattered light}) \qquad (2)$$

$$B_B=B_{B0}\exp(-\sigma V) + (\textit{Intensity of scattered light}) \qquad (3)$$

ここで σ；減少係数*)

V；観測距離

で表わされる。(2)，(3)式を(1)式に代入すると

$$\left|(B_{EO}-B_{BO})\exp(-\sigma V)/\left\{B_{BO}\exp(-\sigma V)+\left(\begin{matrix}Intensity\ of\\ scattered\ light\end{matrix}\right)\right\}\right| \geqq \delta_C \qquad (4)$$

ここで煙粒子により散乱させられる照明光の強さを計算してみる。距離 Vに黒い物体があり，観測点からみたときの視角を ωとする。観測点から Xなる距離に dxの厚さの煙厚を考えると，その体積は $\omega X^2 dx$である（Fig. 2 参照）。

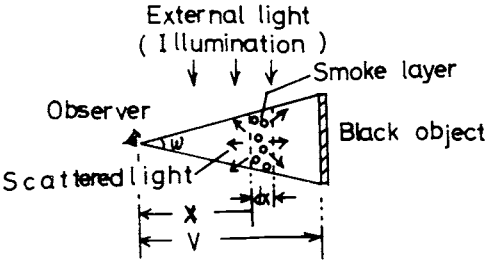


Fig. 2.

この煙層に入射する照明光の平均光束密度（4 π方向からの光の平均値）を Lとすると，ここで散乱させられ観測点に到達する散乱光の光束密度は，

$$\sigma_S L(\omega X^2 dx)/X^2 = \sigma_S L \omega dx$$

ここでσ_S；平均散乱係数（4 π方向から一様な入射光がある場合の散乱光と入射光との比率）

観測点から物体までのすべての部分で同じことが起こるので全散乱光束密度（*Intensity of scattered light*）は，

$$(Intensity\ of\ scattered\ light) = \int_0^V \sigma_S L \omega \exp(-\sigma X)\, dx = k\omega L\{1-\exp(-\sigma V)\} \qquad (5)$$

ここで $k=\sigma_S/\sigma$

$\exp(-\sigma X)$；途中の煙による散乱光の減衰を示す項

(5)式において $\omega=1$（単位立体角）とし，これを(4)式に代入し，σについて整理すると，

$B_{EO}>B_{BO}$のとき，

$$\sigma = 1/V\cdot \ln\left[\{\delta_C kL-(1+\delta_C)B_{BO}+B_{EO}\}/\delta_C kL\right] \qquad (6)$$

標識の輝度（B_{EO}）が背景輝度（B_{BO}）および$\delta_C kL$ に比べ充分に大きいならば(6)式は

$$\sigma \fallingdotseq 1/V\cdot \ln(B_{EO}/\delta_C kL) \quad \cdots\cdots(7)$$

となる。透過光の減衰がほとんど散乱によって起こるような場合（例えば白煙の場合）には $k\fallingdotseq 1$，したがって煙中での照明光の強さは煙濃度に無関係に一定（L = const）である。このような場合には標識の視認限界煙濃度は標識の輝度の指数函数的増加にしたがい直線的に増加することを(7)式は示している。

(7)式において，標識の輝度，箱内照度，および煙質が定まれば観測距離(V)と限界煙濃度(σ)との間には

$$\sigma\cdot V \fallingdotseq \text{const.} \quad \cdots\cdots(8)$$

が成立する。ただし δ_C, $k\fallingdotseq$ const　（δ_Cについては後述）とする。

また白煙では反射板形標識の輝度（B_{EO}）は照明光の平均光束密度(L)と標識の反射率(α)により定まる。すなわち，

$$B_{EO}=\alpha L \quad \text{または} \quad \alpha = B_{EO}/L \quad \cdots\cdots(9)$$

(9)式を(6)式に代入（ただし $B_{EO}>>B_{BO}$ とする）すると

$$\sigma \fallingdotseq 1/V\cdot\ln\{(\delta_C kL+\alpha L)/\delta_C kL\} = 1/V\cdot\ln\{\delta_C k+\alpha)/\delta_C k\} \quad \cdots\cdots(10)$$

実用範囲では$\delta_C k<0.1\alpha$なので(10)式は

$$\sigma \fallingdotseq 1/V\cdot\ln(\alpha/\delta_C k) \quad \cdots\cdots(10)'$$

(10)′式には照明光(L)の項が含まれていない。したがって白煙の場合，反射板形の標識では視認限界煙濃度は照明光の強弱には影響されない。

3．装置と実験の概要

装置の略図をFig. 3 に示す。発煙は炉紙（東洋炉紙No. 2）を電気炉で加熱することにより行なった。くん焼状態を得るために加熱温度を 400℃に，またN_2ガスの供給により炉内のO_2濃度を約10%に保った。発煙材に炉紙を用いたのは木材より材質に均一性が得られるためである。実験時には全乾状態にした炉紙5～15gを長さ10cm，直径 5 cm程度に折り曲げ電気炉に投入する。このようにして得られた煙は比較的白煙に近いものであった。煙を 2 ～ 4 分（炉紙の量により異る）で集煙箱に満たし，均一に拡散した後，測定を行なった。測定時間が長いと凝縮などにより煙質が変化する恐れがあるので 1 回の測定時間を最大15分程度とした。集煙箱は廊下，または室内の一部を模擬したもので，内部には照明設備として10 w の蛍光灯24個設けた。蛍光灯は全部間接照明とし，さらに集煙箱の内面は白色塗料

＊）減光係数（σ）は次式で表わされる。

$\sigma = 2.3/l\cdot \log(I_0/I)$　　又は　$I=I_0\exp(-\sigma l)$

ここで I_0；煙層への入射光強度（平行光線）

I；透過光強度（平行光線）

l；煙層の厚さ（m）

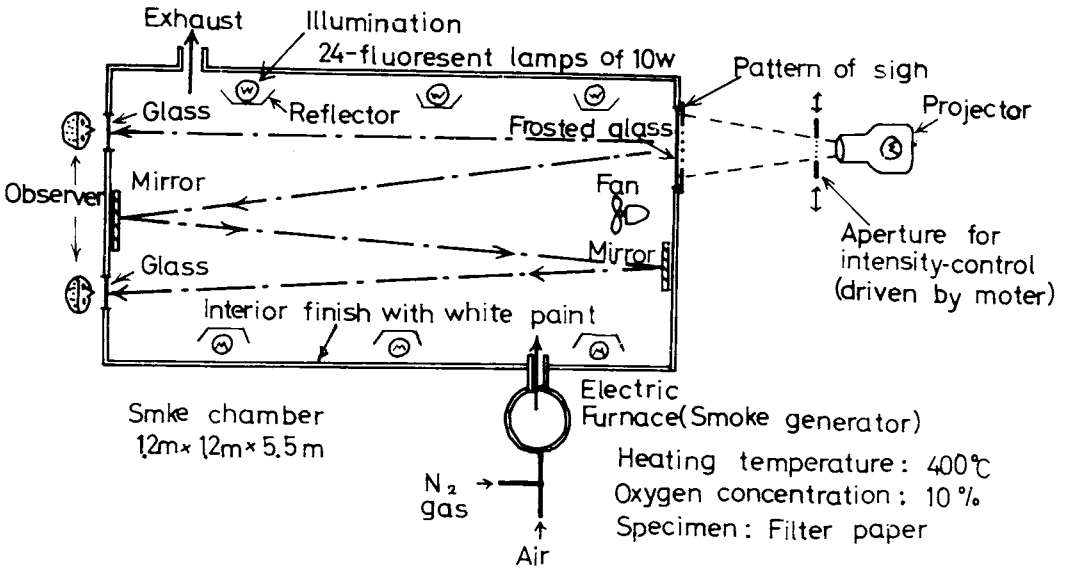


Fig. 3. Apparatus of smoke chamber

仕上げをし箱内照度分布をよくした。箱内には光路長1mの煙濃度計のほかに，観測距離をのばすための鏡を2枚，また煙濃度を均一にするために小型のファンを設けた。標識は発光形（電球を内蔵したもの）の場合には箱の一端をすりガラスにし，そのガラスに任意の標識の紙型（今回の実験ではもっとも単純なものとして，5～15cmφの円形型紙）を貼り付け，箱外からスライドプロジェクターで投光した（任意の標識をスライドによりガラス面に投映することも可能である）。標識の明るさを変えるために，プロジェクターのレンズ面に光学実験用の円形の絞りを設け，それをモーター駆動させ，観測者の手元で標識の輝度が自由に変えられるようにした。また標識の大きさは観測点からの視角を一定にするために観測距離が5.5mのときには，5cmφに，10.5mのときには10cmφに，15.5mのときには15cmφにした。

観測は集煙箱の他端（標識を設けた側の反対側）の一部を透明ガラスとし，箱の中をのぞき込むようにして行なった。観測距離は通常5.5mであるが，2枚の鏡を用い，最大15.5に設定できるようにした。観測者は，標識を見ながら常に標識が視認限界になるように標識の輝度を変化させた。また測定は煙濃度のほかに，標識の輝度および箱内の照度の変化を記録させた。

一方反射板形標識は黒色台紙の上に白色～灰色（白い紙に2mmの間隔に種々の太さの黒い線を縦横に引いたもの）の円形の紙を貼り付けたものを用いた。線の太さを変えることにより台紙とのコントラストの異なる4種類の標識を作った。実験方法で発光形の場合と異なるのは標識の輝度が自由に変えられないことである。したがって発光形の場合には標識の輝度と視認限界煙濃度との関係が実験中を通じて連続してでてくるのに，反射板形の場合には1回の実験で4個（輝度の定まった4個の標識しかないので）の測定値しか得られない。このため反射板形では測定値にかなりのばらつきが見られたので10～15回の繰返し実験を行ないその平均値を用いた。

4. 実 験 結 果

4.1 発光形標識

4.1.1 コントラストの影響

Fig. 4 は観測距離 5.5 m における標識の輝度とそのときの標識の視認限界の煙濃度との関係を示したものである。輝度の増加とともに限界煙濃度が増加している。しかも限界煙濃度は輝度の指数函数的増加にしたがい，ほぼ直線的に増加している。また Fig. 4 には標識の輝度とその背景輝度（透過率の異なる型紙を用いることにより変える）とのコントラスト（B_{EO}/B_{BO}）の強弱による限界煙濃度への影響が示されている。コントラストが3.5以上ではコントラストの影響がほとんど認められない。しかし，それ以下ではコントラス

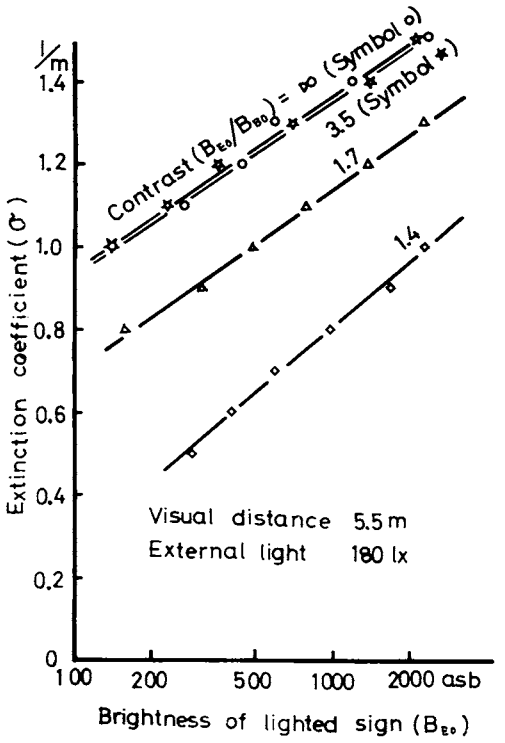


Fig. 4. Relation between brightness of lighted sign and extinction coefficient at the instant of obscuration threshold. Effect of the contrast between object and background is shown.

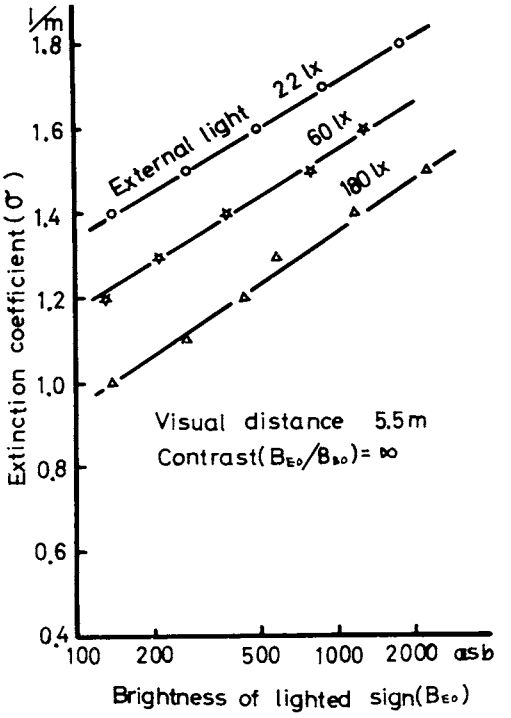


Fig. 5. Relation between brightness of lighted sign and extinction coefficient at the instant of obscurtion threshold. Effect of the external light is shown.

トの低下とともに限界煙濃度が低下している。したがって（B_{EO}/B_{BO}）≦3.5の領域では近似式(7)が成立しない。以後の実験においてはコントラストが無限大になる型紙（透過率零の黒色紙）を用い実験を行なった。

4.1.2 照明光の影響

次に室内の照明の強弱による標識の視認限界煙濃度への影響を調べてみた。その結果を**Fig. 5** に示す。照明光の強弱により限界煙濃度がかなり異なる。

すなわち，箱内が明るいほど限界煙濃度は低下する，ただし，この場合照明光の強弱は蛍光灯の点灯数の増減により行なった。

限界煙濃度(σ)の変数としてB_{EO}/Lを用いると照明光の影響が消去されることは(7)式より明らかである。**Fig. 6**は**Fig. 5**の σの値を変数B_{EO}/Lでもって再プロットしたものである。**Fig. 6** からもわかるように照明光の影響がほとんど消去されている。

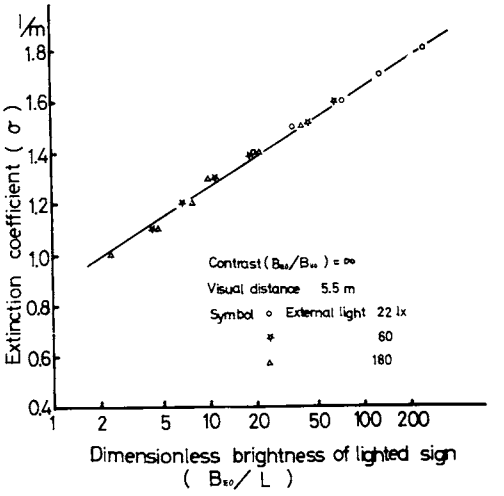


Fig. 6. Relation between dimensionless drightness of lighted sign and extinction coefficient at the instant of obscuration threshold.

4.1.3 観測距離と限界煙濃度

箱内の2枚の鏡を用い，観測距離10.5mおよび15.5mにおける無次元化された標識の明るさ（B_{EO}/L）と限界煙濃度との関係を調べてみた。その結果をFig.7に示す。いうまでもなく観測距離の大きい場合には限界煙濃度が低下している。Fig.8は無次元化された標識の明るさ（B_{EO}/L）と$\sigma\cdot V$（無次元）との関係を示したものである。(8)式が成立する場合には観測距離5.5m，10.5m，15.5mにおける$\sigma\cdot V$の値は一致するはずである。しかしFig.8では10.5mと15.5mの$\sigma\cdot V$の値はほぼ一致するが5.5mの値よりは幾分低い値を示している。これは観測距離をのばすために用いた2枚の鏡の平面度が悪く，標識が幾分ゆがんでみえるため，視認限界の輝度対比が大きくなったためである（後述）。したがってFig.8から発光形標識の場合，各輝度において観測距離（少なくとも5.5m～15.5mの間では）と限界煙濃度との間には(8)式がほぼ成立することが確められた。

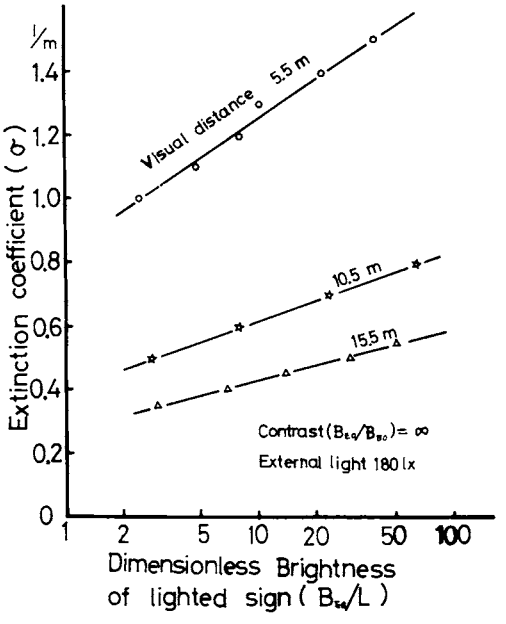


Fig.7. Relation between dimensionless brightness of lighted sign and extinction coefficient at the instant of obscuration threshold
Effect of the visual distance is shown.

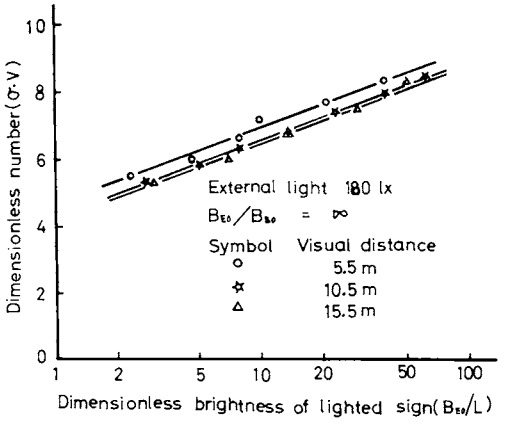


Fig.8. Relation between dimensionless brightness of lighted sign and dimensionless number $\sigma\cdot V$

4.2 輝度対比の測定

鏡2枚使用した場合（観測距離6m）と鏡なしの場合（5.5m）における標識の視認限界の輝度対比を実測してみた。輝度対比の測定には自作の輝度計を用いた。この輝度計は400mmの望遠レンズ付一眼レフカメラを改造したものである。フイルム面にすりガラス付の円形スリットを取付け，視野を5m離れた点で3cmϕになるようにした。スリットの後方には高感度の光電子増倍管を取付け，その出力を自動平衡記録計に接続した。なおレンズの前面には色ガラスフィルターを取付け，輝度計の感度特性をほぼ視感度曲線にした。

測定は通常の実験と同じように、標識を常に視認限界の輝度にしておく。このような状態の下で輝度計を煙を透して標識とその背景とを交互にスキャン（モーター駆動により）させた。記録計の出力より標識の見かけの輝度（B_E）および見かけの背景輝度（B_B）を読みとり視認限界時の輝度対比（δ_C）を(1)式より求めた。測定結果をTablelに示す。

Table 1

鏡を2枚用いたときの対比		鏡なしのときの対比	
δ_{C2}	（煙濃度 σ）	δ_{CO}	（煙濃度 σ）
0.018	(1.40)	0.010	(1.25)
0.020	(1.10)	0.010	(1.10)
0.021	(1.00)	0.013	(1.00)
0.019	(0.80)	0.013	(0.90)
平均 $\delta_{C2}=0.020$		平均 $\delta_O=0.011$	

ただし箱内照度 180lx

Table 1より $\delta_{CO}=0.6\delta_{C2}$，これを(7)式に代入すると

$$(\sigma\cdot V)_{\text{鏡なし}} \fallingdotseq \ln(B_{BO}/0.6\delta_{C2}kL)$$
$$=(\sigma\cdot V)_{\text{鏡2枚}}+0.5$$

すなわち鏡2枚使用して得た$\sigma\cdot V$の値を鏡なしの場合

に換算するには，それぞれの$\sigma \cdot V$の値に0.5だけを加算する必要がある。このような補正を加えるとFig. 8の観測距離10.5mおよび15.5mの$\sigma \cdot V$の値は5.5mの値とほとんど一致する。

なおTable 1より，通常の照明の下では煙濃度を減光係数で0.8～1.4程度まで変えても視認限界の輝度対比にはほとんど影響がないことがわかった。

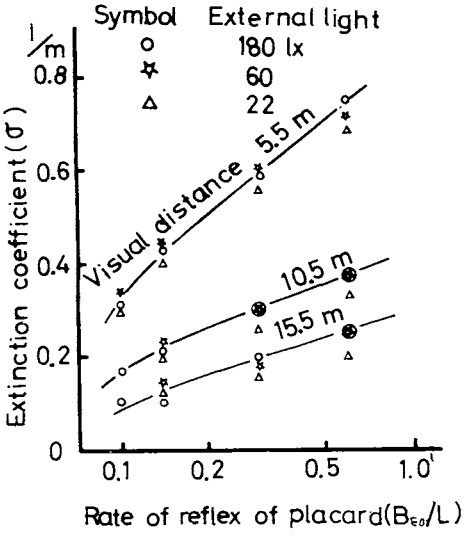


Fig. 9 Relation between dimensionless brightness (rate of reflex) of the placard and extinction coefficient at the instant of obscuration threshold.

4.3 反射板形標識

反射板形標識についても標識の明るさや照明光の視認限界煙濃度への影響を調べてみた。Fig. 9は観測距離5.5mおよび10.5m，15.5mにおける反射板形標識の無次化された明るさB_{E0}/L（反射率）とそのときの標識の視識限界煙濃度との関係を示したものである。反射板形の場合も限界煙濃度は標識の明るさの指数函

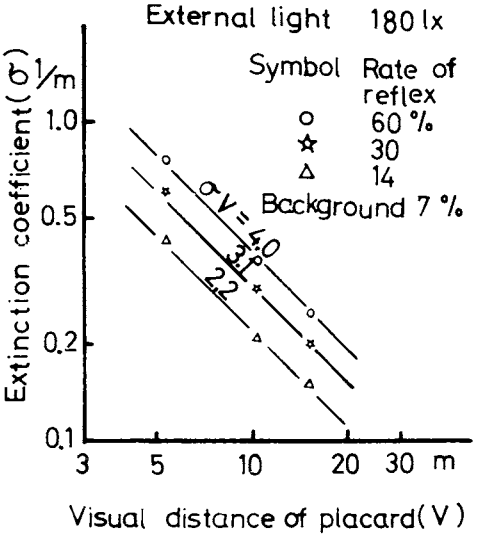


Fig. 10. Relation between visual distance of the placard and extinction coefficient at the instant of obscuration threshold.

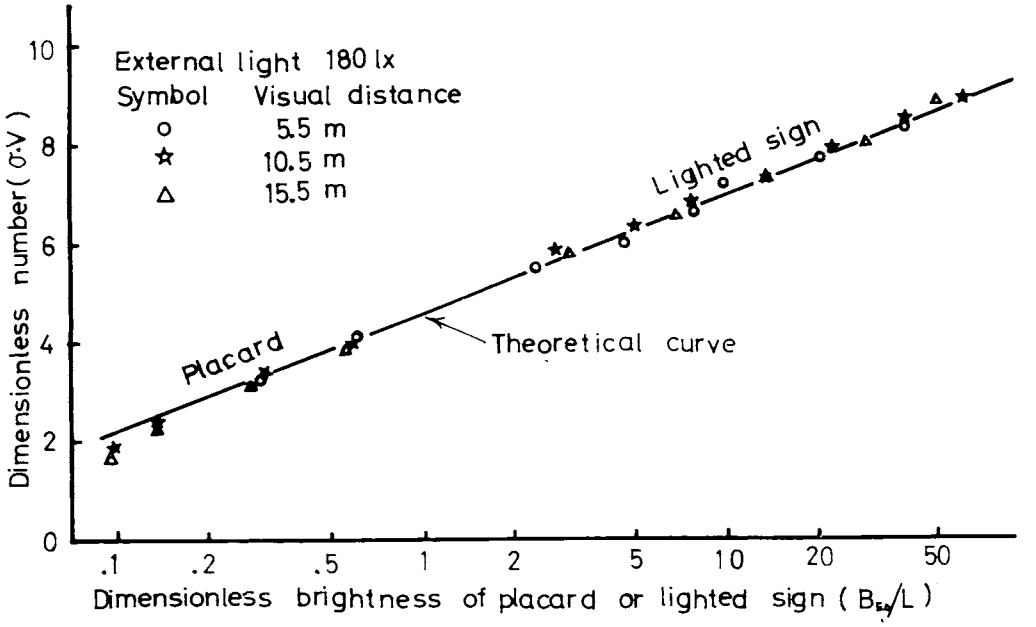


Fig. 11. Comparison of the results of experiment with the theoretical curve.

数的増加にしたがいほぼ直線的に増加している。

一方照明光の影響は 60lx ≦ L ≦180lx の間ではほとんど影響が認められないが，箱内が極端に暗い場合には限界煙濃度が低下している。これは極端に暗くなると視認限界の輝度対比の値が大きくなるためと考えられる。

Fig.10は観測距離とそのときの限界煙濃度との関係を示したものである。反射板形の場合も(8)式が成立していることがわかる。

5．考　　察

Fig.11は無次元化された標識の明るさ(B_{EO}/L)と，$\sigma\cdot V$との関係を反射板形および発光形の標識について示したものである。両種の標識の$\sigma\cdot V$の値がほぼ同一線上に並んでいる。Fig.11の実線は(7)式において$\delta_C=0.01$，$k=1$とおいたときの理論曲線である。理論曲線が発光形および反射板形標識の実験値とかなりよく合っている。またFig.11では照明光が180lxの場合の値のみを示したが，少なくとも60lx≦L≦180lx 間ではすべて上記の関係が成立することが確められた。

最も有効な反射板形標識は台紙が黒色の場合には白色の標識，すなわち標識の反射率（B_{EO}/L）が1のときである。Fig.11より$B_{EO}/L=1$のときの$\sigma\cdot V$の値を求めると約4.5を得る。しかし反射率が1の標識を作ることは困難である。したがって現実には反射板形では最良の状態で$\sigma\cdot V$の値が4程度であろう。これに対し発光形の場合には内蔵される電球の明るさにより$\sigma\cdot V$の値は理論的にはいくらでも大きくとれる。しかし，これも現実には最大10程度であろう。それでも反射板形に比べ見透し距離を2倍以上にのばすことができる。

煙中での標識の見透し距離は標識の大きさによっても変わる。すなわち，大きな標識ほど見透し距離が大きい。その1例をFig.12に示す（煙濃度と見透し距離との積は一定なのでFig.12の縦軸を見透し距離に置き換えて考えることができる)。しかし，ある程度の大きさ以上では見透し距離はほとんどのびない。この限界は視角にして1度くらいである。この程度の大きさの標識は煙中を避難する際に必要な見通し距離を10～20mとするとかなり大きなものになる。特に文字表示の標識では1字の大きさがこれに相当する。したがって，標識の大きさが限られている場合には文字表示よりは記号表示（文字1字に相当するので）の標識の方が煙中では有効である。

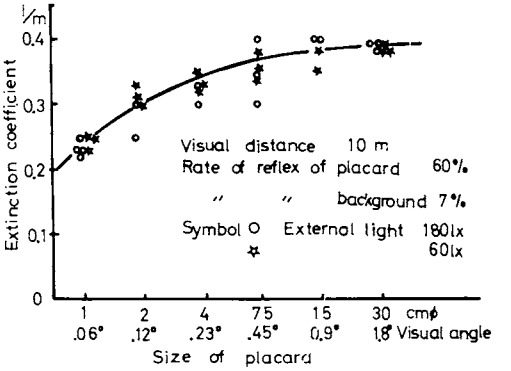


Fig.12. Size effect of the placard

6．結　　論

煙中での標識の見透し距離は煙質や煙濃度が一定な場合，無次元化された標識の明るさ(B_{EO}/L)の指数函数的増加に従い，ほぼ直線的に増加する。また標識の見透し距離と視認限界煙濃度との積が一定であり，この積は煙質，標識の輝度や形状，室内の照明状態などにより異なる。白煙の場合，反射板形標識ではこの値は2～4，発光形では5～10程度である。したがって煙中での反射板形，および発光形標識の見透し距離はそれぞれ

反射板形標識の見透し距離＝(2～4)/σ (m) …(11)

発光形標識の見透し距離　＝(5～10)/σ (m) …(12)

となる。

地下街や広い室内（例えばデパートの売場など）での煙中の見透し距離は建物内の構造や陳列物，装飾品などの状態により異なるが(11)式の反射板の場合がほぼ適用できるものと考えられる。

7．あ　と　が　き

以上のデーターはすべて煙箱外からガラス越しに箱内に設けた標識を観測した結果なので，現実的には眼鏡付きの防煙マスクを装備した人に適用されるべきものである。また今回の実験の場合には標識の置かれた場所があらかじめわかっているが，現実には標識のある場所がわからないことが多い。したがって実際の火災のさいマスクなしで避難する一般人に対しては生理学的および心理学的影響をも考慮しなければならないので，現実の見透し距離は今回実験で得られた値より低いものになると考えられる。

今回の実験では煙質としては白煙に近いものだけについて実験を行なったが，引続き黒煙，特にプラスチックからの煙について見透し距離の大小を研究する予定である。

終りに，今回の研究に際し，研究全般にわたって御指導していただいた守屋忠雄第1研究部長に対し厚く御礼申し上げる。さらに実験装置の組立時にはラジオアイソトープ研究室員の諸氏に大いに手伝っていただいたことを付記し感謝の意を表する。

Visibility through Fire Smoke (I)

(Abstract)

Tadahisa Jin

(Received November 17, 1969)

A smoke chamber was designed to perform the measurement of visibility through fire smoke (see **Fig. 3**). The chamber is provided with an illumination apparatus and two kinds of simple sign. One of the signs is the placard which is made of small circular paper on black background and the other is the lighted sign which is backlighted with a projector. The brightness of the lighted sign can be controlled at will by the observer, and that of the placard can be set in four stages by changing the rate of reflex of the circular paper. Nearly white smoke is generated by heating filter-paper in an electric furnace. Experiments were carried out to get a relation among the brightness of sign, the distance between the object and the observer, and the extinction coefficient of smoke in the instant of obscuration threshold.

The extinction coefficient (σ) at the instant of obscuration threshold may be theoretically given by

$$\sigma \fallingdotseq \frac{1}{V} \ln \frac{B_{EO}}{\delta_C k L} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots (1)$$

where V; Visual distance

B_{EO}; Brightness of sign,

δ_C; Threshold of brightness-contrast ($\delta_C \fallingdotseq 0.01$ under the condition of genral illumination)

L; Mean intensity of external light coming from all direction (Illumination)

$k = \sigma_S / \sigma$ (Ratio depending on the nature of smoke, $k \fallingdotseq 1$ for nearly white smoke)

σ_S; Mean light-scattering coefficient

From Eq. (1), the extinction coefficient in the instant of obscuration threshold is logarithmically proportional to the brightness of sign for a given smoke, a given intensity of external light, and a visual distance.

The results of experiment are shown in **Fig. 4** ~**Fig. 12**. The agreement between the results and the theoretical values calculated from Eq. (1) is good (see **Fig. 11**). The visibility of the placard obtained from the experiment is about $(2 \sim 4)/\sigma$ and that of the lighted sign is about $(5 \sim 10)/\sigma$.

In the case of white smoke, the brightness of the placard is expressed by product of the rate of reflex of the placard and the intensity of the external light, therefore Eq. (1) is given approximately by

$$\sigma \cdot V \fallingdotseq \text{const.} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots (2)$$

The value of the constant in Eq. (2) depends mainly on the rate of reflex of the placard (see **Fig. 9**, **Fig. 10**). The value of the constant for the lighted sign depends on both the brightness of the sign and the intensity of the external light (see **Fig. 6**, **Fig. 8**).

In the case of escape through real fire smoke, the visibility should be lower than that of experiment, because the effects of physiology and psychology must be considered.

R I施設火災の消火〔I〕

フード内における液体火災の炭酸ガスによる消火

守川時生・島田裕久・守屋忠雄

(昭和44年12月1日受理)

1. 緒　　言

ここでいうフードとは，その内部で非密封アイソトープを取扱うためのチャンバーで，扉のついた取扱い窓を有し，フィルター・ファンなどが設けられた排気ダクトに接続されている。排気ダクトを通しての吸出しのため，内部は負圧になり，空気の流れは取扱い窓，バイパスなどの開口面においては常に内部に向っている。このようにして，フンド内部の汚染空気あるいは，汚染物質がフードの置かれている室内へ漏出するのが防がれている。

フード内に火災が発生した場合，ダクトを通しての強制換気は火勢を逆に強めるおそれがないではないが汚染漏出防止の観点からは，換気を停止せず継続した方がよい。したがって，フード内火災の消火も強制換気のもとで行なわねばならない場合が考えられる。このような場合の火災に対して，屋内の小規模液体火災に有効で，かつ，消火後の処理が便利な炭酸ガスが消火剤として有効か否か，また，有効であるならその消火性能はどの程度であるかなどを究明することが本研究の目的である。

今回，オークリッジ型フードとほぼ同じ機能をもったチャンバーを製作し，その中で液体火災を起こし，炭酸ガスによる消火実験を行なった。実験において，消火時間，換気速度，炭酸ガス放出速度などの関係を求め最適炭酸ガス放出速度を決定することを試みた。さらに、上記関係について実験と理論解析との比較をも行なった。

2. 実 験 装 置

消火実験には，オークリッジ型フードを模した大きさの異なるチャンバー3機(200 l, 1800 l, 5000 l容積)を，燃焼装置，およびCO_2放出装置をセットして用いた。チャンバーは，上下開閉扉のついた窓をもっており，排気用ダクトおよびファンを付属したものである。燃焼装置は周囲を水冷した円形皿で燃料には，n-ヘキサンを用いた。CO_2放出はFig.1に示すように，気化式と直接式の2種類の方式を採った。気化式とは，ボンベからタンクへCO_2を導き一旦完全に気化させた後ポンプで放出するという方式で，直接式とは，ボンベから直接配管を通って放出するという方式で，これは固体炭酸を多少含んでいる。今回の実験では，CO_2の窒息消火効果を主眼にしたため前者を多用した。

測定関係については，換気速度はオリフィスと熱線風速計、CO_2放出速度は気化式ではオリフィスによる流速，直接式ではストレインゲージによるボンベのCO_2重量減少速度の測定により行なった。また，CO_2濃度は干渉計で測定した。

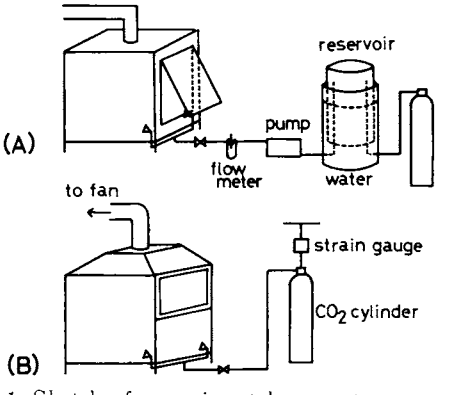


Fig.1 Sketch of experimental apparatuses
(A) vaporized discharge method
(B) direct discharge method

3. 理論的考察——均一混合の場合の濃度変化

放出されたCO_2の空気，フード内部のCO_2濃度が，徐々に増加して窒息濃度に達し，消火が達せられるまでの内部CO_2の空気との混合状態は決して一様なものではなく，部分によりかなり濃淡のあるものであろう

は予想されるが，今かりに，時々刻々の混合状態が均一を保ちながらCO_2濃度が変化していくものと考えれば，そのような場合の関係は以下の式により表わされ，放出速度，換気速度，消火時間などの諸量の間の相互関係の傾向を，ある程度予測することができる。

すなわち，

$$VdN=-QNdt+qdt \qquad ①$$

こゝに

N: CO_2濃度　　V: チャンバーの容積

Q: 換気速度　　q: CO_2放出速度

ただし，この場合，燃焼により発生するCO_2は量的に小さく，また，消火性能を安全側にするので無視した。

①式を積分して

$$N=q/Q\cdot[1-\exp(-Qt/V)] \qquad ②$$

各燃料についてのCO_2の最小窒息消火濃度は既知である。(n-ヘキサン 29%) Nに最小窒息消火濃度N_Eを入れると，理論消火時間t_Eが得られる。すなわち，

$$t_E=V/Q\cdot\ln[q/(q-QN)] \qquad ③$$

消火に要するCO_2量はqtで，すなわち

$$qt_E=qV/Q\cdot\ln[q/(q-QN_E)] \qquad ④$$

qtはQが一定のとき，qを大きくするほど，qtは小さくなる。そして$q=Q$（$q>Q$はあり得ない）のときqtは最小である。

4. 実 験 結 果

実験結果を項目別に整理すれば以下のとおりである。

(1) CO_2放出口の最適位置，個数の決定

チャンバーの各すみ8点に放出口を設けて，種々のやり方で放出を試みた結果を**Table 1**に示す。下4点使用が前面下2点使用よりやや優れているが，扉開放の場合，開口部よりの漏洩がみられたので，後者を以下の実験に採用した。

Table 1 Comparison of extinction times for location and number of CO_2 nozzles

Location and unmder of CO_2nozzles	Extinction time
8 each at every corner of top and bottom	20 sec.
4 each at every corner of bottom	11
4 each at every corner of top	24
2 each at every front corner of bottom	12
2 each at every front corner of top	23

volume of chamber: 5×10^3 l
rate of ventilation: 3×10^4 l/min
rate of CO_2 application: 3.1×10^3 l/min
sliding door: open
fuel: n-hexan
burner: pan of 20cm dia.

Number and location of CO_2 nozzles	Extinction time
8 each at every corner of top and bttom	154 sec.
2 each at evry corner of bottom	40
2 each at every corner of top	75
2 each at every front corner of bottom	50 sec.

volume of chamber: 5×10^3 l
ability of ventilation: 3×10^4 l/min
rate of CO_2application: 3.55×10^3 l/min
sliding door: open
fuel: n-hexan
burner: pan of 20cm dia.

(2) CO_2濃度分布の測定

底から20cm点（燃焼皿の上5cm）と40cmの点で濃度度を測定した結果を**Fig.2**に示す。濃度のfluctuationは大きかったが，濃度は一般に上部で低く，下部で高いという結果が得られ，濃度の不均一さは顕著であった。

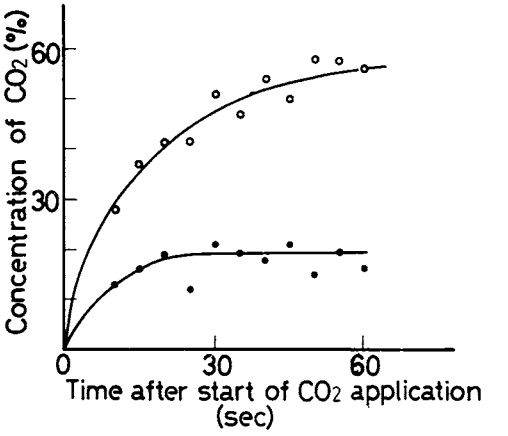


Fig.2 Concetration of CO_2 vs. time after start of CO_2 application
rate of CO_2 application: 218 l/min
rate of ventilation: 1800 l/min
discharge method: vaporized discharge
Volume of chamber: 200 l of volume

(3) 燃焼規模の消火に及ぼす影響

Fig.3 が示すように，予燃時間を30秒にとると実施した実験条件の範囲では，燃焼面積の増加とともに消火時間の増加がみられたが，燃焼面積がある程度の大きさになると，消火時間への影響はほとんど無視できるほど小さくなった。そこで200 lのチャンバーは，直径10cmの皿を1800 lおよび5000 lのチャンバーでは，直径20cmの皿を用いて以下の実験を行なった。

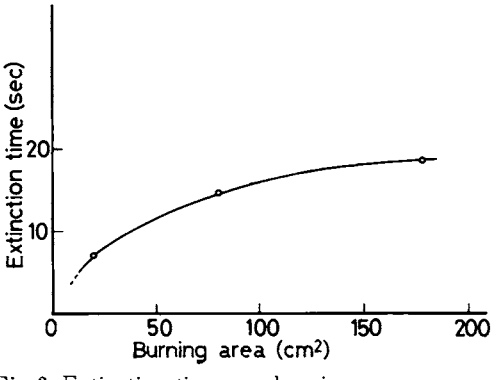


Fig.3 Extinction time vs. burning area
rate of CO_2 application: 218 l/min.
discharge method: vaporized discharge
volume of chamber: 200 l

(4) a.換気速度と消火時間の関係(CO_2放出速度一定)

b.CO_2放出速度と消火時間の関係（換気速度一定）

気化式による200lチャンバーでの実験におけるa.の関係は，**Fig.4** が示すように換気速度とともに消火時間が長くなる。b.の関係については，**Fig.4** の一部を書き換えると**Fig.5** が得られ，放出速度の増加とともに消火時間が短かくなることがわかる。

1800lチャンバーにおける実験結果を**Teble 2** に示す。また，直接式による5000 l チャンバーでの実験におけるa.の関係は**Fig.6** が示すように，気化式の場合と類似の曲線が得られた。扉を閉鎖した場合の実験結果を**Tadle 3**および**Fig.7**～8に示す。この場合，換気能力とは扉開放状態での換気速度を指している。**Fig.4** **Fig.6** には③式より求めたCO_2の空間的濃度分布の一様な場合の理論消火時間も載せたがそれより値小さかった。

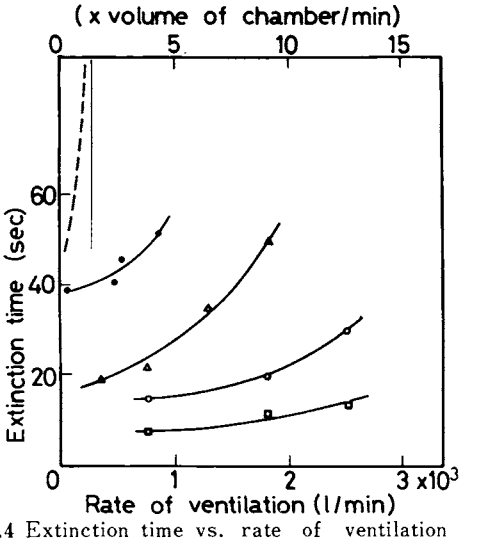


Fig.4 Extinction time vs. rate of ventilation
rate of CO_2 application; ● 57 l/min
△ 82
○ 106
□ 218
discharge method: vaporized discharge
Volume of chamber: 200 l
The broken line is the theoretical curve for the curve of symbol △ when it is assumed that CO_2 concentration in the chamber is always even.

(5) CO_2放出速度とCO_2消火必要量との一般的な関係，および，気化式，直接放出法の比較

項目(4)で得られたすべてのデータをqt/Vを縦軸にqt/Vは消火に要するCO_2量である。またq/QはCO_2放出速度と換気速度の比で無次元的放出速度である。

この図によりCO_2放出速度と消火に要するCO_2量の関係が一括された。また，この図から気化式と直接式放出の比較ができ，前者の方がCO_2必要量は多少小さいようである。

Table.2 Relation between rate of ventilation and rate of CO_2 application

Rete of ventilation	Rate of CO_2 application	Extinction time
880 l/min	232 l/min	73 sec.
880	260	50
880	290	38
1230	260	85
480	260	62

volume of chamber: 1.8×10^3l
discharge method: vaporized discharge

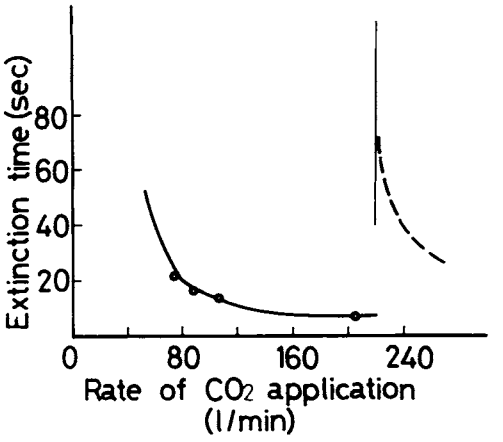


Fig.5 Extinction time vs. rate of CO_2 application
rate of ventilation: 760 l/min
discharge method: vaporized discharge
volume of chamber: 200 l
The broken line is the theoretical curve when it is assumed that CO_2 concentration in the chamber is always even.

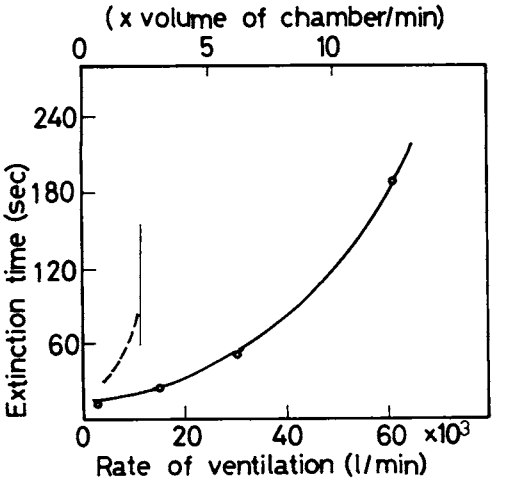


Fig.6 Extinction time vs. rate of ventilation
rate of CO_2 application: 3.3×10^3 l/min
discharge method: direct discharge
Volume of chamber: 5×10^3 l

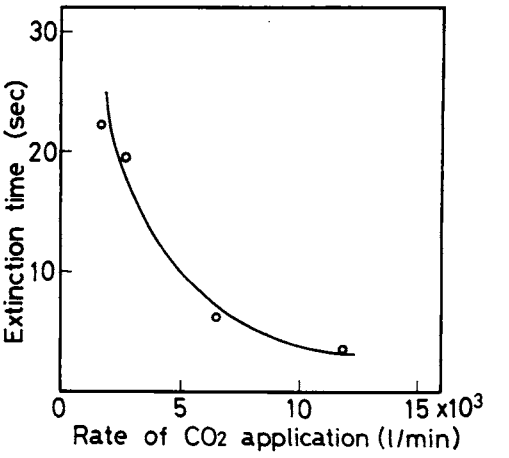


Fig.7 Extinction time vs. rate of CO_2 application
ability of ventilation: 3.0×10^4 l/min
opening condition of door: closed
discharge method: direct discharge
volume of chamer: 5×10^3 l
The ability of ventilation is the rate of ventilation in case where the door is open.

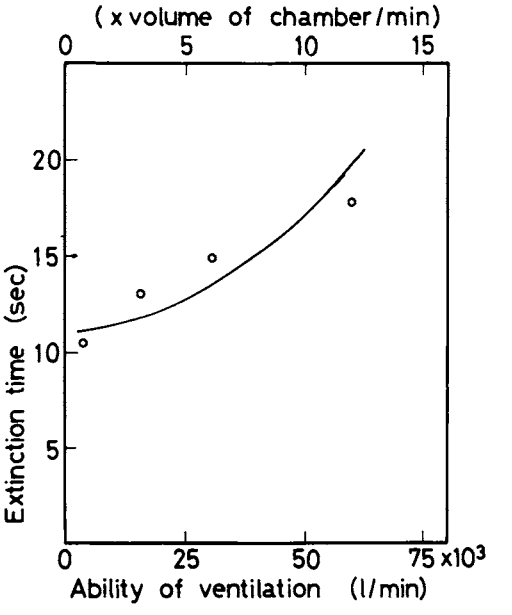


Fig.8 Extinction time vs. ability of ventilation
rate of CO_2 application: 3.54×10^3 l/min
opening condition of door: closed
discharge method: direct discharge
volume of chamber 5×10^3 l

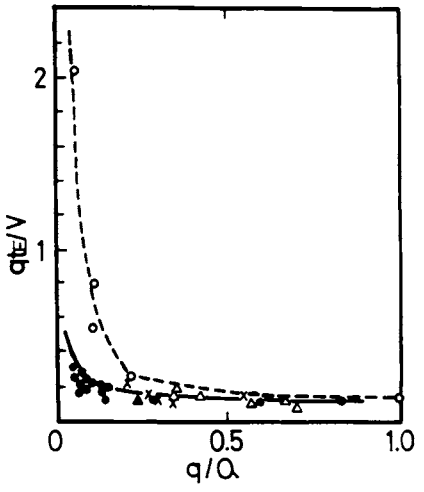


Fig.9 qt /V vs. q/Q

	volume of chamber	opening condition	discharge method
○	5 ×10³ l	open	direct
△	5 ×10³ l	closed	direct
●	2 ×10² l	open	vaporized
×	1.8×10³ l	open	vaporized

5. 考　　察

項目(1), (2)からもわかるように実験は最も効率的に消火することに主眼を置いたため，チャンバー内で，CO_2が均一濃度になることなく，燃焼部分で濃度が高くなったと思われる。したがって，理論消火時間を大きく下回わる結果となったのであろう。

項目(3)の燃焼面積と消火時間の関係は，一見して消火は濃度に依存するから燃焼面積にはよらないように思えるが。実際には**Fig.3** のようになった。これはCO_2濃度の場所的変動が大きく，燃焼面積が大きくなるほど消火濃度以上のCO_2が燃焼部を完全に覆いきる可能性が小さくなり，そのため消火時間は燃焼面積とともにのびたものと思われる。

チャンバーの scale effect については，前節でもふれたが，無次元量qt /Vと，q/Qで表わすと，チャンバーの scaleの如何にかかわらず，一つの曲線にまとめることができる。

気化式と直接式では**Fig. 9** から前者の方が効果的であることも前述のとおりである。これについて，後者は固体炭酸を含み冷却効果が考えられるが，それよりも前者のガス濃度としての貢献度の方が大きいためと思われる。しかし，q/Qが0.5程度になると両者の差がほとんどなくなるのは，直接式の場合，固体炭酸を含むため，放出口からの飛程が大きく，吹消作用を新たにもたらすのではなかろうか。

また，直接式でファンの換気能力を同一にして，扉開放と閉鎖とを比較した場合，**Table 3** から後者の方がもちろん効果があるが，扉を閉鎖した場合でも隙間からの空気の流入は多少あるので，実際に同一の換気速度にして比較した場合でさえも，扉閉鎖の方が消火効果が多少大きいようである。これは扉閉鎖の場合，空気はチャンバーの隙間から入るため，扉開放の場合と流動およびCO_2との混合の現象が異なるためと思われる。すなわち隙間から入った空気は放出されたCO_2を希釈することなく壁面にそってダクトに吸込まれたのであろう。

Table 3 Relation between ability of ventilation, rate of ventilation, rate of CO_2 application and extinction time

Ability of ventilation	Rate of ventilation	rate of CO_2 application	Extinction time
3.0×10^4 l/min	1.85×10^4 l/min	1.17×10^4 l/min	1.5 sec.
3.0×10^4	1.33×10^4	6.55×10^3	4.0
3.0×10^4	1.03×10^4	3.55×10^3	13.0
3.0×10^4	9.29×10^3	2.54×10^3	17.5
3.0×10^4	8.54×10^3	1.79×10^3	20.0
6.0×10^4	8.54×10^3	3.55×10^3	16.0
1.5×10^4	6.30×10^3	3.55×10^3	11.0

気化式，直接式のいずれの場合も，実際の消火においては，q/Qを0.5程度にとるのが最善と考えられる。その理由は，**Fig.9** の曲線で，$q/Q>0.5$ではCO_2の必要量にほとんど差がない。通常の建造物の場合には，q/Qが大きくてもさしつかえなく，むしろ好ましいのであるが，アイソトープフードの場合にはq/Qをあまり1に近づけると開口部から逆流による汚染の問題を生じるおそれがある。一方，q/Qを0.5より少さくとるとCO_2必要量が大きくなり好ましくないと同時に，消火し難くなる危険性もでてくる。$q/Q=0.5$のときCO_2必要量が容器の⅕と著しく小さいのは，チャンバーの下層部だけに重点を置いた局所放出に近い放出だからである。なお，上記実験結果は比較的小規模な燃焼面積についてのものであるので実際的場合として床面全

体にビニルシート，ペーパーシート，n－ヘキサンを混在させた状態での火災の消火実験を行なってみたが，q/Qが0.5程度で確実に消火した。そこで規模の大きな火災に対して，多少の消火時間の伸びはあるにしても上記結果を適用しておおむねさしつかえないと思う。

6．結　論

結論として次の五項目を挙げることができる。

1．換気状態でも初期小規模火災のCO_2消火は可能ある。

2．消火に要するCO_2量がFig. 9よりからり，設計への参考資料が得られた。すなわち，CO_2放出速度と換気速度の比q/Qを約0.5にとるのが適当でそのときのCO_2の必要量はチャンバー容積の⅕である。

3．消火は扉を閉鎖することが可能なときは閉鎖した方が消火効果が大きい。

4．放出口の最適位置は，前面下すみ2点である。

5．直接および気化両放出方式の優劣の差は，最適放出条件ではほとんどない。

終りに本研究に際して，いろいろと御援助をいただいた能美防災株式会社の逸見氏，高圧ガス工業株式会社の森，辰己，南谷の各氏ち深く感謝の意を表する。

Fire Extinguishing Measures for Radioisotope Facilities

(1) Extinguishing Effect of Carbon Dioxide on Liquid Fires in Hoods

(Abstract)

Tokio Morikawa, Hirohisa Shimada and Tadao Moriya

(Received December 1, 1969)

The purpose of this study is to develope the method of extinguishing fires in radio isotope facilities.

In the present report, the study of carbon dioxide extinguishment of the liquid fires in radioisotope handling hoods is presented.

Carbon dioxide is usually applied as extinguishant for the fires in an enclosure only when not ventilated.

But, for the fire in a hood, it must be applied under the ventilating condition, to avoid radioactive contamination of the atmosphere surrounding the hood.

First of all, it was made sure by some experiments that the extinguishing method using carbon dioxide is applicable for extinguishing the fires of this kind.

Secondly, experiments were carried out to see how much carbon dioxide is required to extinguish the fires in the hoods of different scales and different opening areas, changing the rate of carbon dioxide application, the rate of ventilation and means of carbondioxide discharge.

The following results were obtained. (1) The extinction time increases with the rate of ventilation and decreases with the rate of CO_2 application in both cases of the discharge methods, one being "vaporized discharge" and the other "direct discharge". In the former case, carbon dioxide is discharged in the form of gas and in the latter case it is discharged directly from the CO_2 sylinder, so it was in the form of the mixture of gas and solid. The patterns of the curves in the both discharge methods are similar. (**Fig. 4—8**) (2) The concentration of carbon dioxide is generally higher in the upper region than in the lower region of the hood. (**Fig. 2**) (3) The dimensionless relations between the rate of carbon dioxide application q/Q and the amount of carbon dioxide required for extinguishing the fires qt/V were obtained from all the data, where q is the rate of carbon dioxide application, Q the rate of ventilation, t_E the extinction time, and V the volume of the hood. (**Fig. 9**) The most suitable value of q/Q is 0.5 for extinguishing the fire. The amount of carbon dioxide required is one fifth as much as the volume of hood. It is very small, despite of the hood being ventilated during the experiments. The minimum carbon dioxide concentration of the extinction limit is known as 29%, when n-Hexan is used as the fuel. It may be considered that our result of smaller amount of carbon dioxide for extinguishment is perhaps due mainly to the local application.

水噴霧による液体燃料火災の消火

中久喜 厚・高橋正一

(昭和44年12月24日受理)

1. まえがき

密閉室内の火災の消火には水噴霧が非常に有効であることが知られ，最近非常に多く使用されるようになった。液体燃料の火災でも条件次第では水噴霧によって非常によく消火されることが知られているが，その消火の機構については十分知られていない。円筒容器内の液体燃料火災の上方から水噴霧を放出させた場合の消火については既にいくつかの研究報告がある。[1~8] これまでの研究で消火の機構とされているものには，高沸点の液体については水噴霧により液面が燃焼点以下に冷却されること，[2] また揮発性液体については炎内または容器壁で水蒸気が発生し，その水蒸気によって炎が冷却されるか，[4,8] 蒸気層がもはや燃焼できない程度に希釈されること[3,8] などである。しかし，これらの要因だけで消火を完全に説明できるかどうかについては，実験的にもまだ疑問の点が多い。水噴霧内の伴走空気が消火に寄与することを述べた例もあるが，[3,5] これについては深く検討されなかった。我々は円筒容器内の液体燃料火災の真上から風だけを送って吹き消す実験を別個に行ない，水噴霧消火実験の結果と比較し，水噴霧内の伴走空気による吹き消し効果をしらべた。

水噴霧を円筒容器内の液体燃料火災の真上から適用して消火する場合には，上記の水噴霧の蒸発と冷却のほかに吹き消し効果が大きく作用するものであること，および液体燃料の種類によってどのような要因の組合せで消火されるものであるかを述べる。本報告では吹き消しと水噴霧による消火の2項目に大別して説明する。

2. 液体燃料

吹き消し，水噴霧消火実験に使用した燃料は Table 1 のとおりである。説明の便宜上，これらの燃料を Table 1 のように3種類に分けることにした。消火の傾向が同じになるものを同一種類にまとめたわけであるが，必ずしも Table 1 のように判然と区別の付けにくい場合もある。今後特に断わらないかぎり，液体の種別で消火の傾向などを表わすことにする。引火点が室温以上のものにはガソリンを点火剤として使用した。n－ブタノール，o－キシレンなどの点火にはガソリンの極少量を使用した。メタノール水溶液についても吹き消し，水噴霧消火実験を行なったが，濃度30vol.%以下のときは，やはりガソリンの極少量を点火剤に用いた。点火剤を用いたときの最小予燃時間を軽油，白灯油の場合1.5分，そのほかは0.5分とした。

Table 1　Classification of liquid fuels

Class	Fuel	Specific Gravity	Flash Point (℃)	Distillation I.B.P. (℃)	Distillation 50 % (℃)	Distillation F.B.P. (℃)
1 st	Gasoline	0.732	−43	32.5	92	185.5
	n-Hexane, Benzol Cyclohexane, Ether					
2 nd	Gas oil	0.835	70	187		349
	Kerosene	0.790	56	180	207	254
	B Heavy oil, n-Butanol Isoamyl Alcohol, o-Xylene					
3 rd	Methanol, Ethanol, n-Propanol Dioxane, Acetone					

3. 燃 焼 容 器

使用した燃焼容器は **Table 2** に示すような円筒形のもの11種類と後述する直方体容器1種類である。今後これらの容器を表わすのに，円筒形で内径 115 mm，高さ80mmである場合に115$^{\phi}$×80と mm単位で表わすことにする。

Table 2 Dimensions of combustion vessels

Material	Inner Radius (mm)	Height (mm)	Wall Thickness (mm)
Steel	35	300	1
	87	450	1
	115	350, 80	0.5
	300	300, 80, 50	4
	500	300	4
	700	300, 80	4
	1100	300	4

4. 吹 き 消 し

4.1 実　　験

小型通風機の吹出口に内径50mm，長さ1mの鋼製パイプを取り付け，その先端から真下にある容器内の液体燃料火災に送風し吹き消す実験を行なった。通風機は出力約0.1PSのシロッコファンである。風速はパイプの先端（吹出口）からの距離を調節することで変化させた。吹出口から一定の距離における風速は**Fig.1**のような内径 105 mm，長さ1mのダクトの先にピラム

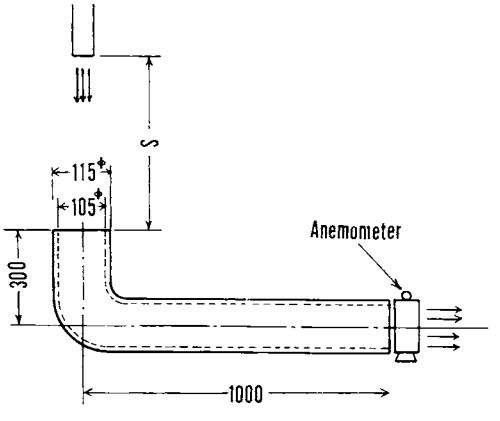


Fig.1. Tube to measure the velocity of the wind

風速計を置いて測定した。風洞でダクト内における圧力損失をしらべ，その結果から風速を補正した。通風機の容量が小さいため，吹き消し実験ではほとんど直径 115 mmの燃焼容器が使用された。今後特に断わらない限りこの容器を使用しているものとする。吹き消し実験で利用できた最高の風速は 5 m/see であった。実験結果は送風開始から消火するまでの時間すなわち消火時間で整理した。

容器内の液体燃料火災の実験には次の2方式がある。

(1) 液面高一定方式　燃焼中，液体を外部から補給し容器内の液面の高さを常に一定にする。

(2) 無補給式　容器内に貯わえられた一定量の液体を外部から補給することなく燃焼させる。

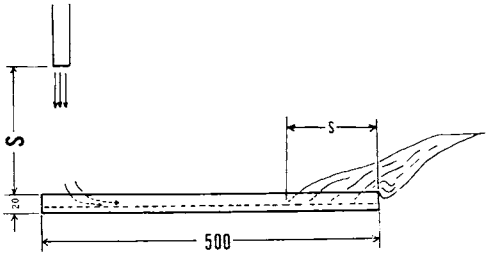


Fig.2. Diagram of the test of blow-off of the liquid fire in the open rectangular parallelpiped vessel

消火実験では無補給式で行なわれるのが普通であり，我々もその方法にしたがった。液面の容器上縁からの距離 h mmや点火から送風開始までの時間すなわち予燃焼時間を変化させて消火実験しそれらの消火に及ぼす影響をしらべた。**Fig.2** のような内のり巾40mm，長さ

500mm, 深さ20mmの鋼製容器に液体を入れて燃焼させ，容器の一方の端の真上から風を送る実験も行なった。円筒容器の周囲を水冷したときの吹き消しはどうなるかも，容器の外壁面を上縁近くまで水冷した場合について実験を行なった。

4.2 結　　果

4.2.1 吹き消しの形式　液体燃料火災の真上から割合

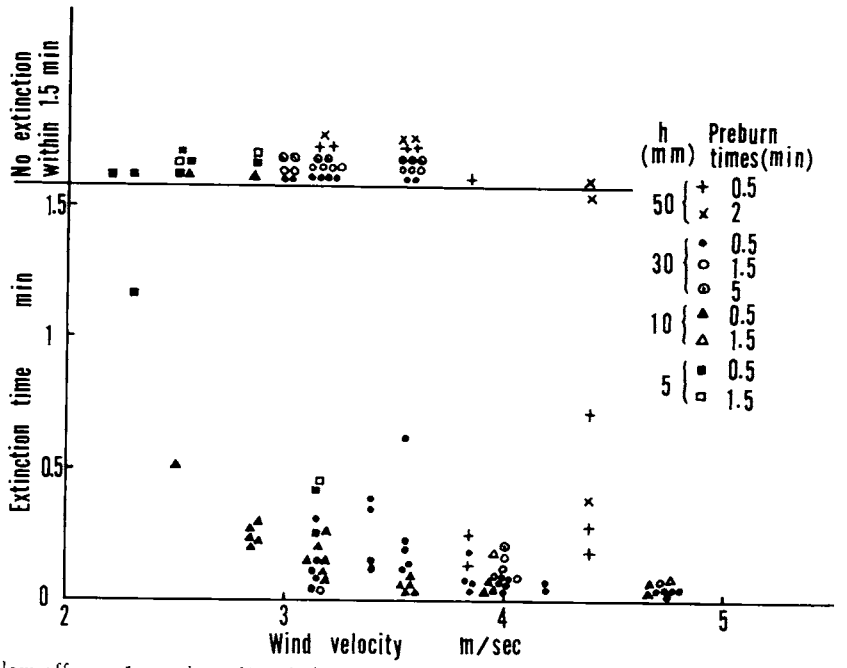


Fig. 3 a Blow-off ——1 st class liquid (gasoline). The blow-off tests reported in Fig. 3-7 were carried out exclusively using the vessel 115 mm in diameter.

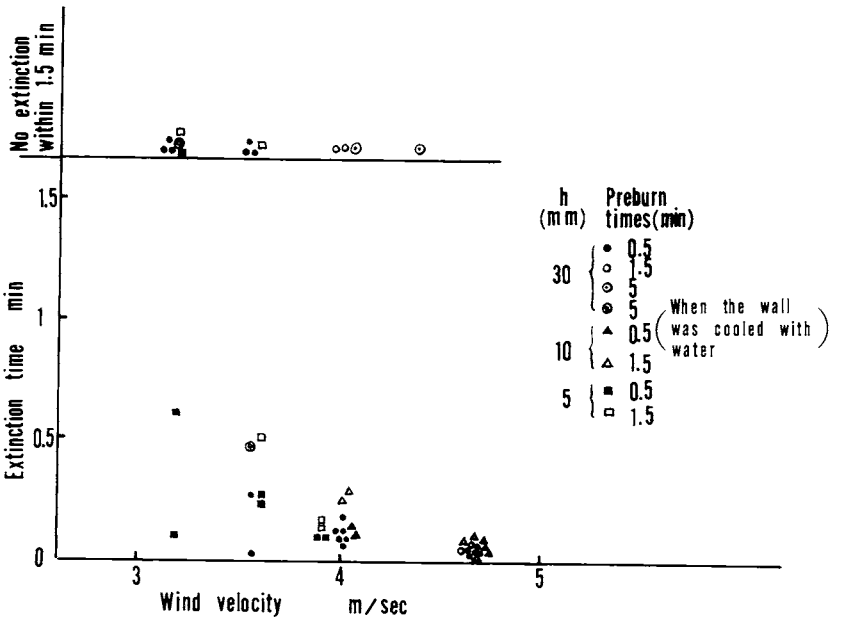


Fig. 3 b Blow-off——1 st class liquid (benzol)

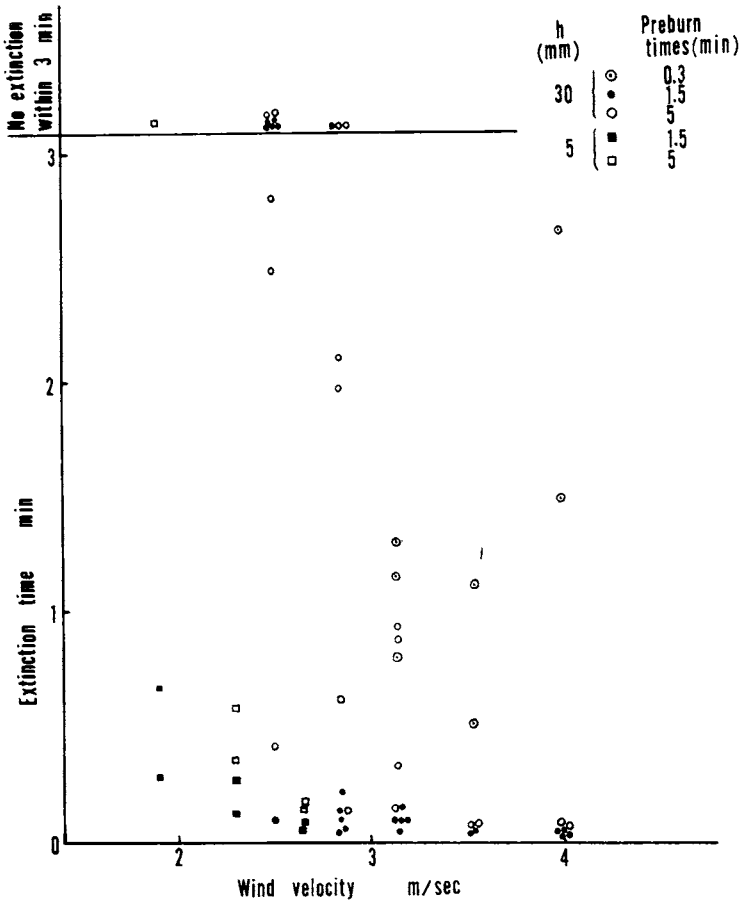


Fig. 4a Blow-off——2nd class liquid(kerosene)

に整流された風を送ると，予想外に低い風速で炎は吹き消される。第1類の液体すなわちガソリン，ベンゾールについての吹き消し実験の結果はそれぞれFig. 3のa，bのとおりである。消火時間を風速に対して図示してある。図中の一つの点は一つの実験に対応する。これらの液体はすべてある一定の風速以下で急に消えなくなる傾向にある。hが30mmで，予燃時間が0.5分のとき，ガソリンは風速3.0m/see，ベンゾールは3.3 m/seeで全然消えなくなる。第2類の液体のうち，白灯油，n－ブタノール，イソアミル・アルコールについての実験結果はそれぞれFig. 4のa，b，cに示されている。これらの燃料は軽油と同じく，[10] hが30mm位で予燃時間が短かいとき，Fig. 5に示されるように炎が容器の中央部では消滅し，容器の縁で空気の流れに沿って激しく燃えるようになる。このような炎を安定な炎（Stable flame）とよぶことにする。第3類の液体でもhが大きく予燃時間の短かいときに安定な炎を生ずる。アセトン，エタノール，ジオキサンの実験結

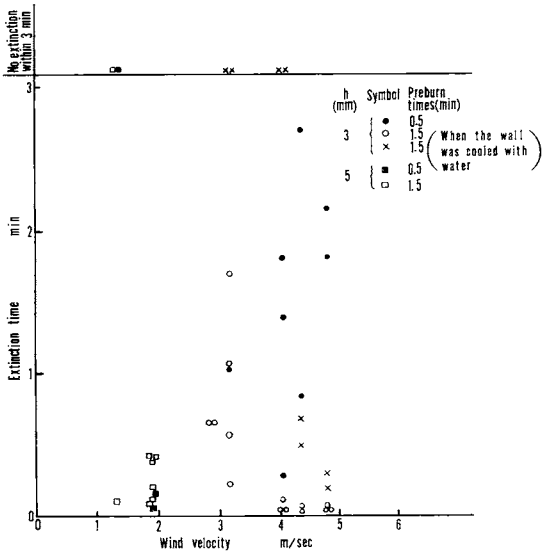


Fig. 4b Blow-off——2nd class liquid(n-butanol)

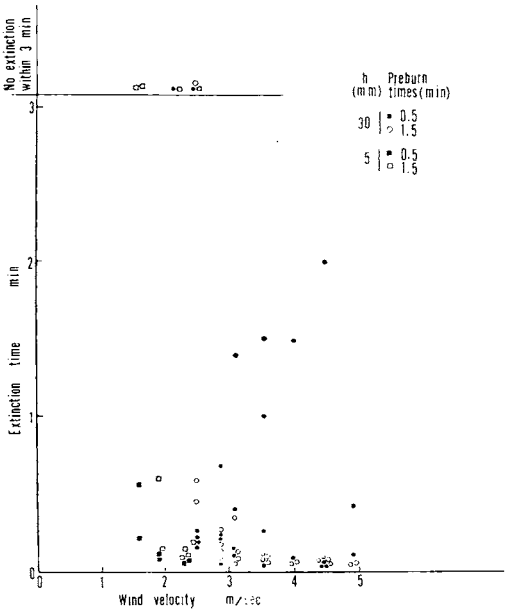


Fig. 4c Blow-off——2nd class liquid (isoamyl alcohol)

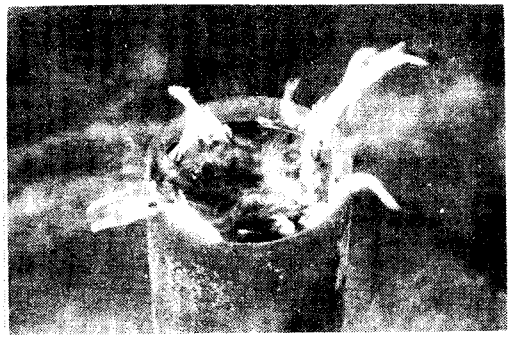


Fig. 5. Stable flame (gas oil)

果をそれぞれFig. 6のa，b，cに示す。安定な炎ができると一般に容易に消火しない。しかし，容器中央部のあらわになった液面が空気によって冷却されて発生蒸気量が減少し，炎は次第に小さくなり，有限の時間で消えることが多い。o-キシレンの実験結果をFig. 6dに示すが，傾向としては第2類よりは第1類の液体に似ている。

4.2.2 液体燃料火災において定常状態に達するまでの時間（t_{st}）

吹き消し実験は予燃時間5分位の範囲までで行なったが，それ以上予燃時間を長くしても，特に消火時間に対する影響はみられなかった。液体燃料火災におい

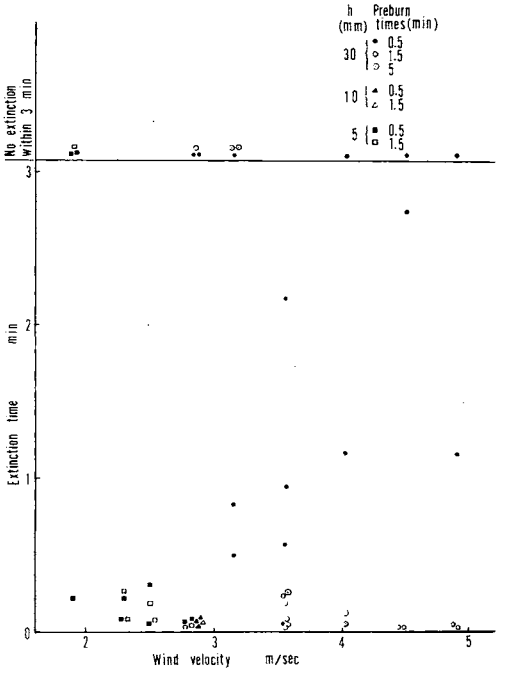


Fig. 6b Blow-off—3rd class liquid (ethanol)

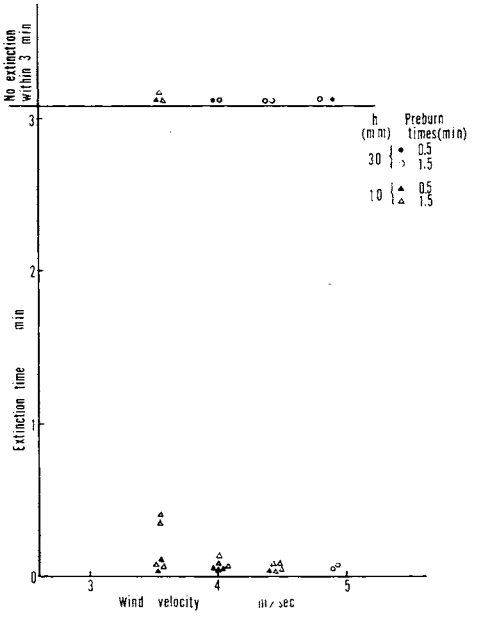


Fig. 6c Blow-off—3rd class liquid (dioxane)

て果してどの位の時間で定常状態に達するものなのかをしらべてみた。t_{st}を求めるのに無補給式では液内の鉛直下方向の温度分布が定常になるまでの時間を測定することにより求めた。液面高一定方式の場合には燃

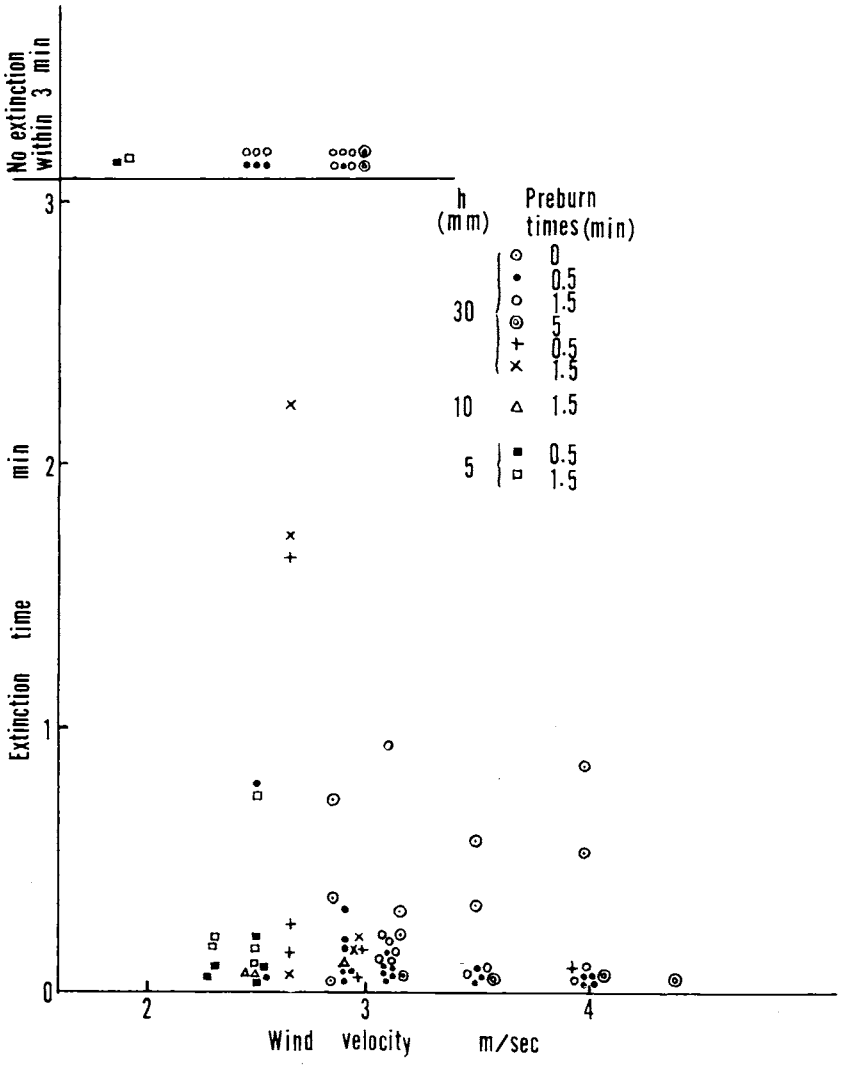


Fig. 6a Blow-off—3 rd class liquid (acetone)

焼速度の時間による変化からt_{st}を求めた。液面高一定方式の燃焼実験から求めたt_{st}をTable 3に示す。無補給式でも同表中のt_{st}に相当する時間でほぼ定常状態に達することが知られる。[10] t_{st}は液体の種類，容器の形状・寸法などに依存する。メタノールなどの場合のt_{st}は小さいが，軽油，ベンゾールなどの場合のt_{st}は大きい。また容器の肉厚が厚くなるとt_{st}は増大し，容器の外壁面を水冷したり，容器の底が浅いときにはt_{st}は小さくなる。[9] Table 3でも分るようにt_{st}は一般に非常に大きい。

4.2.3 蒸　気　層

炎の形は液体の種類，容器の大きさと肉厚，液面高，点火後の時間などの影響をうける。115$^{\phi}$×350の容器で無補給式で燃焼させた場合の炎の形は次の通りである。第1類の液体では，hが30mm位の深さでも点火後直ぐに容器縁に近いところで層流になり，時間が経過しても層流部分の長さはそれほど変化しない。また燃焼速度の大きい液体ほど層流部分は長くなる。すなわち蒸気層は厚くなる。軽油の場合，hが10mm位では容器縁上に層流部分を生ずるが，hが30mm位では層流部分がなくなる。メタノールも液面が$h=5$位のときには容器縁上に層流部を生ずるが，液面が多少これより下ると乱流炎となり，同じhでの炎の乱れ方は軽油の場合より大きい。炎の形または蒸気層の厚さ，およびそれらの時間やhによる変化は液体の種別が同じであれば，ほぼ等しくなる。しかし，第2類のo－キシレ

ンは蒸気層の厚くなる点で第1類の液体と似ている。容器の外壁面を縁近くまで水冷した場合の炎の形をしらべた。h =30の場合，第2，3類の液体の炎は液体の壁面に接する部分から現われるようになり，壁面近傍の蒸気層の厚さは非常に減少する。時間が経過してもこの状態は変化せず，水冷しない場合とは全く異な

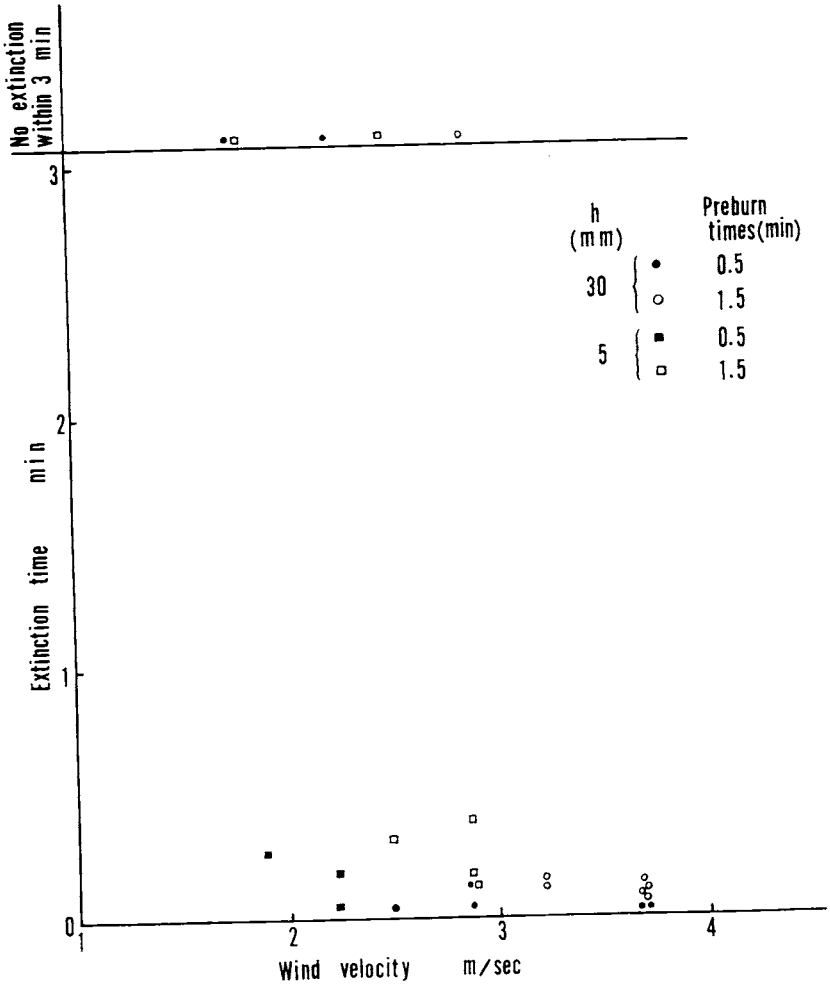


Fig. 6d Blow-off—3 rd class liquid (o-xylene)

Table 3 t_{st} of some liquids which were determined from the measurement of the change of burning rate with time at the constant level of the liquid surface (min).

Vessel	h (mm)	Liquid			
		Gasoline	Benzol	Gas oil	Methanol
115$^{\phi}$×350	30	25	40	35	15
300$^{\phi}$×300	150	20		50	

る。ガソリンなどは容器縁上，これに近いところでの層流はなくなるが，液体が容器の壁面に接する部分より高いところまで蒸気層は存在する。

4.2.4 予燃時間の影響

第1類の液体はFig. 3のa，bからも分るとおり予燃時間が長くなるにつれて消えにくくなる。第2類の白灯油，n－ブタノール，イソアミル・アルコールはFig. 4のa，b，cに示されているように，予燃時間が短かいと軽油の場合[9]と同じく，安定な炎を生じ消えにくくなる。予燃時間が長くなると非常に消えやすくなる。例えばFig. 4bのn－ブタノールの場合，0.5分予燃では安定な炎を生じ消えにくいが，1.5分予燃では風速4 m/sec以上で短時間（5秒以内）で消えるようになる（今後短時間で消火すると書いたときには，5秒以内で消火する場合を表わすことにする）。o－キシレンは第1類の液体と同じく（Fig. 6d）予燃時間が長くなると消えにくくなる。第3類の液体もFig. 6a～cから分るように第2類とほぼ同じ傾向を示す。ただジオキサンの場合には，Fig. 6cでもみられるようにメタノール[10]同様ほかの液体燃料に比較し非常に消えにくい。これらの液体は液面全体が炎に包まれる扁平な炎（Flat flame）を生じ非常に消火しにくくなる。点火時から蒸気層の厚い第1類の液体は予燃時間が短かくてもh =30では安定な炎ができなかった。以上のことはあくまである一定風速以上でいえることである。

4.2.5 液面高の影響

液面が高くなると消えやすくなる。メタノールはh =30では風速5 m/seeまでの範囲で全然消火しなかったが，[10]h が小さくなると非常に消えやすくなる。ジオキサンもメタノール同様にh =30では容易に吹き消されないが，液面が高くなると簡単に消えることがFig. 6cから知られる。Fig. 3～6のどの場合でも，h =30, 10, 5の順に次第に消えやすくなっている。いま，30秒以内に確実に消火する風速を吹き消しの限界風速と名付けると，各種液体についてh =30, 10, 5の場合のそれはTable 4のようになる。第1類の液体の限界風速は液面高の影響を余り受けないが，第2，3類の液体の場合には液面高の影響を大きく受ける。第1類の液体でも液面が高い場合（h が5 mm位）には，限界風速以上でやはり安定な炎を生ずるが，この場合比較的短かい時間で消えてしまう。我々の実験したすべての液体についてh =100(mm) のように液面の容器縁からの距離が非常に長いと，風速をどんなに大きくしても消火しなかった。

Table 4 Critical wind speeds (v_c) to blow off liquid fires at different levels (h) of the liquid surfaee

Liquid	Preburn times (min)	U_c (m/sec)		
		h (mm)		
		30	10	5
Gasoline	0.5	3.7	2.9	2.9
n-Hexane	0.5	3.3		2.9
Benzol	0.5	3.6		3.3
Gas oil	1.5	4.5	2.0	1.4
	5.0	2.9	2.5	2.2
Kerosene	1.5	2.9		1.6
n-Butanol	1.5	2.7		1.6
Isoamyl Alcohol	1.5	2.5		1.7
o-Xylene	1.5	3.0		2.6
Acetone	1.5	3.2		2.2
Dioxane	1.5	>5.0	3.6	3.6
Ethanol	1.5	3.0		2.1
Methanol	1.5	>5.0	5.0	2.7

4.2.6 容器壁外面を縁近くまで水冷した場合

第2，3類の液体燃料火災の吹き消しでは水冷しない場合の予燃時間が短かいときと同じように安定な炎を生じ消えにくくなる。Fig. 4bのn－ブタノールの例をみれば分る。しかし，第1類の液体では，Fig. 3bでもみられるようにかえって容易に消火するようになる。

4.2.7 送風後の炎の振動

通風機を廻し始めてから風が定常状態に達するまでに約2秒かかるので，2秒以上かかって消火する場合がほとんどである。一定の風速になってから送風した場合に瞬間的に消火する場合がありうるかどうかをしらべるために，送風管の吹出口に障害物をおき，風が定常状態に達してから障害物を急に取り除いて送風し消火する実験を行なってみた。瞬間的に消火する場合もあるが，大体2～3秒かかって消えるのが普通である。瞬間的に消火しない場合には，炎が激しく振動した後に消火する。n－ヘキサンおよびガソリン火災の吹き消しを16mmカメラで64コマ/secの速度で撮影した結果によると，炎が激しく振動した後に消える場合には，炎の形が周期的でない非常に複雑な変化をし，炎が液面から離れるようにみえてまた液面に戻ることがある。瞬間的に消える頻度の2～3秒以内振動した後に消える頻度の割合は液体の種類，予燃時間，液面高などによって異なる。第3類やn－ブタノール，軽油などは瞬間的に消える場合の方が多かったが，第1類の液体の場合に液温や容器壁の温度が高くなると，炎が激しく振動した後に消える場合の方が多かった。風速が小さくて消火時間が長くなる場合，炎の形の変動は非常に緩漫になる。

4.2.8 メタノール水溶液の吹き消し

メタノールは吹き消しにくいが，メタノールの水溶液で濃度が低くなると次第に消えやすくなる。初めの濃度が30，40，50vol.%の水溶液について実験した結果をFig. 7aに示す。初濃度の高い方が消えにくいが，風速の大きいところでは消火時間にそれほどの差はない。液体の総量から判断して消火時の濃度は初濃度とほとんど変化がない。容器内のメタノール水溶液の量を変化させて実験してみたがFig. 7bのように消火時間に対する液体量の影響はほとんどなかった。Fig. 7bには予燃時間を変化させたときの結果もでているが，予燃時間の長い場合の方が消えにくくなる。メタノール水溶液火災に送風した場合，安定な炎を生じ，容器壁面近くに残った炎は次第に小さくなり消える。これらの現象からメタノール水溶液の火災の消火には風に

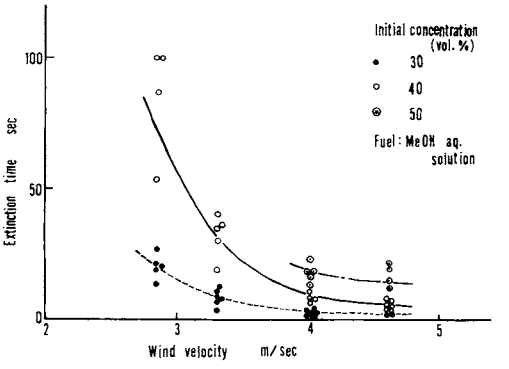


Fig. 7a. Blow-off of fires of methanol aq. solution ——— effect of the initiel concentration; t_p=2min; h =30

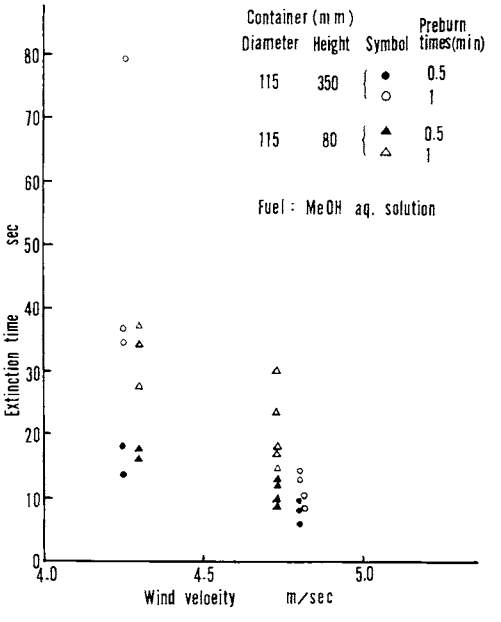


Fig. 7b. Blow-off of fires of methanol aq. solution —— effects of the initial quantity of the solution and the preburn time; h =30.

よる液面の冷却が関係していることが知られる。

4.2.9 風による液面の冷却をみる試験

円筒容器内の液体燃料火災に真上から風を送った場合には今まで述べてきたように結構よく消えたが，風を容器の斜上方からまたは横方向から送った場合には一般に風下の容器壁の両側に炎が残り，非常に消えにくくなる。Fig. 2のような直方体容器で風による液面の冷却をしらべる実験を行なったが，容器の長さ方向の斜上方からまたは真横から送風すると風上の容器壁

が風の流れを妨げ，容器内の液体燃料火災に対する影響は非常に複雑になるので，図のように真上から送風する方法を採用した。容器のどの部分の真上から送風しても消火の過程は同じであるが，我々は容器の一隅の真上から送風した。吹出口真下の液面上の風速が5.7 m/secで液面の容器上縁からの距離hが10mmのとき，ガソリン，ベンゾール，軽油，n－ブタノール，n－プロパノールについて予燃を短かくして（10秒以内）送風すると比較的短かい時間で消える。予燃時間が長いと(1.5分)，送風した瞬間液面全体で炎は非常に大きくなり，その直後急激に小さくなり風上の液面では炎が消滅し，風下の壁面にわずかに残る程度となり，さらに炎は小さくなって消える。この現象は風により風上の液面で発生する可燃蒸気が空気により薄められ炎が消滅し，液面が冷却されて風下に送られる可燃蒸気の量が減少し炎が小さくなるというように風による液面の冷却と発生可燃蒸気の希釈が同時に作用して消火するものと考えられる。この場合でもhを小さくすると消えやすくなる。風速を小さくすると，液面上にFig. 2のような炎が長さsだけ残るようになる。メタノール，ジオキサンは比較的大きな風速でも，sは比較的大きな一定の値を保ち全然消火しなかった。

4.2.10 容器の大きさの影響

直径87mm，35mmの容器についても吹き消し実験を行なってみたが，容器の直径が小さくなると次第に吹き消えやすくなるのがみとめられた。

4.3 考　　察

いままで述べてきた実験結果から，吹き消しにおける消火の傾向を二大別することができる。すなわち，第1類の液体や予燃時間が長かったり液面が高いときの第2，3類の液体のように，ある一定の風速以上で短時間で消火し，この風速以下で非常に消えにくくなる場合と，第2，3類の液体で予燃時間が短かいときや液面が比較的深いときのように，安定な炎を生じて全然消えないか，消えても相当長い時間かかって消える場合である（今後消火の傾向とよぶときには以上のような消火の形式のほかに，消火の限界風速の大きさを含めた傾向を表わすことにする。）。

燃焼が定常に達するまでには相当長い時間を要することが知られたが，吹き消し実験の結果は予燃時間をそれほど長くとらなくても，消火の傾向を求めることができた。後述するように吹き消し実験では蒸気層の厚さが問題になることが多いので，燃焼速度が速くなり蒸気層がある一定の厚さに達すれば消火の傾向はほぼ一定してくるものと考えられる。

吹き消しの傾向は液体燃料の種類によって異なる。Table 4に示されるように，第1類の液体の吹き消し限界風速は大きく，燃焼速度が速く蒸気層の厚い液体ほど大きくなる。この風速以上では，送風後短時間(5秒以内）で消火し，液面高および予燃時間の影響は少ない。これは蒸気層の厚さがこれらの影響を余り受けないからであろう。第2，3類の液体の吹き消し限界風速は一般に小さい。予燃時間が短かいときとか，液面が深いときとか，容器の外壁面を水冷したときには，安定な炎を生じ容易に消えなくなる。予燃時間が長くなったり液面が浅くなると，蒸気層が厚くなり，これがある一定の厚さに達すると短時間で消えるようになる。安定な炎を生ずると，全然消えない場合もあるが，有限の時間で消える場合の方が多い。後者の場合，炎は風によって容器壁近くに押し寄せられて小さくなり炎から液面へのふく射熱は減少し，容器中心部の炎のない液面は風によって冷却されて発生蒸気量は減少し，空気による蒸気の希釈が加わり炎は次第に小さくなり消える。送風した直後に炎が激しく振動する現象が第1類の液体では特に多く観察された。炎が激しく振動する場合には短時間で消火するが，これは蒸気層内の蒸気が空気によって液面全体に亘って同時希釈される機会が振動のために多くなるからであろう。蒸気層がある一定の厚さ以上になれば，液体の種類に無関係に限界風速以上で液面上の蒸気の同時希釈が行なわれるわけであるが，そのための限界風速は蒸気層が厚いほど大きくなる。メタノールとジオキサンは我々の実験に使用した液体のうちでは例外で，比較的大きい風速でも炎は抑圧されず液面全体をおおう扁平な形となり，安定な炎も，空気による液面全体に亘る同時希釈も起こりにくい。これらの液体の水溶液は濃度の低いほど消えやすくなり安定な炎を生じ，風による炎の抑圧，液面の冷却，発生可燃蒸気の希釈が同時に行なわれ，有限の時間で炎は消滅する。

5．水噴霧による消火

5.1 実験の概要

水噴霧による消火実験を行なうに当たって，使用する各種水噴霧の性質を知っておく必要がある。水噴霧の諸性質のうち特に消火に関係すると考えられる4つの性質すなわち粒の大きさ，粒の速度，散水量（単位面積当り単位時間当りの落下水量)，粒に伴なって流れ

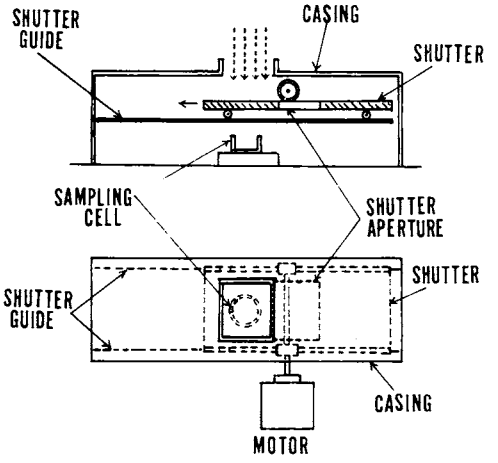


Fig. 8. Diagram of droplet sampling cell and shutter

る空気（伴走空気）の速度を測定した。粒の粗い場合の粒の大きさと速度は高速度カメラによってごく接近した距離（80cm）で撮影した。粒の細かい場合には，Fig. 8のような捕集装置で噴霧粒を油中に捕え，これを顕微鏡写真装置で撮影することにより大きさを求め，速度は計算により求めた。散水量は床面上にノズル直下から放射状に一定間隔におかれた測水容器に水滴を受けて測った。伴走風速はFig. 1と同じ要領で測定した。水噴霧の大部分は曲管部の壁面に付着し，ダクトの先端から水流となって床面に落下し，風速計には主として風だけが通過するようになっている。使用したノズルはTable 5に示されるように渦巻式5種，衝突式2種，羽根回転式1種である。No. 20のノズルは孔径の異なるノズルチップを交換して使用できるようになっている。各種ノズルの水霧霧のTable 5以外の性

Table 5. Some properties of nozzles

Type of Nozzle	Nozzle No.	Diameter (mm)	Number of nozzle hole	Flow rate (ℓ/min) Pressure at nozzle (kg/cm²) 5	9
Swirl	1	7.2	1	46.5	60
	2	10.8	1	85	113
	3	8.0	1	54	69
	8	6.5	1	52	67
	20	2.7	1		10
		6.4	1	28	35
Impinging Jet	15	2.0	18	79	105
	16	1.0	12	15	20.5
Rotating disk	4	10.3	1	57	74

質については後で述べる。No. 1，2，3，4，8のノズルは市販の固定消火装置用ノズルである。

水噴霧による消火実験は，容器内の火災に真上に取り付けられた1個のノズルから水噴霧を鉛直下方向に放出させて行なった。ノズル直前の水圧は15kg/cm²までの範囲で変化させた。ノズルは床面より2.7 mの高さに設置し，ノズル先端と容器上縁との距離は2.4 mになるようにした。直径300mm以上の容器での消火実験では，石油類など水に溶けない液体の場合には主として高さ300mmの容器を使用し，第3類の水溶性液体の場合には高さ80mmの容器を使用した。また，水に溶けない液体の実験では，容器の底部に水を入れ，その上に約50mmの厚さに液体燃料をおいた。水噴霧放出前の予燃時間が長いときは適宜この燃料の層を厚くした。各種容器内の液体の燃焼は無補給式で行ない，点火から水噴霧放出までの予燃時間やん を種々変化させて，水噴霧放出から消火に至るまでの時間すなわち消火時間を測定した。孔径の小さいノズルの場合，電磁バルブからノズルの先端までの間に若干の距離があるので，水流が定常状態に達するまでに割合長い時間を要する。そのため，Fig. 9のような漏斗状の水受けを水流が定常になるまでノズルの真下において，放出される水噴

Fig. 9. Funnel-shaped spray collecting apparatus to screen a fire from the spray

霧粒子のすべてがこの水受けの下に接続したパイプを通って流れるようにしておき，水流が定常になった後，下のハンドルを横に引いて水噴霧が燃焼液面にかかるようにした。水噴霧を液体燃料火災の真上からばかりでなく，斜上方や真横の方向から放出させた場合の消火実験も行なった。水溶性液体の火災は水噴霧によってある一定の濃度に希釈されてから消える場合が多い。浮秤式比重計で消火の瞬間における溶液全体の平均の比重を測ることにより平均濃度を求めた。

5.2 結　　果

5.2.1 水噴霧の性質

(1) **散水量分布**　ノズル軸を中心としてその周囲の床面上への散水量分布には**Fig.14** の上図にみられるように種々の型がある。渦巻式ノズルの散水量分布の1例を**Fig.10** に示す。圧力が高くなると散水角度が次第に小さくなる。我々の使用した渦巻式ノズルはすべてノズル内部のコアの周囲に3個のら旋流を与える孔があり，中心に1個の比較的小さな孔のある型である。したがって，ノズル周囲の方向によって散水量分布が異なり，コアの周囲の3個の孔に対応して，ノズル軸からその周囲の3方向に対して散水量が多い。**Fig.10** の散水量分布曲線はノズル軸周囲の8方向に対して床面上に採取された散水量を平均した値である。衝突式ノズルでも散水量分布に方向性があるが，我々の使用した衝突式ノズルは周囲に孔の数が多いために割合方向性が少なかった。しかし，孔の数とその配置によっては方向性が強くでる。羽根回転式のノズルNo. 4 では散水量分布に方向性がなかった。

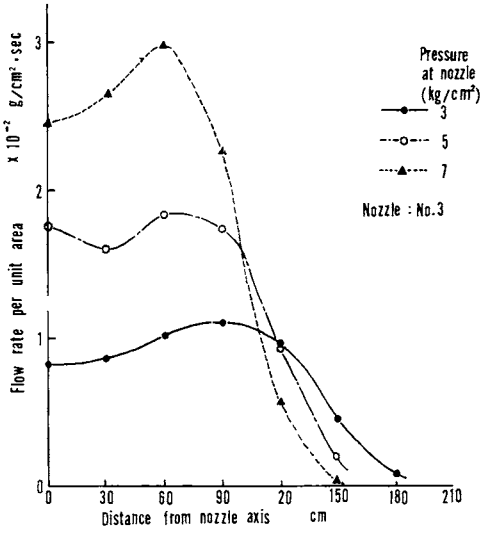


Fig.10. Spray pattern on plane 2.6 m below the nozzle; nozzle: No. 3.

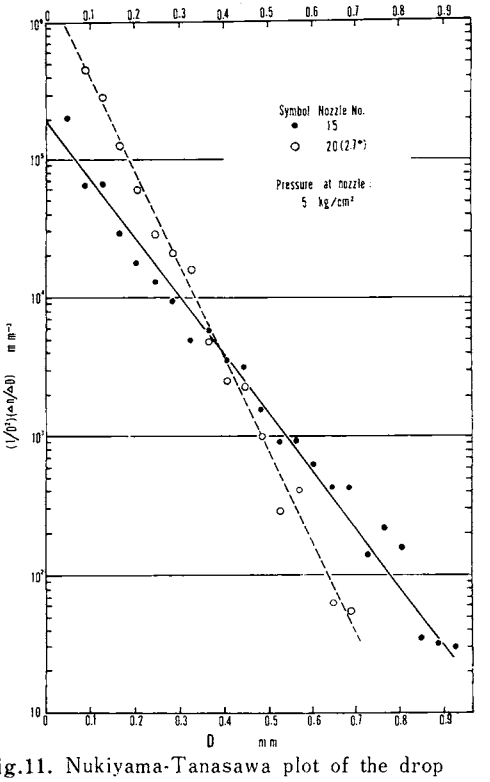


Fig.11. Nukiyama-Tanasawa plot of the drop size distribution

(2) **粒の大きさと速度**　噴霧粒の大きさを求めるために，油上に捕集する方法がよく使われるが，この方法では粒の運動量が大きいとき粒が油面に衝突したさいつぶれてしまい，[7,8,11] 正確な粒径分布を求めること

Table 6. Drop size of the spray

Type of nozzle	Nozzle No.	Diameter (mm)	Pressure at nozzle (kg/cm²)	$\bar{x}_{10}$* (mm)	$\bar{x}_{31}$** (mm)	$\bar{x}_{32}$*** (mm)	a	b**	Reference
Swirl	3	8.0	3	1.35	1.54	1.6	2	1	
	20	2.7	15	0.260	0.350	0.384	2	½(1)	
			5	0.144	0.264	0.237	2	1 (½)	
	20	6.4	15	0.098	0.149	0.164	2	1 (½)	
			5	0.145	0.210	0.228	2	1	
Impinging jet	15	1.5	9	0.624	0.372	0.406	2	1	
			5	0.322	0.474	0.518	2	1	
	16	1.0	13	0.148	0.243	0.273	2	1	
			3	0.283	0.325	0.370	2	1	
Circular hole		0.29	50			0.130	2	1	15
Centrifugal		3～6	1.3～2.5			0.365	4	½	16
Gas-atomizing		0.34				0.025	2	1	13, 15
Swirl		0.6	50			0.047	−0.5	1	15
Impinging jet		0.61 ～0.95	6～35			0.12 ～0.14	1	1	15

* Linear mean diameter $\bar{x}_{10}=\sum x_i \cdot \Delta n_i/\sum \Delta n_i$ where Δn_i is the number of droplets in the range of diameters $(x_i-\Delta x/2)$—$(x_i+\Delta x/2)$.

** Volume-diameter mean diameter $\bar{x}_{31}=(\sum x_i^3 \cdot \Delta n_i/\sum x_i \cdot \Delta n_i)^{1/2}$

*** Sauter mean diameter $\bar{x}_{32}=\sum x_i^3 \cdot \Delta n_i/\sum x_i^2 \cdot \Delta n_i$

** Rarely, b takes the value in the bracket.

はできない。粒径が約0.5mm以下のときは，我々のようにノズルから約2.5m下方で油上に捕集する場合，衝突によってつぶれることは考えられないから，最大粒径が0.5mm以下のときは油上捕集の方法を[11]，これより大きい粒が含まれるときは飛んでいるところを直接高速度カメラで撮影するようにした。噴霧粒は一般にノズル直下では細かく，ノズル直下から離れるにしたがい粗くなるが[6,12]，この傾向はノズルの種類に依存し，渦巻式では強く現われる。噴霧粒には粒径分布があるので，各種平均粒径を各種ノズルから噴出された噴霧について算出しTable 6に示した。ノズルNo. 3以外はノズル直下の噴霧粒を油上に捕集した結果である。圧力が高くなると平均粒径は多少細かくなるが，極端な相違はないようである。粒径分布を表わすのに種々の経験式が用いられるが，我々は抜山・棚沢氏によって提出された次式を使用した。[13,14]

$$dn/dD=nAD^a\exp(-BD^b) \quad \cdots\cdots\cdots(1)$$

nは粒数，Dは粒径(mm)，A，B，a，bは定数である。測定された粒径分布について$\log(dn/D^a \cdot dD)$をたて軸に，D^bを横軸にとって最も直線に近づいたときのa，bの値を求めた一例をFig.11に示す。各種水噴霧について求められたa，bの値をTable 6に示してある。同表中には既に報告されたa，bの値も比較のため示してある。我々の例では$a=2$，$b=1$となる例が圧倒的に多い。粒の粗いノズルNo. 3の場合に，高速度カメラ撮影によって粒の大きさと速度を測定したが，その両者の関係をFig.12に示す。測定点はノズル直下2mからさらに水平方向に1mはなれた点である。高速度カメラによって撮影された粒をFig.13に示す。いま

粒の運動に対する空気の抵抗にNewton式を仮定すると，

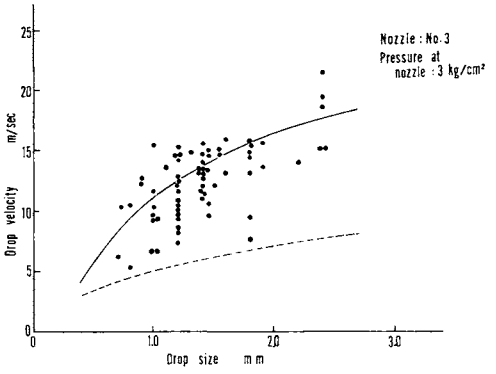


Fig. 12. Size and velocity of the droplet; real line: theoretical values calculated from eq. (2) under the assumption that the initial droplet velocity is equal to 24m/s where H is the pressure head at the nozzle; dashed line: terminal velocity calculated from eq. (3).

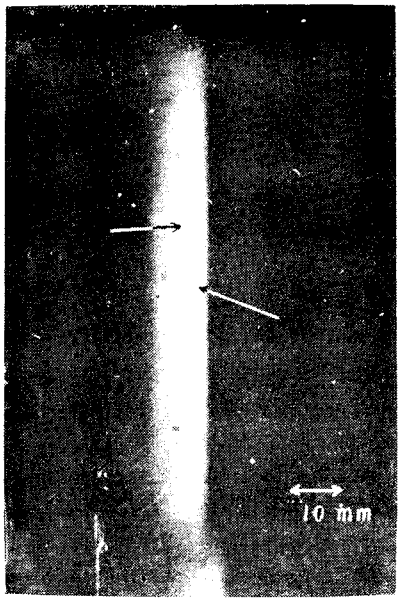


Fig.13. High speed photograph of spray drops moving downwards; film speed: 5900 frames/sec; nozzle pressure: 3 kg/cm²; nozzle: No. 3.

ノズルから真下の方向への粒の速度はノズルから噴出後 t 秒で次式のようになる。

$$v=v_t\left[\frac{v_o+v_t}{v_o-v_t}e^{kt}+1\right]\Big/\left[\frac{v_o+v_t}{v_o-v_t}e^{kt}-1\right]\cdots\cdots(2)$$

ここではv_oは粒のノズル出口での初速度，v_tは終速度である。kとv_tはそれぞれ次式で表わされる。

$$k=[3cg\rho'(\rho-\rho')/D\rho^2]^{1/2}$$
$$v_t=[4(\rho-\rho')Dg/3c\rho']^{1/2}\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots(3)$$

ここでρ，ρ'はそれぞれ水，空気の密度，cは空気による抵抗係数，gは重力の加速度である。いまHをノズル直前の圧力水頭として，v_oを24m/sとして，**Fig. 12**の測定点でも近似的に(2)式が適用できるものと仮定して計算した値が同図に実線で示してある。cの値には0.44をとった。同図の破線はv_tを示す。噴霧が細かいと，勿論(2)式は適用できない。また，ある程度粗い噴霧でも伴走風の影響を受け，(2)式の適用されない場合がでてくる。噴霧粒のうち特に細かい粒の終速度は伴走風速より一般に小さいので，伴走風速と同速度で運動する場合がある[4]。このノズルの実流量から，ノズル一杯に等しい流速で水が流れるとしたときの平均流速は，圧力3 kg/cm²で14.4m/secである。**Fig. 12**の結果では，粒径がある程度大きくなると14.4m/secを上回る速度になることは確かである。このことから，渦巻式ノズルでコアの中心に孔のないノズルのようにノズル出口部の水流の中に空隙[17-19]ができていないとしてもノズルの流速が周囲と中央部で大きく異なることが考えられる。

(3) 伴走風速　粒と空気との運動量交換により水噴霧内には空気の流れを生ずる。この伴走空気の総風量は放出されたときの噴霧粒の大きさ，速度，流量などに依存する。ノズルから2.4 m下方の水平面上での各種ノズルの風速分布を圧力7 kg/cm²の場合について測定した結果を**Fig. 14**に示す。散水量分布も比較のため示してある。一定点で測られる伴走風速には変動があり，また渦巻式ノズルではノズル軸から周囲の各方向に対して不均一な散水量分布に伴なう不均一な風速分布が観測された。したがって伴走風速はノズル直下で測られた多くの測定値の平均で表わすことにする。**Fig.14**の結果によると，渦巻式ノズルの場合，粒径が等しければ，ある任意の位置での風速はほぼ散水量に比例するようである。一般に風速はノズル軸上で最も大きくなり[20]，圧力とともに増大する。水噴霧内の風はその外周から導入されるが，ノズル先端でノズル軸と直角な平面を通して水噴霧に流入する風の速度分布は**Fig. 15**のようになる。ノズル直近で風速は最も大きい。ノズル軸から遠ざかるにしたがい風速は急激に低くなるが，ノズルから相当離れたところでも噴霧の全周に

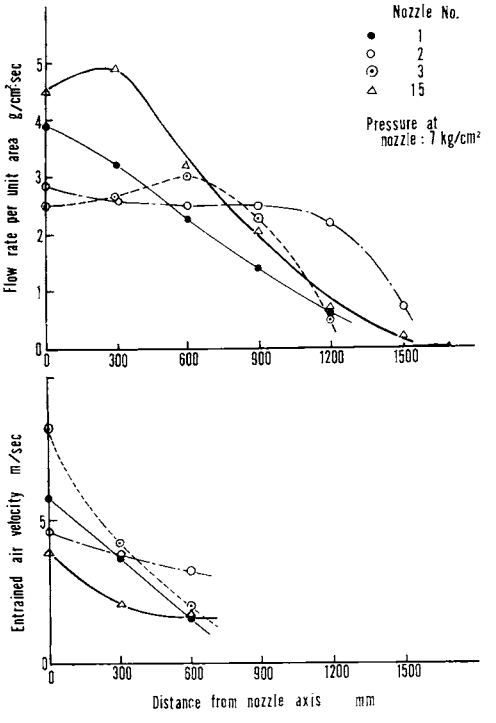


Fig. 14. Distribution of the flow rate of the spray and the mean entrained air velocity

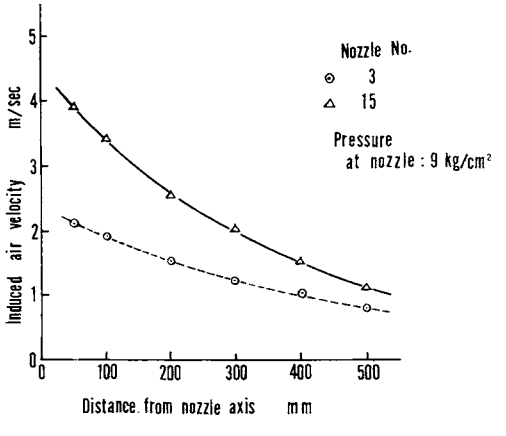


Fig. 15. Velocity of the wind induced into the spray through the plane perpendicular to the nozzle axis at the top of the nozzle

亘って微風速であるが噴霧に向う空気の流れが存在している。Fig.14, 15をみると，ノズルNo. 15の水噴霧はほかの渦巻式ノズルに比べ外部からの流入風量は大きいのに，ノズル真下の伴走風速は小さいが，ノズル直下から相当離れても風速は急には減少しない。

このノズルのように噴霧内での粒径分布がノズル軸からの距離にほぼ関係なく一様なときには，風速は散水面全体に一様に分布されるような傾向を示すようである。風速分布は周囲から，特にノズル直近で噴霧に流入する空気の慣性のためにノズル軸で最大になる傾向がある。風速分布はさらに水噴霧の散水角度，噴霧粒の大きさや密度の空間的な分布状態によっても影響される。水噴霧内の風速分布をFig.16のような無次元数で表わすと，その分布の形は，一種のノズルについて

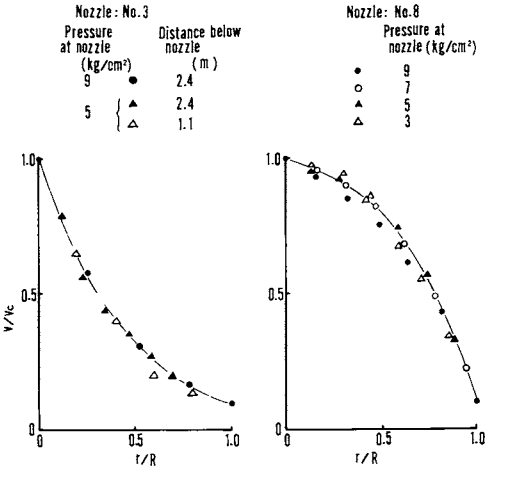


Fig. 16. Distribution of entrained air current plotted against the distance from the nozzle axis at different heights; nozzle: No. 3.

は，ノズルからの距離や圧力によってほとんど影響を受けない。図中のvはノズル軸からの距離rにおける風速である。また，風速がノズル軸における風速v_cの1/10になる点のノズル軸からの距離がRである。 水噴霧消火実験では直径30cmの容器が主として使われたので，ノズル直下におかれた30cm容器への平均散水量とノズル直下の伴走風速との関係を各種ノズルについて，次項以下の参考のためにFig. 17に示した。

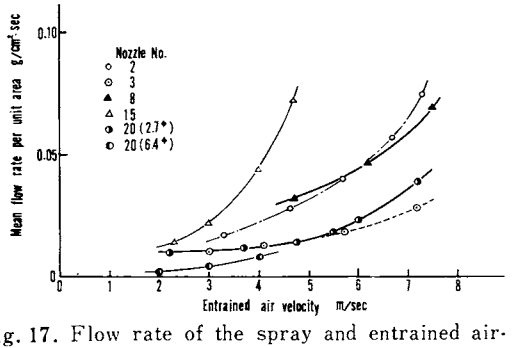


Fig. 17. Flow rate of the spray and entrained air-current at the liquid surface of the vessel 30 cm in diameter which is fixed right below the nozzle

5.2.2 水噴霧消火の形式

比較的に粒が粗く伴走風速の大きい水噴霧（ノズルNo. 3）を適用した場合の消火について述べる。軽油の火災に水噴霧を適用してから消火に至る過程は次の通りである。油面に水噴霧が到達すると同時に炎は瞬間的に非常に大きくなる。これは吹き消しでもみられる現象である。水噴霧内の伴走空気が蒸気層内に進入し，内部の可燃蒸気を一時に燃焼させるためと噴霧粒が油面に衝突し油をはね返す（Splashing）ためであろう。このように炎が大きくなった後に短時間で消えてしまう場合と吹き消しのところでも説明したように，ある一定の風速以上で安定な炎ができて容易に消えない場合の二通りを生ずる。安定な炎ができると消火時間は長くなるが，壁面近くに残った炎は次第に小さくなり，有限の時間で消える。同じ条件で実験しても，このように短時間で消火する場合と割合長い時間かかって消火する場合の二通りを生ずることは，既にRasbash氏によって灯油の場合について確かめられている。[3] 次に短時間で消火する場合についてであるが，瞬間的に消えてしまう場合と炎が激しく振動した後に消える場合とがある。予燃時間がある程度長くなると，油面，容器壁の温度が高くなり，水噴霧がこれらの部分に衝突して蒸発し，水蒸気による窒息消火もありうる。しかし，水噴霧のかかった瞬間に消火しないで，何回か炎が振動した後に消火する場合のあることは，吹き消しでもみられる現象である。容器径700mm，予燃時間2分，h ＝150の場合に，消火時間を噴出圧力に対して図示するとFig. 18のようになる。圧力が高くなると短時間で消える確率が大きくなる。ある圧力以下で急に消えにくくなる傾向がある。

ガソリン火災の消火は軽油のように消火時間が二つの範囲に分れることなく，Fig.19に示されるようにある圧力以上では短時間で，ある圧力以下で急に消えにくくなる傾向を示す。ガソリンの場合にも短時間で消える場合には，軽油の場合と同じく炎の振動する場合がある。

5.2.3 予燃時間の影響

第2，3類の液体は予燃時間を長くすると噴霧適用後短時間で消火する確率が大きくなる。軽油，B重油の容器径300mm，h ＝150での結果をそれぞれFig.20のa，bに示す。Fig.20aの軽油の場合で安定な炎を生じ割合長い時間かかって消火するときには，予燃時間の長い方が消火時間の長くなるのが観察される。予燃が長くなると油面下の油内各点の温度がより高くなり冷却に時間がかかるからである。第1類の液体の場合には予燃時間の影響はほとんどみられなかった。Fig. 20cのベンゾールの例をみれば分る。ベンゾールの場合，予燃時間が長くなるとかえって消えにくくなる傾向がみられる。

5.2.4.液面高の影響

液面が高くなると消火されやすくなる傾向がある。第2，3類の液体の場合には，液面高の影響が特に顕著である。軽油の容器径300mmとB重油の容器径500mmの結果をそれぞれFig. 21のa，bに示す。どちらの場合も液面が高くなると消えやすくなっている。第1類の液体でもやはり液面が高くなると消えやすくなる傾向にはあるが，前2者の液体ほど顕著な影響を受けない。Fig.20cのベンゾールの結果をみれば分る。hを余り小さくすると，噴霧粒によるはね返し（Splashing）のために，液面上では炎がなくなっても容器壁の外側で燃え続けるという現象が起こり消えなくなる。第1類の液体のように引火点の低い液体の場合に，この現象は顕著に現われる。

5.2.5 吹き消しとの比較

吹き消し実験では容器はほとんど内径115mmのものを使用したので，水噴霧消火でもこの容器を使用して実験し，吹き消しの結果と比較した。水噴霧内の伴走風速には割合大きな変動があって吹き消しの場合の風速とは比較にならないが，消火の大体の傾向を比較することはできる。ガソリンでh＝30の場合の結果をFig. 22aに示す。下図が水噴霧消火の結果である。縦軸に消火時間を，横軸に吹き消しでは風速を水噴霧消火では伴走風速をとっている。両者の場合の消火の傾向はほとんど一致している。しかし，h ＝10のときには，吹き消しではある一定の風速以上で短時間で消えてしまうのに，水噴霧消火では同じ風速では容器の外壁面で燃焼が継続し消火しない。これは粒が粗いための，Splashingのためである。どの位の液面高までSplashingが消火に影響するかは，容器の寸法や燃料の種類にも関係し簡単には決められない。h ＝100のときには，水噴霧消火でも伴走風速5m/secまでの範囲で全然消火しなかった。軽油ではh ＝30，10の何れの場合にもガソリンと異なり消火の傾向はほぼ一致した。軽油のh ＝10の場合の結果をFig.22bに示す。軽油の場合には，Splashingの影響がガソリンの場合より少ないといえる。

5.2.6 メタノールの消火

メタノールの火災は吹き消されにくいことを前に述

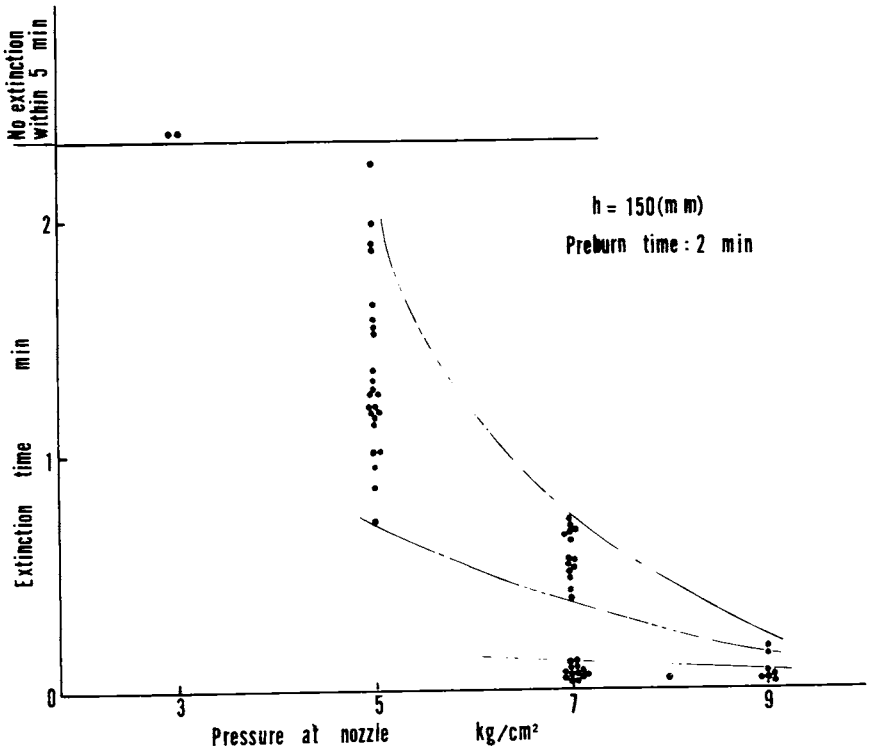


Fig. 18. Extinction of gas oil fires with water sprays; vessel: 700ϕ×300; nozzle: No.3.

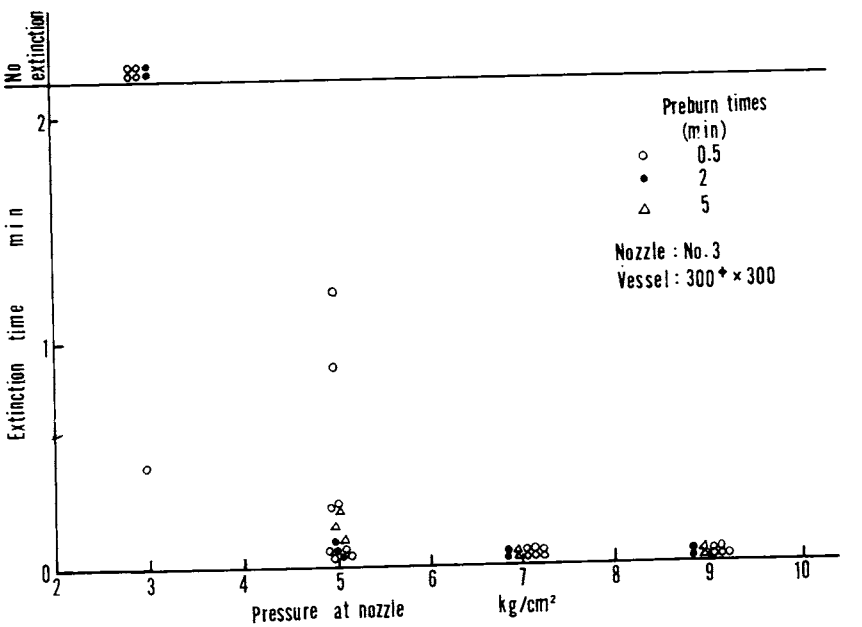


Fig.19. Extinction of gasoline fires with water sprays; vessel: 300ϕ×300; h =150.

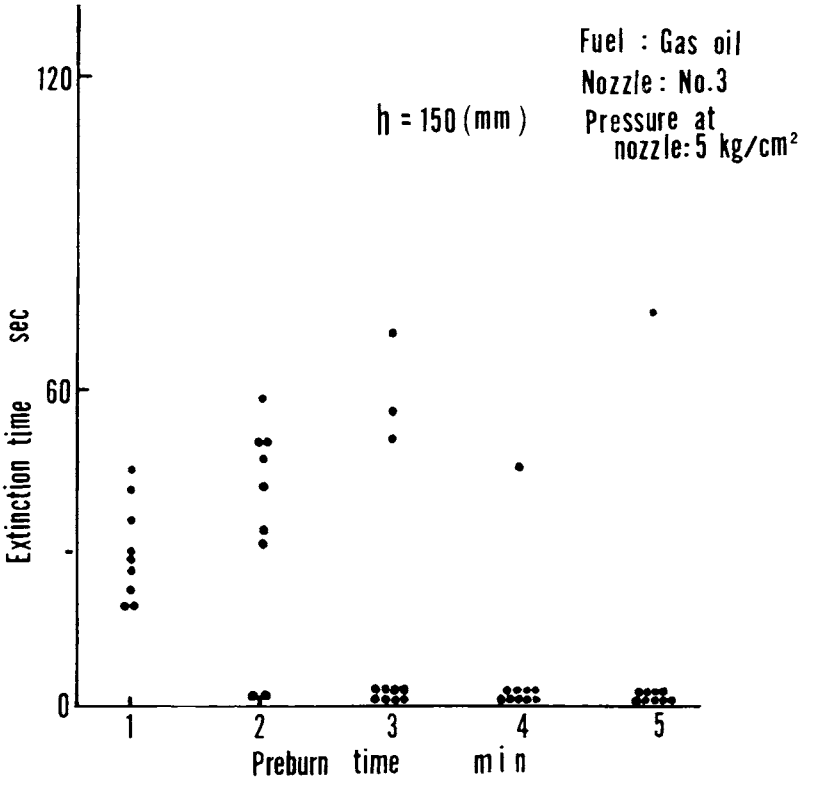


Fig.20a. Effect of preburn time on extinction with the spray (gas oil); vessel: 300φ×300.

べたが，水噴霧消火の場合にも伴走風速の相当大きいところで瞬間的に消火しない限り非常に消えにくい。300φ×80の容器で予燃時間を種々変えた場合の消火時間をノズル圧力に対してFig.23aに示す。予燃時間をある程度長くすれば，圧力7 kg/cm²以上で瞬間的に消える場合がでてくる。メタノールの蒸気層は薄いので，ガソリン，軽油のように炎が振動した後消えるという場合はなく，噴霧をかけた最初の瞬間に消火しない限り，液体または液面がある一定の濃度に希釈されるまで消火しない。予燃時間の長い方が瞬間的に消火される確率は大きい。700φ×80の容器で実験した結果をFig.23bに示す。容器径の大きい方がより大きい風速で始めて瞬間的に消火される場合がでてくる。長時間を要して消える場合の消火時間はメタノールの場合の方が，軽油の場合より散らばり方が少ない。メタノールの消火では吹き消しよりも水噴霧による液体の希釈の効果が大きく現われるためである。

5.2.7 消火の傾向の分類

水噴霧消火の場合にも液体燃料の種類によって消火の傾向が異なる。第1類の液体はすべてほぼ同じ消火の傾向を示し，ある一定の伴走風速以上では短時間で，それ以下では急激に消えにくくなる。第2類の液体はすべて引火点，沸点の比較的高いものであるが，それらの火災はある一定の風速以上で短時間で消火されるか，割合長い時間を要して消火される2通りの場合を生ずる。n-ブタノール，イソアミル・アルコール，o-キシレンなどが短時間で消火されるときは瞬間的に消火される場合が多い。第3類の液体燃料はある一定の風速以上での瞬間的な消火とある一定の濃度までの希釈による消火の2通りを生ずる。噴霧を適用した瞬間に消火されないで，割合長い時間かかって消火された瞬間における容器内の液全体の平均濃度はFig.24のようになる。予燃時間の長い場合には，消火時の濃度は低くなり，すなわち消えにくくなる。n-プロパノールはある圧力以下で急に消えにくくなるが，アルコール類は圧力の低いところでほぼ同じ濃度で消えるようになる。

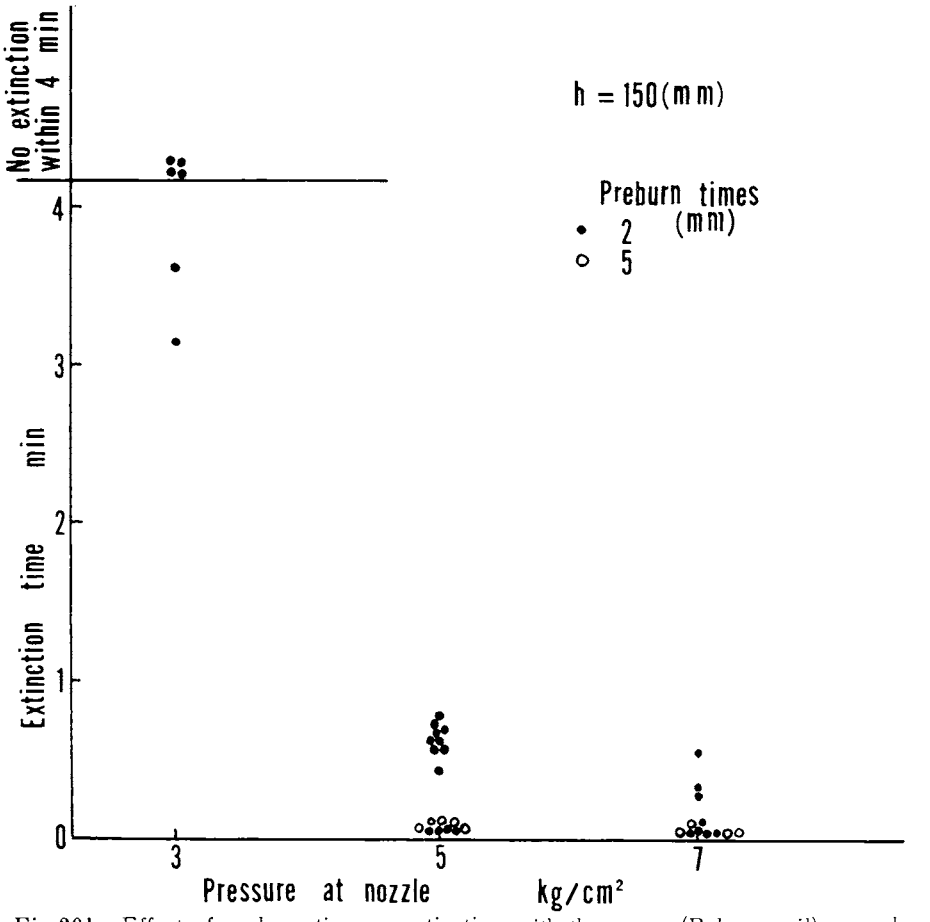


Fig.20b. Effect of preburn time on extinction with the spray (B-heavy oil); vessel: 300ϕ×300; nozzle: No. 3.

5.2.8 各種ノズルによる消火

これまで述べてきたのはすべて粒が粗く，ノズル直下での風速の大きい，したがって吹き消し効果の強いノズルNo. 3 による消火実験の結果である。我々が使用した噴霧ノズルでNo. 3 と同じく粒の粗いものに，何れも渦巻式でNo. 1，2，4，8 がある。これらのどのノズルから放出される水噴霧もSauter 平均粒径($\bar{D}_{32}$)はほぼ等しく 1 mm以上になるものと推定される。粒の細かい噴霧を出すノズルにはNo. 15, 16, 20があるが，これらのノズルから放出される水噴霧のSauter 平均粒径もほぼ等しく0.35±0.20mmの範囲に入る。これら各種のノズルを使用して消火実験を行なったのでその結果を次に述べる。

ガソリンについて，300ϕ×300の容器を使用して実験した結果はFig.25aのようになる。消火時間をノズル直下の平均伴走風速に対して図示してある。この図によると，粒の粗い水噴霧を出すノズルでの実験結果はすべて同じ消火の傾向を示し，ほぼ同じ風速（約5 m/sec）で急に消えにくくなっている。細かい水噴霧を出すノズルの場合にもすべてのノズルについて同じ傾向を示し，ほぼ同じ風速（約3 m/sec)で消えにくくなっている。700ϕ×300の容器で実験した結果はFig. 25b である。容器径が300mmから700mmに変化しても，この場合消火の傾向はほとんど変化しないようである。容器径が 115mmになると消火の傾向は異なってくる。しかし，容器径が異なると火災の形態・規模の違いもあるが，液面高の対比も難かしく，消火の難易を厳密に比較できない。ガソリンの容器径 115mmでの結果をFig.25c に示す。同図にはh = 100 の結果がでているが，噴霧が粗く吹き消し効果の強いノズルNo. 8 では，h =100の方がh =30のときより消えにくくなる。しかし，細かい噴霧ではかえってh = 100 の方が消えやすくなっている。この傾向はベンゾールについても同じである。同じ容器で実験した結果をFig.25d に示

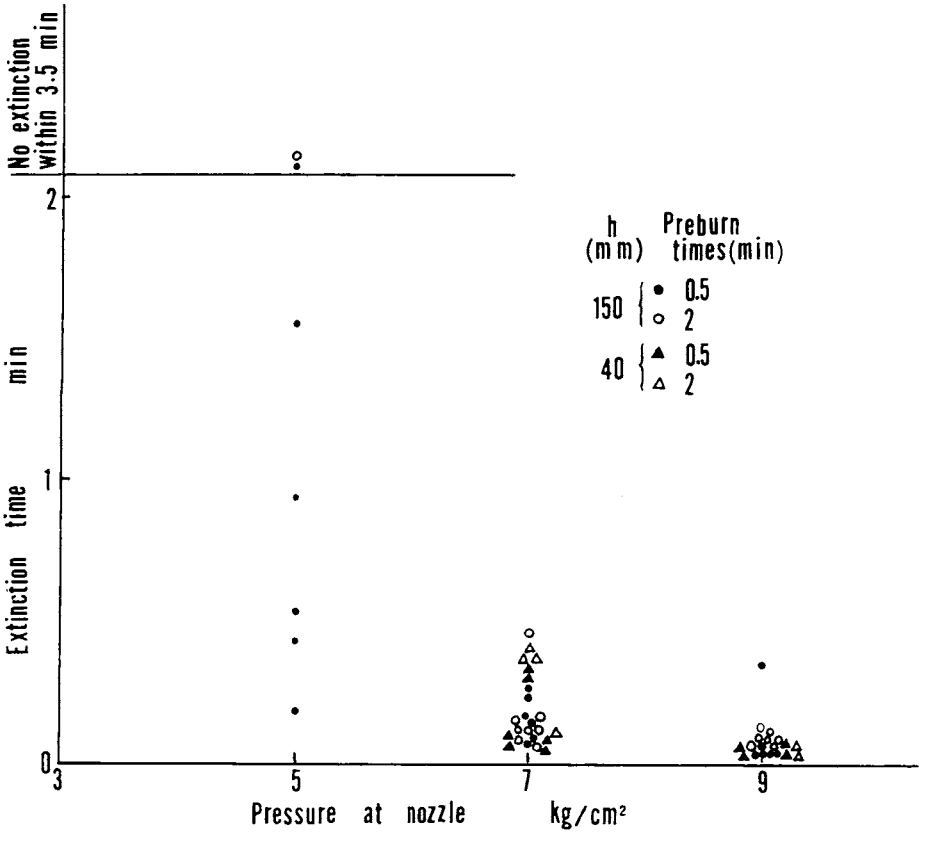


Fig.20c. Effect of preburn time on extinction with the spray (benzol); vessel: 700$^{\phi}$×300; nozzle: No. 3.

す。h = 100 で噴霧が細かいときには，予燃時間の長い方が消えやすくなる傾向であるが，噴霧が粗いときにはこれと逆の傾向になる。n-ヘキサンについて300$^{\phi}$×300の容器で実験した結果をFig.25e に示すが，ガソリンのFig.25aの結果とほぼ同じ傾向を示している。

軽油について300$^{\phi}$×300，700$^{\phi}$×300の容器で実験した結果はそれぞれFig.26のa，bのとおりである。軽油の場合にも噴霧粒の大きさによって消火の傾向を異にするが，平均粒径が等しければ同じ風速で消火時間はほぼ等しくなる。粗い水噴霧では約5 m/secで，細かい水噴霧では約2.5m/secで急に消えにくくなる。これらはガソリンの場合とそれぞれほぼ等しい風速である。軽油の火災を粗い噴霧で消火する場合には，短時間で消火する場合と長い時間かかって消火する2通りの場合を生ずることはすべてのノズルについて同じであるが，長い時間かかって消火する場合には散水量の多いノズルでは多少早く消える傾向にある。n-ブタノールについて300$^{\phi}$×80の容器，h =60で実験した結果をFig.26cに示す。予燃時間の長い方が短時間で消火する確率は大きいが，短時間で消火しない場合にはかえって消火に長い時間を要する。また，噴霧粒の大小によって消火の傾向を異にするが，噴霧の粗いほど消えにくくなる傾向は軽油の場合と同じである。

エタノールについて300$^{\phi}$×80の容器を使用して実験した結果を前のガソリン，軽油などと同じように縦軸に消火時間，横軸に伴走風速をとって図示するとFig. 27a のようになる。Fig.25, 26にみられるような一定の傾向を示さない。同じ容器でのアセトンについての実験結果をFig.27bに示す。前と同じく横軸に伴走風速をとっているが，この場合も第1，2類の液体のようなはっきりした傾向を示さない。これは水溶性液体について一般に観察される現象で，伴走風速と噴霧粒の大きさだけでは消火時間は決らないことを示す。Fig. 27bで予燃時間が長くなると瞬間的に消火される割合が非常に大きいことが知られる。メタノールについて300$^{\phi}$×80の容器を使用して消火実験をし，希釈消火の場合の消火の瞬間における溶液全体の平均濃度を比

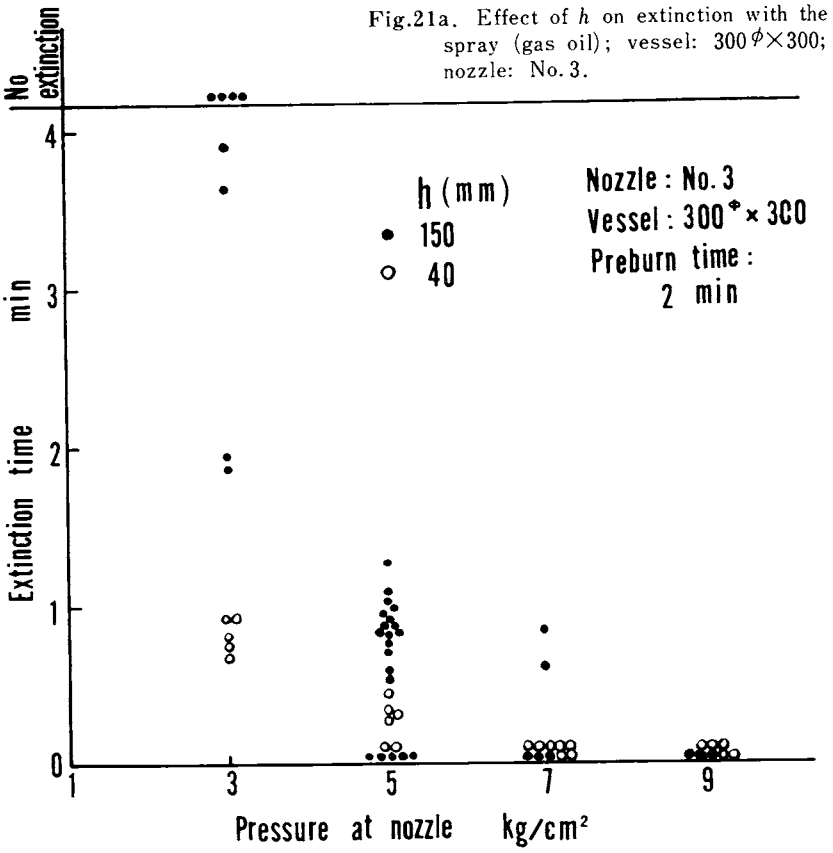


Fig.21a. Effect of h on extinction with the spray (gas oil); vessel: 300ϕ×300; nozzle: No. 3.

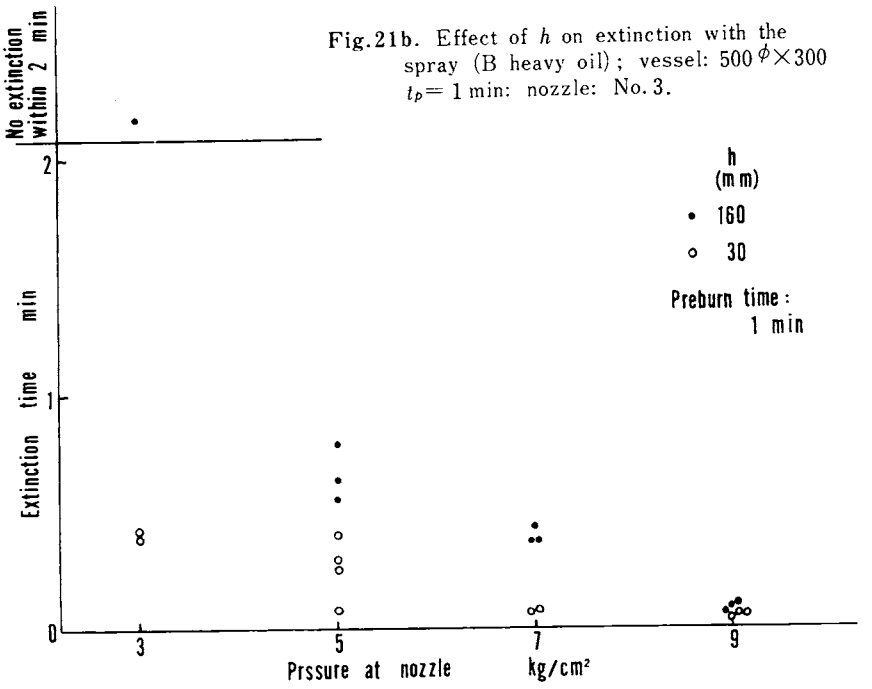


Fig.21b. Effect of h on extinction with the spray (B heavy oil); vessel: 500ϕ×300 t_p= 1 min: nozzle: No. 3.

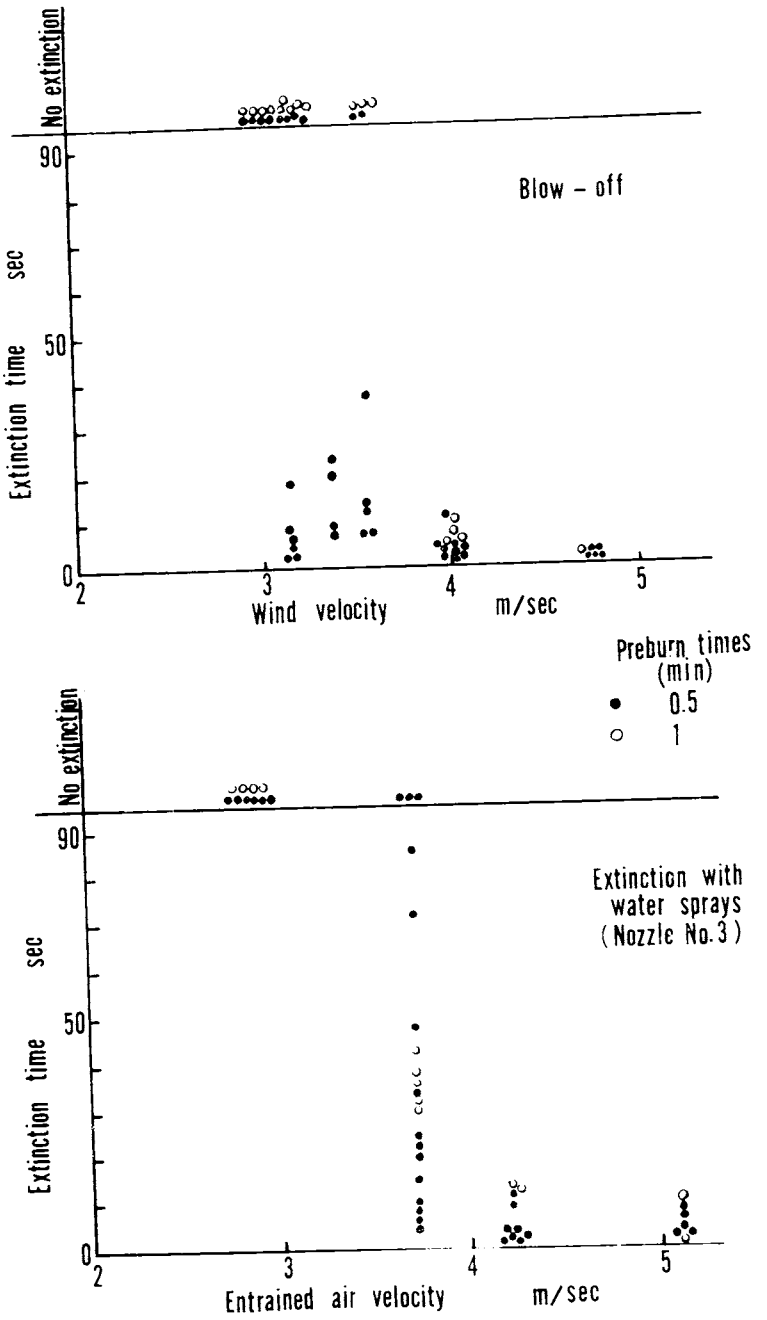


Fig.22a. Comparison of the results of extinction by the spray with those of blow-off (gasoline); vessel: 115$\phi\times$80; h =30; nozzle: No. 3.

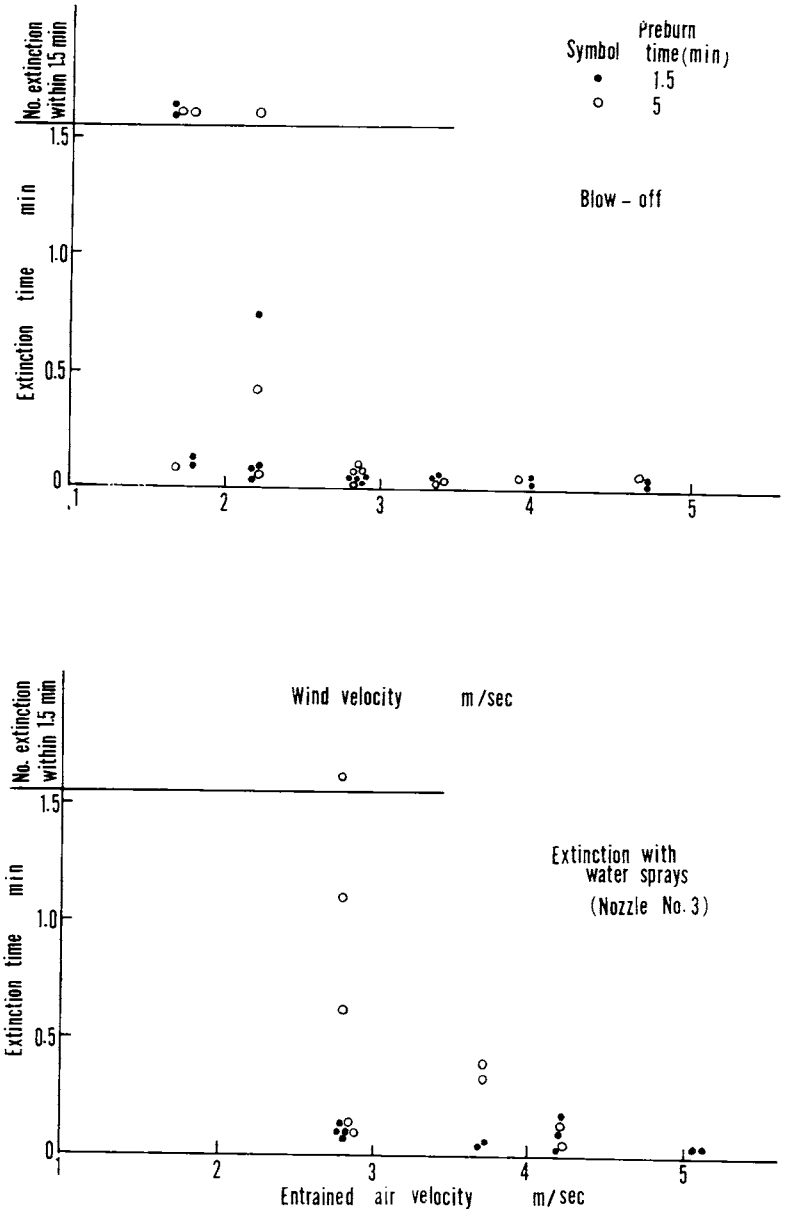


Fig.22b. Comparison of the results of extinction by the spray with those of blow-off (gas oil); vessel: 115ϕ×80; h =10; nozzle: No. 3.

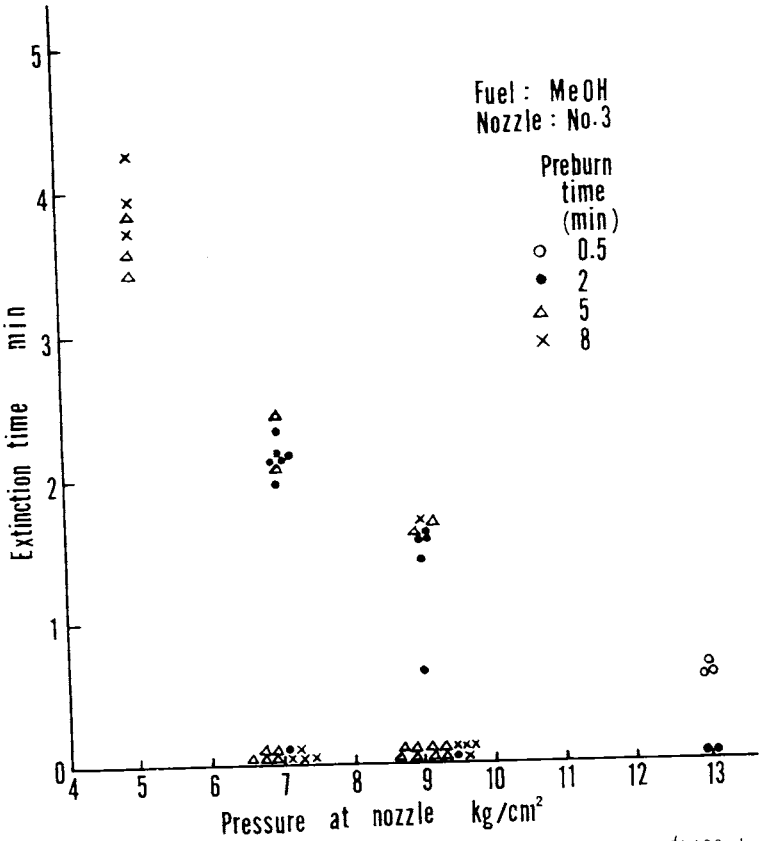


Fig. 23a. Extinction time vs. nozzle pressure (methanol); vessel: 300ϕ×80; h =50.

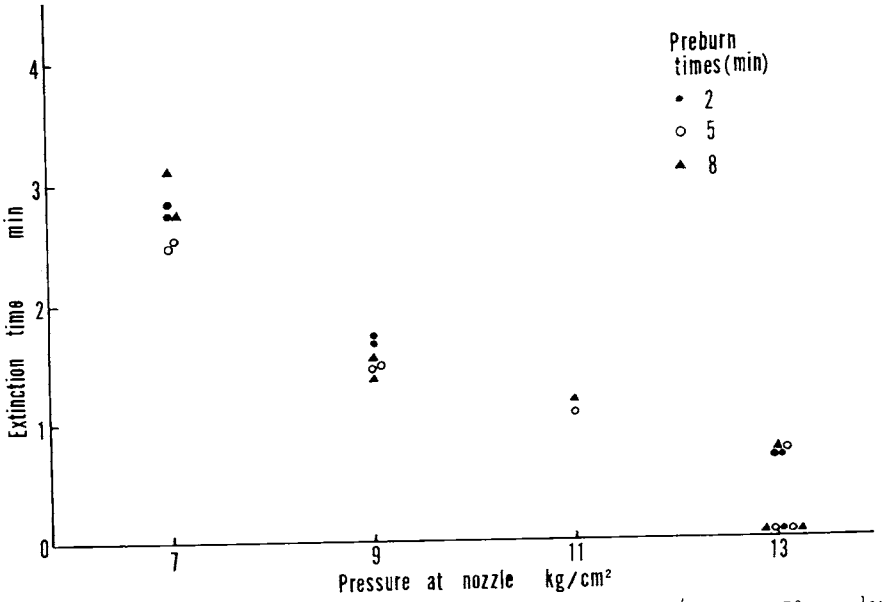


Fig. 23b. Extinction time vs. nozzle pressure (methanol); vessel: 700ϕ×80; h=50; nozzle: No. 3.

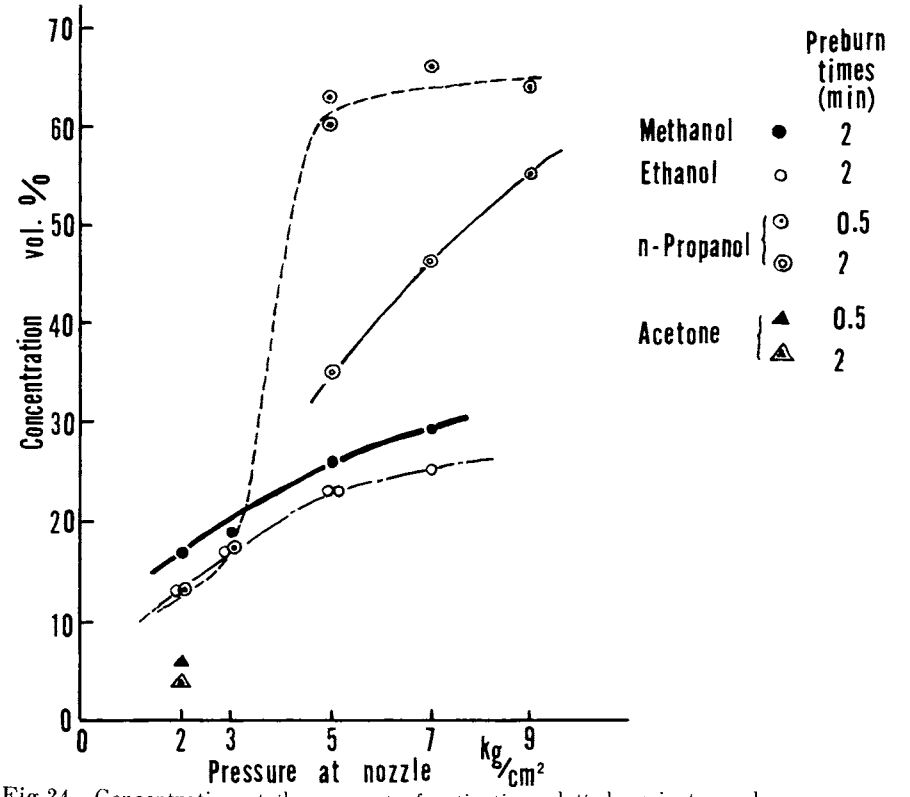


Fig.24. Concentration at the moment of extinction plotted against nozzle pressure; vessel: 300ϕ×80; h=60; nozzle: No. 3.

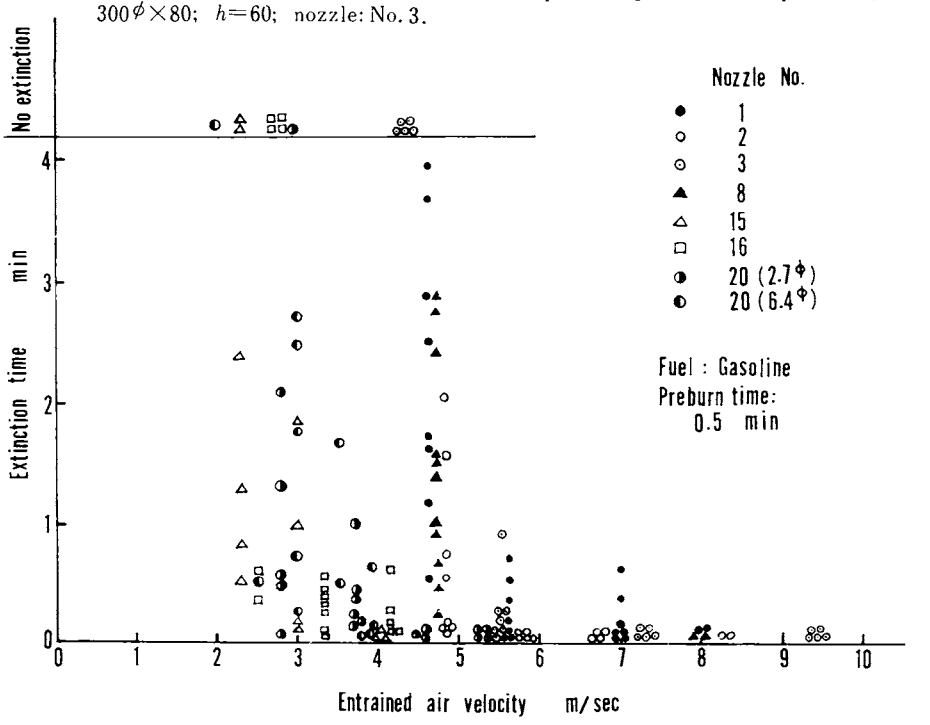


Fig.25a. Extinction time vs. entrained air velocity — 1 st class liquid (gasoline); vessel: 300ϕ×300; h =150.

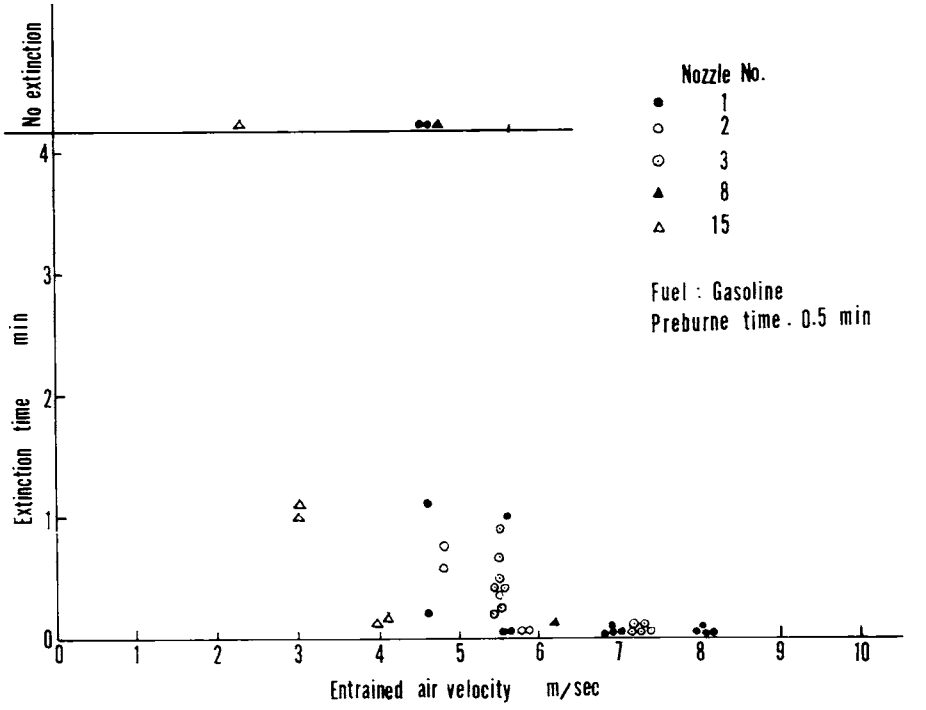


Fig.25b. Extinction time vs. entrained air velocity (gasoline); vessel: 700ϕ×300: h =150.

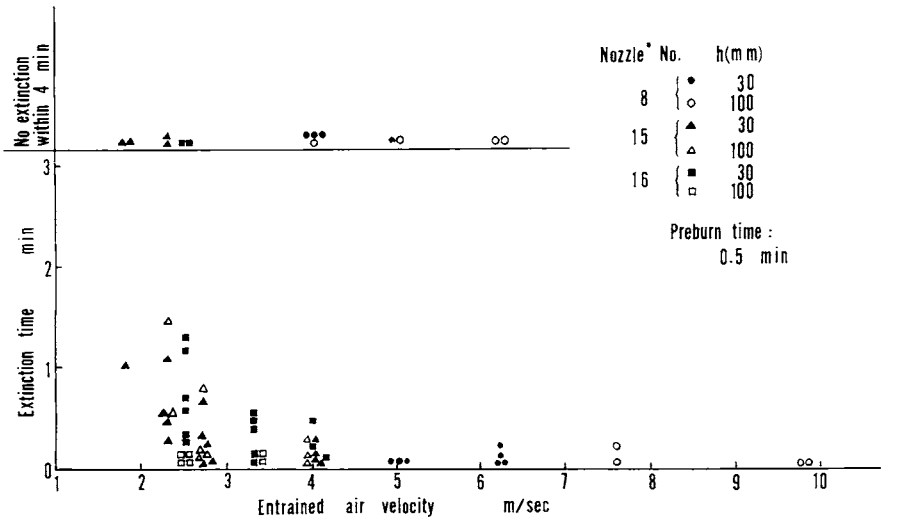


Fig.25c. Extinction time vs. entrained air velocity (gasoline); vessel: 115ϕ×80.

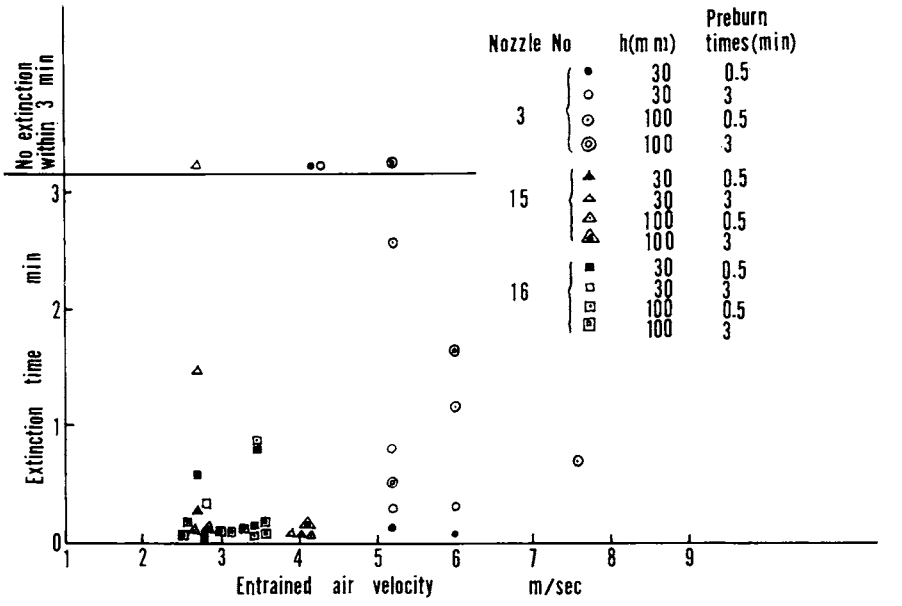


Fig.25d. Extinction time vs. entrained air velocity (benzol); vessel: 115ϕ×80.

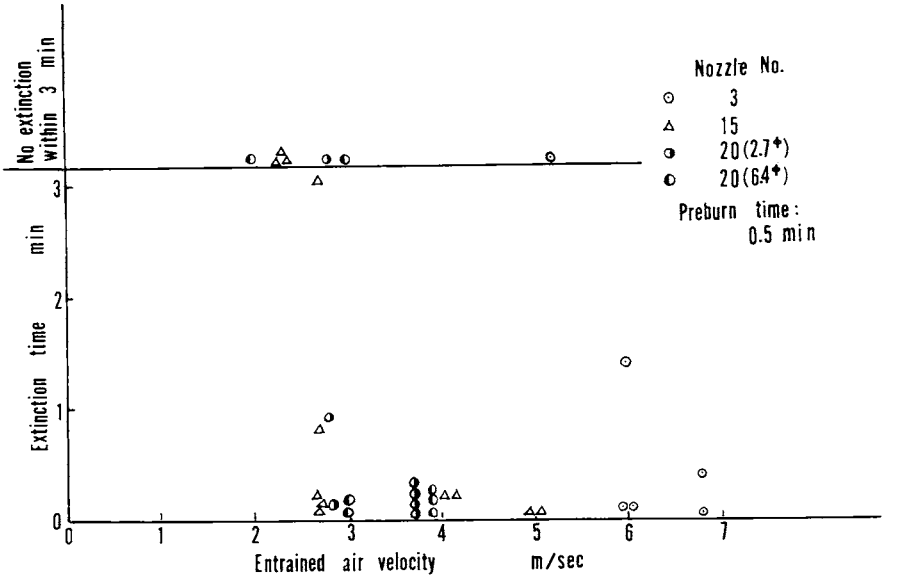


Fig.25e. Extinction time vs. entrained air velocity (n-hexane); vessel: 300ϕ×300: h =150.

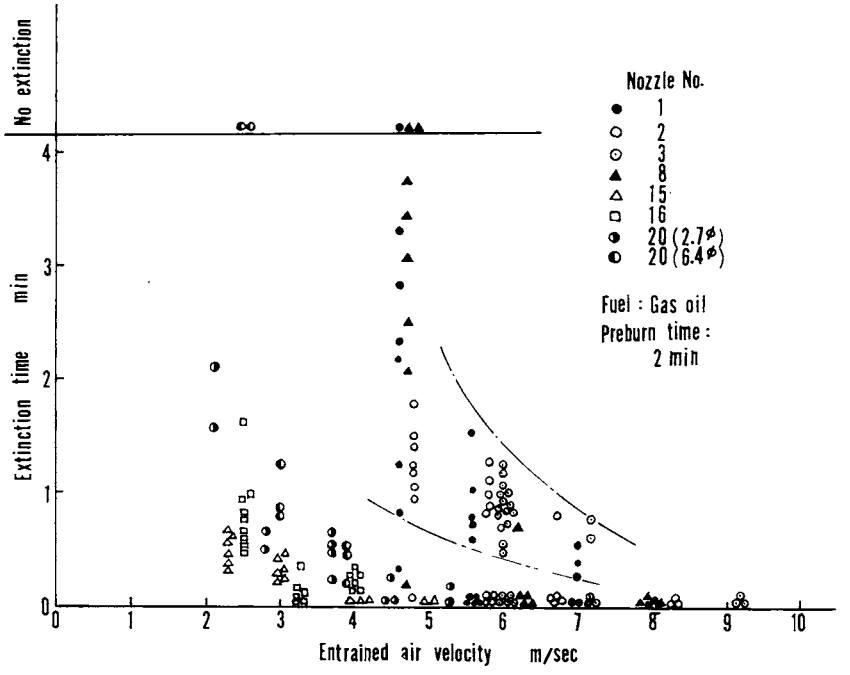


Fig.26a. Extinction time vs. entrained air velocity — 2nd class liquid (gas oil); vessel: 300 $\phi \times 300$; $h = 150$.

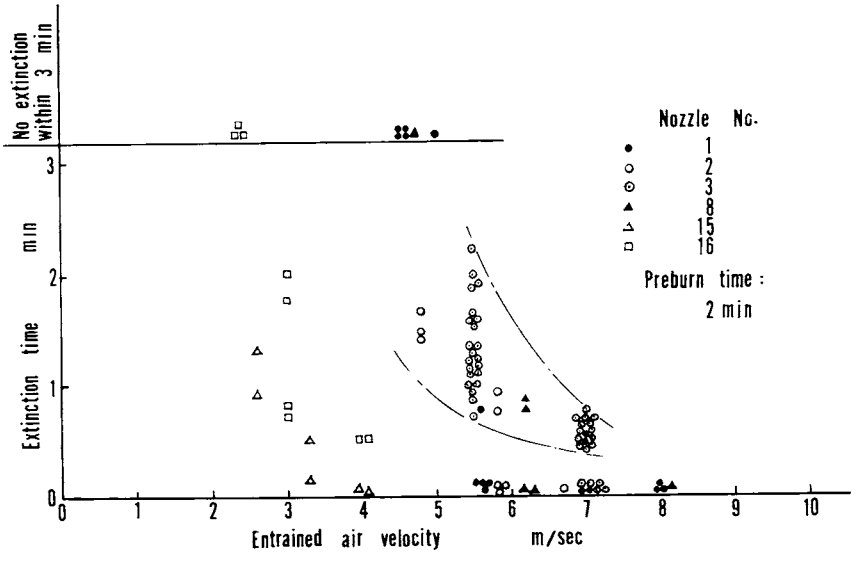


Fig.26b. Extinction time vs. entrained air velocity (gas oil); vessel: 700 $\phi \times 300$; $h = 150$.

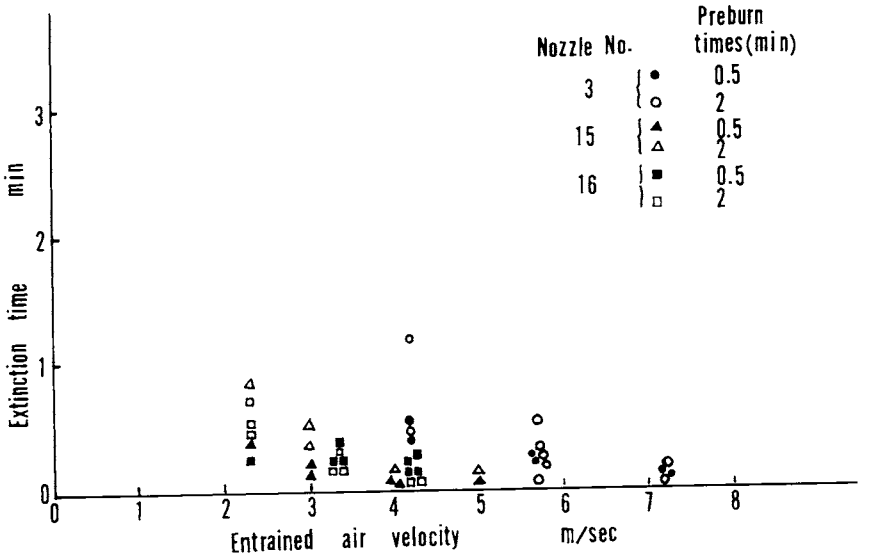


Fig.26c. Extinction time vs. entrained air velocity (n-butanol); vessel: 300ϕ×80; h =60.

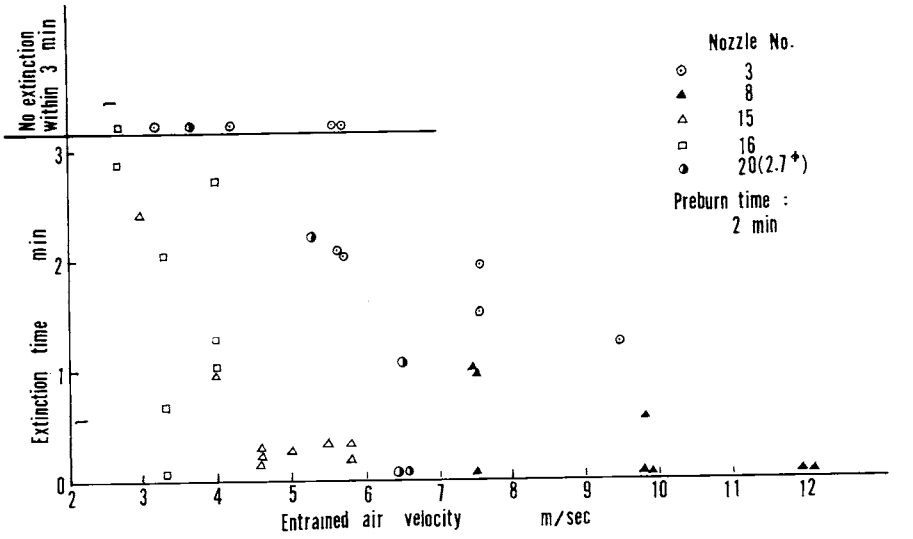


Fig.27a. Extinction time vs. entrained air velocity (ethanol); vessel: 300ϕ×80; h =60.

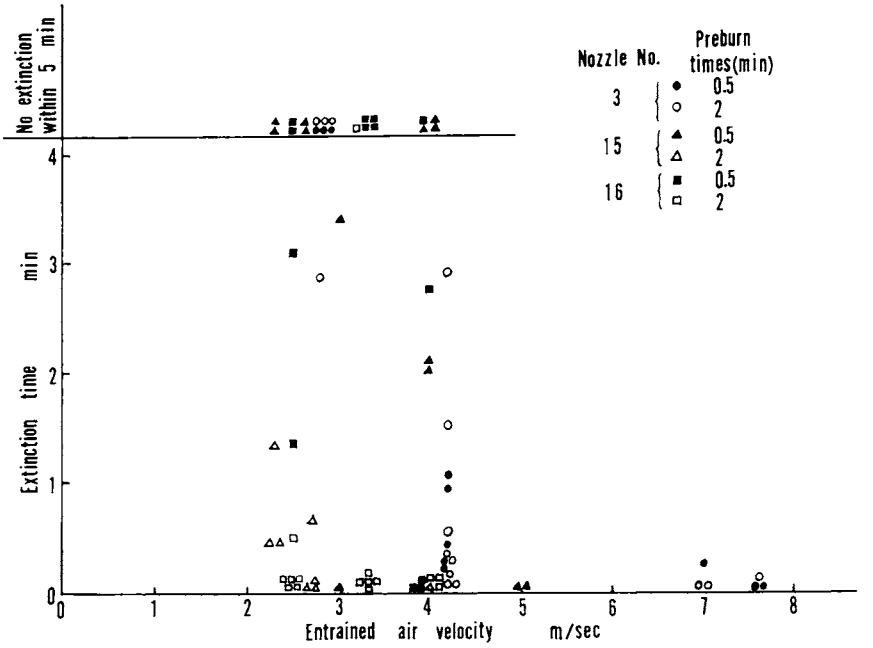


Fig.27b. Extinction time vs. entrained air velocity (acetone); vessel: 300ϕ×80; h =60.

重測定により求め，伴走風速に対して図示するとFig. 28のようになる。この図から消火時の濃度は伴走風速

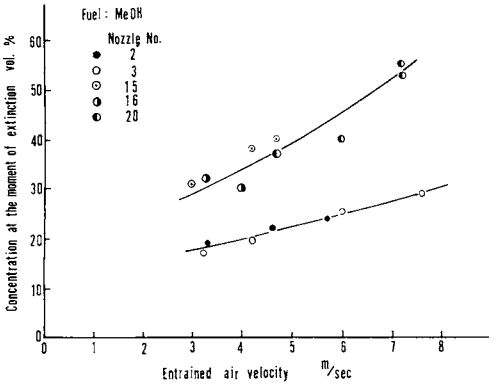


Fig.28. Concentration of methanol at the instant of extinction with water sprays plotted against the entrained air velocity; vessel: 300ϕ×80; h =50; t_p= 2 min.

Table 7 Relation between the initial quantity of methanol and the extinction time. Nozzle: No.20; h=30(mm); preburn times: 1.5 min; nozzle pressure: 15kg/cm^2.

Vessel (mm)	Extinction time (sec)
115ϕ×80	70, 16, 33, 72, 63,
115ϕ×350	58, 14, 57, 69

と粒の大きさによってほぼ決まり，また粒の細かいほど高くなる傾向である。この結果から，一般に第3類の液体は散水量の影響を大きく受ける。メタノール水溶液の初濃度50vol.%のものについて液体量を変化させて実験してみた。結果をFig.29に示す。吹き消し実験の場合と同様，消火時間は液体の最初の量の影響をほとんど受けないこと，また予燃時間が長いと長くなることが知られる。純粋のメタノールについても同様の実験を行なった。結果を Table 7 に示す。細かい水噴霧を出すノズル No. 20の孔径2.7 mmを使用して実験した結果である。液体の最初の量が大きく異なっていても，同じ圧力下で消火時間はほとんど変わらない。この程度の消火時間では，消火後の溶液全体の平均濃度は容積の大きい容器の場合約95vol.%以上である。メタノールについて115ϕ×350の容器での消火時間—伴走風速関係をFig.30に示す。細かい水噴霧での結果であるが，h =50の場合の方がh = 100の場合より消えやすく，また同じh =50では予燃時間の長い方が消えやすい。これはガソリン，ベンゾールの同じ容器での結果（Fig.25c, d）と同じ傾向である。液面が深くまた噴霧が細かいと，容器壁面での噴霧の蒸発量が大となり，発生水蒸気が窒息消火に寄与するものと考えられる。容器径300mmの場合でも液面が深いと，特に細かい噴霧で簡単に消えるようになるのが観察さ

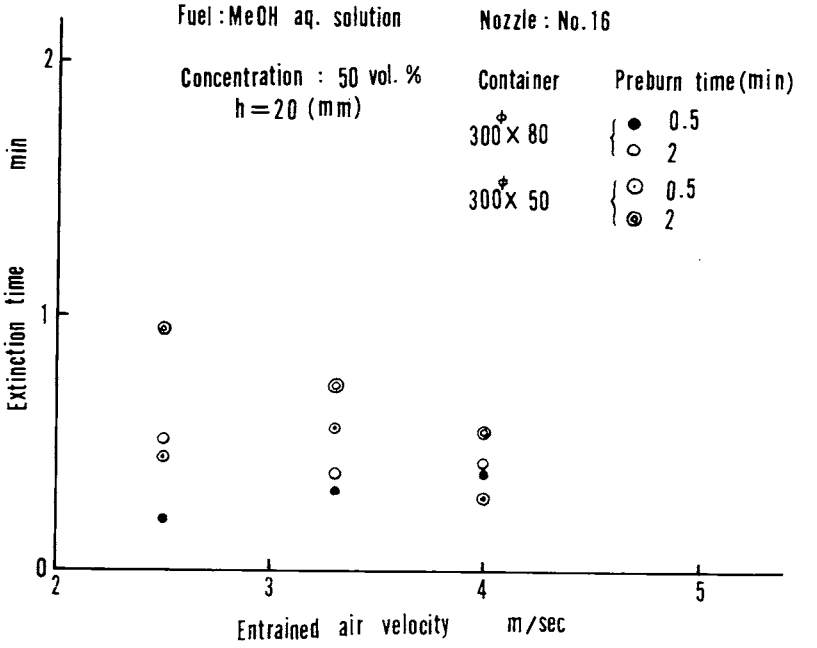


Fig.29. Extinction of fires of methanol aq. solution with water sprays

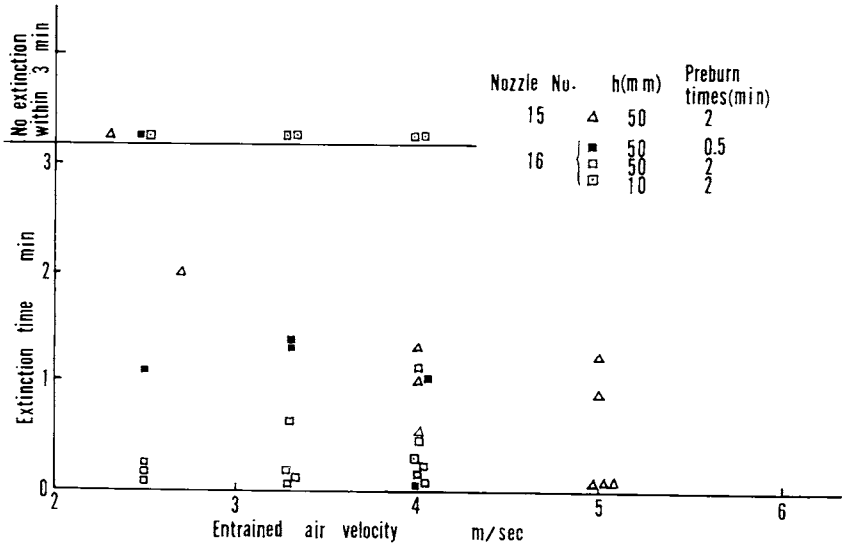


Fig.30. Extinction of methanol fires with sprays; vessel: 115φ×80.

された。各種噴霧ノズルによって各種液体燃料の火災を消火するときの限界風速をTable 8に示す。限界風速はガソリン, n-ヘキサン, 軽油, n-ブタノールについては水噴霧放出後30秒以内に確実に消火する風速を, そのほかの液体については瞬間的に吹き消される場合の生ずる最低の風速をとっている。粒の粗いノズルNo. 3, 8と粒の細かいノズルNo.15, 16, 20の限界風速の間に大きな差がみられる。水噴霧消火の場合には伴走

Table 8. Critical entrained air velocity to extinguish liquid fuel fires with water sprays. (m/sec)

Diameter of the vessel (mm)	Nozzle No.	Preburn time (min)	h (mm)	Gasoline	Gas oil	n-Butanol	Acetone	Dioxane	Ethanol	Methanol
115	3	0.5	30	4.0			4.2			
		1.5	30						5.7	5.7
		2.0	30		4.2	2.8				
	8	0.5	30	4.5			5.0			
		1.5	30					10.5	6.2	10.5
		2.0	30							
	15	0.5	30	2.7			3.5			
		1.5	30			2.3		>4.7	4.0	
		2.0	50					2.7		5.0
	16	0.5	30	3.3		<2	1.9			
		1.5	30		2.5					
		2.0	50					4.0		2.5
	20 (2.7φ)	0.5	30	2.8			<2			
		1.5	30		<2	2.5		>7.2	6.0	>7.2
		2.0	50					4.5	5.3	5.3
300	3	0.5	150							
		2.0	150	5.5	7.0					
		2.0	60			5.7	5.0	9.5	7.6	7.0
	8	2.0	60			6.5	5.5	12.0	7.5	10.0
	15	0.5	150	3.7						
		2.0	150		3.0					
		2.0	60			3.0	2.7	>6	>6	5.8
	16	0.5	150	3.3						
		2.0	150		3.0					
		2.0	60			3.0	2.5	>4	3.3	>4
	20 (2.7φ)	0.5	150	3.7						
		2.0	150		3.7					
		2.0	60			3.0	2.6	>6.5	6.5	>6.5

風速の変動やSplashing の消火への影響が大きいので，Table 8の結果と吹き消し実験のTable 4の結果とを厳密に比較することはできない。

5.2.9 水噴霧の放射角度の影響

液体燃料火災に真上から水噴霧を適用した場合の結果について述べてきたのであるが，液体燃料火災の斜上方からや真横から適用した場合には，粒の粗い吹き消し効果の強い水噴霧では風下の容器壁の両側に炎が残りやすく，非常に消えにくくなる。既に確認されている[1]ことであるが，液面と水噴霧の放射方向の間の角度が小さいほど消えにくい。

5.3 考　　察

灯油の水噴霧消火で安定な炎が生じた後の消火は油面が灯油の燃焼点以下になるためであることを油面の温度測定から結論している例があるが，[2]我々の吹き消し実験で知られたように水噴霧ばかりでなく伴走空気による冷却効果や希釈効果も同時に作用しており，安定な炎ができても燃焼点以上で消火する場合のあることは当然考えられる。吹き消し実験で，安定な炎を生じて消えた直後の灯油そのほかの第2類の液体に炎を近づけると液面全体に瞬間的に拡がる場合が多くみられた。

第1類の液体の消火は，主として伴走風速と噴霧粒の大きさの影響を受けた。第2類の液体では散水量の多い方が長時間かかって消火する場合の消火時間は多少短かくなるが，やはり伴走風速と噴霧粒の大きさの影響を大きく受ける。これは伴走風速による炎の抑圧，液面の冷却，蒸気層の希釈の効果が大きいことを示している。また，これらの液体では，噴霧粒の細かい場合に粗いときより低い伴走風速で消火したが，この原因について考えてみる。粒が細かいと，炎，蒸気層，容器壁，液体での蒸発と冷却の効果が大きくなり，ま

た粒が液面に衝突したときのSplashingが減少し，ともに消火に寄与する。第1類の液体に粗い噴霧($\bar{D}_{32}\geqq 1$)を適用した場合，h が極めて小さいと（容器径300mmでh が約30mm以下，容器径115mmでh が10mm以下）全然消えなくなる。軽油などは第1類の液体よりSplashingの影響は少ないが,条件次第でその影響が大きく現われる。さらに伴走風速の変動特に液面上の各点で異なる風速分布の影響が考えられる。我々の実験した範囲では，粒が細かいほどこの影響は少なかった。

メタノール水溶液の吹き消しでは，消火時間が液体の最初の量に無関係なこと，予燃時間が長くなると長くなることなどから，風による炎の抑圧，液面の冷却，発生可燃蒸気の希釈が主な原因と考えられる。メタノール水溶液の水噴霧消火でも吹き消し実験の場合と同じ現象がみられるので，上記の吹き消しの機構が消火の原因になることが考えられる。メタノールの消火実験で消火時間が液体の最初の量に無関係であること（**Table 7**）と液体が水噴霧によってある一定の平均濃度まで希釈されないと消火しないことから，液体の表面だけが特に低い濃度に希釈されて消火されるものであることが分る。粒が細かくなるほど消火時の平均濃度が高くなることも，液面が希釈される割合（液面における濃度勾配）がより大きくなるためであろう。したがって，メタノールの消火は，液体特に液面がある一定の濃度に希釈されてからの伴走風による炎の抑圧，液面の冷却，発生可燃蒸気の希釈に起因するものである。第3類の液体の水噴霧消火では，噴霧のかかった瞬間に消火しないときには，**Fig.24**に示されるように，ある一定の濃度まで希釈されないと消火しない。また，**Table 8**と**Table 4**を比較すると分るように，水噴霧消火における限界風速は吹き消しの場合より一般に大きくなる。吹き消しと水噴霧消火におけるこれらの相違は液面上の各点で異なる風速分布やSplashing の影響によるのではないかと考えられる。

比較的粗い水噴霧が油面をたたくと，エマルジョンが生成され，これが消火の原因になるかどうかについてはしばしば議論されてきた。生成されたエマルジョンが消火に寄与しないという考え方が多く提出された[3,5,7]。我々も軽油とB重油の場合にエマルジョンの生成をみとめたが，これが消火の原因となりうるかどうかの実験的根拠はまだ見出されていない。

6．結　論

円筒容器内の液体燃料火災に真上から水噴霧をかけたときの消火の機構をしらべるために，吹き消し実験を同時に行なった。吹き消しの機構としては，

1）蒸気層内の可燃蒸気の濃度を空気によって燃焼下限界よりも低くする。

2）液面を空気によって冷却する。この冷却は風によって炎が抑圧され安定な炎を生じた場合に限られ，風による発生可燃蒸気の希釈が同時に行なわれる。

吹き消し実験における消火の傾向は，点火直後から蒸気層の厚い液体（第1類）と蒸気層の薄い液体（第2，3類）の二つに大別され，後者の場合で蒸気層の薄いときには特に消えにくい安定な炎を生ずる。蒸気層がある程度厚くなると，第1類の液体も含めて，風による蒸気層内の蒸気の液面全体に亘る同時希釈により消火されるようになる。吹き消しの限界風速はメタノール，ジオキサンを除いて第1類の液体の方が第2，3類の液体より大きい。

水噴霧による消火の機構としては，伴走空気による上記の吹き消し機構のほかに，さらに次の機構が考えられる。

3）水噴霧粒が炎，蒸気層，容器壁，液面，液内で蒸発することにより発生可燃蒸気を希釈する。

4）水噴霧粒が蒸発することによりまた水噴霧そのものによって，前項で述べた各部分を冷却する。

5）水溶性液体の場合には，特に液面が水噴霧によってある一定の濃度まで希釈され消火する。

以上のように水噴霧消火には種々の要因があるが，これらの要因が単独で消火に関係することは稀で，これらのいくつかの要因の組合せで消火される場合が多い。消火を妨害する要因としては，Splashing と液面上の各点で異なる風速の分布とが考えられる。これらを含めた7要因が消火にどの程度関係するかは，液体燃料の種類，容器寸法，液面高，水噴霧の種類によって異なる。我々の実験した範囲では次のように結論できる。水に溶けない液体燃料については消火時間が，水溶性液体については消火時の平均濃度が粒の大きさと伴走空速によってほぼ決る。噴霧粒が細かいときには粗いときより低い伴走風速で消火する。第1類の液体では主として伴走空気による吹き消しが関係し，水噴霧による各部（炎，蒸気層，容器壁，液面，液内）における蒸発と冷却が補助的な役割をする。第2類の液体では伴走風と水噴霧の蒸発による窒息作用で噴霧適用後短時間で消火する場合と伴走風と水噴霧の冷却および可燃蒸気の希釈によって長時間を要して消火する場合の二通りになる。第3類の液体の場合には，吹き消

しによって瞬間的に消火されないときには，水噴霧によってある一定の濃度に液面が希釈されてから伴走風による炎の抑圧，液面の冷却，発生可燃蒸気の希釈によって消火するものである。粒が細かいほど，液面と液内のほかの部分との濃度の差が増大し，より高い平均濃度で消えるようになる。

円筒容器内の液体燃料火災を真上から水噴霧(D_{32} >0.1)でおおうようにして消火する場合，できるだけ速い風，整流された風，細かい水噴霧を送るノズルを使用すれば効果的であることが分った。実際のタンク火災に対しては，本報告の結果がそのまま適用されないが，本報告に述べた原理にもとづいて最も有効な消火方法をとられることが期待される。

最後に本研究に対し御教示，御協力をいただいた消防研究所の中田金市所長ほか所員の皆様，ノズルを提供して下さった日本消火装置工業会ならびに共立農機工業株式会社に対し心から謝意を表します。

文　献

1) DJ. Rasbash, Z. W. Rogowski, G. W. V. Stark; Combustion and Flame, **4**, 223(1960)
2) D. J. Rasbash, Z. W. Rogowski; Combustion and Flame, **1**, 453 (1957)
3) D. J. Rasbash, Z. W. Rogowski; Chemistry and Industry, **24**, 693 (1954)
4) D. J. Rasbash; Proceedings of Symp. on the Interaction between Fluids and Particles, Adlard and Son, 1962, P. 217
5) 黒沢　敦; 火災, **14**, 38 (1964)
6) 矢治頼夫; 日本火災学会論文集, **9**, 58 (1960), **11**, 21 (1961)
7) 高橋良二, 矢治頼夫; 東大工学部綜合試験所年報, 第20年, 第20号, 1962, P. 88
8) V. I. Blinov, G. N. Khudiakov; Acad. Nauk. SSSR Doklady **113**, 1094 (1957)
9) 中久喜　厚, 高橋正一; 未発表
10) 中久喜　厚, 高橋正一; 投稿中
11) R. W. Tate; A. I. Ch. E. Journal, **7**, 574(1961)
12) R. Brown, J. L. York; A. I. Ch. E. Journal, **8**, 149 (1962)
13) 抜山四郎, 棚沢　泰; 日本機械学会論文集, **4**, 86(1938), **4**, 138(1939), **5**, 131, 136(1939), **6**, II－7(1940)
14) 棚沢　泰; 機械の研究, **15**, 759 (1963)
15) 棚沢　泰; 機械の研究, **15**, 1515 (1963)
16) 林　太郎, 大田了介; 空気調和・衛生工学, **37** 182(1963), **36**, 1009 (1962)
17) R. W. Tate, W. R. Marskall, Jr.; Chem. Eng. Prog., **49**, 226 (1953)
18) M. Doumas, R. Laster; Chem. Eng. Prog., **49** 518(1953)
19) P. A. Nelson, W. F. Stevens; A. I. Ch. E. Journal, **7**, 80 (1961)
20) D. J. Rasbash; G. W. V. Stark; Chem. Eng., December, A82 (1962)

Extinction of Liquid Fuel Fires with Water Sprays

(Abstract)

Atsushi Nakakuki and Masaichi Takahashi

(Received December 24, 1969)

An investigation on the extinction with water sprays of fires of liquids burning in cylindrical vessels was carried out. The blow-off tests by the wind sent from the right above position of burning liquid were also carried out to clarify the effect of the air-flow in the spray on extinction. Eleven vessels of various dimensions were used. From the difference of the extinction process, sixteen different liquids used were divided into the three classes as shown in Table 1.

1) Blow-off

The fires of such liquids as classified in the 1st class, the vapor layers of which are thick from the very initiation of burning, are likely to be extinguished in a very short time (within 5 sec) by the dilution of the vapor zone, by applying the wind faster than the critical wind speed v_c (m/sec). In these liquids, the extinction time is not so much affected by the time of predurning t_p (min) and the distance h (mm) of the liquid surface from the edge of the vessel wall. In the liquids of 2nd and 3rd classes, the vapor layers in the flames are thin, but become thick at large t_p or small h. At small t_p or large h, the stable flames as shown in Fig.5 which are very difficult to extinguish are formed with these liquids, whereas, at large t_p or small h, the fires are extinguished in a very short time (within 5 sec) above the critical wind speeds which are smaller than those with the former liquids (1st class) except methanol and dioxane. The size of the stable flame reduces gradually due to the cooling of the liquid surface and the dilution of combustible vapor, and extinction takes a long time after applying the wind. When fire is extinguished in a very short time, the flame is blown off instantly or after vibrating violently. It is observed more frequently with the liquids of 2nd and 3rd classes that the fires are extinguished instantly or simultaneously with the application of the wind. The critical wind speeds of blow-off of some liquids at different levels of the liquid surface are shown in Table 4.

Through these tests, the following two mechanisms are suggested to account for the blow-off:

a) dilution of the flammable vapor from the liquid to a concentration lower than that required to sustain flame;

b) cooling the liquid surface when the stable flame is formed.

2) Extinction with water sprays

Water sprays were produced from a rotating disk, six swirl and towo impinging jet nozzles. The spray properties, that is, the flow rate of the spray per unit area, the drop size, the drop velocity and the entrained air velocity were measured. The distribution of the drop size was analysed by the formula proposed by Nukiyama and Tanasawa. It is shown from the measurements of the drop size for various sprays that the exponents of the formula are approximately constant as in Table 6. It is confirmed that the equation (3) for the dounward drop velocity derived assuming that the Newton's formula is applicable for this case agrees approximately with the experimental data.

The tests of extinction of liquid fires with water sprays projected from the nozzle which was fixed right above the burning surface were carried out. The results of the extinction tests with coarse sprays whose Sauter mean diameters D_{32} are larger than 1 mm show the same tendency as those of the blow-off tests. With the fine sprays whose $\bar{D}_{32}$ are in the range 0.1 − 0.5 mm, the blow-off effect

by the entrained air is also observed. The influences of t_p and h on exinction are similar to those in the blow-off test. In the case of the 1st class liquid, the extinction time takes an almost constant value at the same entrained air velocity and drop size, and is independent of the flow rate of the spray. With the liquid of the 2nd class, the extinction time is also determined mainly by the entrained air velocity and the drop size, but more or less affected by the flow rate of the spray. In these liquids (1st and 2nd classes), the critical entrained air velocity which are defined in the same manner as v_c in the blow-off test decreases with the droplet size. With the water-soluble liquid (3rd class), it was confirmed by experiment that the fire was extinguished due to the dilution of the liquid surface with water sprays, and the cooling of the liquid surface and dilution of the flammable vapor by the entrained air. Therefore, the extinction times of these liquids are very much influenced by the flow rate of the spray. The concentration C_c of the solution at the instant of extinction takes a constant value at the same drop size and entrained air velocity, .and increases with the entrained air velocity and with the decrease of the drop size. With all liquids, the formation of steam and the cooling of the flames, the liquid etc. with water sprays contribute to the extinction of the fire, but the splashing caused by the spray at the liquid surface has the reverse effect on the extinction.

As the mechanism of extinction by means of water sprays are considered the following factors in addition to the above-mentioned mechanisms of blow-off by the entrained air:

c) dilution of the flammable vapor by steam formation at the flames, the vapor zone, the vessel wall and the liquid;

b) cooling the flames, the vapor zone, the vessel wall and the liquid by steam formation and by the direct contact of spray drops;

e) for the water-soluble liquid, dilution of the surface layer of the liquid.

In some cases, extinction occurs by any single factor of those mentioned above but, in most cases, by the combination of some of them.

赤外共鳴放射を利用した火災検知

中　島　清

(昭和44年12月24日受理)

1. 緒　論

炎の放射を利用した感知器には，現在炎のチラツキを感知する方式と，炎の熱放射を強度的に感知する方式の2方式が使用されている。これらの感知素子は可視域から2.5μ程度までの波長の放射を検知するものであり，おもに炎の灰色放射部を利用している。ところがこの波長域は他の高温物体による放射の波長域と同じものであるので，他の高温物体からの放射が誤動作の原因となりがちである。一般に，高温ガスの放射中には共鳴放射が存在し，かなりの強度を持つといわれている。[1,2] そこでまず，この高温ガス体からの共鳴放射が，炎の場合どのような波長域に分布しているかを調べてみた。その結果，種々の燃料について波長約4.4μの炭酸ガスによると思われる共鳴放射が強力に存在することが認められた。

そこで，この波長域に高感度をもつ感知器を作るならば，従来の感知器において避けられなかった誤動作を除くことが可能ではないかと考え，赤外共鳴放射を利用した感知器を試作し，実用上の問題点について検討を加えた。

2. 炎の分光強度の測定

普通高温ガス体の放射には共鳴放射が存在するといわれている。そこで，各種の炎についてそれらの波長および強度を知るために，炎の分光特性を測った。その結果，赤外共鳴放射だけを利用する感知器の実現の見通しがついた。

2.1 実験装置

炎の分光強度を測定するため，Fig. 1 に示すような

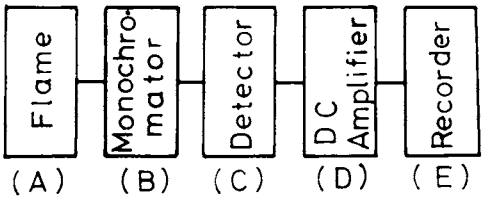


Fig. 1. Arrangement of spectral measurement.

測定系を用いて実験を行なった。図においてAは安定な炎を得るための燃焼装置で，Fig. 2 にその概要を示す。燃料は本来，木材，紙など固体のものを使用したかったが，安定な炎が得られないので，ロウソクを除いて常温で液体または気体のものを用いた。Fig. 1 のBは分光計で，Leiss社のシングル・モノクロメータを用いた。同図Cは検出器で，Charles M. Reeder & Co., Inc.のRP－3W型真空熱電対を用いた。これらは Fig. 3 に示すように配置した。

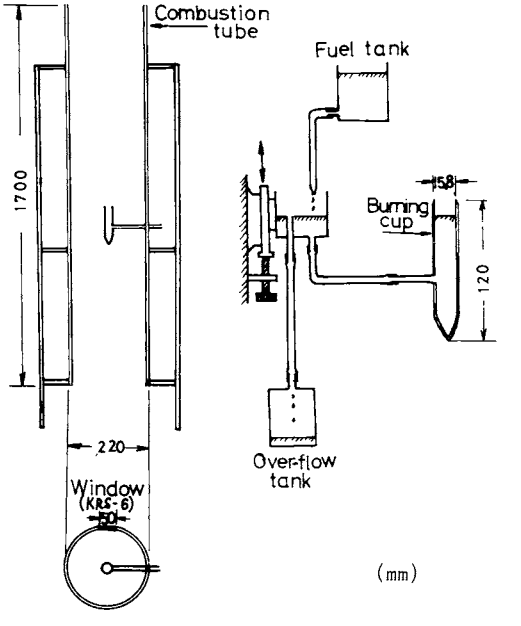


Fig.2. Burner.

Fig. 1 のDは大和電気製6401型直流増幅器（最大感度　0.1μVフルスケール），またEは理研電子製のD－72型の2ペン記録計で，放射強度および波長ドラム回転角の記録に用いた。

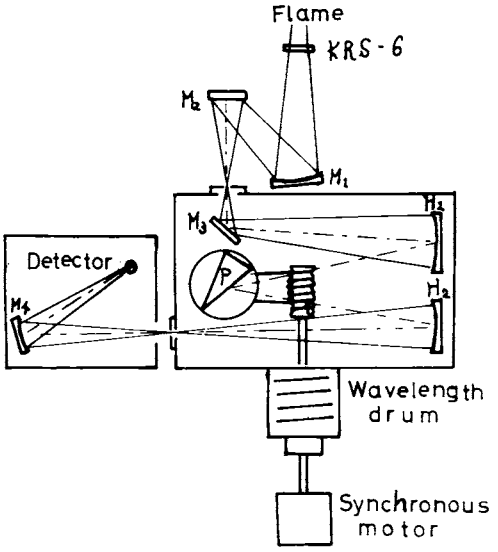


Fig. 3. Optical system of monochromator.

2.2 波長較正および分散補正

Fig. 3に示すように，使用したモノクロメータは波長ドラムが1回転すると，プリズム台が1°回る構造のものであり，プリズムには種々の材質のものが使用できるようになっている。そこで，ドラム目盛と波長の関係をOptical Coating Laboratory, Inc. のNarrow bandpass filterおよび適当な光源で較正後使用した。

また，上記のモノクロメータの射出スリットにおける1次分散は次式によって補正した：

$$d\lambda/dw = d\lambda/f d\theta.$$

ここで，$d\lambda$, dw, $d\theta$はそれぞれスペクトル線の波長の微小変位，スリット面上におけるスペクトル線の位置の微小変位，プリズムの偏角の微小変位を表わし，fは凹面鏡H_2の焦点距離である。

このほか，空気中の炭酸ガス，水蒸気およびプリズム，窓材等の吸収補正が厳密には必要であるが，光路長，波長域から考えて無視できるものとした。

2.3 実験結果

上述の実験装置により，ロウソク，ガソリン，ヘキサン，アルコール，都市ガスの炎の発光分光特性を調べた。Fig. 4 (a)～(d)は補正を行なった測定結果の代表的なものを示す。図から明きらかなように，いずれの炎の場合にも4.0～4.7μ(ピーク値約4.4μ)の波長の中間赤外領域に炭酸ガスによると思われる共鳴放射が存在することがわかった。その放射量は，ロウソク，ガソリン，ヘキサンの場合全放射量の約20%，都市ガス，アルコールの場合約85%であり，またそのピーク値は前者の場合灰色放射のそれの約2.5倍,後者の場合約30倍であった。

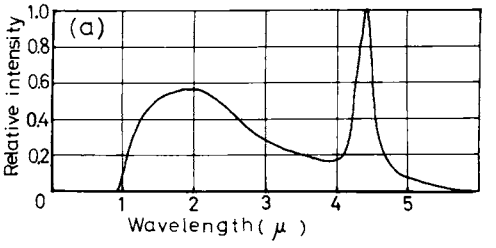
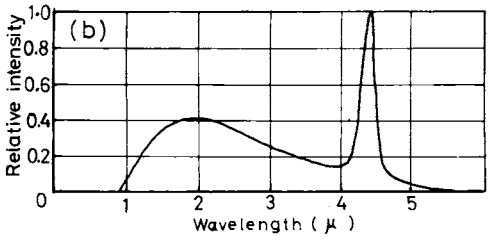
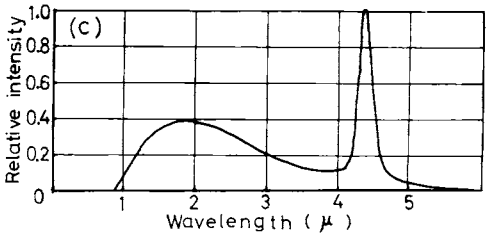
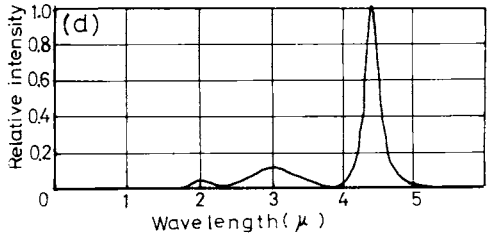


Fig. 4. Emission spectrum of various flames.







(a) Candle light
(b) Gasoline flame
(c) Hexane flame
(d) City gas flame

なお，都市ガスの場合空気との予混合炎と拡散炎とについて行なったが,予混合炎の場合放射量が拡散炎の約1.3倍となるが,分光特性はほとんど同じであった。

上記の発光分光特性とともに，炎の温度を直径0.1mmの白金－白金ロジウム熱電対で測定した。その結果

はFig.5に示すとおりである。

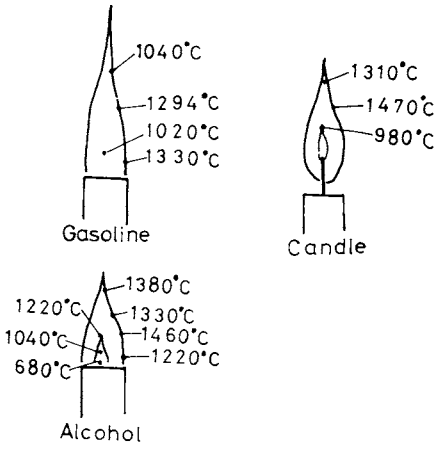


Fig.5. Relative temperatures in various flames by thermocouple.

2.4 検　　討

前項の実験結果によれば，ロウソク，ガソリン，ヘキサンの場合，ほぼ同様な発光分光特性をもつ。これは炎の中に炭素粒子が多く，赤外放射の大部分を灰色放射が占めているためと思われる。なお，この灰色放射のピーク波長は約1.8μであり，Wien の変位則から炎の温度は 1,340 ℃と推定される。この値は，Fig.5 に示す熱電対による測定温度1,300～1,470℃とほぼ一致する。

これに対し，都市ガスおよびアルコールの場合，共鳴放射は灰色放射に比べ著しく強い。Fig.4 (a) において波長約2μの山は灰色放射のピーク値，約3μの山は4.4μと同様炭酸ガスの放射によるものと考えられる。

いずれの場合にも波長4.4μに強い共鳴放射が存在することは，これを利用してきわめて誤報を起こしにくい炎感知器を作り得るものと推定される。すなわち，いま，炎と，炎を伴わないが炎と同じ温度，放射強度，形状をもつ高温物体があるとき，後者の波長域4～5μの放射エネルギは前者の1/10程度であり，きわめて誤報を起こしにくい感知器が期待される。

3. 炎感知器の試作

前節の結果から炎の赤外部における共鳴放射の実体がわかったので，これを利用して炎感知器の試作を行なった。

3.1 回路方式

前節の共鳴放射を利用した感知器として，その波長域だけを通す赤外バンドパス・フィルタを感知素子の前面に設けたものがまず考えられる。ここではさらに，炎のチラツキ成分をとらえる方式[3]を併用することとした。炎のチラツキ成分をとらえることは，利用できる放射エネルギの減少を伴うが，これは交流増幅で救済できるものとした。

そこで，Fig.6 に示すように，赤外フィルタ(F)，検出回路(A)，電気的低域沪波器(B)，増幅器(C)，波形整形回路(D)，遅延回路(E)から構成することとした。

A：Detector head
B：Low-pass filter
C：Amplifier stage
D：Wave-shaping circuit
E：Delay circuit
F：Infrared bandpass filter

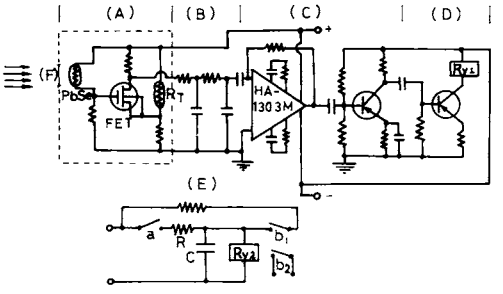


Fig.6. Synthetic circuit diagram.

3.2 検出回路

使用した赤外フィルタはアメリカのOptical Coating Laboratory, Inc. のものを用いたが，その透過分光特性はFig.7 に示すとおりである。

赤外線検出素子のうち，常温で4μより長波長域で高感度のものは，InSbおよびPbSe 光導電セルである。とくに後者は前者より高い検出率がとれるのでこれを採用することとした。PbSe セルの分光感度特性はFig.8に示すとおりであり，また使用したものの特性はTable 1に示す。

PbSeセルのインピーダンスは3 MΩ程度であるので，Fig.6 の点線で囲まれた(A)に示すように，インピーダンス変換用のMOS型電界効果トランジスタ回路を

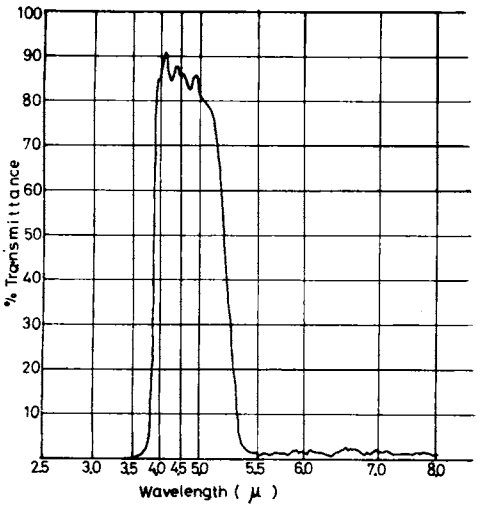


Fig. 7. Transmission of infrared bandpass filter.
(Optical Coating Laboratory, Inc.)

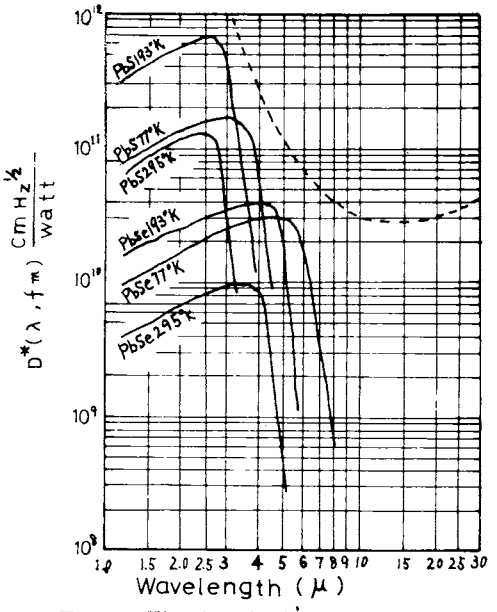


Fig. 8. Wavelength characteristics of various photoconductors.
D* : Detectivities

検出回路に付加した。このトランジスタの諸特性は Table. 2に示すとおりである。

この検出回路の感度を知るために，Fig. 9 に示す回路により，ガソリン，新聞紙等を燃やしたときの出力波形を調べた。その結果はFig. 10に示すとおりである。同図(b)から，検出回路から 5 m離れて新聞全紙の⅛の大きさのものを 2 枚重ねて燃やしたとき，0.5mVp-p の出力が得られることがわかる。

Table 1. Characteristics of PbSe photoconductive cell.
($8 \times 8\,mm^2$ Element, SANTA BARBARA RESEARCH CENTER)

conditions	Blackbody temperature	500°K
	Blackbody flux density	$6.54 \times 10^{-6}\,Wcm^{-2}$
	Chopping frequency	780Hz
	Noise bandwidth	80Hz
	Bias voltage	250V
	Load resistance	1.0MΩ
	Detector temperature	295°K
Test results	Impedance	3.5MΩ
	Noise	2.9μV
	Signal	540μV
	Detectivity	$2.8 \times 10^8\,cmHz^{1/2}W^{-1}$
	Blackbody responsivity	$1.3 \times 10^2\,V\,W^{-1}$

Table 2. Characteristics of MOS type field-effect transistor 3SK13, (HITACHI Ltd.)

BV_{DSX} ($I_D = 10\mu A$, $V_{GIS} = -10V$)	20V
I_{DISS} ($V_{GIS} = -6\,V$, $V_{DS} = 0$)	−10 pA
I_{DSS} ($V_{DS} = 6\,V$, $V_{GIS} = 0$)	2.0mA
V_{GISC} ($I_D = 10\mu A$, $V_{DS} = 6\,V$)	−0.8V
v_n ($V_{DS} = 6\,V$, $I_D = 1mA$, $Rg = 1M\Omega$, $f = 270Hz$)	$0.6\mu VHz^{-1/2}$
y_{is} ($V_{DS} = 6\,V$, $I_D = I_{DSS}$, $f = 270Hz$)	$750\mu\Omega$

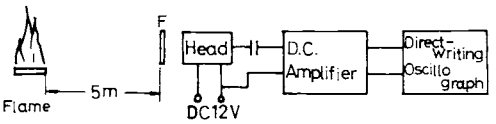


Fig. 9. Arrangement of measurement of flame flicker.
F : Infrared bandpass filter

そこでこれを標準火災発見条件とした。この場合，検出回路を置いた位置における全受熱強度は最大約 1.5 mW cm^{-2}，バンドパス・フィルタ通過後の共鳴放射部のそれは0.45mW cm^{-2}であったので，炎のチラツキ分のそれは0.1mW cm^{-2}と推定される。

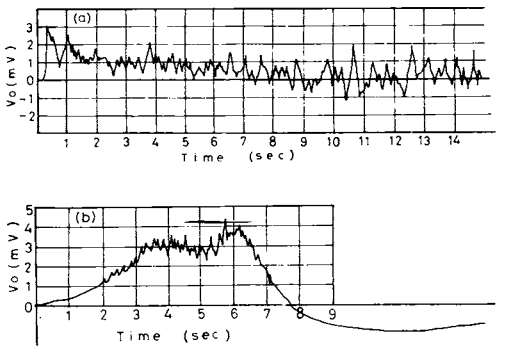


Fig. 10. Output voltage of detector head V_o.
(a) 20cm diameter pan of gasoline
(b) Burning of 2 sheets of $20\times30cm^2$ newspapers

3.3 低域濾波器

Fig. 10に示した測定結果から炎のチラツキは2～15Hzであることがわかったので，この周波数帯のみを通すＲＣ２段低域炉波器を用いることとした。

この炉波器単体および後述の増幅器を併用した場合の周波数特性は**Fig. 11**に示すとおりであり，炉波器の挿入損失は約10dBであった。

3.4 増 幅 器

検出回路からの出力0.5mVにより波形整形回路リレー動作電圧10Vを得るために，電圧利得約85dB(20,000倍）の増幅器が必要となる。実際には炉波器の挿入損失－10dB，後述の波形整形回路の利得＋15dBがあるので，80dB程度の利得があればよい。利得および増幅周波数を考慮して，日立の演算増幅器用集積回路ＨＡ1303Mおよびトランジスタ１段増幅回路で構成した。その回路は**Fig. 6**の(C)として示している。

3.5 波形整形回路

この回路は，強い放射の急激な変化およびスイッチの開閉等により生じるインパルス電圧等を一定振幅とするために設けられ，リレーを負荷としたＢ級増幅回路である。その結線は**Fig. 6**の(D)の部分に示すとおりであり，波形整形出力はリレーRy_1の接点ａの開閉により得ている。

3.6 遅 延 回 路

この回路は，放射が２～３秒間連続して与えられたとき動作し，ごく短時間の放射では動作しないよう，付加された。**Fig. 6**の（E）に示すように，R，CおよびRy_2で構成されている。図においてb_1は自己保持用接点，またb_2は火災信号発生用接点である。

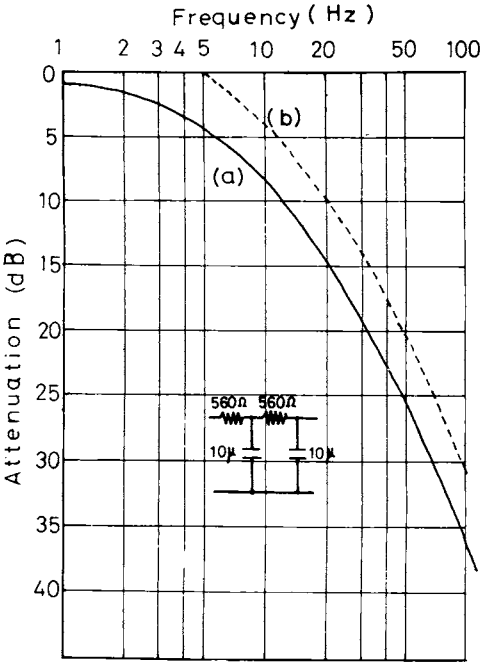


Fig. 11. Filtering characteristic curves of RC filter and amplifier.
(a) Without amplifier
(b) With amplifier

3.7 試作器の性能

完成した試作器は，当初の設計どおり新聞全紙の⅛枚を二つ重ねにしたものを燃やしたときに，距離５ｍの位置で動作した。これは従来の炎感知器に比べ，警戒距離にして約½となるが，設計自体がこの感度を目標としてなされ，実用上十分な感度であると考えられる。試作器は500W電球を感知器から0.5ｍの位置で点滅しても誤動作をすることはなかった。そこで通常の熱源や光源による誤動作はほぼないとみられる。しかし，最大の誤動作源となる太陽の放射エネルギは，実測によれば夏季の地上において約50mW cm^{-2}，検出回路に使用した赤外バンドパス・フィルタを通過した後においても1.6mW cm^{-2}であった。この値は標準火災発見条件の炎のチラツキ成分0.1mW cm^{-2}を上まわる

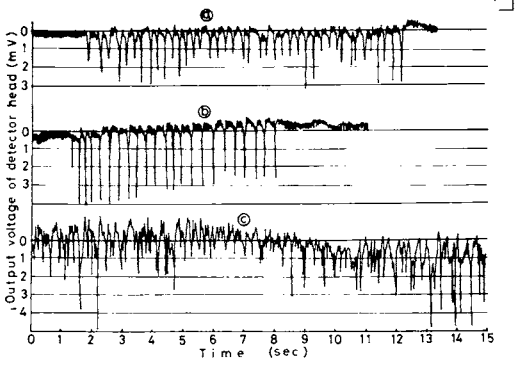


Fig. 12. Solar radiation which is reflected by the sway of various surfaces.

Reflector a : Aluminium plate
b : Glass mirror
c : Water

値であるが，実際には検出ヘッドを上向きに設置することはありえないので，反射による誤動作だけを考えればよい。この際，反射体は比較的平たんな面と，3～5μ波長において6％以上の反射率を持ったものからの反射でなければ誤動作を起こす可能性は少ない。参考のため，ガラス鏡，水面，アルミニウム板の3者を振動させながら，太陽の反射光を試作ヘッドに入射させて，その出力をオッシログラフに記録した。その結果はFig. 12に示すとおり，ヘッド出力で約3～5mVとなり，誤動作を起こす可能性のあることがわかった。したがって，遮閉板の使用，取り付け位置の選定が，誤動作を防ぐため必要と考えられる。

4. ま と め

以上で赤外線共鳴放射を利用した炎感知器の説明をおわるが，実用化するまでには多くの問題が残っている。

(1) PbSeの経年変化

(2) 赤外バンドパス・フィルタの機械的強度

(3) PbSeならびにフィルタの価格

(4) ヘッドを複数個，並列接続した場合の感度低下等である。これらの問題については今後とも研究を続けたいと考えている。

おわりにあたり本研究に有益な助言を賜わった。熊野陽平第二研究部長，山本満郎，渡辺彰夫両研究室長および試作工場の方々に深く感謝の意を表します。

引 用 文 献

1) A. G. Gaydon: Spectroscopy and Combustion Theory.

2) A. G. Gaydon, H. G. Wolfhard: Flames.

3) 筒井勇次郎：消防研究所報告，Serial No. 21, 1—14 (1961)

Fire Detection by Infrared Resonance Radiation

(Abstract)

Kiyoshi Nakajima

(Received December 24. 1969)

The object of this paper is to describe the new type flame detector which is sensitive to infrared resonance radiation.

The first part of this paper reports that flames of burning fuels, such as gasoline, alcohol, candle and city gas commonly emit a considerably strong resonance radiation band of about 4.4 μ, and that the radiant energy of the band amounts to about one fifth of the entire radiant energy (see Fig. 4).

The second part is concerned with the flame detector based on the above-mentioned facts. As shown in Fig. 8, a PbSe photoconductive cell which has high sensitivity in the above-mentioned wavelength region, and field effect transister (MOS type) are used as detector head in a trial set. Furthermore, an infrared bandpass filter is placed in front of the cell so that only the resonance radiation band can be passed through. The trial set consists of detector head, electric low-pass filter, amplifier, wave-shaping circuit, integrating circuit, etc., as shown in Fig. 6.

The detector can detect (1) 20 cm diameter pan fire of gasoline at a distance of 5 m from the head, (2) burning of a sheet of newspaper of about 1000 cm^2 at the same distance, and (3) burning of a match stick at a distance of 50 cm from the head. The false alarm does not occur by flashings of 500W-bulb at a distance of 50 cm from the head.

消防水利としての不圧水井戸の水文学的研究

細 野 義 純

(昭和44年12月26日受理)

1. 緒 言

消防水利として，井戸，集水池等の施設によって，地下水を用いる例は相当の数にのぼっている。* しかしながら，その分布をみると，特定な市町村の地域に集中する傾向がみられ，市町村の消防水利のかなりの部分が地下水によっているところもあれば，逆に同様な地形，地質等の条件のもとにある隣接した市町村であっても、まったく設置されていないなどの例もあって必ずしも地下水がこれら消防水利施設として，十分に活用されているものとはいいがたい。

消防水利として，地下水を用いることの利点としていくつかの事がらをあげることができる。それらを列記すれば，

1）寒冷地にあっても，冬季に凍結の心配がないこと。

2）貯水槽，貯水池等の人工水利のように，消費した水をふたたび補給する作業を要せず，使用後放置したままの状態で，すみやかに原水位に回復すること。

3）水の代価を必要としないこと。

4）施工費用も他の施設，たとえば貯水槽等に比し，経済的であること。

などがある。一方，欠点としては，

1）水位が季節的に変動すること。

2）さく井の適地を決めがたく，帯水層の選択にも技術を要すること。

3）使用に際しては，地表からある深さまで，吸管を下げねばならないこと。

などをあげることができる。

別の見地から，大きな地震等が発生した場合を考えると，導水管，送水管，配水管等の水道管路の折損，取水場，浄水場，配水場等の水道施設の損傷などによって，断水を余儀なくされ，消火栓が無能と化すことは必至であり，[16]そのような場合にも使い得る水利施設として，貯水槽とともに重要な役割をもっている。** この種の非常事態を想定して，水供給のための具体的な拠点を定める調査研究は，米国においてその例を認めることができるが，[25]わが国の場合には，従来，行なわれたものはない。

このように，消防水利として地下水を利用する方法には2つの場合がある。その第1は，地下水のもつ利点に着目し，平時における消防水利として開発を行なうことであり，第2は，非常事態を想定しての補助水源としての場合である。*** そして，両者の間には，その調査方究方法，施工法等において，基本的になんら変わるところはないが，後者のような非常事態を想定しての場合には，必ずしも消防水利の基準に示された数値にこだわらねばならないものとは考えない。

地下水は，水文学的には地球における水の循環に関与した，組織的な循環水の一部である。地下水が他の循環系の水に対して，著しく異なる点は，地下水系中の多くの水の部分が，流動状態にあるというよりも，むしろ，貯留状態にあるというべき，おそい循環速度のもとに存在することである。地下水の利用にあたって，第一に考えねばならないことは，地中におけるこのような水の賦存機構である。今日では被圧水に関す

* 消防庁刊行，昭和43年消防年報（通巻 第18号）によれば，昭和43年4月1日現在で、全国総数30773個となっている。

** これらの水利施設が，地震によってどの程度の被害をうけるかについては，新潟地震，[8][9] 十勝沖地震の場合について調査した例がある。その結果は，河川や井戸等の自然水利の安全性は，もっとも高く，また，貯水槽も国が定めた補助の対象となるような基準にしたがって施工されたものは安全性が高いことが確認された。

*** 地震に伴って地下水位が変動する例として宮部直己[1]の報告がある。筆者も松代において研究を行なった例[15]があるが，これらを綜合してみると礫層を帯水層とする不圧水の場合には信頼性は大きいものと考える。

る賦存機構については，かなり明らかにされてきたものといえよう。しかしながら，不圧水**については，まだ未解決な問題が多く，このために評価にも違いを生じ，十分に活用されにくい結果を招いているものと考えることができる。

この研究は，消防水利として利用できる水量を賦存するような帯水層の位置および性質を明らかにするため，不圧水について水文学的な検討を行なったものである。その結果，さく井方法，および，さく井の適地を知る手法が次第に明らかになってきた。

この報告中に例示する個々の事実の詳細については，それぞれ，別の機会に発表したものもあるが，[9)-24)]本報告では，それらを総括して，消防水利に適する実用的な見地から，とりまとめを行なったものである。

2．消防水利として要求される条件

消防水利が利水のうえで他の利水，たとえば，農業用水，工業用水，上水道等と比べ，著しく異なる特質は，消費する水の総量は僅少なものであるにかかわらず，短時間に必要とされる水量がきわめて大きいことにある。国が定めた消防水利の基準（昭和39年12月10日，消防庁告示第7号）によれば，取水可能水量が毎分1 m^3以上で，かつ，連続40分以上の給水能力を有するものとされている。この水量を地下水から得るためには，帯水層の注意深い選択が必要とされる。また，地盤面からの落差，すなわち水位は，4.5m 以下とされているが，この値は揚水による水位降下後の値であり，地域によってはきびしいものがある。とくに最近のように産業公害による広域にわたる不圧水の水位低下に悩む地域にあっては，季節によって，この値を越す渇水期間が相当長期間にわたる場合が少なくない。***

将来においては，消火に際しての水の消費量を節減して消火を行なうことも考えられ，また，揚水方法を変えることによって揚程の増大も可能であろう。

したがって，本報告では必ずしもこの数値のみにとどまることなく，この数値に多少はずれる程度のものは，本報告の主意に反しない限り，こだわらないことにした。

Fig.1 Distribution of wells qualified for fire-fighting in the downstream area of the river Sagami in Kanagawa prefecture, Japan.

* 被圧水については，今日では工業用水，農業用水，上水道などで盛んに開発し利用されている。一例をあげると，東京では区部を除く三多摩全域での上水道の水源のほとんどは井戸であり，供給量の97%は被圧水を用いた地下水である。このような状態であるから，必然的にその開発技術，評価法についても研究がすすめられ，上記の三多摩地方についてみると，帯水層の確立[7)]がなされ，量的な評価については電子計算機を用いて定量化を行なうことなどが行なわれている。[23)]

** 地中において透水層が上下を不透水層によってはさまれている場合，透水層中の地下水は透水層の傾斜，上圧等によって被圧された状態となる。このような被圧された地下水を被圧水といい，これに対して被圧されていない地下水を不圧水とよんでいる。不圧水はまた，自由水ともよばれる。

*** 一例として，多摩川沿岸の河谷の沖積地をあげることができる。この地域では冬季における渇水がいちじるしい。この問題については，近いうちに“多摩川沿岸における消防井戸の水文学的検討”（仮題）として発表する予定である。

3．消防水利として存在する不圧水井戸の分布例

消防水利として用いられている不圧水井戸の分布は，主として河谷の沖積地，扇状地端末部（扇端部），海岸平野，砂丘地帯，旧河道および現河川の伏流帯等に多くみることができる。*

Fig.1 は相模川下流地域における地形分類および消防井戸の分布を示す図である。***Fig.2*** は同じ地域の地形等高線図を示し，***Fig.3*** は1966年8月における同じ地域の地下水面等高線図を示す。

相模川下流沿岸の平塚市，茅ケ崎市，寒川町一帯には，消防井戸を相当数認めることができる。これらの消防井戸は，地形分類からみると河谷の沖積地，台地の一部，海岸平野，および砂丘に分布し，地下水面等高線図からみると，地下水はすべて相模川からかん養されるものではなく，逆に相模川をかん養し，**また相模川に沿う小河川，すなわち花水川，小出川は，それぞれ独立した地下水区を形成する。しかしながら，全体としては地下水面は盆状構造を示し，そのような部分に消防井戸が多数設けられている。

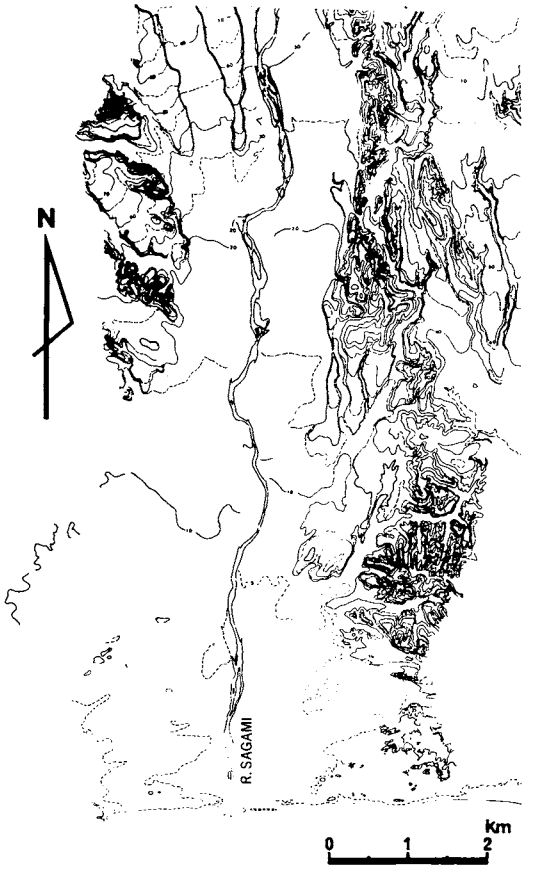


Fig.2 Land contour map for the same area as in *Fig.1*　　Numeral: meter

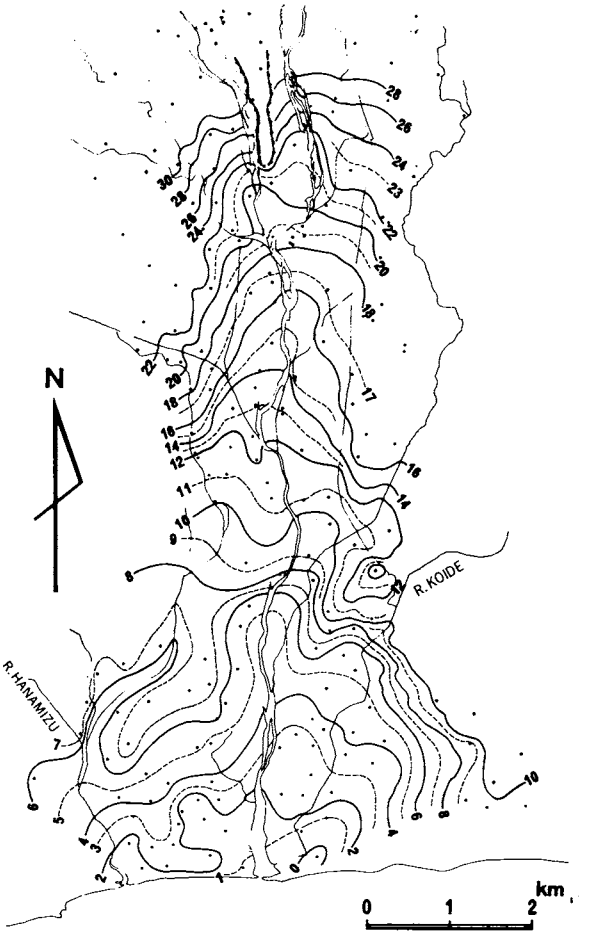


Fig.3 Ground-water table contour map for the same area as in *Fig.1*

* 被圧水を用いた場合には，このような例と異なる場合があるが，ここでは，表題のとおり，被圧水については扱わないことにする。

**このことは，つぎのように言いかえることができる。すなわち，大きな河川が近くを流れていることによって，井戸に水が流入し，多量の揚水ができるというものではなく，井戸が利用できるほどの豊かな帯水層から排出される地下水によって，流れのつきることのない河川が生成されているということである。

Fig.4 は多摩川沿岸の部分にみられる消防井戸の分布例である。* この図の地域は，後出の *Fig.7* の一部に含まれる。この地域は多摩川旧河道をはじめ，沖積地全域にわたって厚く礫層が堆積し，良い透水層を形成している。消防井戸は，これらの沖積礫層の部分と台地の一部に設けられている。地下水と河川の関係は相模川の場合と同様，地下水が多摩川の水をかん養している。台地と沖積地との間の地下水は不連続である。[24]

消防井戸の地理的分布の特質等については，別の機会に詳細にふれてみたいと思う。

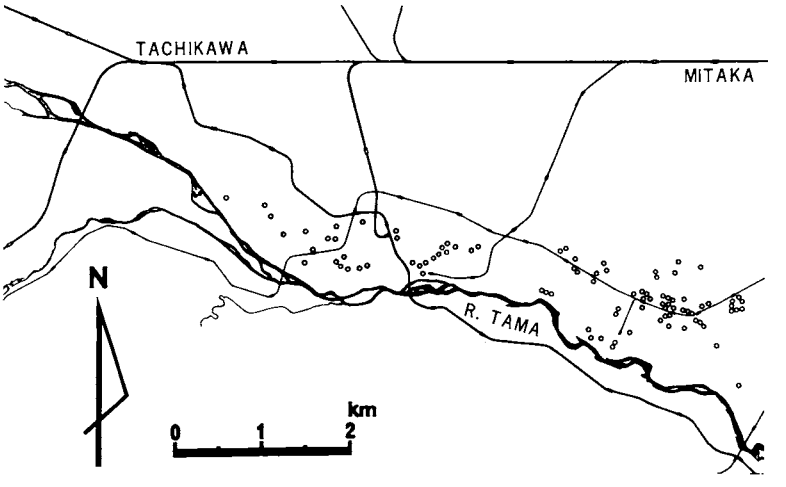


Fig.4 Distribution of wells qualified for fire-fighting in alluvial areas in the gorges along the river Tama, Tokyo. The area shown in the figure is equivalent to a part of the area in *Fig.7*

4．消防水利としての井戸の水理定数の検討

地下水は水頭の高いところから低いところへと移動する。いま，揚水を行なって汲出井戸の水位を下げれば，周囲から井戸に向かう動水傾斜を生じ，地下水は井戸中に流入する。もし，帯水層が等質であって，地下水面が汲出開始前に水平であるならば，揚水開始とともに地下水はあらゆる方向から等しく汲出井戸に流入し，周辺地下水面の形態は円錐状の低下をみるようになる。

このようなときにおける井戸の揚水量と水位降下に関する理論式として，平衡式と非平衡式とに大別して考えられている。**

平衡式の基本式は，***

$$K=\frac{Q}{\pi(h_2^2-h_1^2)}\log_e\frac{r_2}{r_1} \qquad (1)$$

非平衡式の基本式は，

$$s=\frac{Q}{4\pi T}\int_u^\infty\frac{e^{-u}}{u}du=\frac{Q}{4\pi T}W(u) \qquad (2)$$

$$u=\frac{r^2S}{4Tt} \qquad (3)$$

ここに，

K：透水係数　cm / sec

Q：揚水井の揚水量　cm^3/sec

r_1，r_2：揚水井から観測井までの距離　cm

h_1，h_2：観測井 r_1，r_2 における不透水層上面から揚水中の地下水面までの高さ　cm

s：水位降下　cm

r：距離　cm

t：時間　sec

T：透水量係数　cm^2/sec

S：貯留係数

透水係数(Permeability coefficient)，透水量係数(Transmissibility coefficient)，貯留係数(Storage coefficient)は，帯水層に関する定数で，帯水層の水理学的定数とよばれている。この定数を得ることを目的として，揚水試験が行なわれる。

(2)式において，$W(u)$ は井戸函数とよばれている。この式からは，直接に定数を求めることはできないので，対数座標のX軸に u，Y軸に $W(u)$ をプロットした，$u-W(u)$ 曲線(標準曲線という)を作成し，これと同じ大きさの対数座標のX軸に r^2/t，Y軸に s をとって，観測値から $r^2/t-s$ 曲線を作図し，両曲線を重ねて対比すれば，解を得ることができる。

* この地域は都市化の影響がはげしく，水位の低下も著しいので，この図に示した消防井戸のかなりの部分が使用不能の状態となっている。

** これらの式のもつ意味，誘導式，解法等については，山本荘毅[2)3)4)]，村下敏夫[5)]，酒井軍次郎[6)]らによって，国内においても紹介されているので，ここでは式の紹介のみにとどめる。揚水実験による式の運用と，解析の結果例は別に発表した。[21)]

*** 平衡式は非平衡式の特殊な場合に相当するものである。[26)]

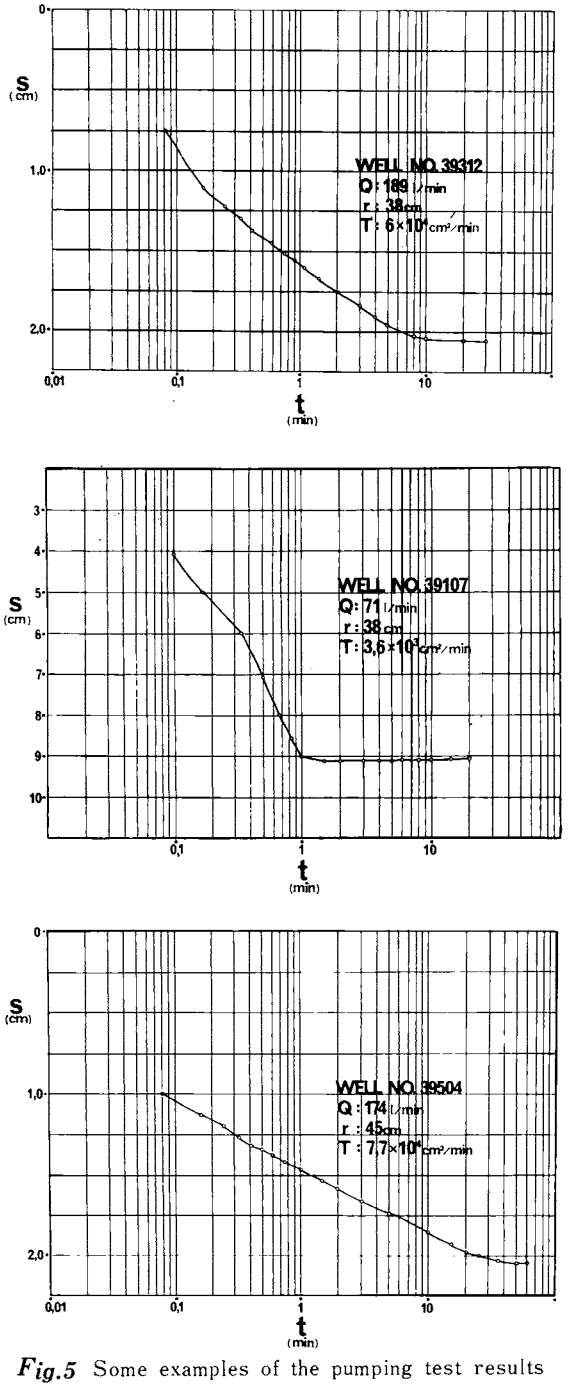


Fig.5 Some examples of the pumping test results of aquifer conducted for several wells designated for fire-fighting

t: Time of pumping (min)
s: Depression of ground-water level (cm)
Q: Pumping rate (l/min)

また，(2)式には，いくつかの誘導式があって，別の方法によっても解を得ることができる。

透水量係数Tは透水係数Kに帯水層の厚さHを乗じたものである。ボーリング等の資料があって，帯水層の厚さが明らかな場合には，(1)式から計算することができる。

Fig.5 は実際に消防井戸を用いて行なった揚水実験の例である*。この観測値から非平衡式によって解析を行なうと，透水量係数Tは3600～77000cm²/minの範囲にあることが計算の結果，みちびかれた。

また，***Fig.6*** は武蔵野市吉祥寺において行なった実用規模揚水実験[21]の一例で，井戸径は60cm，揚水量Qはポンプの能力いっぱいの3000 l/minまで揚水し，そのときの最大水位降下量は88cmとなった。この水量は消防水利として必要な水量の3倍の値である。帯水層は武蔵野礫層で，水位はおよそ10mである。この実験から任意の時間tにおけるr^2/t-s曲線を作図し，非平衡式によって透水量係数Tを求めると，おおむね，8×10⁴cm²/minと計算される。**[21]

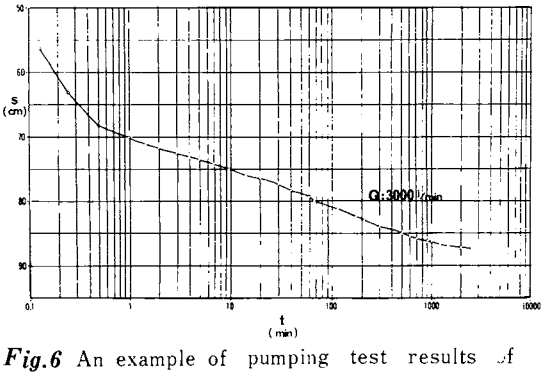


Fig.6 An example of pumping test results of aquifer in Kichijoji, Musasino city, Tokyo.

The dependence of the depression of ground-water level(s) on pumping rate(Q) is illustrated.

* 図中のWell. No. は，さきに発表した資料[17]の観測井番号と一致させてある。図中，39107号井に関するものは，水位降下が大きすぎ，取水可能量の点で消防水利としては，やゝ不安があるように思われる。

** 非平衡式は元来，上下を不透水層によって遮断された帯水層について適用されるものではある。したがって揚水によって水位が降下すればHは小さくなりTの値は修正されねばならない。しかしながらHが十分に大きく(この場合10m)sが小さければ(この場合10～90cm)無視し得るものと考える。また，上位層からの浸透の問題については，降水の結果，水位が上昇しつつあるような，あるいは逆に下降しつつあるような時期を避ければ差し支えないものと考える。

このほか，揚水実験は多くの個所で実施したが，透水量係数Tの値は，特殊な場合を除き，$10^1 \sim 10^4 cm^2/min$の範囲にわたっている。

消防水利に必要な揚水量を得るためには，帯水層の水理学的定数は，透水量係数Tにおいて，およそ$10^4 cm^2/min$程度の数値を必要とする。*

5．水理定数の分布と地下水面との関係

Fig.7 は測水調査[10)20)]によって作成した地下水面等高線図と，揚水試験によって計算された透水量係数Tの分布を示すものである。地下水面等高線図は武蔵野台地南部の立川面を中心とした地域であり，武蔵野面の一部と，青柳面，沖積面がそれぞれ含まれている。測水時期は1967年2月で当該地域では渇水期に当たつている。[11)]この図から地下水面の形態と透水量係数との間には，かなりはっきりとした関係があって，地下水が凹んで谷状となる部分については，透水量係数も大きな値を示しているものということができる。[22)]

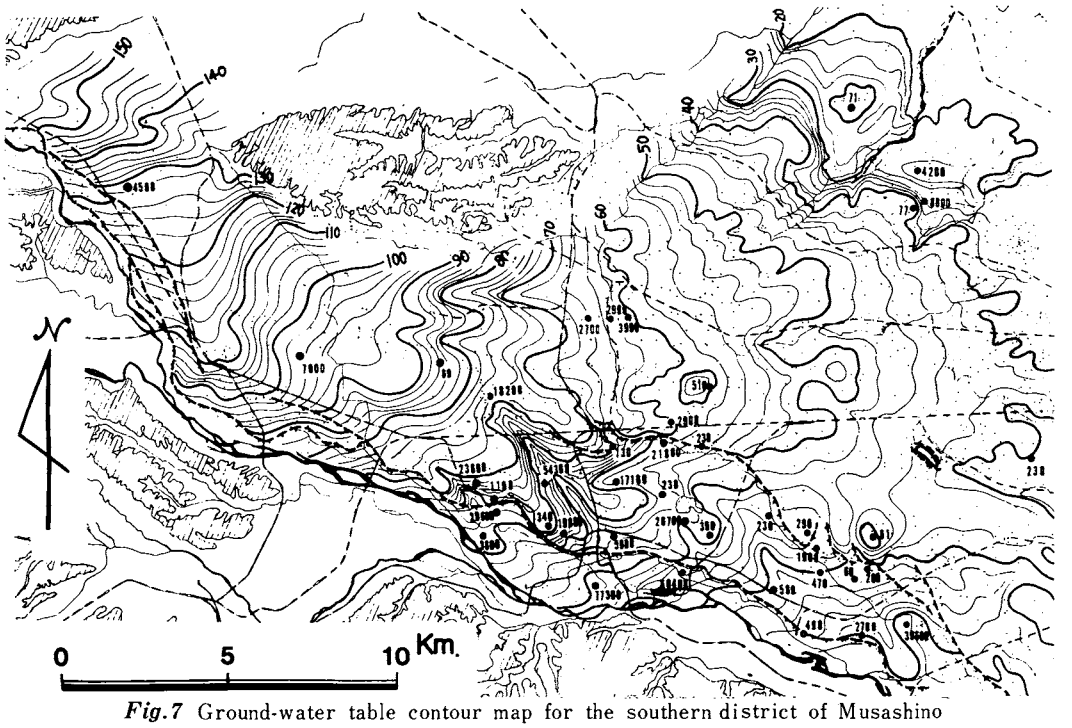


Fig.7 Ground-water table contour map for the southern district of Musashino Terrace. Numerals in the map show the coefficient of transmissibility T in cm^2/min.

6．水位の変動と地下水面との関係

地下水面は，地表からの浸透および上流の地下水域からの流入と，下位層への浸透および下流の地下水域への流出との水収支要素によって，たえず昇降を行なっている。この地下水面の昇降——すなわち水位の変動——にも，大別して二つの要素を指摘することができる。[19)]

その第1は，年間を通しての季節的な水位の変動であり，おおむね，一つのサイクルを形成する。[14)]

第2は降雨に伴う水位の変動であり，降雨の結果，水位が上昇し，やがて降雨の影響が失われると逓減曲線をえがいて消滅する。

地表と帯水層との間に保水能の大きい土層，たとえばローム層などが厚く堆積すると，降水による浸透作用を平滑化する働らきを有するが，[19)]季節的な変動の大小は，帯水層のもつ水理学的定数に大きな関係があるものと思われる。

季節的な変動が大きい部分は，地下水面の谷状に凹んだ部分と一致することは，すでに発表したとおりである。[18)]

Fig.8 は水位の変動状況の一例を示したものである。

* 消防水利としては，時間の単位はminの方が便利である。

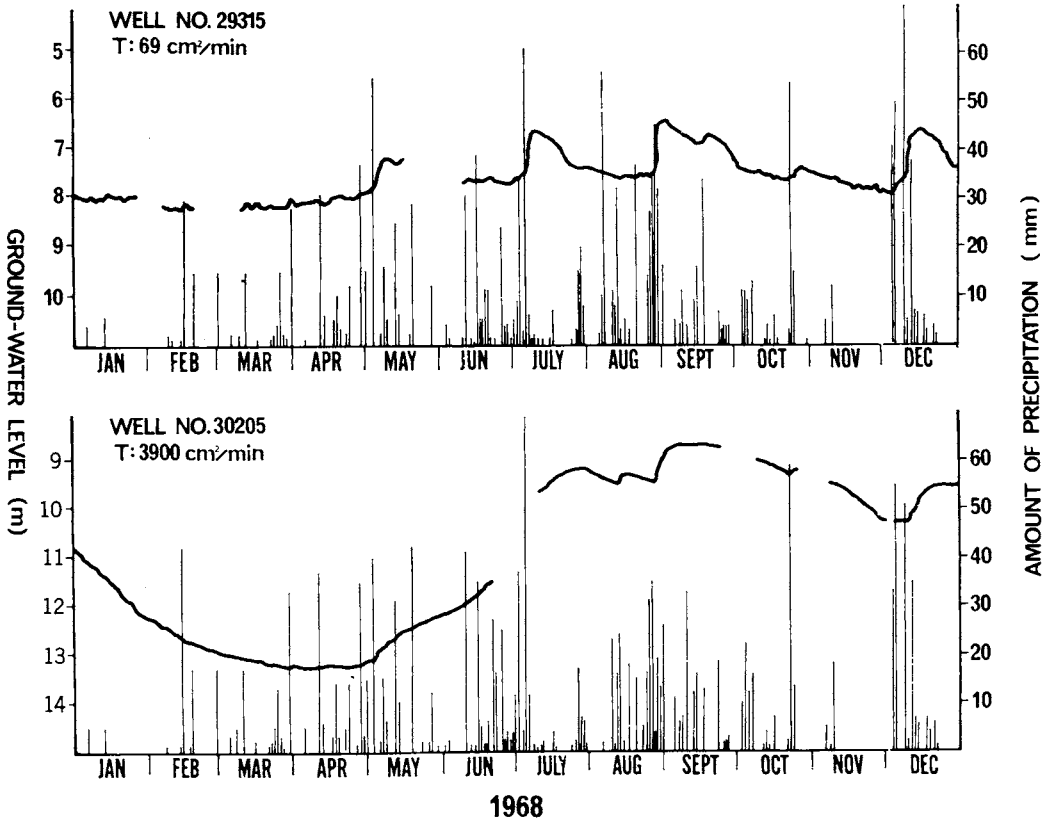


Fig.8 Distribution of dialy amount of precipitation (bar graph) and fluctuation of ground-water level (curve graph) in the year 1968. The upper graph corresponds to the well (well No. 29315) which has the small coefficient of transmissibility and the lower one to the well (well No. 30205) which has the large coefficient of transmissibility.

この図は1968年1年間における水位の変動状況を自記水位計を用いて観測し，結果を水位曲線として図示したものである。降水量はそれぞれ棒グラフをもって示してある。[17]

この図において，Well No. 30205 は武蔵野台地中央部の小平市仲町に設けられた観測井戸のものである。透水量係数 T は3900cm²/minと算出されている。

一方，Well No. 29315は武蔵野台地南部の立川市砂川町に設けられた観測井戸のものであって，透水量係数 T は69cm²/minと算出されている。ともに段丘礫層中に帯水するものである。

このほかにも多くの例があるが，[17]一般に透水量係数の大きい値を示す井戸にあっては，年間を通しての変動が一つの大きなサイクルとして，かつ，その変動の幅も大きいことが特長であるといえる。

一方，一つの降水量に対する地下水位上昇量は，従来から雨量係数と言われ，これはおおむね有効空隙率を示すものとされている。しかしながら，地下水面に達するまでの地層の保水能の問題や，地下水位の上昇がすべて降水によるものでなく上流の地下水域からの流入もあるので，ただちに雨量係数をもって有効空隙率と考えることには疑問をもつ。[19]

*Fig.9*は1968年12月に東京西郊で観測された降水量の積算雨量と地下水位の上昇量を示すものである。[19]降水開始にさかのぼる過去24日間は連続無降雨で，このことは，当地域では過去53年来の記録であるといわれた。しかるに，降水が始まってからの最初の雨量は，管区気象台での12月における第3位の多雨値となり，月間の総雨量にいたっては観測史上最大のものとなった。

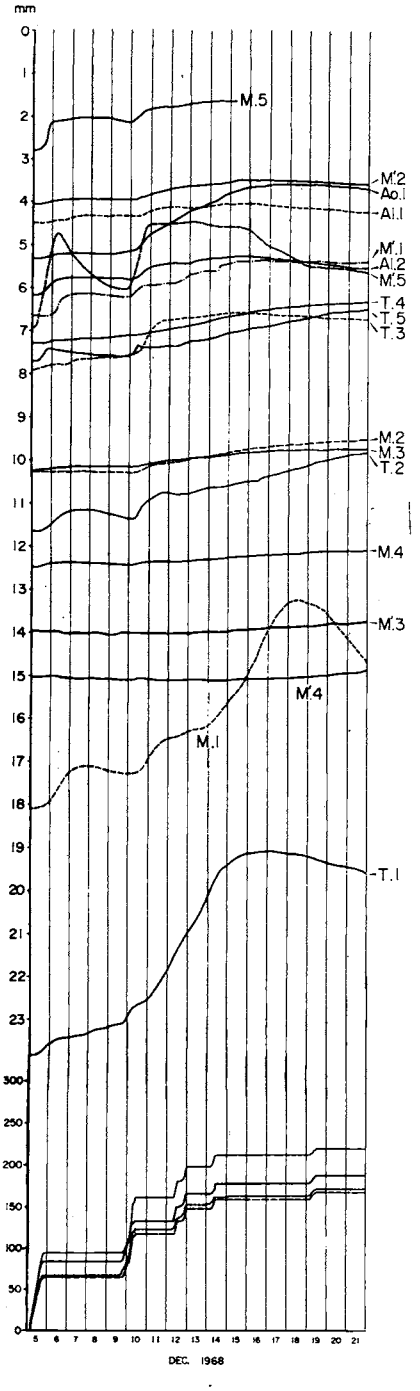


Fig.9 Accumulated precipitation and corresponding rise of ground-water level for a period from Dec. 4-21, 1968

Al 1 : Well No. 30726 Yaho, Kunitachi city T=30000cm²/min
Al 2 : Well No. 39504 Minami-chô, Fuchû city T=77000cm²/min
Ao 1 : Well No. 30722 Fujimidai, Kunitachi city T=24000cm²/min
T 1 : Well No. 18605 Hane, Hamura town
T 2 : Well No. 29208 Okami-chô, Akishima city
T 3 : Well No. 29315 Sunagawa, Tachikawa city T=69cm²/min
T 4 : Well No. 39301 Wakamatsu-chô, Fuchû city T=27000cm²/min
T 5 : Well No. 40517 Koadachi, Komae town
M 1 : Well No. 30437 Nishi-machi, Kokubunzi city
M 2 : Well No. 30205 Naka-machi, Kodaira city T=3900cm²/min
M 3 : Well No. 30524 Nukui-kita-machi, Koganei city
M 4 : Well No. 30604 Sakura-chô, Koganei city
M 5 : Well No. 40101 Nakahara, Mitaka city T=60cm²/min
M' 1 : Well No. 02606 Nobidome, Niiza town T=71cm²/min
M' 2 : Wall No. 21533 Nishi Ôizumi Nerima ward
M' 3 : Well No. 21210 Ôizumi-gakuen, Nerima ward
M' 4 : Well No. 21512 Ôizumi-gakuen, Nerima ward
M' 5 : Well No. 22812 Komone-chô, Itabashi ward T=50cm²/min

Al : Alluvial plain
Ao : Aoyagi terrace
T : Tachikawa terrace
M, M' : Musashino terrace

このような記録的な無降水に続いた記録的な多雨のもとでの記録であるから，検討を行なう場合には，きわめて好条件に恵まれたものといえよう。

この図から，降水が始まってから水位が上昇し始めるまでの時間のずれ，水位上昇の速度，水位が最高に達するまでの時間等は，各観測井によって大きな相違が認められる。降水量に対する地下水位上昇量，いわゆる雨量係数は，はなはだしく異なっており，いくつかの別の要因が関係するものと思われる。また，水位の上昇は降水に伴って上昇するものと，降水が終わった後10～20日間継続して上昇を続けるものなどもあることが確認された。[19]

このようなことから，雨量係数を導入して帯水層の優劣を定量的に判定することは無理を伴うものと考える。

しかしながら，定性的には帯水層の優劣をある程度判定することが可能である。図において，多量の降水にかかわらず水位の上昇がまったく認められないか，またはわずかの上昇にとどまる井戸については，透水量係数が大きい値を示す傾向があるものといえよう。

7．さく井方法と揚水時における水位降下量の関係

さく井に際し，帯水層の全層厚にわたりストレーナーを切った場合と，そうでない場合とによって，水の揚水可能量すなわち水位降下量は異なってくる。この点に関し，従来，具体的な事例として示されたものは少なかったが，筆者が最近行なった事例を示すと，***Fig. 10***のような結果を得た。[21] 実験場所は武蔵野市吉祥寺で，帯水層は武蔵野礫層で厚さ10mを有する。井戸はベノト工法による機械堀りで，径60cm，W 5，W 8の各井戸とも，同様なさく井方法によっている。両者の間の距離は約60m，帯水層の変化はない。このうち，W 8にあっては武蔵野礫層の全層厚にわたって開孔率17%のストレーナーを切り，W 5にあっては武蔵野礫層の上部½，すなわち，5mについて同様に開孔率17%のストレーナーを設けたものである。揚水量はともに1500 l/minとし，そのときの揚水経過時間と水位降下の関係は***Fig.10***のように示される。このことから，帯水層中にできるだけ長くストレーナーを設けることが水位降下を小さくし，換言すれば取水可能量を大きくすることにつながるものと言える。

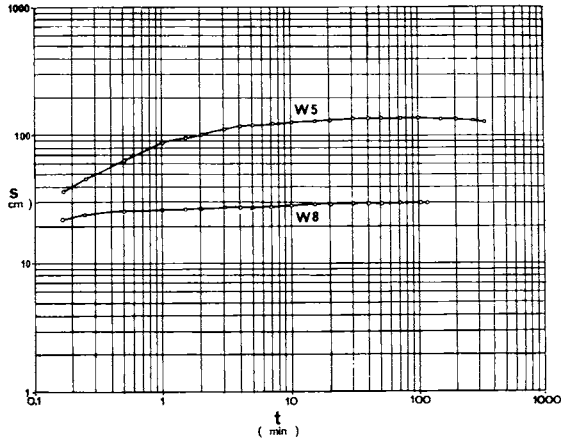


Fig.10 Difference in the depression of groundwater level (s) for a given pumping rate (1500 l/min) between the two different methods of installing the strainer, one to cover whole the depth (10m) of an aquifer and the other to cover only a half (5m).
W8: Well with the strainer to cover whole the depth.
W5: Well with the strainer to cover half the depth.

8．考　　察

透水量係数Tは，帯水層の厚さHに透水係数Kを乗じたものである。したがって，透水量係数が大なる値を示すためには，帯水層の透水係数Kが大きくなるか，もしくは帯水層の厚さHが大きくなるか，またはその両者が大きくならねばならない。***Fig.7***において例示した透水量係数Tの分布をみると，10^1～14^4 cm²/minと，3けたものひらきがあり，このことから帯水層と地下水の賦存機構につき考察を行なうと，

1）もし，帯水層が均質な粒径を有する砂礫層等から構成されていると考えた場合（$T=KH$において，Kを不変と考える），帯水層の厚さHは相当なひらきがあって，帯水層堆積前の原地形面中に，極端な凹部（化石谷）が生じなければならないことになる。* このような極端な化石谷の存在という仮定は，自然界における実際と適合しない。

2）また，帯水層厚が一定であると考えた場合（$T=KH$において，Hを一定と考える），透水量係数Tが大きな値を示す部分の帯水層を形成する堆積物は極粗粒なものであらねばならず，同一礫相のもとで層相の変化が激しいものとなり，当該礫層の連続性からみて考えることができない。**

3）したがって，透水量係数Tの大なるところとは，帯水層の厚さも厚く，堆積物も粗粒なものであらねばならない。*Fig.7* についてみるならば，段丘礫層堆積前の地形がすでに凹部を形成し，そのような化石谷の部分に比較的粗粒な堆積物が堆積し，段丘礫層堆積前の地形が凸部であった部分には比較的細粒な堆積物が堆積したものと考えることができる。[22]

これを地下水の流動状況について考えてみると，同一動水傾斜のもとであるならば透水係数の大きなところは流動速度が大きく，透水係数の小さなところでは流動速度が小さいことは，ダルシーの法則により明らかである。*Fig.7* に示された立川礫層の地域内の実例でみると，地下水の流動速度は水平方向につき，1～3 m/dayが知られている。[10][12][13] これをあてはめてみると1か月間においては，地下水の動き得る速度は，

* 逆に帯水層が盛り上がっても同様な結果になるが，地下水面は少なくとも凹んでいるのであるからこのようなことは，この場合にはあり得ない。

** 立川礫層は段丘礫層であって，ボーリング資料等から推定される限り，砂礫ないし礫層であって，そのように層相の変化がいちじるしいものではない。

30～90m程度と，ごくわずかの移動にとどまる。

以上のことから，段丘礫層堆積前の地形が凹部であって，透水係数Kも大なる部分にある地下水は，下流の地下水域への流出も活発であるものと考えることができる。それに対し，このような基盤の凹部に当たらない周辺の帯水層から流出補給される水量は，流動速度が小さいことから，移動量に限界があって小さく，その差が地下水面の低下となってあらわれ，渇水期における著しい地下水面の谷状化を形成するものと説明することができる。

このことは，逆に1回の降雨による水位の上昇量の場合について考えるならば，同様に逆の関係として説明することができる。

9．ま　と　め

以上，消防水利としての不圧水井戸の水文学的問題につき，従来，研究を行なってきた成果をもとに論及を試みたが，まだまだ不明な点も数多く存在する。

しかし，いままでの結果から，少なくとも消防水利として要求される水量を得るために必要な水文学的環境とは，上例の多くの事実から，つぎのようにまとめることができる。

1）揚水試験の結果からみちびかれる透水量係数はcm^2/minの単位において，おおむね10^4程度のオーダーを必要とする。

2）地下水面等高線図を作成した場合，地下水面が谷状にくぼむ部分は，周辺の部分よりも透水量係数の大きな部分である。

3）地下水面の変動量は，透水量係数の大きな部分においては大きく，年間を通して一つのサイクルで変動する。

4）個々の降水による地下水面の上昇量は，むしろ小さく，場合によっては，まったく影響が認められぬほどの部分が透水量係数は大きい値を示す。

また，井戸を堀る場合の工法としては，帯水層のもつ厚さのすべてにわたって，ストレーナーを設けるようにすると，水位降下も小さく，多量の揚水が可能となる。

この研究を実施するにあたり，長期間にわたる研究の機会を与えていただいた，中田金市所長，堀内三郎元部長，秋田一雄前部長，熊野陽平部長，名雪健一部長をはじめ，消防研究所職員各位から多大の御協力をいただいたことに深く感謝の意を表する。

文　　献

1）宮部直己：地震に伴へる地下水の異常に就て。地震，5，627－664（1933）

2）山本荘毅：「地下水調査法」(1953) p.126-139（古今書院）

3）山本荘毅：「揚水試験と井戸管理」(1962) p.60-80（昭晃堂）

4）山本荘毅：「地下水探査法」(1962) p.215-255（地球出版）

5）村下敏夫：「地下水学要論」(1962) p.67-82（昭晃堂）

6）酒井軍次郎：「応用地下水学」(1967) p.112-158（朝倉書店）

7）新藤静夫：武蔵野台地の水文地質，地学雑誌，77 223-246（1968）

8）消防庁：「新潟地震火災に関する研究」(1965) p.181～198，（消防庁）

9）細野義純：新潟地震災害調査報告，第Ⅱ部，消防施設の被害調査，火災，15，67－75（1965）

10）細野義純：消防水利に利用する地下水の研究（そのⅠ），災害科学研究会資料，p.1～23，(1967)

11）細野義純：消防水利に利用する地下水の研究（そのⅡ），災害科学研究会資料，p.1～29，(1967)

12）細野義純：昭島市付近の地下水に混入した石油系燃料の流出について，鑿井，〔92〕，6-8（1967）

13）細野義純：東京郊外の井戸からガソリン――自由地下水の形態についての若干の問題，水，10，30－35（1967）

14）細野義純：武蔵野台地の自由地下水について，地理学評論，41，391（1968）

15）細野義純：松代群発地震に際し観察された地下水位の異常と水質の変化について，地質学雑誌，74，569-581(1968)

16）細野義純：十勝沖地震による災害について，火災，18，175-179（1968）

17）細野義純：武蔵野台地における地表水および地下水の測水資料，消防研究所技術資料，〔1〕，p.1-261（1968）

18）細野義純：武蔵野台地の自由地下水――とくにその変動の性状について，地質学雑誌，75，103（1969）

19) 細野義純：降水に伴って観察された武蔵野台地における自由地下水の水位上昇について，地理学評論，**41**，103（1969）

20) 細野義純：地下水調査，地球の科学，**8**，〔8〕，33-35（1969）

21) 細野義純：武蔵野市吉祥寺における揚水実験資料，消防研究所技術資料，〔2〕印刷中，（1969）

22) 細野義純：自由地下水における帯水層の水理定数と地下水面の関係，地質学雑誌，**76**，〔2〕印刷中（1970）

23) 細野義純他6名：電子計算機による被圧地下水収支の検討　そのⅠ，そのⅡ，地質学雑誌，**76**，〔2〕印刷中（1970）

24) 細野義純：武蔵野台地南縁部の地下水，ハイドロロジー，〔2〕，印刷中（1970）

25) G. W. Lane, E. L. Reavis, G. J. Stramel: Emergency water supplies in the Wichita area, Kansas, U. S. G. S. Hydrologic Investigations Atlas HA-58.

26) 山本荘毅：前掲3），p. 64—65

Hydrological Investigation on Unconfined Water as a Source for Fire-Fighting

(Abstract)

by Yoshizumi Hosono

(Received December 26, 1969)

A series of the hydrological investigation has been carried out with a view to seek the practical methods by which the probable occurrence of the unconfined aquifer from which the desiradle amount of water may be used for the fire-fighting can be determined.

The results obtained have revealed that the unconfined aquifer which satisfies the above-mentioned requirement is in the hydrological environments specified by the following conditions.

1) The coefficient of transmissibility is in the order of about 10^4 cm^2/min as confirmed by the aquifer test.
2) The ground-water table shows recess in the ground-water table contour map.
3) The amplitude of annual cycle of the ground-water level is extremely large.
4) The amount of fluctuation of the ground-water level caused by the rainfall is relatively small or, in the extreme case, negligible.

As the technique of boring for making the well, an efficient pumping capacity and a large transmissibility may be obtained by the installation of a suitable strainer covering the whole depth of the aquifer.

消防研究所報告

通巻 30 号

昭和 44 年 12 月 印刷

編集
発行　自治省 消防庁 消防研究所
東京都三鷹市中原 3 丁目14番 1 号
電話　(0422)-44-8 3 3 1 (代)