REPORT OF FIRE RESEARCH INSTITUTE OF JAPAN
Serial NO. 36 March 1973

消防研究所報告

通 巻 36 号 1973年 3 月

目 次

研 究

木材の井げた積みの火災を消火するのに必要とする水の量……木 田 甫……(1)
消火剤の必要量に関する研究（その6）……山 鹿 修 蔵……(7)
火災火炎の電気伝導……糸 谷 成 章……(13)
高圧で噴出する蒸気の帯電現象（第1報）……川 崎 正 士……(19)

消 防 研 究 所
東 京 都 三 鷹 市

REPORT OF FIRE RESEARCH INSTITUTE OF JAPAN

Serial No. 36 March 1973

– Contents –

MEMOIR

Extinction of Fires of Small Wooden Crib with Sprays of Water and Some Solutions. .....Hajime Kida ..... (1)

Studies on the Required Quantity of Various Fire Extinguishing Agents. Part 6. Results of the critical concentration for flame extinguishment by a new method. ..... Shuzo Yamashika ..... (7)

Electric Conduction through Flame. ..... Shigeaki Itoya ..... (13)

Experimental Study of Static Electrification of High-Pressure Vapour Jet (1). ..... Masashi Kawasaki ..... (19)

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

木材の井げた積みの火災を消火するのに必要とする水の量

木田　甫

（昭和47年6月30日受理）

1．まえがき

木材の井げた積みの火災は、A型の火災の模型として、消火実験によく用いられるが、その規模（全体の大きさ、木材の寸法、組み方等）と消火に最小限必要な水の量との関連が十分に調べられていないので、ある報告に述べられている特定の組み方、規模の井げた積みの火災についての結果がそのまますぐ他の組み方の井げた積みの火災について適用できるとはかぎらない。たとえば、水に添加剤を加えてその消火効果を増加させる試みはいろいろ報告されているが、多くの場合、消火効果の増加の程度として、おなじ組み方の井げた積みの火災を、その水溶液で消火したときと水で消火したときとの消火必要量の比を用いてあらわしている。しかし、他の規模の火災についてこの比がそのまま使えるかという点については、まだ検討の余地が残されていると思われる。

すなわち、木材の井げた積みの火災の燃焼の状況は、角材の断面の辺長、長さ、井げた積み一段に置く角材の数、積み重ねる高さ（段数）、および予燃時間（点火から消火開始までに経過した時間の長さ）などの多くの量に影響される。したがって、木材の井げた積みの火災の規模と、これを消火するのに必要とする水の量との関係は、これらの多くの要因に支配されると考えられる。この点については、角材単独[1]、または比較的小さな井げた積み[2]について、燃料の燃焼速度（単位時間に減少する燃料の重量）、水の供給率（単位時間に火災に向け放射する水の量）などとの関連が調べられているが、系統的に調べた報告は少なく、まだ十分に明らかにされたとはいえない。

このたびは、井げた積み1個の重量が最大30kg程度の比較的小さな規模ではあるが、いろいろの方法、組み方の井げた積みの模型火災を作り、水およびりん酸水素アンモニウム水溶液で数多くの消火実験を行い、その結果から、水あるいは水溶液の消火必要量がどのような要因により定まり、また量的にどのように関連するかについて調べたので報告する。

2．実　験

燃料として用いた木材は、断面が正方形の日本産の杉の角材で、屋内に長期間放置し、気乾状態（含水率12～15%）としたものである。角材の断面の辺長は、1.7、2.5、および3.5cmの3種とし、長さ25～75cmの範囲で、一段に並べる数、高さ（段数）をいろいろ変えて井げた状に積み、また予燃時間も何段階かに変えていろいろの性状の火災を作り、それぞれについて消火必要量を求めた。井げた積みの重量は約0.5～30kgの範囲である。

点火は、井げた積みの底面の下約15cmの位置に底面とほぼ同じ大きさの鉄製の皿をおき、この皿に入れたガソリンを約2分間燃焼させて行なった。井げた積みは、ばね式皿秤の上におき、点火から消火開始までの重量の変化、消火終了時の重量などを測定した。

消火用の水および溶液を一定のノズル圧で放射するために、耐圧タンク内の水または溶液を調整弁を通した圧縮空気で加圧するようにした。ノズルは、タンクから延ばしたホースの先にバルブと共にとりつけた。

消火実験に際しては、点火後所定の時間経過したときバルブを開いて放射を開始し、井げた積みの各面に、ノズルを手で持ち動かしながら水または水溶液を放射し、できるだけ効果的に消火するようにした。

このように、ノズルを手で動かしながら消火するために生ずる消火必要量の測定値のちらばりは、20回程度練習することによって十分小さくすることができた。消火中発生するゆげと煙のため、井げた積み内部の入

組んだ部分の有様がよく見えないことがあり、消火に丁度必要とする量で放射を止めることが困難で、この方が測定値のちらばりに大きく影響した。

使用したノズルは、全面散水型の噴霧ノズル（噴霧角約30度）で、2種のノズルを用い、ノズル圧3.25kg／cm とし、放射率1.3ℓ／min、および0.80ℓ／min で行なった。噴霧液滴の粒径は、平均0.1～0.2mm程度である。

ノズルの噴霧角がせまく、またよくねらって放射するために、放射した水または溶液のほとんどすべてが井げた積みに命中し消火に有効に使われるので、ここでは消火までに放射した量をそのまま消火必要量とした。

井げた積みの内部の空間がせまいと、中心部へ液がとどきにくく、火災の規模にくらべ消火必要量が大となる。この実験では、角材の間隔が適当で、井げた積みが十分に炎をあげて勢よく燃え、かつ噴霧が中心までよくとどく範囲に限って測定を行なった。これは、角材の実質全体積が、井げた積みの見かけの体積の大略1／2より小さい範囲に相当する。

井げた積みの上方から噴霧を放射すると、炎の上昇気流により細かい噴霧粒子がまい上るために消火に長時間を要し、同じ放射率で井げた積みの側面から放射すれば消火できる場合でも消火できないことがある。

また上方から放射するときには、たとえば、ノズル圧を上げると放射される液量も大きくなるが、噴霧にまきこまれる気流も大となり、炎が横へなびき、かえって消火しにくくなることもみられ、噴霧流と炎の上昇気流の相互作用も考えなくてはならず複雑である。

いくつかの予備実験の結果から、この実験のように、井げた積みの各側面からよくねらって放射する方法が最もむだが少なく消火必要量が小さくなることが分った。このような消火方法は、たとえば消火器で消火するときのように火元をよくねらって放射できる場合に対応するもので、スプリンワラーのようにノズルが固定されている場合には、消火の状況がかなり異ると考えられるので規模と消火必要量の関係は別に検討する必要があると考える。

3．結果および考察

3．1． 井げた積みの燃焼の有様は、木材の材質、含水率を一定とすれば、角材の辺長、長さ、一段に置く本数、積む段数、および予燃時間の関数としてあらわすことができると考えられる。したがって、これらの5つの変数の組合せでいろいろの性状の火災を作ることができる。すなわち、消火必要量もこれら5つの変数の関数としてあらわすことができるわけであるが、多くの組合せの中には消火必要量の値の一致するものがあるはずである。いいかえれば、消火必要量の点からみると同じ規模とみなすことのできる組合せがいくつかあるはずである。このたびの実験の結果、火災の性状と消火必要量の関連について次のような点をあきらかにすることができた。

3．2． 同じ組み方の井げた積みの火災を、放射率を一定とし、予燃時間だけをいろいろと変えて消火必要量を測定した。燃えている一本の角材を消火するとき、消火必要量は角材の炭化深さに大きく影響されることはすでに知られているが[1]、予燃時間を長くとることは炭化深さを大きくしたことになると考えられる。

実験の結果、他の条件が同じであれば消火必要量は予燃時間が長くなるほど大きくなり、燃えつきてくずれはじめる近くで消火を開始するときが最も大きい。

Fig.1 に、断面の辺長3.5cm、長さ45cmの角材を一段に6本づつ7段積み重ねた井げた積みの火災を、予燃時間をいろいろと変え、水、りん酸水素一アンモニウム20wt％水溶液、および市販の強化液（主成分炭酸カリウム約35wt％）で消火した場合の測定値を示す。放射率はいずれの場合も、0.80ℓ／min である。井げた積みの最初の重量は約9kgで、点火後2.5分後には最初の重量の80％、8.5分後には35％となるが、この期間内は単位時間における重量の減少は一定とみなすことができ、7.6％／minである。

図で、丸、三角、および四角の白印は、それぞれ、りん酸水素一アンモニウム水溶液および強化液の消火必要量の測定値である。黒印は、一度消火を確認して放射を止めたが、井げた積みの内部におきが残り、次第に拡大して放射を止めてから3分以外に再び発炎した場合である。多少おきが残ったまま放置しても、3分以内に再燃しない場合には、周囲がぬれているためにそのまま立消えになることが多い。

予燃時間が長いほど、水、水溶液の消火必要量は大きくなるが、それぞれの必要量の比は予燃時間の長さにかかわりなく一定とみなすことができる。強化液は炎を容易におさえることができるがおきを消火する態力が少なく、消火必要量のうちおきを消火するのに用いられる割合が大きい。一方、りん酸水素一アンモニウム水溶液は炎に対してだけでなく、おきを消火する能力も大きく、消火の機構が両者においてかなり異な

ると思われるのであるが、予燃時間と消火必要量の関係はともに同じ傾向になった。

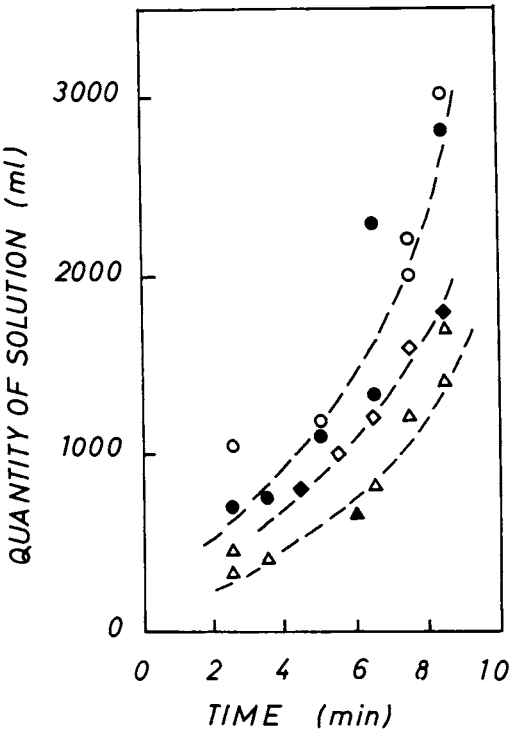

Fig. 1. Relation between preburn time and quantity of solution required to extinguish model fire.
○Water, ◇Loaded Stream (K_2CO_3 35%)
△Monoammonium Phosphate 20wt%
(Black Mark: Reignition occured)
Model fire: sticks 3.5 x 3.5 x 45 cm in size, 6 sticks per layer, 7 layers high.
Discharge rate: 0.80ℓ/min.

射率を小さくすると消火に必要とする時間が長くなり、また消火したときに残る燃料の量が少なくなり、限界の放射率以下では消火できないうちに燃えつきてくずれる。**Fig.2** (a) 、(b) に示した結果からだけでは

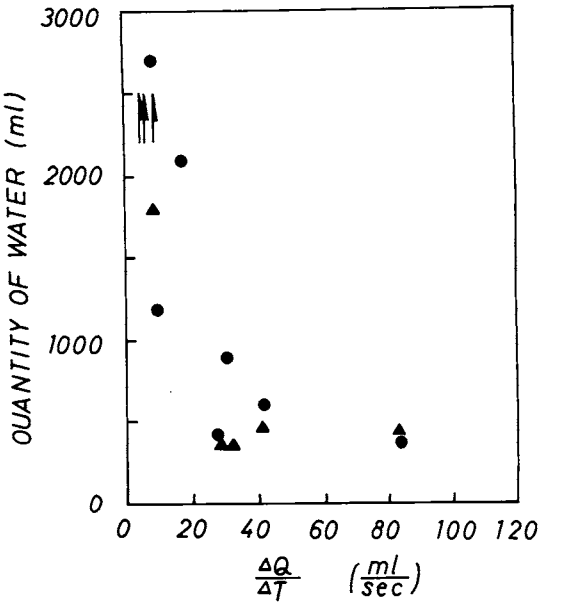

Fig. 2. (a)

Fig. 2. Relation between discharge rate and quantity of solution required to extinguish model fire.
(a) Water (b) Monoammonium Phosphate 20wt%
● completely extinguished
▲ reignition
arrow mark: not extinguished
Model fire: sticks 2.5 x 2.5 x 35 cm in size, 6 sticks per layer, 10 layers high.
Preburn time: 2.5 min.

3. 3. 一定の規模の火災を消火するときの、放射率と消火必要量の関係を調べるために、辺長 2.5cm、長さ35cmの角材を一段に6本づつ10段積み重ねた井げた積み（重量約5kg）の火災を、予燃時間はすべて2.5分とし、いろいろの放射率で消火し、消火必要量を求めた。ただし、放射率を変えるために計5種のノズルを用いたので、噴霧角、粒径その他噴霧の性状は同じではなく、正確な意味で放射率だけを変えた実験ではない。水およびりん酸水素一アンモニウム 20wt%水溶液での結果を**Fig.2(a)** 、(b) に示す。図で、失印は消火できないうちに燃えつきてくずれた場合、また三角印は、放射を止めた後3分以内に再び発炎したものである。一定の規模の火災を消火する場合、放測定の数が少なく確定した結論を出すことは困難であるが、この実験の場合の限界の放射率は、水、りん酸水素一アンモニウム20wt%水溶液の場合それぞれ0.3ℓ／min、0.15／ℓ／min の程度となり、りん酸アンモニウム水溶液の方が時間をかければ小さな放射率で消火できることになる。

また、放射率を一定とし、燃料の量を多くすると（単位時間内に減少する燃料の重量を大きくすると）、消火時間も長くなり、ある程度以上燃料の量が大きくなるともはや消火不能になる限界が存在する。放射率0.80ℓ／min で水を用いて消火するときには、井げたの積み方とも関連するが、辺長2.5cm の角材では最初の重量が20kg程度となる。しかし、正確な値は求めること

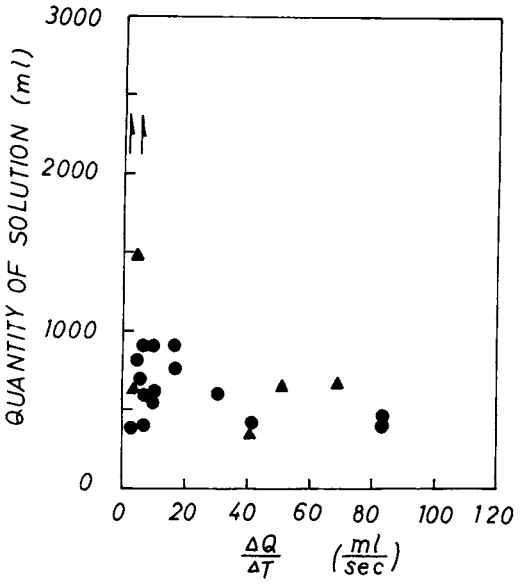

Fig. 2. (b)

ができなかった。

3．4．　消火可能の限界の範囲内では、消火必要量を決定する主な要因として、消火開始の時点におけるおきの量と燃焼速度の２つを考えてみた。消火開始時

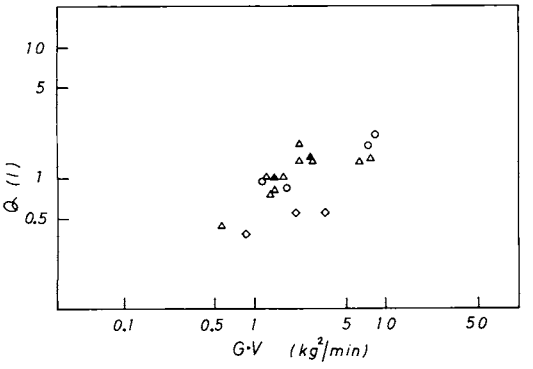

Fig. 3. (a)

Fig. 3. Variation of quantity of solution required to extinguish model fire with the value G•V.
Fig. (a), (b), and (c) show results correspond to cribs composed of sticks of thickness 1.7, 2.5, 3.5 cm, respectively.
△Water discharge rate 0.8 ℓ/min.
○Water discharge rate 1.3 ℓ/min.
◇ Diammonium Phosphate 20wt% discharge rate 0.8 ℓ/min.
Black mark: reignition occured.

におけるおきの量は直接測定することが困難であるので、ここではおきの量そのものではなく、関連する量として井げた積みの点火前と消火開始時の重量の差をとった。消火必要量Q（ℓ）を燃焼速度V（kg／min）および先にのべた井げた積みの重量の減少量G（kg）の関数として回帰分析を行うと、水、りん酸水素二アンモニウム20wt％ 水溶液について次の実験式が得られた。

$$Q=0.90\ (G.V)^{0.60}$$

$$Q=0.44\ (G.V)^{0.60}$$

Fig.3（a）、（b）および（c）に、それぞれ断面の

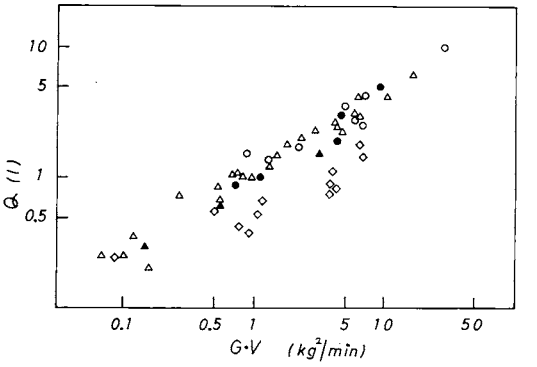

Fig. 3. (b)

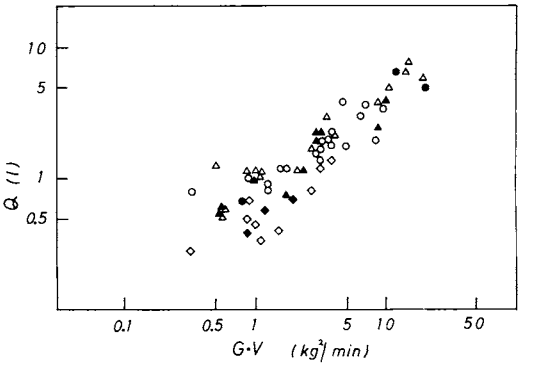

Fig. 3 (c)

辺長が1.7、2.5、および3.5cm の角材の井げた積みの火災についてのQ とG ・V の関係を示した。丸印は水の放射率1.3ℓ／minで、三角印は0.80ℓ／min で消火した場合で、白印は放射を止めてから３分以内に再燃しなかった場合、黒印は再燃した場合である。四角印は、りん酸水素二アンモニウム20wt％ 水溶液で消火した測定値で、白印、黒印の区別は水と同様である。

辺長が1.7cmの場合はややちらばりが多いが、実験の再現性も考慮すると、消火必要量は、水、りん酸アンモニウム水溶液ともに角材の寸法、組み方、予燃時間にかかわらず、G・Vの関数になると考えてよい。図には示してないが、0.80ℓ／minより小さな放射率でいくつか消火必要量を測定したが、消火可能であれば同じG・Vの値については放射率1.30ℓ／min（又は0.80ℓ／min）の場合と同じ程度のQの値が得られた。

りん酸アンモニウムの水溶液を用いると水の場合より消火必要量は小さくなるが、水と水溶液の必要量の比は火災の規模と放射率の相対的な大きさに無関係であり、同じ規模の火災を消火するのにりん酸水素二アンモニウム20wt%%水溶液では水の約1／2でよいことがこれらのグラフに示されている。

3. 5. 辺長2.5cm の角材の井げた積みの火災を水で消火するときには（**Fig.**（**b**））、放射率0.80ℓ／minではG・Vの値が30程度が消火可能の最大の規模であるが、1.3ℓ／min ではG・Vの値が30以上でも容易に消火できる。また、辺長3.5 cmの角材の井げた積みでは、同じ放射率でも辺長2.5 cmの角材の井げた積みより大きなG・Vの値の火災が消火できた。消火可能の範囲内では、放射率の大きさにあまり関係なく、同じG・Vの値については消火必要量も同じになると考えられる。（当然放射率の小さなときには消火時間が長くなり、消火できたとき残っている燃料の量が少ない）。

しかし、その消火可能の限界の規模自体は、G・Vの値だけでは決定できず、他の要因も考えなくてはならない。井げた積みの最初の重量をWo、その重量燃焼速度をVとすると、もえつきるまでの時間Wo／Vは、井げた積み内部の空間の広さが同じ程度であれば、角材の辺長が小さいほど小さくなる。したがって、消火可能の限界規模を考えるためには、Vだけでなく、Wo／Vも考える必要があると思われる。

4. まとめ

i) 重量が最大約30kgまでのいろいろの組み方の井げた積みの火災を、水およびりん酸アンモニウム水溶液の噴霧で消火するときの消火必要量を求めた。

ii) 消火開始時におけるおきの量および燃焼速度が消火必要量を定める主要な要因となることを明らかにし、これらの間の実験式を導いた。

iii) いろいろの条件の火災について、りん酸アンモニウム20wt %水溶液の水に対する消火効果の増加の程度を明らかにすることができた。

iv) 火災の規模にくらべ放射率が小さいと消火できないが、この限界の放射率については明らかにすることはできなかった。消火開始時におけるおきの量および燃焼速度以外に別の要因を考える必要があると考えられる。

5. 引用文献

1) 碓井 憲一
日本建築学会論文集 第41号
昭和25年8月

2) Kalelkar, A. S.
Fire Technology **7** 293 (1971)

Extinction of Fires of Small Wooden Crib With Sprays of Water and Some Solutions.

(Abstract)

Hajime Kida

(Received June 30, 1972)

The factors influencing the critical amount of water and some solutions required to extinguish small wooden crib fire were determined. Sprays of liquid were applied manually at a predetermined rate through a nozzle to each side of the burning crib. The required quantity of liquid was measured for various degrees of fire intensity obtained by varying the size of sticks, number of sticks per layer and height of the crib. The effect of preburn time on the quantity of liquid was also examined.

Fig. 1 shows the relation between the preburn time of the model fire and the required amount of liquid. In Fig. 2 (a), (b), (c), the effect of application rate of the liquid on the amount of liquid required to extinguish the model fire is shown. It was found that the burning rate of the crib (V kg/min) and the weight of fuel lost (G kg) by the time when discharge of spray was started had very important role on the amount of liquid required to extinguish the fire, Q (ℓ) The measured value of Q is plotted against the value of G·V in Fig. 3. The data obtained in this study were correlated by the following relations:

for water $Q = 0.90\ (G \cdot V)^{0.60}$

for diammonium phosphate 20 wt% solution

$Q = 0.44\ (G \cdot V)^{0.60}$

In this study, only limited data about the relation between the critical discharge rate to extinguish the model fire and the intensity of the fire were obtained. It is considered that, to determined this rate, not only V and G, but another factors, for instance V/W_0, where W_0 is the initial weight of the crib, must be taken into consideration.

消火剤の必要量に関する研究(その6)

消炎濃度の測定法と測定結果

山　鹿　修　蔵

(昭和47年11月22日受理)

1. 序　論

可燃性液体や気体の炎は、その中に、ある濃度の消火剤が混合すると消える。そしてその場合の濃度は、燃料――空気――消火剤三成分系の爆発限界曲線の消火剤の最大濃度――いわゆるピーク濃度であると考えられて来た。しかし筆者らの実験結果によれば[1)2)]現実にはその値よりも小さく、局所放出方式の場合約⅔、全域放出方式の場合約⅓で消火することがわかった。後者の場合室内の酸素濃度が約19%に低下していることを考慮すると、消火にはピーク濃度の⅔でよいということになりこれはCreitz の方法[3)] による値に近いことを指摘した。そして、これは爆発限界曲線は予混合の状態であり予混合炎の消炎濃度を与えていたことに他ならない。したがって通常の火災の炎のような拡散炎を消火する時の消炎濃度は、燃料と空気を予混合せずに空気中に消火剤のみを予混合したような状態で測定を行い、その時の空気中の消火剤濃度を消炎濃度とすべきである。

Creitz の方法においては消火剤を燃料側と空気側にそれぞれ添加して濃度を測定し、消火剤の効果を論じているが後者の場合が上記の筆者の主張と合致する。彼の方法によれば濃度は空気と消火剤の流速より計算されるが、流速がある範囲内にないと結果が一致しない点が見られ、これは流速による影響――あるいは吹き消しの効果が加味されているのかも知れない――があるようである。また固体試料の場合は測定できず、液体試料の場合は〝しん〟を用いる必要があるようである。

以上の観点から筆者は流通法を避けて静置法とし、また気体から液体および固体まで測定できるような方法を採用して測定し、測定結果について検討を加えたので報告する。

2. 実験方法

測定に用いた装置の概要を **Fig.1** に示す。内容積は73.3ℓ、正面の扉は30cm角で手前に開くようになっている。天井には一辺15cm角の窓がスライドして開くようになっている。床面には直径 1.5cmの穴が4cm間隔に合計81個あけてある床面が二重底になっていてスライドできるようになっており、通常は閉じられているが、下部全部と天井全部を開けると約 100回／h 程度の換気が十分とれて予燃の必要ある場合には前扉を閉じたままできるようになっている。また上下の開口部を閉じるとスライドされる隙間からのみ空気が流出入して約 1.2回／h の換気となるようになっている。装置の下部には、消火剤送入用、ガス分析用、着火電源電線用等の穴が数個あけてあり、ここから装置内のガスをポンプで引出して分析したり、消火剤を送り込んだりできるようになっている。

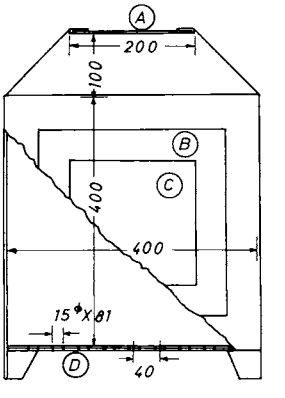

Fig. 1. The vessel used to determine the concentration for flame extinguishment. A is a sliding top. B is a door having glass C for peep into the vessel. D is a floor having holes to introduce air. It has an another sliding floor to shut off air.

使用した燃料は試薬 JIS 1 級のもので、これを一辺 5 cm深さ 2.5cmの容器に½の深さにいれて点火し試験炎として用いた。燃料容器は高さ 5 cmの台の上にのせて用いたので炎の基部は床上約 7.5cmのところにあり、炎は容器のほぼ中央にあることになる。消火剤は市販のボンベ入 JIS 3 種の液化炭酸（二酸化炭素）を用いた。

装置内のガスの分析は、ポンプで装置のほぼ中央から配管して引き出し再び戻す途中にガスクロマトグラフのガスサンプラーを入れコックの切換えによりガスクロマトグラフに導入して行った。

測定の手順は燃料容器に燃料をいれた後扉および開口部を閉じ、所定量の消火剤ガスを導入する。その後スパークにより点火しそのまま自己消炎するまで放置する。その間ガスの分析を 1 分ごとに行ない、消炎後も 5 分間以上継続して行った。炎の存在する間はガス濃度の変動が大きかったが、消炎後は安定して換気による変化だけとなるのでこれを補正して消炎時のガス濃度を決定することができた。

3. 実験結果と考察

実験の結果を **Fig.2** に示す。一酸化炭素は少量検出されたものもあったが省略して、二酸化炭素——酸素——その他（主として窒素）系の三角図で表わした。

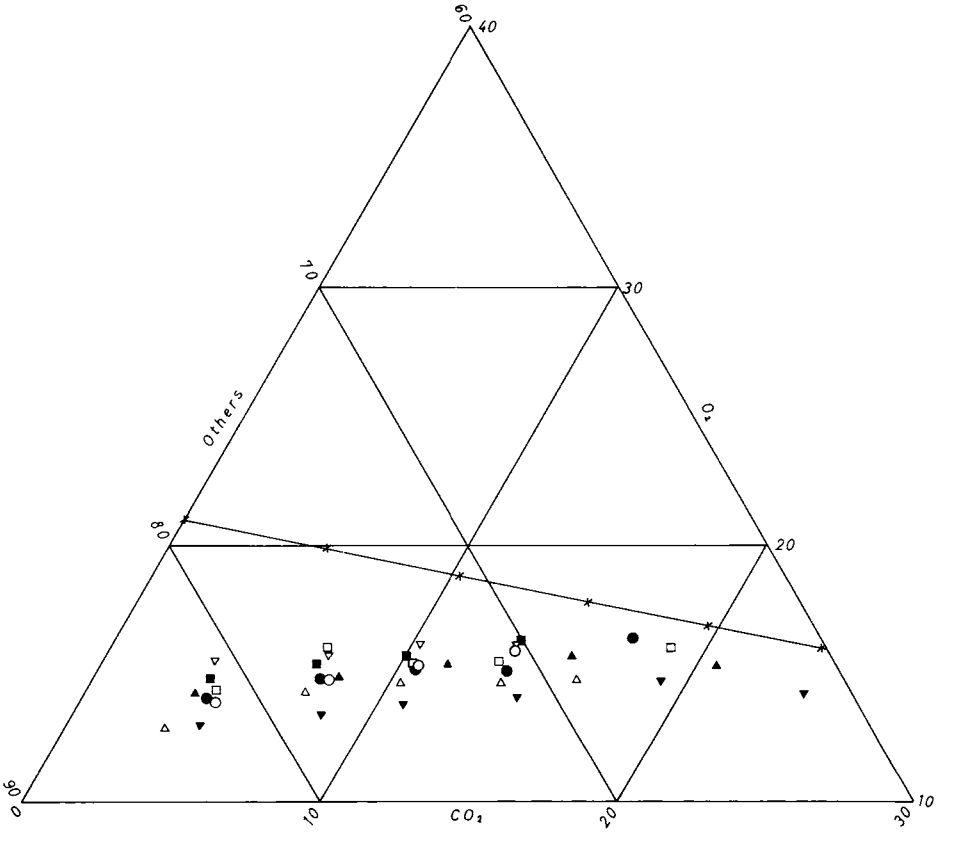

Fig. 2. The triangular graph of the system carbon dioxide-oxygen-other components. The marks are ○ for hexane, □ for benzene, △ for diethyl ether, △ for ethyl acetate, ● for methyl ethyl ketone, ■ for acetone, ▲ for ethanol, and ▲ for methanol. The start concentration are shown by mark x.

この結果によれば実験開始時の二酸化炭素濃度より燃焼の結果二酸化炭素が増し酸素が減少した点で消炎したことがわかる。このような点群を今かりに各燃料ごとに直線上にあるものと仮定して開始濃度直線との交

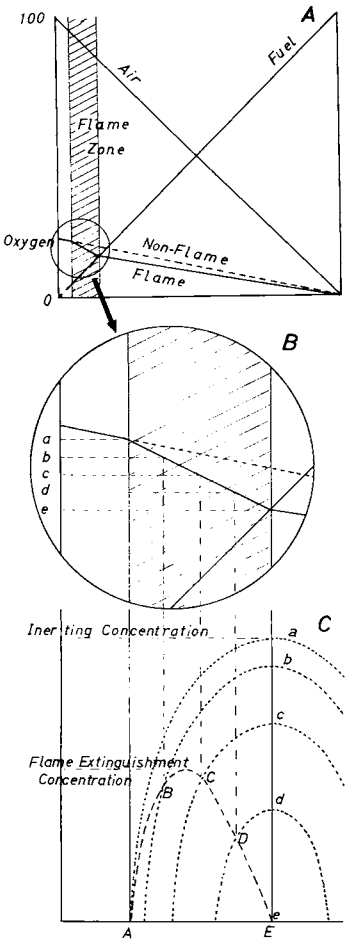

Fig. 3. The illustration shows the decreasing of oxygen concentration as going into flame zone of diffusion flame. The curve a is the range of explosion for oxygen concentration a. Therefore, the curve for diffusion flame extinguishment becomes to curve ABCDE. Then the concentration for flame extinguishment can get as the maximum.

Table 1. Comparison of concentration for two methods

Fuel	Concentration for flame extinguishment by this method	Concentration for inerting by explosion method
Acetone	19	26
Benzene	23	31
Diethyl ether	24	38
Ethanol	24	36
Ethyl acetate	20	–
Hexane	19	29
Methanol	29	26
Methyl ethyl ketone	20	–

点を求めると**Table.1** のような二酸化炭素濃度値が得られる。これは点火後直ちに消炎した場合の開始時二酸化炭素濃度に相当し、これが拡散炎の消炎濃度の限界値と考えられる。火災の炎は拡散炎であるから、この濃度に適当な安全係数を乗じた値をもって消火設備の設計濃度とすることが妥当である。

次にこの値が何故に**Table.1** に比較したように爆発限界法に比べて小さく約⅔の値になるかについて考察する。爆発限界法においては燃料――空気――消火剤の三者が均一に混合されており然る後に着火され火炎伝播が行われる。したがって燃料と混合される時点においての空気中の酸素濃度はどこでも21%である。しかし拡散炎においては炎の外側から空気が拡散して行くがその際、外側では確かに酸素濃度が21%あっても炎の内部へ進むに従がい燃焼により酸素が消耗され、最も濃度の濃い消火剤を要求する燃料空気混合比が理論空燃比に近い場所における空気側の酸素濃度は21%より少なくなっている点に注意すべきである。この辺の関係を**Fig.3** のように模型化して示せば、この間の関連はおのずと了解されるであろう。

4. 各種消火剤を用いた測定値

以上述べた方法により測定した各種の可燃性液体および気体に対する各種の消火剤の消炎濃度を**Table.2** に示す。用いた可燃性液体および気体はいずれもJIS 1級程度のもの、また消火剤は自治省令の技術上の規格に合格したものまたはこれと同等のものである。ただし実験方法は多少簡略化して行った。

すなわち消火剤ガス濃度はそのたびに定量分析せず送入量より逆算してある。それは先に詳細に行なった**Fig.2** の実験の場合の濃度が理論計算値と誤差の範囲内で一致したためである。したがって測定は消炎濃度のやや下まで消火剤を入れ、次に点火しさらに消火剤を追加導入して消炎するまでの消火剤総量を測って計算するという方法で行ない、5回の平均を取った。また粉末消火剤の場合には噴出させた消火剤の有効量を室容積で割ってそのまま濃度とした。試料が気体の場合には液体試料容器の位置まで銅管で導いてバーナとし測定した。

Table 2. Concentration of various extinguishing agents for flame extinguishment applied to flames of various fuels

Extinguishing agent / fuel	Nitrogen (%)	Carbon Dioxide (%)	Halon (%)				Dry Chemical (g/ℓ)			
			1301	1211	1011	2402	Sodium Base	Potassium Base	Phosphate Base	Monnex
Acetic Acid	12	8	1.0	1.2	1.0	0.3	0.21	0.11	0.11	0.07
Acetone	29	21	3.1	3.7	3.6	2.1	0.21	0.13	0.13	0.09
Acetonitrile	11	9	2.1	2.3	3.2	1.2	0.22	0.14	0.15	0.11
Acetylene	42	35	7.0	7.2	8.7	5.2	–	–	–	0.17
Acrylonitrile	32	24	3.5	4.3	5.3	3.4	0.25	0.20	0.21	0.15
Aniline	18	13	1.8	1.9	1.7	0.9	0.18	0.13	0.13	0.08
Benzene	29	21	3.1	3.1	4.2	2.0	0.25	0.14	0.16	0.10
Boiled Oil	28	17	1.9	2.6	1.7	1.8	0.22	0.14	0.10	0.10
Butadiene-1.3	27	18	4.0	3.9	3.9	2.4	0.42	0.19	0.18	0.13
Butanol-1	26	22	3.3	3.7	4.4	1.3	0.23	0.12	0.14	0.08
Carbon Disulphide	56	55	7.8	3.1	5.5	2.0	–	–	–	–
Carbon Monoxide	45	30	2.0	2.6	5.5	1.6	0.20	0.16	0.14	0.10
Diethyl Ether	30	23	3.9	4.4	4.7	2.9	0.22	0.13	0.14	0.09
Ethanol	33	23	3.5	4.1	4.0	2.3	0.29	0.13	0.15	0.08
Ethyl Acetate	31	21	2.6	3.0	3.1	1.5	0.18	0.12	0.13	0.07
Ethylene	31	25	4.4	4.6	5.5	3.0	0.24	0.16	0.14	0.12
Gasoline	30	19	3.5	3.8	4.6	2.3	0.28	0.13	0.14	0.10
Hexane	27	20	3.2	3.9	4.3	2.1	0.28	0.13	0.13	0.08
Hydrogen	62	51	12.7	16.8	11.7	9.0	–	–	–	0.37
Kerosene	27	17	2.5	2.9	3.2	2.1	0.22	0.13	0.14	0.09
Light Oil	29	18	2.5	3.0	2.3	1.8	0.21	0.14	0.13	0.10
Methane	17	10	0.9	1.3	1.3	0.8	0.13	0.11	0.12	0.09
Methanol	37	28	6.5	7.3	7.0	4.4	–	0.18	0.22	0.10
Methyl Ethyl Ketone	33	23	3.5	4.1	4.2	2.4	0.24	0.13	0.16	0.08
Monochlorobenzene	18	13	1.9	1.8	1.9	0.8	–	–	0.13	–
Pentane	26	19	3.6	3.5	4.2	2.5	0.27	0.15	0.15	0.11
Propane	20	14	1.9	2.1	2.5	1.7	0.17	0.13	0.13	0.10
Propanol-1	22	18	3.0	3.7	4.0	2.5	0.23	0.15	0.13	0.10
Pyridine	29	21	3.2	3.6	4.1	1.6	0.23	0.12	0.15	0.09
Rapeseed Oil	31	20	2.0	3.6	2.1	2.0	0.22	0.11	0.13	0.09
Toluene	22	18	2.0	2.1	2.7	1.5	0.20	0.13	0.13	0.09
Vinyl Chloride	20	15	2.9	2.8	3.6	1.9	–	–	0.14	–

5. 結　論

以上述べた方法はCreitzの方法に比べ、静的な方法である。気体液体はもちろん予燃を必要とする固体にも応用できる。また必要であれば、装置、燃料等を加熱して常温以外のデータを取ることも出来る。またふん囲気を通常の空気成分以外にも出来る。

この方法は一般に行われる全域放出方式による火災実験より得られる値に比べて、燃焼による酸素の減少を補正し得る点で正しい消炎濃度を与えるものと考える。

なお、**Table.1** に引用したメタノールのInerting concentration (NFPA Fire Code) は、この方法によるデータから見て少な過ぎ、元データの誤りである点を指摘する。

おわりにこの実験に使用した消火剤のうち、ハロン1301は小野田セメント株式会社より、ハロン1211と、Monnex とはインペリアルケミカルインダストリーズジャパンリミテッドより提供していただいた事を付記して感謝の意を表します。

引用文献

1) 山鹿修蔵、守川時生：消防研究所報告 Serial No.32 P 37－43 (1970)

2) 山鹿修蔵：消防研究所報告 Serial No.33 P 1－5 (1971)

3) E.C.Creitz：*J. Res. NBS* **65 A** 389－96 (1961)

Studies on the Required Quantity of Various Fire Extinguishing Agents

Part 6. Results of the critical concentration for flame extinguishment by a new method.

(Abstract)

Shuzo Yamashika

(Received Nov. 22, 1972)

A method of measuring a critical concentration of extinguishing agents required for flame extinguishment in laboratory is described in this report. The method is a static one, and can be used for fires of the gas, liquid, and solid fuel. The result by this method was compared with that by Creitz's one. An effect of oxygen concentration of surrounding air on the critical concentration was investigated.

The vessel used is shown in Fig. 1. Its volume was 73.3 liters. Air is permitted to enter into the vessel from the floor, if necessary, and to flow out from the top. After introducing a definite volume of extinguishing agent, the fuel is ignited, and let to burn freely till it is extinguished by the mixing of increasing combustion products. The gaseous products in the vessel were analyzed by gas-chromatography. In Fig. 2, the starting gas concentrations are indicated by symbol x, and the gas concentrations at extinguishment are shown by various symbols for different fuels. The concentration for flame extinguishment in normal air can be found out on this graph as the concentration of extinguishing agent at the intersection of the line of the starting gas concentration and that of the extinguishing concentration.

The concentration for flame extinguishment was about two third of the inerting concentration in explosion method. The reason may be attributed to the difference of diffusion flame and premixed flame, i.e. to the decrease of oxygen concentration as going into flame zone of diffusion flame as illustrated in Fig. 3.

The critical concentrations of various extinguishing agents for flame extinguishment of various fuels measured by the method modified partially are shown in Table 2.

火災火炎の電気伝導

糸　谷　成　章

（昭和47年12月15日受理）

1. はじめに

最近、電力需要の増加に伴ない、送電又は配電電圧が高圧化する傾向に加えて、これら高圧線の近傍に各種建造物が設けられている事態もふえてきている。さらに、異常事態の発生に即応して送電を停止することは、保安電力の確保上、次第に困難となっているので高圧活線の火災時における安全性の確保について、配慮が必要である。たとえば、火災の炎が高圧活線に触れた場合、その導電性に起因する漏洩電流が炎を介して人体に流れるためにおこる感電の危険性ということも考えておく必要があろう。

炎の導電性については、炎内における電離の問題としてSaha, Wilsonその他により研究が行なわれ、Spitzer, Chapmann, Cowlingその他は炎の導電率を理論的に導いている。しかしこれらは比較的小さい炎についての結果を与えているのみなので、筆者は一般の火災状態を念頭において、できるだけ大きい炎について一連の実験を行なってみた。以下、その概要を報告させていただく。

2. 実験結果

2. 1. 直流による炎の電気伝導

まず、**Fig.1** に示すように、10～20cm間隔ではられた 1.2mm径のニクロム線電極を炎が包むように井げた状に組立てた杉材を燃焼させ、電極に印加される直流

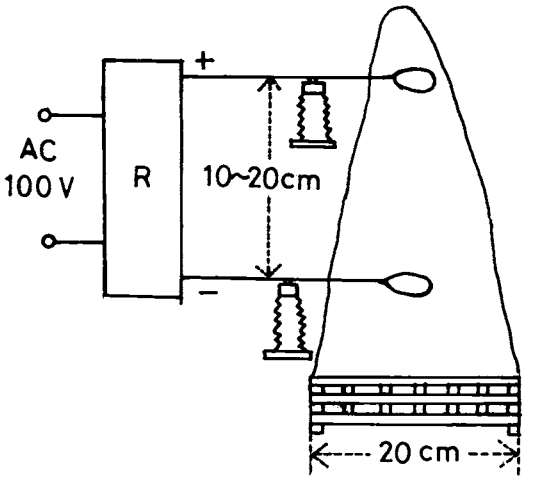

Fig. 1. experimental apparatus,
R: vacuum tube type rectifier with a volt-meter and micro-ampere-meter
Fuel: wooden crib

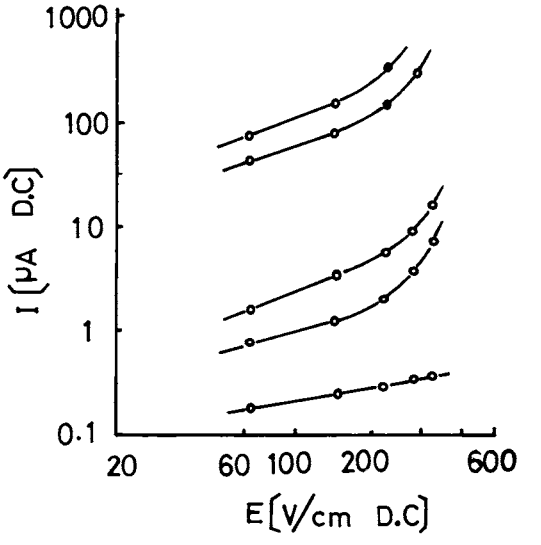

Fig. 2. relation between applied electric field strength E and leakage current I in flame,
Fuel: a. wooden crib
b. excelsior
c. gasoline
d. transformer oil
e. metylated spirit

電圧を変え、炎による漏洩電流を測った。次に同じ体積の木毛を燃やし同様に炎の電気伝導を調べた。また直径20cmの火皿でガソリン、メチルアルコール、及びトランスオイルを同じ程度の炎をあげさせて燃やし、上述の電極を用いて炎の伝導を調べた。

これ等の結果は **Fig.2** ならびに Table 1 に示すとおりである。通常、このような電圧電流特性は3段階、

Table 1. Electric characteristics of flames

Fuel	$A(\Omega cm)^{-1}$	$B(VA^{-2})$	$\rho(\Omega cm)$	$n(cm^{-3})$
excelsior	6×10^{5}	2×10^{10}	2×10^{5}	1×10^{10}
wooden crib	2×10^{6}	2×10^{11}	7×10^{5}	3×10^{9}
gasoline	1×10^{7}	1×10^{13}	3×10^{6}	6×10^{8}
transformer oil	4×10^{7}	2×10^{15}	1×10^{6}	2×10^{8}
metylated spirit	2×10^{8}	2×10^{16}	7×10^{7}	3×10^{7}

すなわち、暗流領域、飽和領域、自続放電領域にわけられるが、図に示すように木材やガソリンでは飽和領域は明確でなかった。また Table 1 からわかるように木材の燃焼火炎は比較的電導性が高く、特に電極周辺の電圧降下(後述する BC^2) が減少することが著しい。

さらに木材火災の電気伝導をより詳しく知るために **Fig.3** に示すように耐火レンガで内張りしたドラム缶の下方からブロワーで均一に送気できるようにした燃焼装置で木材を燃やし、その時の送気量を調節することにより燃焼の状態、火焔の長さと温度を調節した。

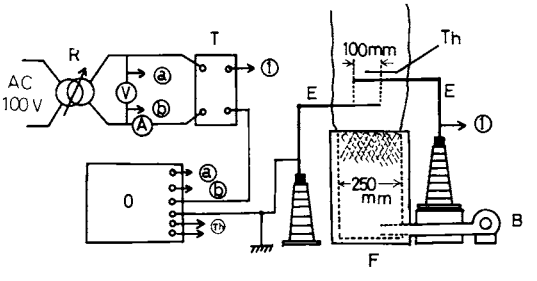

Fig. 3. experimental apparatus
F: furnace with brick wall for burning wood
T: step-up-transformer (200V:100kV・10 kVA) or (200V:6kV・3 kVA)
E variable-gap electrodes, consisting of cupper-wires of diameter 5mm or 47cm² vertical parallel-cupper-plates.
Th: Chromel-Almel thermo-couple 1mm in diameter
B: blower controlled air supply
O: oscillograph
R: regulator (5kVA)

燃焼装置の直上の面積47cm²の平行銅電極間に90V の直流電圧を印加し、電極間隔を変化して、その間隔と電極間電流との関係を炎の温度が1000～900℃と900～700℃の二つの状態にわけて測定した。なお、炎の温度は上部電極近傍で1mmクロメルアルメル熱電対で測定した。測定結果は **Fig.4** に示すとおりである。

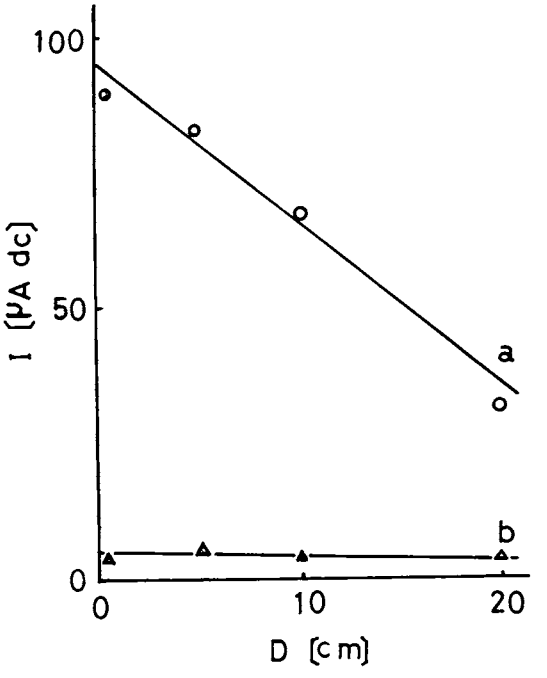

Fig. 4. relation between electrodes gap D and average current I in case that voltage across parallel plate electrodes is 90V D.C.
a: flame temperature between 900～1000°C
b: flame temperature between 500～900°C

2. 2. 交流による木材炎の電気伝導

上述の **Fig.3** の燃焼装置で、その上方に5mm銅線を固定及び可動電極とし、交流の印加電圧を変えながら漏洩電流、電圧の測定を行なった。その結果は **Fig.5** に示すとおりである。測定結果のバラツキは燃焼状態(600～1000℃)を大きく変化させたためによるものである。

2. 3. 交流放電開始電圧

23×25×50cmの缶に、乾燥した3cm角の杉材(長さ20cm)をたえず缶の上端に達するよう投入して燃やし一方、缶の上方に平行にはられた5mm径の電極に 500 V／min の割合で交流電圧を増加させて、アーク放電

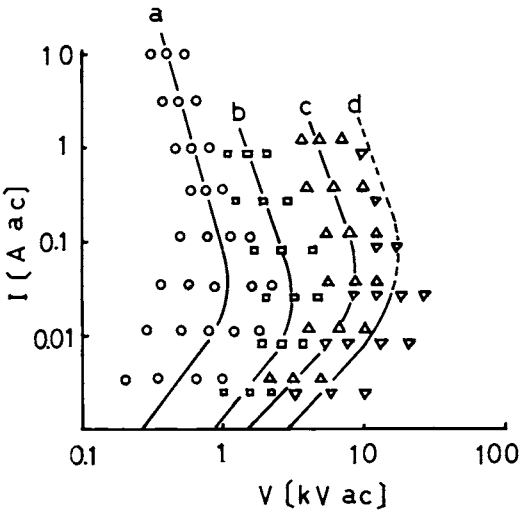

Fig. 5. A.C. electric conduction in flames. curves show average values, symbols and letters denote the following electrode gaps.
○a 4 mm　　△c 100 mm
□b 25 mm　　△d 1000 mm

開始電圧を求めた。炎の温度は前項同様、700～900℃になるようブロワーにより供給空気量を変えて調整した。また上部の電極として使用する電線の太さを変えてアーク放電で電線が断線する条件をも調べた。

Table 2. Arc discharge in flames

Electrodes gap	Flame temperature	Break down voltage
15 cm	800 °C	3 kV
15 cm	800 °C	4 kV
15 cm	800 °C	12 kV
20 cm	800 °C	8 kV
20 cm	700 °C	10 kV
20 cm	800 °C	6 kV

その結果、後述の実験式およびTable 2 に示す放電開始電圧をえた。放電はブロワーが動作して灰が舞上る状態になると比較的低い電圧で発生した。

またアークによる銅線の断線を調らべた結果、700～900℃の火炎中では、断線時のアーク電流は炎の温度とほとんど無関係で、後述のように電線径と相関が認められた。

3. 考　察

3. 1. 直流電気伝導

電極が距離D〔cm〕の間隔で炎内におかれ、電位差V〔V〕であるとき、電極に流れる電流C〔A〕は、A, Bを常数とすれば、次の近似式で示される。

$$V = ACD + BC^2 \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (1)$$

右辺第一項は炎中の電圧降下、第二項は電極降下をあらわす、上式に **Fig.2** に示す曲線の直線部分の二点の測定値を代入してA, B を求めるとTable 1　のとおりとなる。また、上式右辺第一項の均一電界域における電位傾度をF　とすれば、電流密度iは、

$$i = n\,e\,F_0\,(k_1 + k_2) \cdots\cdots\cdots\cdots (2)$$

となる。ここでn は1 cc当りのイオン数、e は 素電荷量、k_1及びk_2は正負イオンの易動度である。いま炎中の正イオン電流を無視し、炎中の自由電子の易動度k_2を大気中での値に準じ2500cm²／sec・V とすると電子密度を算出することができる。後述の通り **Fig.4** に示す並行板間での実験結果から電流密度、したがって電子密度(n). 抵抗率(p)が得られる。次に **Fig.4b** の直線で示す炎がクリブの炎と等しいと看做して、クリブ炎の$n.p$ をきめ、その他の炎はクリブの炎と Table 1 のA を比較して $n.p$ を求めた結果を Table 1 に示す。

Fig.4 は前述のとおり平行板電極間隔と平均電流の関係を 900℃をわずかにこえる炎と以下の炎にわけて実測したものであるが、図において、直線が縦軸と交わった点の電流値から、炎の接触抵抗は高温では 4 MΩ－cm²、低温では 100MΩ－cm²と求められ、一方直線a, b の勾配から炎の体積抵抗率は、高温では 400kΩ－cm、低温では 700kΩ－cmと求められる。なお、炎の温度がT〔K°〕の場合、炎内の電子の移動度k_2 を$2.5T$〔cm²／sec・V〕として[1]、体積抵抗率 ρ から電流として作用する電子密度 n は、

$$n = 1/\rho k_2 e \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (4)$$

となる。式(4)から高温の炎では$n = 7 \times 10^9$／cm³、低温の炎では3×10^9／cm³程度となる。

3. 2. 交流電気伝導

平行2線条が均質な電導物質中にあり、電極近傍における電圧降下が無視できる場合、媒質の体積抵抗率をρ_v、2線条の軸間距離を s、半径を r、長さをl とすると、2線条間の電気抵抗 R は次式で示される[2]。

$$R = 2.3\rho_v / 2\pi l \cdot \log_{10}[(D+2r)^2/r^2] \cdots (5)$$

そこで **Fig.5** の結果を **Fig.6** に示すように電極間に流れる電流が1 mAとなる電圧を縦軸に、$\log_{10}[(D+2r)^2$

$/r^2$〕を横軸に取り整理しなおした。図において直線aは900℃程度の炎の場合、直線bは7700℃程度の場合に相当する。図から明らかなように交流による炎の電気伝導は直流の場合に比較して電極降下が無視できる程度少ないので、上記の2つの直線の勾配から炎の体積抵抗率は高温の場合0.6MΩ－cm、低温度の場合1.5MΩ－cmとなる。

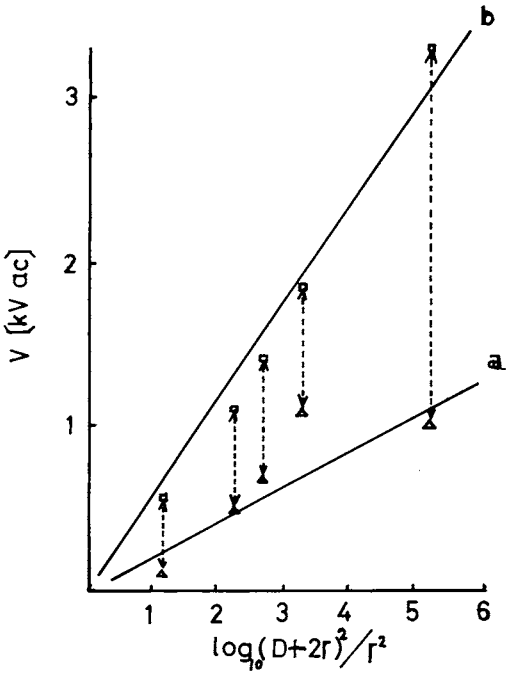

Fig. 6. relation between electrodes voltage V necessary for flowing a current 1mA and $\log_{10}(D+2r)^2/r^2$,
D: distance between electrodes
r: radius of wire electrodes
a: flame temperature around 900°C
b: flame temperature around 700°C

火災のように電離度の低い弱イオン化プラズマについて、Chapman と Cowling がプラズマの伝導度 e について次式をあたえている[3]。ここで T はプラズマの絶対温度、e は電子の電荷、n は電子密度、k はボルツマン定数。D は拡散係数である。

$$\rho = e^2 n_e / kT \cdot D_{12} \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (6)$$

上式に $D_{12}=3.39/8n_0\theta\cdot(kT/2\pi m_e)^{\frac{1}{2}}$、$n_e=\alpha n_0 p$ の関係式を代入し、定数に数値を入れると、

$$\rho = 3.34\times10 \quad \times\alpha/\theta T \cdots\cdots\cdots\cdots (7)$$

ここで α はイオン化度、θ は衝突断面積 p は電離物質の分圧である。一方イオン化度に関する Saha の式[4]において $\alpha\leqq 1$ の場合、ϕ を仕事函数とすると次式になる、

$$\alpha = \bar{p}^{\frac{1}{2}}\times(2.4k\times10^{15})^{\frac{1}{2}}T^{\frac{3}{2}}\mathrm{e}\times\mathrm{p}(-\phi/2kT)\cdots(8)$$

(7)式の α に(8)式を代入すると、

$$\rho=(3.34\times10^{-12})(2.4k\times10^5)^{\frac{1}{2}}p^{-\frac{1}{2}}\theta^{-1}T^{\frac{1}{2}}\mathrm{e}\times\mathrm{p}(-\phi/2kT)\ \cdots\cdots(9)$$

炎の電気伝導度は、p 及び θ が温度により変化しないとすると、$T^{\frac{1}{2}}\cdot\mathrm{e}\times\mathrm{p}(-\phi/2kT)$ に比例することになる。

炎の仕事函数を求めるために、電極間隔を20cmとして、0.75MΩ の直列抵抗を介して15kV の交流電圧を印加して、炎の平均電導度と平均温度を測定した。この結果を **Fig.7** に示すように $\log_{10}(\rho T^{\frac{1}{2}})$ を後軸に、

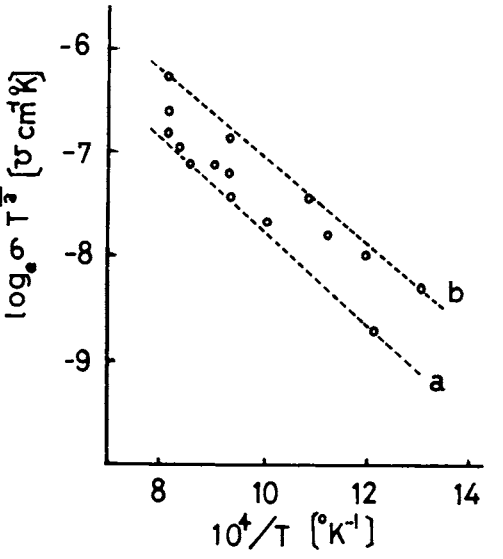

Fig. 7. relation between $\log\sigma/T^{\frac{4}{3}}$ and $10^4/T$ applied voltage of 15kV A.C. with 0.75MΩ series impedance,
a: at early burnt stage
b: at fully development stage
σ: conductivity of flame

$1/T$を横軸に示すと(9)式によりプロットの勾配から仕事函数が求まる。**Fig.7** より、木材炎の仕事函数は0.8 eV 程度になる。アルカリ金属の酸化物は金属単体の場合（1.8～3eV）より仕事函数が低いことから推定すると、木材炎では、そこに含まれるK_2O,CaOなどの灰成分によって電気伝導が生ずるものと考えられる。**Fig.7** の直線の勾配から炎の体積抵抗率の温度係数は

近似的に1℃につき−0.9%程度になる。木造家屋の火災実験によると炎の温度は最高値で1100℃程度であるから、火災時の炎の体積抵抗率は 900℃での測定結果から少なくとも0.3MΩ・cmと推定される。

3．3．交流放電

Fig.5 の曲線の最大電圧値及びTable 2 から、500～900℃の木材を燃やした炎中でのアーク放電開始電圧の平均値を V_D とすると、5～20cmの電極間隔の場合次式で近似される。

$$V_D = 2\times10^9 T^{-2} D^{0.6}\,[\mathrm{V}] \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots(10)$$

ここで T は炎の絶対温度、Dは電極間隔〔cm〕である。また900℃程度の炎中で放電開始電圧は1cmあたり150V であった。なお、直流によるアーク放電開始電圧は、交流で測定した値より低く、900℃の炎中での最低値は1cmあたり 100V であった。

アーク放電により、電線が断線する放電電流の最少値をI〔A〕とし、電線径を d〔cm〕とすると、電線径が1～5mmの間で次の実験式が得られた。

$$I_D = 0.06 d^3 \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots(11)$$

4．おわりに

木材が燃えた炎は、主として炎の中にある灰分の熱電離により電気抵抗が比較的低くなるものと思われる。木造家屋の火災時の炎の電気抵抗は交流で100kΩ−cm程度になり、放水流を通しての感電防止基準ができている地下水の電気抵抗と比較するとおよそ 100倍程度の値になることが予測できる。また木材炎中の平行電線間のアーク放電開始電圧は1100℃の温度で電極間隔1cmにつき平均 600V 程度となり、通常の大気中での放電開始電界30kV／cmと比較すると50分の1になる。

炎中の電子密度は10^7～10^{10}cm^{-3} 程度の測定結果を得たが、この値は、これまでに報告された測定値に近いものである。一方、木材が燃えた炎の熱電離仕事函数は0.8eV 程度になったが、これまでに報告された値より低い値である。

言うまでもないが火災時においては、火炎中に燃焼している木板や金属板が混入する場合は、炎の電気抵抗は更に低下する。

これらの実験結果から高圧電気設備に接近した火災現場における感電防止のために、従来から実施されている安全対策[5]に次のことを追加する必要があろう。

1．建物から噴出した火災が高電圧の電線に触れている場合は、建物への注水は電線に注水すると同様の注意が必要である。

2．時々炎の先端が活線に触れる程度の炎でも消火活動のため近ずく場合には、炎との安全距離も活線と同様に保つ必要がある。

参考文献

1) 本多侃士　放電現象持論　I（昭38）p. 50　東京電機大学出版部

2) 電気学会　電気工学ハンドブック（昭31）p. 77　電気学会

3) S. Chapmann. T. G. Cowling, The Mathematical Theory of Nonuniform Gasses, 1952 Cambridge University Press

4) M. N. Saha, Phil mag **40** (472) 1920

5) 電気火災事故防止委員会報告　電気試験所彙報 **16** 1952

Electric Conduction through Flame

(Abstract)

Shigeaki Itoya

(Received Dec. 15, 1972)

With marked growth in the utilization of electric power and the density of population in urban areas, the number of buildings positioned close to high voltage lines is increasing, while it is getting difficult to stop power supply even when a building fire takes place near such power lines. Accordingly, firemen have often to fight fire near the high voltage live lines, exposed to a possible danger of electic shock by way of fire flames.

There are many works on the ionization in flames, but hardly any of them deals with the case of real fires with which firemen have to compete. Therefore, experiment on the ionization of flames similar to actual fires have been performed, and the results are summarized as follows.

Electric characteristics of various flames of about 20 cm in diameter with D.C. voltage applied to the electrodes immersed in the flame are shown in Fig. 2 and Table 2. It is noticeable that the flames of burning woods show the higher electric conductivity than those of other fuels.

Electric characteristics of flames were also measured for electrode gap ranging from 4 mm to 1 m with A.C. application, the results of which are shown in Figs. 5 and 6. Through these results, it is clear that the potential drop in the region close to the electrode for A.C. is very small, and that the average volume resistivity will be approximately 100 kΩ-cm. The A.C. arc discharge voltage in flames will be about 1/50 of that in ordinary atmosphere.

Taking these facts into account, the firemen must be sufficiently cautious against the danger of electric shock by way of flame when engaged in fire fighting practices near the power lines.

高圧で噴出する蒸気の帯電現象(第1報)

川　崎　正　士

(昭和47年12月18日受理)

1. まえがき

最近発表された“全国工場事業場における静電気の実態調査”[1]によれば、報告された静電気災害のうち気体および液体の噴出工程で発生したものが8%に達しており、その中で放電火花をともなったものの80%がガスや蒸気に引火している。一方原料などを高温高圧――たとえばポリエチレン製造時には2000気圧以上――で処理する工場が増加している。最近このような工場の高圧装置が破損して、内部の高圧蒸気やガスが噴出し、その際発生した静電気の放電によって爆発や火災を起したと考えられる事故が数件発生し、人命の損失と数十億円の被害があったことが報告されている。

また、最近発生した大型石油タンカーの爆発事故のあるものは、揚げ荷後におこなうタンク洗浄作業中に起った。この作業では、普通放水銃で温水を高速で吹き出したり、壁面に高圧水蒸気を噴出して汚れを取っているが、ほとんどの爆発事故は他に着火源が見あたらないことから、水または蒸気の噴出による静電気が注目されている。

上述のような問題に関連する研究としては従来、液体が霧状で噴出する際の帯電現象では、L.Chapman[2] (1936) その他により、気体が噴出するときの帯電現象についてはW.Nusselt[3] (1922) その他により研究されているが、液体蒸気の噴出による帯電現象については、W.A.D.Rudge[4] (1914) その他が水蒸気について研究しているのみであり、水以外の液体の蒸気の場合は、まだよく研究されていない。そこで、可燃性ならびに不燃性の各種液体が、高温高圧のもとで蒸気として噴出した場合の帯電現象、その蒸気が可燃性の場合、放電による着火の危険性の有無を調べる目的で研究を開始した。この報告では、実験で使用した装置の詳細と帯電の分布に関する実験および16種類の液体の噴出圧力と電荷発生の関係を求める実験について述べ、それらの実験結果について考察を行なう。

2. 実験装置および測定法

実験は、とくに可燃性液体蒸気を対象とする場合に放電着火する危険性も考慮して、厚さ20cmの鉄筋コンクリート防護壁に囲まれ接地された1.8m立方のトタン内張りの木製実験槽の中で行なわれた。なお、実験槽の壁には扉と観測窓を設けた。

実験装置は**Fig.1**に示す。実験槽の一端に高圧蒸気を噴出させる内容積1ℓのオートクレーブ**Fig.2a**を置き、その前方に発生電荷を収集するためのプローブをスタンドに固定、配置した。プローブの構造は**Fig.2c**に示す。オートクレーブの取付け架台はふっ素系樹脂棒で大地と絶縁した。プローブおよびオートクレーブの収集電荷を電流測定法により、2個の振動容量型電位計の出力端子から電磁オツシログラフにそれぞれ記録させた。実験に先だって槽内に設けた除湿機を用いて内部の相対湿度を30～40%に保った。

試料はすべて特級試薬を用い、水の場合にはイオン交換樹脂法および蒸溜法を併用して製造した純水を使用した。実験開始前オートクレーブを水道水、メチルアルコールおよびベンゾール、純水、最後に使用する液体で十分に洗浄して後、700ccの試料を入れた。その後、外部から2kWの電気炉で内圧100kg/cm²となるまで加熱した後、上述の実験槽内に入れて、そのニードルバルブを槽の外部から長い柄付きのハンドルで開き、**Fig.2b**に示す直径0.5mmのノズル穴から噴出させた。なお、圧力はブルドン型圧力計を用いて測定し、その読みを観測窓を通して読みとった。

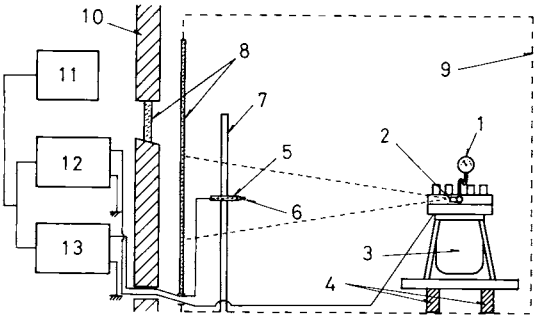

Fig. 1. Sketch of experimental apparatus.
1: Bourdon's pressure gauge
2: Nozzle
3: Autoclave
4, 5: Insulator (polytetrafloroethylene)
6: Electrode (brass piece of 3mmφ)
7: Stand
8: Window for observation
9: Experimental chamber
10: Reinforced concrete wall
11: Electromagnetic oscillograph
12, 13: Vibrating reed type electrometer

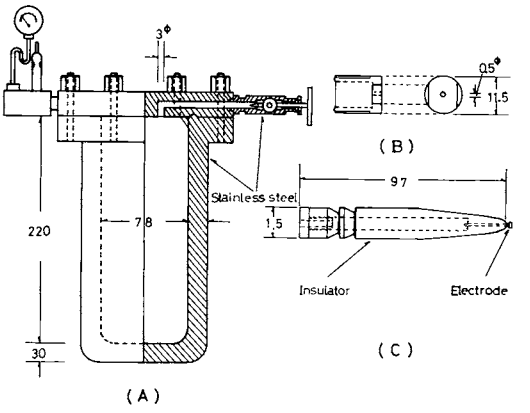

Fig. 2. (A) Autoclave (B) Nozzle head and (C) Probe (Dimension: mm)

3. 実験結果

3. 1. 空間的帯電分布

Photo.1 はノズルから噴出中の水蒸気の状況である。目に見える蒸気の拡がりの角度は内圧50kg／cm²のとき噴出軸上70～80cmまで約10度であり、噴出口の近傍では内圧が5kg／cm²にさがるまでほぼ一定であった。ま

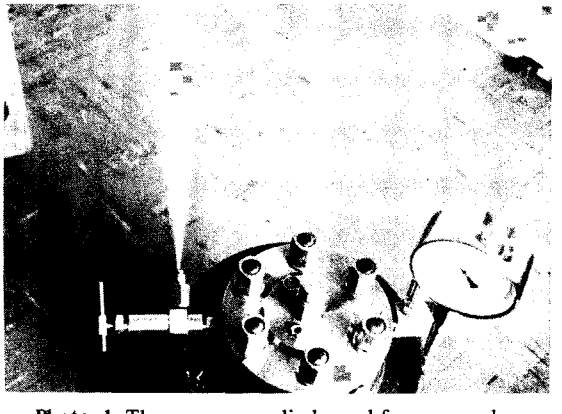

Photo. 1. The vapour was discharged from a nozzle.

たプローブの収電用電極は、初期には半田メッキ黄銅および黄銅を用いたが、測定値に差異が認められなかったので、その後、後者のみを用いることとした。

Fig.3, Fig.4a および **b** はそれぞれ蒸溜水、メチルアルコールおよびアセトンの、噴出蒸気中に置かれた

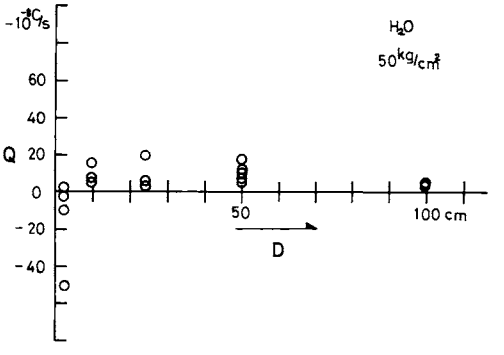

Fig. 3. Charge distribution on axis of a steam jet.
Q: Collected charge on the probe.
D: Distance on the jet axis.

プローブで検出した電荷が、噴出軸上でノズルからの距離が変化するにつれてどのように変るかを示す。なお、この図は繰返し実験し、オートクレーブに発生する電荷対圧力曲線が互いにほぼ等しい場合についてのみ測定値として採用した。図上の各点は **Fig.3** を除いて通常5回以上の測定の平均値である。この実験を通じてプローブ上の収集電荷は、ノズルから噴出軸上距離20cm以下の点では不安定な値を示した。この原因は蒸気が液化し小液滴に分裂する場所に近いこと、およ

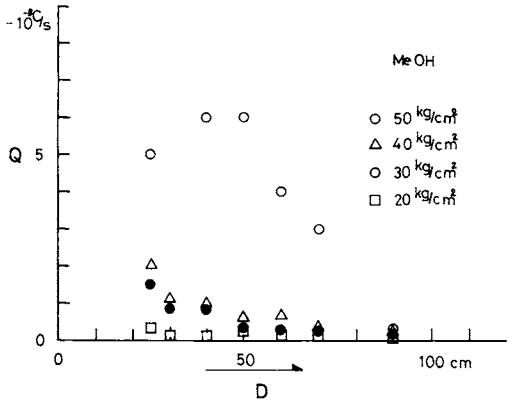

Fig. 4. (a) Charge distribution on axis of a methyl alcohol vapour jet.
Q: Collected charge on the probe.
D: Distance on the jet axis.

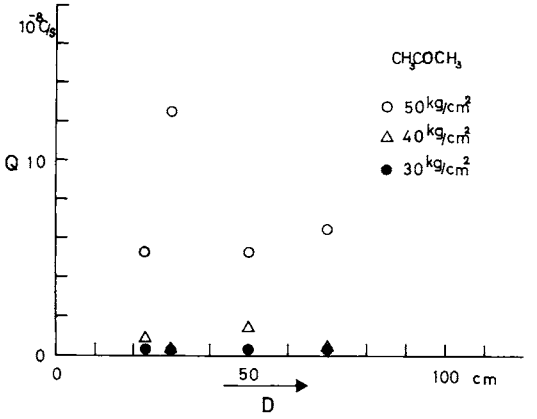

Fig. 4. (b) Charge distribution on axis of an acetone vapour jet.
Q: Collected charge on the probe.
D: Distance on the jet axis.

び蒸気の拡がりに対し挿入した電極の影響が、噴出点に近い程無視し得なくなるためではないかと考えられる。ノズルからの距離が軸上40～60cmでは比較的安定した値を示し、距離60cm以上では遠のくにつれて減少した。**Fig.5a** および**b**はそれぞれ、メタノールおよびアセトンの場合に、ノズルから軸上50cmの距離における垂直分布である。両図とも蒸気の可視域における電荷が非可視域における電荷よりも大きな値を示した。本実験で使用したノズルの場合、噴出軸の中心で必ずしも電荷が大であるとはいえない。

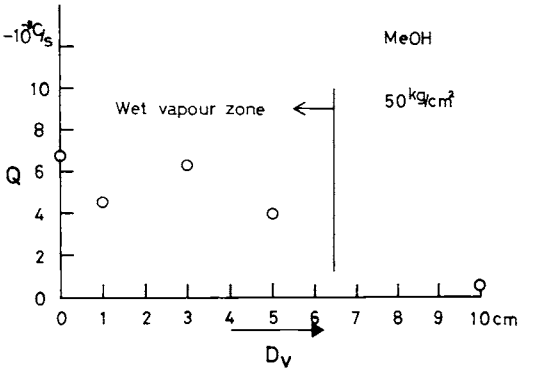

Fig. 5. (a) Charge distribution as the point of 50cm from the nozzle in the vapour jet axis of methyl alcohol.
Q: Collected charge on the probe.
D_V: Vertical distance from the jet axis.

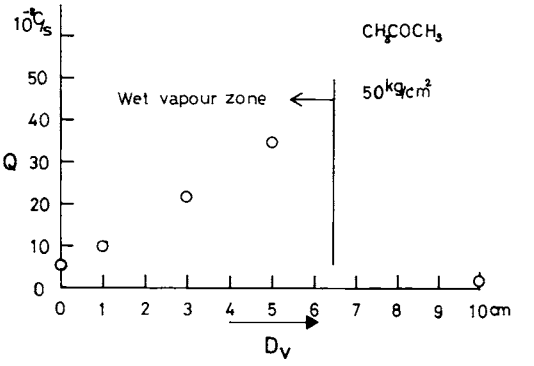

Fig. 5. (b) Charge distribution at the point of 50cm from the nozzle in the vapour jet axis of acetone.
Q: Collected charge on the probe.
D_V: Vertical distance from the jet axis.

3. 2. 各種液体蒸気による帯電

噴出軸上ノズルから50cmの点にプローブ電極をおいた場合、そこに集められた種々の試料の単位時間当り平均収集電荷と圧力の関係は **Fig.6a, 6b** の例に示すとおりであり、60kg／cm²以下の圧力では *n*- ブチルアルコールおよびアセトンを除き、それは圧力の減少とともに減少した。*n*- ブチルアルコールでは他の試料とは異なり乳白色の高濃度の霧状物体が槽内に充満し、発生電荷は50kg／cm²付近で最高となった。なお、同時に測定したオートクレーブの発生電荷は他と同様に圧力の減少とともに減少した。この場合に見られた乳白色の霧状物体が電荷発生に影響を与えたものと思われる。アセトンは圧力の減少とともに50kg／cm²までは発

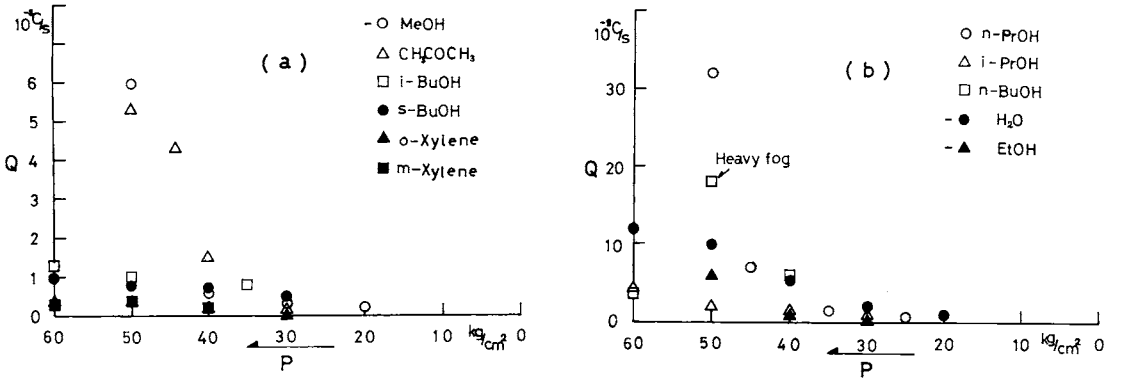

Fig. 6. Relationship of static charge versus the vapour pressure, at the point of 50cm from the nozzle in the jet axis.
Q: Collected charge on the probe. P: Vapour pressure in the autoclave.

生電荷が減少するが、以下45kg／cm²付近で発生電荷が上昇し、小さなピークを作り、その後また圧力とともに減少して行く。この傾向は同時に測定したオートクレーブ発生電荷にも見られる。この他 *tert*-ブチルアルコールおよび *p*-キシレン、ベンゾール、*n*-ヘキサン、四塩化炭素についても実験を行なったが、*tert*-ブチルアルコールの場合は加熱中凝固のため、*p*-キシレンの場合は発生電荷が微少のため測定不能であり、またベンゾールおよび *n*-ヘキサン、四塩化炭素の場合はまったく電荷を検出することができなかった。

4. 考　察

液体の流動による帯電現象を問題にする場合には、ベンゾールおよび四塩化炭素などが比較的よく帯電する物質であることが知られている[5]。しかし、蒸気噴出における帯電を対象とする本実験では、明らかにそれとは異なった結果が得られた。**Table.1** に、各試料液体蒸気が50kg／cm²の内圧で噴出中、ノズルから噴出軸上50cmの位置で収集した電荷と物性定数とを示してある。**Table.1** によるとベンゾール、*n*-ヘキサン、四塩

Material	Collected charge on the probe (C/s)	Dipole moments (D)	Molecular weight	Boiling point (°C)	Critical point (°C) , (atm)
o-Xylene	0.4×10^{-9}	0.62	106.17	142	
m-Xylene	0.4×10^{-9}	0.37	106.17	139	
p-Xylene	–	0.1	106.17	138.4	
n-Butyl alcohol	185×10^{-9}	1.63	74.12	117.5	288 , 49
i-Butyl alcohol	10×10^{-9}	1.63	74.12	108	265 , 48
sec-Butyl alcohol	8×10^{-9}	1.65	74.12	98.5	
tert-Butyl alcohol	–	1.66	74.12	82.5	
n-Propyl alcohol	320×10^{-9}	1.657	60.10	97.15	264 , 50.2
i-Propyl alcohol	20×10^{-9}	1.682	60.10	82.4	235.6 , 53
Ethyl alcohol	-60×10^{-9}	1.67	46.07	78.3	243 , 63
Methyl alcohol	-70×10^{-9}	1.69	32.04	64.65	240.0 , 78.5
Acetone	80×10^{-9}	2.85	58.08	56.3	235.5 , 46.6
Benzene	0	0	78.12	80.13	289 , 48.6
n-Hexane	0	0	86.13	68.8	234.7 , 29.9
Carbontetrachloride	0	0	153.82	76.68	283.2 , 45.0
Water	-100×10^{-9}	1.85	18.2	100	374.2 , 218.3

Table 1. Collected charge on the probe at the point of 50cm from the nozzle in the jet axis (the discharge pressure of 50kg/cm²) and properties.

化炭素では双極子能率を持っておらず、その他の液体では双極子能率を持っていることがわかる。一方、川崎弘司[6]その他は液体の分裂による帯電においてはベンゾールは帯電しないと報告している。以上のことから高温高圧で噴出する蒸気の帯電では流動帯電の機構よりも液体の分裂の機構の方がより支配的ではないかと思われる。また、この帯電には試料液体の双極子能率が関係するのではないかと推察される。

5. むすび

以上述べて来たことを要約すると、次のようになる。(1) 一般に噴出圧力10kg／cm²から40kg／cm² の範囲では発生電荷は圧力の増加とともに増加する。(2) 噴出ノズルから軸上50cm以上の距離では電荷は距離とともに減少する。(3) ベンゾール、*n*-ヘキサンおよび四塩化炭素では高圧蒸気として噴出しても電荷を発生しない。(4) 蒸気の噴出による電荷の発生は液体の双極子能率に何らかの関係があるのではないかと推察される。

この実験から液体の流動帯電とは異なる二、三の問題点が明らかになった。また、液体の種類によっては、かなり多量の電荷が発生することも明らかになったので、それらの帯電による着火の問題など、残された問題点をさらに明らかにしたい。

最後にご指導いただいた横浜国立大学工学部の北川徹三教授をはじめ諸先生がた、実験に協力して下さった当研究所の皆様に厚く御礼申し上げます。

文　献

1) 田島泰幸他：労働省産業安全研究所技術資料 RII-TN-70-3.
2) Chapman, Seville：Phys. Rev.,**52**, 184(1937)
3) W. Nusselt：Zeitschrift des Vereins Deutschen Ingeniere, **66**, 39(1922)
4) W. A. D. Rudge：Proc. Roy. Soc. A., **90**, 127(1914)
5) 山本格治：日本火災学会論文集, **7**, 1(1957)
6) 川崎弘司：電気試験所報告, 506号 (1950)

Experimental Study of Static Electrification of High-Pressure Vapour Jet(I)

(Abstract)

Masashi Kawasaki

(Received 18, Dec. 1972)

The electrification in the vapour jet of various liquids was studied.

The vapour was discharged from a nozzle of diameter 0.5 mm set at the wall of the enclosed vessel, in which the vapour pressure was elevated to about 100 kg/cm^2 by heating and vaporizing the liquid. The electric charge generated in the jet was collected by a probe of a brass electrode of 3 mm in diameter. The charge quantity per second at various points in the vapour jet of 16 kinds of liquids was measured in the pressure, range 10-80 kg/cm^2. The humidity of ambient atmosphere was kept constant during the experiment.

(1) The electric charges, collected per unit time (s) at the point of 50 cm from the nozzle in the jet axis at the discharge pressure of 50 kg/cm^2 were: about 0.4×10^{-9} C for *o*-xylene; 0.4×10^{-9} C for *m*-xylene; very small for *p*-xylene, 175×10^{-9} C for *n*-butyl alcohol; 10×10^{-9} C for *i*-butyl alcohol; 8×10^{-9} C for *sec*-butyl alcohol; 320×10^{-9} C for *n*-propyl clcohol; 20×10^{-9} C for *i*-propyl alcohol; 80×10^{-9} C for acetone; 70×10^{-9} C for methyl alcohol; 60×10^{-9} C for ethyl alcohol; 100×10^{-9} C for water. They have all dipolemoments. However, vapours of benzene, *n*-hexane and carbon-tetra-choloride which have no dipolemoments, were not electrified.

(2) The charge increased with the vapour pressure in most liquid, except the acetone and *n*-butyl alcohol.

It seems that the electric charge in the jet vapour is related to the dipolemoment of the liquid.

消防研究所報告

通巻 36 号

昭和48年3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）44-8331（代表）