ISSN 0426—2700

REPORT OF FIRE RESEARCH INSTITUTE OF JAPAN
Serial No. 56 September 1983

消防研究所報告

通 巻 56 号 1933年9月

目 次

研 究

含水沪紙および木材消火物への伝熱と着炎機構……高橋 哲……(1)

水系消火剤の作用機構と効率……高橋 哲……(7)

高温における塩化水素および臭化水素の燃焼抑制効果……斎藤 直……(13)

防火木造建物の火災初期における発生ガス……箭内英治，守川時生……(19)

樹木の延焼防止効果に関する実験的研究……山下邦博，林 幸司，稲垣 実……(27)

ヘリコプターからの音声による避難誘導について（その1）
——平坦地での明瞭度，了解度——……渡部勇市，神 忠久……(37)

ヘリコプターからの音声による避難誘導について（その2）
——平坦地での音圧レベル，周波数特性——……渡部勇市，神 忠久……(49)

消 防 研 究 所
東 京 都 三 鷹 市

REPORT OF FIRE RESEARCH INSTITUTE OF JAPAN

Serial No. 56 September 1983

– Contents –

MEMOIR

Heat Transfer and Ignition of the Extinguished Wood Residue and the Wet Filter Paper
..... Satoshi Takahashi ..... (1)

Extinction Mechanism and Efficiency by Sprays of Water and Chemically Improved Water
..... Satoshi Takahashi ..... (7)

Combustion Inhibition Effects of Hydrogen Chloride and Hydrogen Bromide at High Temperature
..... Nashio Saito ..... (13)

Analysis of Efflucent Gas in Initial Stage of Mortarplastered Wooden House Fire
..... Eiji Yanai, Tokio Morikawa ..... (19)

Experimental Investigation of the Protection of Fire Spread by Trees
..... Kunihiro Yamashita, Kōji Hayashi, Minoru Inagaki ..... (27)

Voice Guidance for Evacuation from Helicopter
Part 1. Articulation and Intelligibility on Flat Ground
..... Yuichi Watanabe, Tadahisa Jin ..... (37)

Voice Guidance for Evacuation from Helicopter
Part 2. Sound Pressure Level and Frequency Characteristics on Flat Ground
..... Yuichi Watanabe, Tadahisa Jin ..... (49)

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

含水沪紙および木材消火物への伝熱と着炎機構

高橋　哲

（昭和58年5月10日受理）

1. まえがき

木材火災の消火機構については諸説があるが，燃焼要件の遮断のような物理化学的原則だけが総てでないことは確かである。例えば著者[1]が指摘したように，生成炭素による吸水量が支配的となる機構もあるし，大火にみられる如く，局部的鎮圧速度と再燃速度および火災の拡張速度の競争関係が全体の消火を左右するような実際的機構もある。特に後者の機構にもとづく消火については，重要であるにもかかわらず，従来議論された形跡をみない。この種の消火機構を論ずるためには，まず再燃現象について検討しておく必要があろう。

燃焼には，炭の酸化反応である無炎燃焼と，木質部の熱分解を伴なう発炎燃焼とがあるから，再燃という言葉も，一旦消火した状態から，そのいずれに回復することを指してもよいであろう。しかし火災として重要な意味を持つのは，火勢の拡大が急速であることから，発炎燃焼の方である。そこで本報では，消火残渣が発炎燃焼を開始するに至る熱的条件を検討してみた。

木材消火物の再燃時間については，碓井[2]の実験や著者[3]の物理的解析があり，強放射条件下で吸水率が余り大きくない範囲内では，再燃時間と吸水率は良く比例することが示されている。ここでは著者の解析結果を確認するため，濡らした沪紙を使用した伝熱形態のモデル実験，および木材消火物については再試験を行った。

他方，オキが原因となり再着炎に発展する再燃形態も，建物だけでなく山火事等に多い。この，無炎燃焼から着炎に至る条件についても検討された例をみかけないので，木材残渣について実験的検討を加えた。

2. 実験方法

2.1 含水沪紙と木材消火物に対する放射加熱

放射加熱を行うために，内径15cm，内高20cmの電気炉を使用した。炉天井部は，試料挿入口として，直径5cmの穴を穿ったJIS R 2611 A 5の断熱レンガで覆った。炉温は自動温度コントローラーで一定に保った。

伝熱形態を調べるための試料として，厚さ1mmの東洋炉紙No.424を使用した。これを直径3cmの円板状に打抜き，デシケーター中で完全に乾燥させた後，水噴霧を均等にかけたものを吊るして供した。

木材消火片は，3×3×3.3cmの杉角材を，約20%の重量減少量まで炉中で炭化させた後取出し，水噴霧をかけて吸水させたものである。これ等試料の重量は自動天秤で秤量した。そして細い金属線に吊るして再度炉中に戻し，ストップウオッチで着炎までの時間を測った。

2.2 炭化クリブに対する加熱

炭の無炎燃焼の拡大後に，着炎に至る熱的条件を調べるための試料は，3×3×21cmの杉角材を，Fig. 1に示すように4列8段に積上げたクリブの消火残渣であ

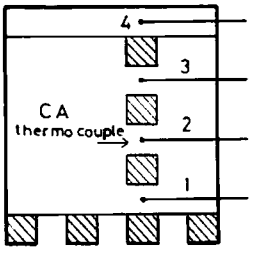


Fig. 1 Thermocouple location

り，これを数ヶ月間気乾させて供した。消火時の重量減率は各々記録してあるので，これをそのまま再燃実験における試料の炭化程度の指標とした。炭化クリブは金網張りの台上に乗せ，ボロ布に浸したn-ヘプタンの火炎で，底部中央に，無炎燃焼が継続しうる最少限度の点火を行った。

クリブ内の温度分布測定には，0.32mmϕのクロメル—アルメル熱電対を使用した。熱電対の配置は，Fig. 1に示すように，下から2，4，6，8段目の上下を角材で挟まれる空間の中央部とした。

3. 実験の結果と考察

3.1 放射加熱による吸水沪紙の着炎

沪紙の吸水率x (kg／m²)は，含水量m (kg)を沪紙の総表面積A (m²)で除した値$x=m/A$で表わす。

Fig. 2に着炎時間τ (sec)と吸水率xの関係を示す。

実線は$x=0$の点を除外して求めた回帰直線である。τは加熱温度毎に，xと良好な比例関係にあることがわかる。碓井[2]の木材試料でみられたバラツキは，ここでは認められなかった。加熱温度全体を通した関係式をうるために，$x=0$での沪紙の着炎時間も温度の関数として求めた。Fig. 2の一連の実験炉温で得た値

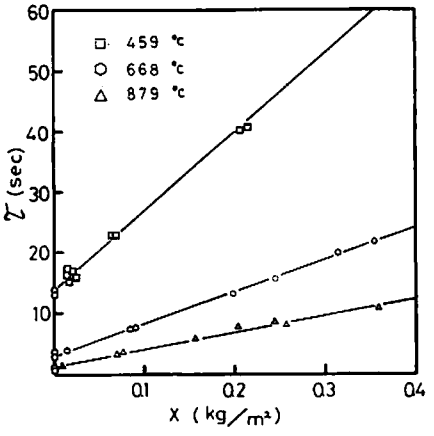


Fig. 2 Relationship between ignition time, τ, and water content, x, of wet filter paper. Regression line derived from wet filter paper. White Circle "o" indicate τ_0 at x=0.

と，別途に約100℃間隔で測定して得た値とを，絶対温度の逆数で目盛り，これをFig. 3に示す。

秋田[4]は沪紙，木材等繊維物質の着火性を比べ，発

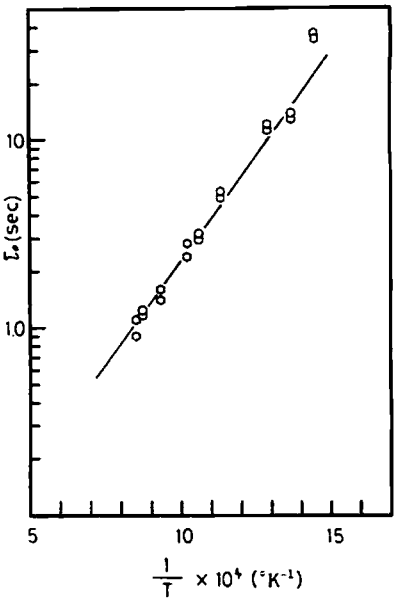


Fig. 3 Ignition time, τ_0, of dry filter paper at different heating temperature, T,.

火点はほとんど同じであるにもかかわらず，発火時間にはかなり差のあることを説明している。セルロース系物質に関して，その他にAlvares[5]，Simms[6]等は，おおむね600～525℃位の着火温度を報告している。筆者の実験では400℃付近でも確実に着炎した。しかしFig. 3に示したように，約450℃を境として着火時間の傾向にズレを生じた。ここではより高温領域での加熱を扱っているので，この領域での関係式は(1)式で表わせる。

$$\tau_0 = a \exp\left(\frac{E}{RT}\right) \qquad (1)$$

ここに，τ_0；全乾沪紙の着炎時間 (sec)

a；定数 (sec)

E；着炎の活性化エネルギー(Kcal/mol)

R；ガス定数($\approx 2\times10^{-3}$ Kcal/mol·°K)

T；加熱温度 (°K)

(1)式において，Fig. 3から$a\approx0.0144$，$E\approx10.2$の値がえられるが，これは秋田[4][7]の得た値とほぼ一致する。

Fig. 2に戻り，吸水沪紙の着炎時間τは(2)式のように表わせる。

$$\tau = k(T)x + \tau_0(T) \qquad (2)$$

そして(2)式から得たτ_0は，Fig. 2およびFig. 3に示す

ように、(1)式のτ_0と完全に一致する。即ち

$$\tau = k(T)x + \tau_0(T) \qquad (3)$$

ただし、ここで$k(T)$は比例定数である。

すなわち、吸水沪紙の着火時間は、乾燥沪紙の着火時間とkxとの和であり、kの次元解析は蒸発速度の逆数を示すことから、kxは沪紙の乾燥時間を示すものと考えられる。ここで試料表面への伝熱形態を正確に知る事はむずかしいが、熱放射が主要な成分であることは推定できる。炉はほとんど閉空間に近く、試料表面積が炉壁面積と比べて小さい事、沪紙および水の熱吸収率が各々ほぼ0.95と大きい事等から、熱放射による総括熱吸収率も1に近いと考えられる。ここでは黒体を想定した理論的放射伝熱量を基準とし、これに係数fを掛けることにより、その何倍の熱量が伝達されたか調べる。

即ち熱吸収速度は$f\sigma(T^4-T_0^4)$である。乾燥時間kxは蒸発速度に関係する量でありxに比例することから、まず水の蒸発速度$\dot{W}_{exp}$を一定とみなし(4)式のように表わしてみる。

$$\dot{W}_{exp} = \frac{f\sigma(T^4-T_0^4)}{l} \qquad (4)$$

ここに、l：水の蒸発に要する熱量（≈620Kcal/kg）

σ：ステファン・ボルツマン係数

T：炉温（°K）

T_0：吸水沪紙の表面温度、である。

したがって

$$\left.\begin{aligned} k_{exp} &= \dot{W}_{exp}^{-1} = \frac{l}{f\sigma(T^4-T_0^4)} = \frac{1}{f\dot{W}_{calc}} \\ \text{or}\quad \frac{k_{calc}}{k_{exp}} &= \frac{\dot{W}_{exp}}{\dot{W}_{calc}} = f \end{aligned}\right\} \qquad (5)$$

但し、添字exp, calcは各々測定値、計算値を示す

Fig. 2から求めたk_{exp}、および$f=1$とした時の計算値k_{calc}をfと併せTable 1に示した。

fを調べて分る通り、相対的に温度の低い側では、熱放射以外の伝熱形態の占める割合が高くなるのは通例の通りである。しかしいずれにせよ$f \approx 1$となるので、熱放射のみで計算しても実用上問題ないほど誤差は小さい。

Table 1 Experimental and calculated tangent, k, of ignition time, τ, and water content, x, relations of wet filter paper.

Heating Temperature (°K)	k_{exp} (sec/kg/m²)	k_{calc} (sec/kg/m²)	f (=k_{calc}/k_{exp})
732	128	135	1.05
941	53	52	0.98
1152	27	24	0.89

濡らした沪紙の着炎時間は、蒸発速度一定と見做した水の蒸発時間kxと乾燥試料固有の着炎時間$a\exp(E/RT)$の和として良く表わせる事、およびその際の伝熱形態は主として熱放射である事が証明できた。

3.2 放射加熱による木材消火片の着炎

木材は異方性なので、繊維方向により炭化厚や着火性が異なる。これを避けるため、碓井[2]は木口に防火塗料を塗布し供した。しかし筆者は炭化厚の影響は少ないこと、木口を炉底に向け同一条件下に測定する事、および蒸発時間と比べ乾燥試料の着火時間は高温側では短い事等の理由から、特にそのような操作を加えないで供した。

900℃における測定結果はTable 2の如くであった。

Table 2 Ignition time test of wet extinguished wood residue at 900 ℃.

Weight loss ratio ϕ	Water content x(kg/m²)	Ignition time	
		Experimental τ_{exp} (sec)	Calculated τ_{calc} (sec)
0.183	0.0	2.8	–
0.239	0.0	3.4	–
0.165	0.13	6.8	3.2
0.202	0.201	9.2	4.9
0.285	0.215	9.6	5.2
0.236	0.434	13.2	10.6
0.261	0.465	12.8	11.4
0.238	0.474	15.0	11.6
0.218	0.539	15.3	13.2
0.298	0.823	25.0	20.0
0.235	1.350	38.0	33.1
0.244	1.804	41.5	44.0

ここでτ_{calc}は、先に著者[3]が提出した(6)式において、$G=1$として算出した値である。

$$\tau = \frac{l}{G\sigma T^4}x \qquad (6)$$

ここで、Gは総括熱吸収率、xは沪紙と同様に炭化層の単位面積当りの吸水量である。

τ_{calc}をτ_{exp}と比較するには、実験値ではあるが、重

量減率$\phi \approx 0.2$における炭化試料の着炎時間τ_0を加えた$\tau_{calc}+\tau_0$を用いるべきであり，この操作によって両者は一層よく一致することがわかる。

すなわち(6)式は，本質的には水の蒸発時間を示す式なので，水の蒸発した後，乾燥試料の着炎に要する時間は含まれていない。これに関する研究は見当たらないが，高温条件下ではこれはごく短かいので，近似的に(6)式でよく表現できたものと考えられる。木材炭化物についても，沪紙と同じく(3)式のような一般形で示せれば，精度はさらに向上するとみられる。しかし，$\tau_0(T)$がどんな形をとるかは，今後の課題である。

3.3 炭化クリブを用いた無炎燃焼からの着炎

着炎が濡れた残渣の乾燥後に起こるとすれば，実験の目的には，予め気乾させた試料を使用する方が精度向上と時間の節約上都合がよい。気乾残渣について，炭化程度と熱電対の設置位置毎の着炎時の温度分布の測定例をTable 3に示した。

Table 3 Temperature distribution (℃) in an extinguished crib residue at the time of flaming from glowing.

Weight loss ratio ϕ	Thermocouple location			
	1	2	3	4
0.1	525	650	400	275
0.2	525	638	425	415
0.2	563	545	438	250
0.2	505	583	338	255
0.4	650	787	625	400
0.4	525	700	650	406

Simms,[6] 秋田[8]等は無垢の木材の場合，その表面温度が500℃付近に達した時に着炎する事を示し，さらに秋田[9]は，これが有機ガスの着火温度に相当する事を示した。ここでの実験のように，表面が予め厚く炭で覆われている場合にはどうであるか，特に研究は見当らないが，熱的条件は同じと考えてよかろう。

表面が灰に覆われていて正確な値かどうかわからないが，光学的測定では，炭の表面温度は600℃付近に達しており，表面付近は着火の条件をみたしている。一方，内部の雰囲気温度は，クリブの底より少し上方が常に最高を示し，これより鉛直上方に向うにつれ，熱分解ガスおよび燃料固体に熱を奪われることから低くなり，又より下方でも流入空気による冷却と燃焼不完全によって低くなるようなパターンをとる。そして着炎は，内部温度の急上昇と発煙量の急増の後に，底部付近で突然に起こるが，Table 3に示したように，最高部分は常に500℃を越しており，600℃付近の場合が多い。

もとより，クリブのように立体的拡がりを持つ燃料の着火で，着炎部位とその時の温度をさがし当てる事は不可能なので，おおよその値を示すにすぎないが，あらましを知るにはこの程度の測定でもよいと考える。

次にガスの濃度条件については，試料は既にかなり炭化しているので，燃焼限界内にこれを高めるには，無垢の木材の場合より高い温度で長時間加熱する必要のある事は推定できる。測定数が充分ではないが，Table 3の例では$\phi=0.2$付近で最も低い温度で着炎している。炭化残渣への無炎着火が，固体内部への熱拡散のため，炭化程度ϕの小さい程むずかしい事，これに対し，炭化の進んだもの程熱分解速度は遅くなる事等を併せ考えると，$\phi=0.2$付近で最も着炎しやすくなったのかもしれない。なお濡れた試料でも試してみたが，結果は，当然に着炎までに時間を要するものの，着炎時の温度はいずれもTable 3の最高温度付近にあり，乾燥残渣との識別はできなかった。着炎時間は，炭化や濡れの程度，初期の火源の位置，大きさ，さらには燃料の配置等に関係するものであり，着炎の条件そのものは無垢の木材と変りないと考えられる。

ここでの再燃は，着炎の為の条件を指すものであり，火炎の拡大に関しては，3.2節に述べた条件の方が適合すると考えられる。

4. 結論

1）木材消火物への熱放射による伝熱機構を調べるため，まず吸水沪紙をモデルにして検討を加えた。吸水沪紙の着炎時間は，熱放射による乾燥時間と乾燥沪紙固有の着炎時間の和でよく表わせた。

2）木材消火物の着炎時間も，吸水沪紙と同様に，乾燥時間と炭化木材固有の着炎時間の和でよく表わせる。強放射条件下では後者がごく短い事から，著者[3]が先に提出した解析式のよく当てはまる事を確認した。

3）木材消火物が無炎燃焼から発炎着火に発展する条件は，炭化程度にもよるが，燃料集積体の内部の空間温度が500℃以上で，かつ熱分解ガス濃度が可燃範囲内に達した時点と考えられる。一般的傾向として，初期の炭化度が高い程，着炎直前の内部温度は高い。

参考文献

1）高橋　哲：日本火災学会論文集，30，1，P. 31
(1980)
2）碓井憲一：日本建築学会論文集，41，P.100(1950)
3）高橋　哲：日本火災学会論文集，32，1，P. 41
(1982)
4）秋田一雄：消防研究報告，9，1～2，P. 77
(1959)
5）N.J.Alvares，S.B.Martin：*13th symp on comb*，
P. 905 (1971)
6）D.L.Simms：*Comb & Flame*，4，P. 293(1960)
7）秋田一雄：消防研究所報告，9，1～2，P. 32
(1959)
8）　同上　9，1～2，P. 27(1959)
9）　同上　，P. 20(1959)

Heat Transfer and Ignition of the Extinguished Wood Residue and the Wet Filter Paper

(Abstract)

Satoshi Takahashi

(Received May 10, 1983)

Study on the reignition process of the extinguished wood residue has important values while there is a practical extinction mechanism as the competition between suppression and reignition controls overall extinction. But we find little works on this problem.

The author[1)] formerly gave statistical analysis based on Usui's experiments. In this paper. reexamination was performed and confirmed the given equation hold well at higher temperature. But more precise agreement was obtained by adding the reignition time of the non-wet carbonized wood itself.

Another type of the experiment is to test the form of heat transfer by using wet filter paper as a model. It was confirmed that the form of heat transfer on wet filter paper is radiation, and the ignition time of it is the sum of drying time and the ignition time of dry filter paper itself.

Although the material may different, the ignition time of the both could be expressed by the similar form.

The other type of reignition is the development from glowing to flaming combustion. Air dried wood crib residue was used and the temperature distribution of the atmosphere among the crib layer was measured.

The highest temperature zone located slightly up the bottom, and its temperature just when flamed always exceeded 500°C. and was observed the temperature becomes higher as the initial carbonization degree increases.

水系消火剤の作用機構と効率

高橋　哲

（昭和58年5月10日受理）

1. まえがき

水および水に化学物質を添加した，いわゆる水系消火剤は，建物火災や森林火災の主要な消火剤である。

水系消水剤の効果に関しては，既にかなりの数の報文があるが，消火の定義そのものが研究者によって異なったり，明瞭でないものも多く，さらに測定項目や実験方法もまちまちである。当然それらの比較を通じ，普遍的消火現象あるいは消火機構を抽出し整理することは非常に困難である。

水を燃料頂部から注ぐ方法では，消火必要水量を燃料の重量減率，換言すると炭の生成量で整理すると両者は良く比例する事実を筆者は報告[1)2)]してきた。

本報では，水以外の消火剤や，より実際的な注水方法に近づける目的で，振動的に燃料周囲から注水した場合にも重量減率で旨く整理できるものか否かを試してみた。整理に当っては，木材系火災の消火の定義から明確にしておく必要がある。個々の詳しい内容は文献に譲るとしても，火炎の消滅をもって判定する方法[3)]と，炭の無炎燃焼が停止する事をもって判定する方法[3)4)]と大よそ二通りあるであろう。消火現象をより定量的，普遍的に論ずるには後者の定義による方が合理的と考えられ，本報ではこれを用いた。本報は既述のように，一つの簡潔な整理方法を提案し消火機構解明の糸口にしようとするものであり，過去のデータの整理を目指すものではない点を予め付言しておきたい。

2. 実　験

2.1 消火方法と消火液

注水はガラス管製キャピラリーからの棒状形状で行なった。この方法はクリブ頂部から注ぐ場合，先に筆者[1)]がレーキ状にノズルから放水した結果と差異が認められない事が分っている[2)]ので，簡便で実際的方法として採用したものである。キャピラリーはビニールホースを介し，内径16.5cm，内高28cmのタンクに連結し，重力式で注水した。

注水方法（水のみでなく，化学消火液も含めて，以後注水と呼ぶ）は，クリブ頂部平面上に液を循環放出し自然に流れ下らせる方法―頂部注水法―，および任意に周辺から振動的に注水する方法―振動注水法―の二法を試みた。

消火液には水の外に濡れ水（29dyne/cm），CMCを添加した増粘水(8.9cp) およびリン酸水素二アンモニウム水溶液（5％および25％）を使用した。

2.2 燃料と測定

燃料には3×3×21cmの杉角材を4列8段に積上げた気乾状態のクリブを使用した。従来の経験[1)]から，この程度のサイズがあれば，充分に諸現象のモデリングが行なえると考えたからである。消火過程における諸重量の測定には台秤を用いたが，この装置は著者[2)]が従来使用してきたものと同じである。

3. 実験の結果と考察

木材クリブは燃焼性状の再現性が高いので消火のモデルによく使われ，特に三次元構造火災モデルとして適していると考えられる。しかし消火実験では，消火に及ぼす燃料の燃焼状況の指標に何を取ればよいかまず問題である。燃焼の進行程度の目安となる予燃時間，火勢を示す燃焼速度，およびその積分値である重量減少量等が考えられる。

このうち，予燃時間は簡便な指標としてよく用いられる。例えばJ.Bryan[5)]，木田[6)]等は予燃時間が長く

なる程消火必要液量が増加する事実を示した。しかし予燃時間は燃料の燃焼状態を表わす一つの指標ではあっても定性的であり，かつ直接その状態を示すものではないので，消火現象の物理的解析の目的には適さない。

燃焼速度は木材への正味の入射エネルギー量に比例するから，必要注水速度との間に何かの関連性があってもよさそうに思える。しかし熱分解は全面で行なわれているから，熱分解の阻止，換言すると入射エネルギーの遮断の為には，全面に液を行き渡らせる事が必要である。三次元構造物では仲々これがむずかしい事は当然であり，この場合には，既消火領域から二次的に気化したり，付着吸収される水の割合が多くなる。燃焼速度は燃料の構造と関係するから，相似な燃料形態の間では，この意味での相関はありうるが，燃焼速度という熱物理的意味との関連性はなお不明である。

最後の重量減少量は，燃焼開始から現時点までの履歴を最もよくとどめるものであり，間接的に木質部の残量や炭の生成量を示している。著者[1]はクリブの頂部平面上に水を注ぐ方法を試し，指標として重量減率をとると，消火必要水量と良く比例し整理できる事を示した。この時の必要水量は炭火層に吸収される水量に依存する。さてこのように再現性の高い消火実験が可能となりその機構も明らかなので，本報の消火剤や注水方法についても同様な整理方法を試みれば，効果や作用機構の正確な比較が可能となり，消火作用解明の手掛かりがえられるかも知れない。

即ち頂部注水法による必要水量Qは(1)式で表わせたので，任意の方法による必要水量も便宜的に(2)式のように表わしてみる。

$$Q = M_o \phi \lambda \mu_o \qquad (1)$$

$$Q = M_o \phi \lambda \mu \qquad (2)$$

ここで，M_o ；木材燃料の初期重量

ϕ ；消火開始時の重量減率

λ ；炭素収率

μ_o ；頂部注水法における単位重量の炭素の消火に必要な水量（3.4gH_2O/g char）

μ ：単位重量の炭素の消火に必要な，その方法特有の水量(gH_2O/g char)

そして消火効率ηを(3)式のように定義する。

$$\eta = \mu / \mu_o \qquad (3)$$

特定の注水方法において，水と他の薬剤との効果の比を取る方法は，Bryan[4]，Tyner[3]等がSuperiority Factor と称し用いているので目新らしくはない。しかし(3)式の定義方法によると，同じ水でも注水方法間の効率の比較が可能であり，μ_oが数値的，方法的に一定なので，ηはより広範囲にその消火方法に固有な効率を示す指標となりうる。燃焼の程度ϕと消火効率ηの関係を各消火方法毎に整理して得た結果がFig.1 である。

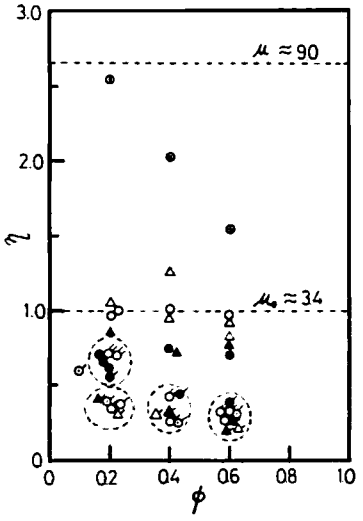


Fig. 1 Relationship between extinction efficiency, η, and weight loss ratio, ϕ..

(1) Explanation of the symbols

Type of Extinguisher	Application rate (g/min)	Application method	
		From Top Surface	Free
Water	240	○	○
Water	940	–	○
Wet water (29 dyne/cm)	240	–	◉
Wet water (29 dyne/cm)	940	◉	–
Viscous water (CMC 8.9 cp)	240	●	●
$(NH_4)_2HPO_4$ 5%-Soln	240	△	△
$(NH_4)_2HPO_4$ 25%-Soln	240	▲	▲

(2) Symbols encircled with dotted line belong to the same group of weight loss ratio, i.e. ϕ = 0.2 or 0.4 or 0.6.

以後，Fig.1にもとづいて消火剤毎に検討を進める。

3.1　水

頂部方式では$\eta=1$である。振動方式では，相対的に注水速度の小さい場合$\eta\simeq 1/3$となり，炭化程度ϕによる差が認められない。これに対し注水速度が大きく，ϕの小さい時にηの大きくなる傾向が認められる。これは炭の厚みが小さい場合，吸水容量が少ないため，過剰放水に陥る結果とみられる。ここでは，振動方式では$\eta<1$となる事，およびϕの小さい時を除いて，ηは注水速度にかかわらずほぼ一定値をとる点を指摘しておく。

3.2　ぬれ水

頂部方式では$\eta\gg 1$となり，ϕの小さな側では，点線で示した飽和状態に近い。ぬれ水は炭化層に著るしく多量に浸透固定される事実を示している。これに対し振動方式では，水との差が全く認められない。

3.3　増粘水

増粘水が消火効果にプラスする事実はよく知られている。しかし何故利くかについては必ずしも明確ではなく，付着量が増加する事実[7]もある反面，必要液量が少なくて済む[8]等の矛盾する説明が共存する。

Fig.1のように，頂部方式では$\eta\simeq 0.75$となり，水より少ない量で消火出来た。増粘水の場合，通常は燃料に対する付着量が増加するように考えられやすい。しかし，一旦炭化層の生成した燃料に対しては，浸透量の減少即ち必要液量の減少という形で効率の向上に結びつくものであることが明らかである。これに対し，木の葉，無垢の木材のような吸収層を持たない燃料に対しては，付着量の増加が着火阻止力の向上という形で，全体として消火にプラスするものと考えられる。

消火効果といっても，冷却のように一次的な作用と，燃焼阻止効果を高める作用とは，別次元の意味[2][9]を持つものである点に注意しておきたい。

振動方式について比べると，水を少し上回る量が必要であった。これは水と比べて浸透力に乏しく，表面に添って拡がりにくいため，より多く注水する必要が生じたものとみられる。

3.4　リン酸水素二アンモニウム水溶液

25%水溶液の頂部注水方式では少し水に優るものの，他の濃度，注水方式では水とほとんど差が認められなかった。

従来，リン酸水素二アンモニウムは消火効果を高める代表的添加薬品とされ，その種のデータを記載した論文[3][4][5]も多い。しかし，消火効果を必要液量で判断するかぎり，Tyner[3]，木田[6]等の論文を詳細にみても，限界的に小さな注水速度の場合を除いては水とほとんどかわらず，著者の実験結果Fig.1でも強調する程顕著な効果はみられない。しかし一旦リン酸水素二アンモニウムを吸収した木材は，乾燥後も外部からの強い加熱を継続しないかぎり発炎しないし，自発的に燃焼を継続する力は無くなる（防炎効果）から，この意味では評価出来る。即ちここでの消火は化学的というより，物理的，機械的に全表面を濡らしうるか否かにかかっており，リン酸水素二アンモニウム水溶液からは水が気化しにくい事および防炎効果が相まって，多少の水の気化分を防炎効果で補なっているかにみえる。

消火効果には，今まで述べてきたように，冷却作用と並んで再燃阻止作用の有無が強調並論されなければならない。結果は同じ消火効果であっても，その所以は全く異なる。

以上のようにぬれ水の頂部注水方式の場合を除くと，添加物の影響は少ない。本報の実験結果Fig.1および，Tyner[3]，木田[6]等の実験結果から総合的に判断してみると，限界的小注水速度の領域を除いては頂部法，振動法毎にほぼ一定の効率を示すとみられる。即ち，消火必要水量は，より技術的な方法と炭化程度に依存していると言える。本報の振動注水実験での効率は大部分の場合$\eta\simeq 1/3$であり，これは主として人為的な筒先の回転速度で決ったものである。

ここで，ηが小さい程消火効率は高く，熱的な冷却作用に近づく事を示す。発炎燃焼中の熱源は火炎であり，固体に供給される熱量は時間に比例する。一方，木材のように炭化する物質では，火炎からの熱の供給が停止しても，炭の無炎燃焼が開始され再発炎に至る。したがって，木材火災の完全な消火とは赤熱された炭を発火温度以下まで冷却することである。消火を短時間に完成しようとすれば，上の時間の関数として必要な水量は減少し，その時点での固体の熱容量が主たる決定因子となる。

簡単な試算によっても，これは$\eta\simeq 1/3$とした場合の$1/10$にも達しない微々たる量である。

一方$\eta>1$では，吸収以外に蒸発や流失する割合が高くなる事を示す。炭化層が水で飽和する場合は$\eta=2.6$となるが，普通の放水速度で$\eta>2.6$の場合には，気化水量の割合はごく小さいので，流失する割合の著るしく高い事を示す。例えば保野[10]によると消防隊に

よる消火の必要水量は経験的に床面積1 m²につき約85 kgである。正確な計算をするためには，対象の平均炭化厚を知る事が必要だが，仮に1 cmの厚みまで炭化し，かつ建物の内面積を床面積の6倍と想定すると$6\times\mu_0 \fallingdotseq 20(kg/m^2)$が計算上必要な水量である。これは$\eta=4.2$に相当し，やはり相当量の無駄があると考えられる。本報の振動注水法の効率$\eta=1/3$を想定すると，その約13倍もの水量が消費されている。すなわち，実際的な必要水量は，ほとんど操作的，技術的要因によって決定されると言えよう。

まとめ

木材系火災に対する消火剤や消火方法の効果を比較するために，燃料の燃焼状態の指標として重量減率をとると，各薬剤相互及び適用方法相互の特徴が定量的に比較できることがわかった。また，特に興味ある現象として，注水方法にかかわらず炭化程度と必要液量は比例的であることもわかった。

参考文献

1）高橋　哲：日本火災学会論文集，30，1，P.31(1980)
2）　　同上　　32，1，P.19(1982)
3）H.D.Tyner：*Ind & Eng chem*, Jan, P.60(1941)
4）J.Bryan; D.N.Smith：*Engineering*, June 8, P.457(1945)
5）　　ibid.　　，June22, P.497(1945)
6）木田　甫：消防研究所報告，No36，P.1(1973)
7）J.B.Davis; D.L.Dibble; S.S.Richard; L.V.Steck：*Fire Technology*, 1, 3. P.216(1965)
8）C.S.Grove; S.T.Grove ; A.R.Aidun：Fire *Research abstracts and Reviews*, 4, P.54(1962)
9）高橋　哲：日本火災学会論文集，32，1，P.41(1982)
10）保野健治郎：日本火災学会論文集，20，2，P.101(1971)

Extinction Mechanism and Efficiency by Sprays of Water and Chemically Improved Water

(Abstract)

Satoshi Takahashi

(Received May 10, 1983)

Extinction efficiency is largely influenced, for instance, such as by fuel configuration, degree of combustion and also by liquid application method and its rate. These various technical factors are involved in the extinction and make the mechanism obscurred.

The author[1] formerly reported that extinction phenomena could be more well correlated using weight loss ratio in place of preburn time as a parameter.

In this study, some kinds of chemically improved water as well as plain water are tested on wood crib fires and arranged by the method above mentioned. These results are shown in Fig. 1.

The efficiency of the free oscillatory application from any side one likes and of applying on top surface of the crib depended closely on weight loss ratio and the type of application, and less on chemicals added.

高温における塩化水素および臭化水素の燃焼抑制効果

斎藤　直

（昭和58年5月20日受理）

1. 緒　言

高分子を難燃化するために、ハロゲンを含む難燃剤で処理したり、ハロゲン原子を直接高分子中に組み込む方法が多くとられている[1]。ハロゲン化メタンやハロゲン酸は、気相燃焼を抑制することが知られており したがって高分子中に含まれるハロゲンの難燃化作用は、気相燃焼反応の制御によると考えられている[2]。

しかしながら、高分子中に導入されたハロゲンは、固相反応の制御によっても難燃化作用をしているとする報告もなされており[3]、ハロゲンの気相燃焼制御作用による難燃化効果は、定量的に明らかにされているとはいい難い。

著者は、高分子の難燃化におよぼすハロゲンの気相燃焼制御による効果について、より具体的な知見を得る目的で、590～640℃の高温における6種類のハロゲン化メタンの燃焼抑制効果を測定し、既に報告した[4,5]。

今回は、ハロゲンを含む難燃高分子が、熱分解する際に発生する塩化水素および臭化水素の高温における燃焼抑制効果を、前報と同様の定容燃焼法により測定した結果について報告する。

2. 実験装置と実験方法

測定に用いた装置は、外径30mm、長さ80mm、肉厚2mmの円筒形透明石英セルをもつ定容燃焼装置と、セル内の試料混合気の燃焼にともなう発光を分光し観測する光学系により構成されている。セルは、水平におかれた円筒形電気炉内に設置され、590～640℃に加熱されている。セル内の気体を真空ポンプにより排気した後、排気用電磁弁を閉じ、あらかじめ圧力を測定し1ℓフラスコ中に貯えてある試料混合気を、導入用電磁弁を0.2秒間開放してセルに導入し、自然発火させる。

本研究では、試料混合気の自然発火の圧力限界、試料導入より自然発火に至るまでの発火の誘導時間、および試料混合気の発火後の燃焼にともない放出される光のうち、431.5nmにピークをもつCHラジカル発光の持続時間を測定した。ただし、長い誘導時間後にきわめて弱い発光をともなう遅延炎については、目視とストップウオッチにより、その上限界と発火の誘導時間のみを測定した。なお、これらの実験装置と測定方法について、前報で詳細に報告した[4]。

試料混合気として、プロパンの量1に対し、3.5倍または12倍の酸素を加え、これに0.5倍の塩化水素または臭化水素を添加したものを用いた。これらの試薬の純度は、プロパン99.99%、酸素99.9%、塩化水素99.99%および臭化水素99.8%である。

3. 実験結果と考察

3.1 自然発火の圧力限界と誘導時間

一般に、定容加熱法により観測される炭化水素／空気（または酸素）混合気の、1気圧以下の低圧、400～450℃以上の高温における発火は一段階で生じ[6]、その圧力限界は、Fig.1に実線で示したように、加熱温度の上昇とともに単調に低下することが知られている[7]。しかし、メタンやプロパンなどの低級炭化水素類では、過剰の酸化剤が存在する場合に、Fig.1に点線で示す圧力限界に囲まれた遅延炎域が現われることがある。この領域では、長い誘導時間後に、きわめて弱い発光をともなう発火が生じる。Minkoff ら[6]によれば、この領域内にある混合気は、燃料分子が酸化され、一酸化炭素と水素分子に変化した後に発火すると説明さ

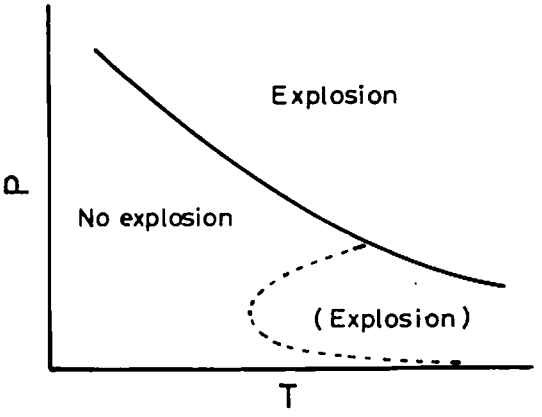


Fig. 1 High temperature ignition diagram for a typical hydrocarbon and oxygen mixture
solid line : limit of normal explosions
dashed line : limit of weak explosions for lower hydrocarbons

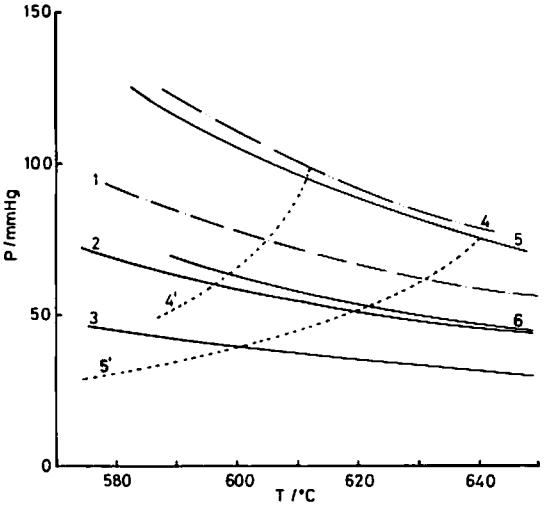


Fig. 2 Pressure limits of propane/oxygen mixture with and without halogen acid
1. $C_3H_8+3.5O_2$
2. $C_3H_8+3.5O_2+0.5HCl$
3. $C_3H_8+3.5O_2+0.5HBr$
4,4'. $C_3H_8+12O_2$
5,5'. $C_3H_8+12O_2+0.5HCl$
6. $C_3H_8+12O_2+0.5HBr$
---- : upper limit of weak explosion region

れている。

実験に用いた各混合気の自然発火の圧力限界をFig.2に示す。この図には，参考のためプロパン／酸素比が等しく，添加剤を加えていない二種類の混合気の圧力限界も示してある。1：12プロパン/酸素および1：12：0.5プロパン/酸素/塩化水素混合気には，前述した遅延炎域が認められた。Fig.2中に，この上限界を点線で示してある。塩化水素を添加した混合気の遅延炎上限界は，無添加のプロパン／酸素混合気のそれより高温低圧側に移動し，1：12：0.5プロパン／酸素／臭化水素混合気では，遅延炎域は測定温度範囲より消滅した。これと類似する現象は，燃料希薄なプロパン／酸素混合気に，ハロゲン化メタン類を添加した場合にも認められている[5]。遅延炎域の性質についての，前述したMinkoffらの説明，および水素／一酸化炭素／酸素混合気の第二限界の性質[8]を考慮すれば，本実験で用いた燃料希薄なプロパン／酸素混合気の遅延炎上限界は，酸水素混合気の第二限界と類似の性質をもっているといえる。したがって，塩化水素または臭化水素を燃料希薄なプロパン／酸素混合気に添加したことによる遅延炎域の縮少あるいは消滅は，前報と同様の考察から，これらの添加剤による水素原子の除去反応が付け加わったことによる。臭化水素によるこの効果は，測定温度範囲で塩化水素のそれより大きいことがわかる。

塩化水素および臭化水素の両者とも，燃料過剰および希薄なプロパン／酸素混合気の正常炎の圧力限界を測定温度範囲で低下させた。また，これらの添加剤は，同温同圧条件下での正常炎域における自然発火の誘導時間を短縮した。臭化水素によるこれらの効果は，いずれも塩化水素によるものより大きかった。実験に用いた各混合気の，同温同圧下で得られた自然発火の誘導時間の一例を，Table 1に示す。ただし，Table 1中の1：3.5：0.5プロパン／酸素／臭化水素混合気の値は，外挿値である。また，比較のために，添加剤を加えていない混合気の自然発火の誘導時間も合せて示した。

臭化水素は，炭化水素の酸化反応を触媒的に加速す

Table 1 Ignition delay of mixtures under same conditions　* extrapolated value

Mixture	Additive 0.5 Moles	Ignition Delay τ (s)	Remarks
$C_3H_8+3.5O_2$	-----	2.18	615°C 97.3mmHg
	HCl	1.17	
	HBr	0.17*	
$C_3H_8+12O_2$	-----	2.50	615°C 116.9mmHg
	HCl	2.21	
	HBr	0.27	

ることが知られており，プロパン／酸素混合気に対するこの作用については，すでにMaizusとEmanuel′により詳細に研究されている[9]。また，Cullisらは，臭化水素が，ホルムアルデヒド，アセトアルデヒド，ベンゼン，またはクメン／酸素混合気の自然発火の誘導時間を短縮することを報告している[10]。したがって，臭化水素を添加することにより生じた，プロパン／酸素混合気の自然発火の圧力限界の低下や，誘導時間の短縮は，臭化水素が，プロパン／酸素混合気の発火に至るまでの酸化反応を加速したことによるものである。また，塩化水素を添加した混合気の場合にも，その効果は臭化水素のそれより小さいが，臭化水素添加の混合気と同様の挙動を示している。したがって，塩化水素は，臭化水素の効果より小さいが，発火に至るまでのプロパンの酸化反応を臭化水素と同様に加速する作用をもっていると結論できる。

実験に用いたすべての混合気は，正常炎域において

$$\tau(P/T)^n \exp(-E/RT)=\text{const.}$$

の関係を満たしていた。ここに，τは自然発火の誘導時間，Pは混合気圧力，Tは加熱温度，nは総括反応次数に関係する定数，Eは総括活性化エネルギーおよびRは気体定数である。その一例を，Fig.3,4に示す。この関係式より求まる各混合気の正常炎域におけるnとEの値を，無添加のプロパン／酸素混合気のそれらとともにTable 2に示す。プロパン過剰，希薄のいずれの混合気に対しても，塩化水素および臭化水素は，nの値を小さくする。総括活性化エネルギーEに対する両添加剤の作用は異なり，塩化水素の添加によるEの値の変化は少ないが，臭化水素添加により，この値は小さくなった。

3.2　混合気の燃焼にともなうCHラジカル発光と添加剤の燃焼抑制効果

著者は，すでに自然発火後の混合気の燃焼が，セル内で一様に生じているとは考えにくいことを，CHラジカル発光強度の時間変化に基づき指摘した[4]。自然発火後の混合気の燃焼が，どのように進行しているかを確かめる目的で，中間結像法を利用し，反応セル観測窓全面から放出される光と，窓の中心，直径18mmの部分から放出される光の時間変化を測定した。結果をFig.5に示す。もし，発火後の混合気の燃焼が，セル内いたるところで同時に進行しているなら，両者の発光強度の時間変化は，強度の大小の違いのみで，その形は類似でなければならない。しかしながら，得られた

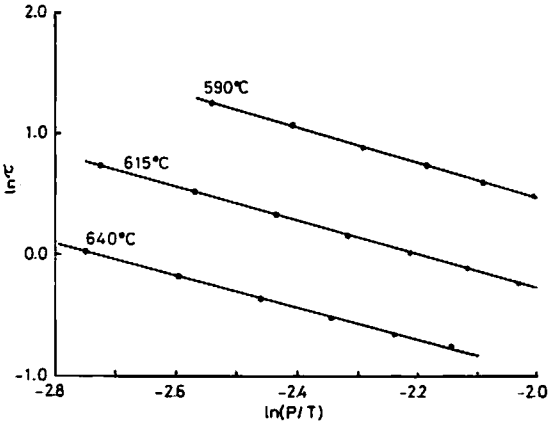


Fig. 3 Ignition delay τ(s) of 1:3.5:0.5 $C_3H_8/O_2/HCl$ mixture as a function of pressure P (mmHg) and temperature T

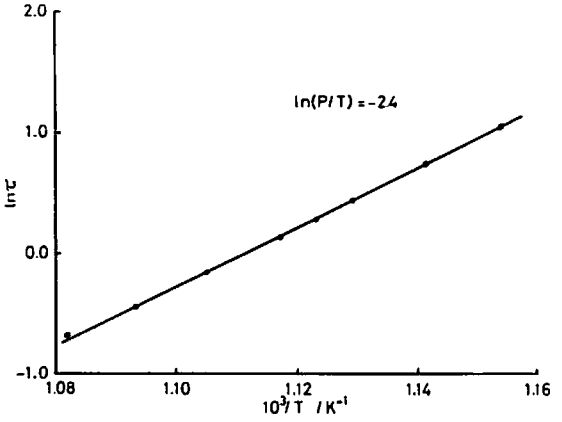


Fig. 4 Ignition delay of 1:3.5:0.5 $C_3H_8/O_2/HCl$ mixture as a function of $1/T(K^{-1})$

Table 2 Overall reaction order and activation energy of mixtures in normal explosion region

Mixture	Additive 0.5 moles	n	E (kcal/mol)
$C_3H_8+3.5O_2$	------	1.9	62.9 ± 1.4
	HCl	1.4	48.8 ± 0.2
	HBr	1.3	29.7 ± 0.6
$C_3H_8+12O_2$	------	1.7	50.7 ± 0.3
	HCl	1.4	49.0 ± 0.6
	HBr	1.4	34.4 ± 0.7

結果は，Fig.5にみられるように明らかに異なっており，したがって，混合気の自然発火後の燃焼は，セル内いたるところで一様に進行しているものではないと結論できる。

さらに，自然発火用セルと同形状の円筒形透明石英セルの中央部に，3mmの間隔で直径1mmのタングステン電極を相対するように挿入し，温度27℃，圧力48.9mmHgの1：5プロパン/酸素混合気に火花放電で着火した場合の燃焼にともなうCHラジカル発光を観測した。得られた発光強度の時間変化を，Fig.6(b)に示す。Fig.6(a)は，同組成の混合気を，温度590℃，圧力107.1mmHgで自然発火させたときに観測されたCHラジカルの発光強度時間変化である。両者を比較すると，これらの発光強度時間変化の挙動が，きわめて類似していることがわかる。火花放電により混合気に着火した場合には，伝播火炎が形成されること，およびCHラジカルの発光は，火炎面に局在する[11]ことを，以上の結果と合せ考察すれば，自然発火の場合にも，発火中心より燃え拡がる伝播火炎を形成し混合気が燃焼するとしてよい。それゆえ，混合気の燃焼にともなうCHラジカルの発光強度時間変化の¼幅として定義した発光持続時間の逆数をとれば，それは系内の平均燃焼速度に関係した量となっている[4]ことが確認できる。

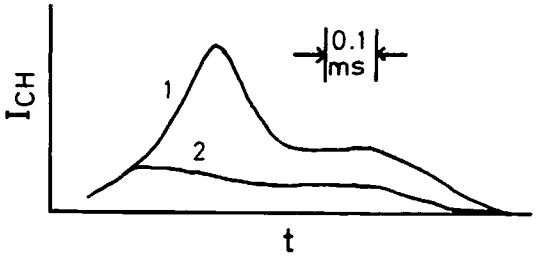


Fig. 5 Variation of CH radical emission intensity with time
1 : emission from all of the area of cell window
2 : emission from a partial area of cell window (diameter, 18 mm)

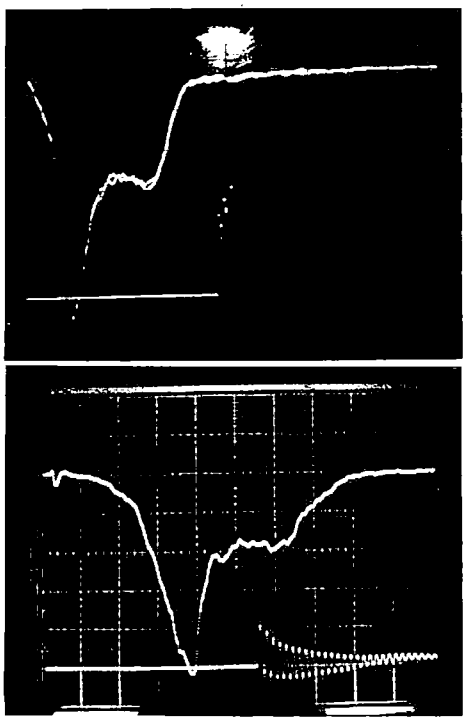


Fig. 6 Variations of CH radical emission intensity of 1:5 C_3H_8/O_2 mixture
(a) Spontaneous ignition, T=590°C, P=107.1 mmHg, 0.2 ms/div.
(b) Ignition by electric spark, T=27°C, P=48.9 mmHg, 0.2 ms/div.

CHラジカルの発光持続時間は，実験に用いたいずれの混合気においても，加熱温度一定のとき，圧力限界より数十mmHg以上高圧になると，圧力によらず一定となった。塩化水素または臭化水素を添加した混合気の，一定となった発光持続時間$t_{1/4,\infty,Add}$の逆数と，無添加のプロパン/酸素混合気のそれとの比

$$Rt = t_{1/4,\infty,0} / t_{1/4,\infty,Add}$$

の値をTable 3に示す。Table 3には，参考のため，添加剤を含まないプロパン/酸素混合気で得られた発光持続時間$t_{1/4,\infty,0}$の逆数を，無添加混合気欄下段に示してある。また，比較のため，0.5倍の窒素を添加した混合気のRt値も示した。この表より明らかなように，塩化水素および臭化水素は，加熱温度範囲590～640℃におけるプロパン/酸素混合気の自然発火後の燃焼を物理的希釈効果のみの窒素と同程度しか遅れさせることができないことがわかる。

ここで取扱った混合気は，プロパンおよび酸素を主体としたものであり，しかも加熱温度が590～640℃と，きびしい燃焼条件下での測定であった。それゆえ，現実の難燃高分子の気相燃焼反応の制御による難燃化効果を検討する際に，これらの結果を単純にあてはめるわけにはいかない。そのためには，よりおだやかな燃焼条件下での，これら添加剤の燃焼抑制効果を知る必要がある。しかしながら，これまでに報告してきた高温におけるハロゲン化メタン類の燃焼抑制効果を合せ考察するなら，少なくとも次のことはいえる。すなわち，ハロゲンによる気相燃焼反応の制御による難燃化効果を有効に利用するためには，難燃高分子が熱分解する際に，含まれるハロゲンを単にハロゲン酸として

Table 3 Relative values of burning velocity of mixtures at high temperature
Values under raws of nonadditive mixtures are reciprocals of observed emission duration

Mixture	Additive 0.5 moles	R_t		
		590°C	615°C	640°C
$C_3H_8+3.5O_2$	------	1.00	1.00	1.00
		$1.41ms^{-1}$	$1.54ms^{-1}$	$1.67ms^{-1}$
	N_2	0.99	0.99	0.95
	HCl	0.99	0.97	0.93
	HBr	1.02	0.99	1.00
$C_3H_8+12O_2$	------	1.00	1.00	1.00
		$1.11ms^{-1}$	$1.19ms^{-1}$	$1.23ms^{-1}$
	N_2	0.94	0.93	0.94
	HCl	0.91	0.87	0.90
	HBr	·0.91	0.95	0.95

発生させるのではなく、四塩化炭素もしくは臭化メタンのような、きびしい燃焼条件下でも化学的燃焼抑制効果を示すハロゲン化合物として発生させ、火炎帯に導入する方法をとるべきである。

4. 総　括

燃料過剰および希薄なプロパン／酸素混合気に、塩化水素または臭化水素を添加し、加熱温度590～640℃におけるこれらの添加剤の燃焼抑制効果を、定容燃焼法により測定した。

1：12：0.5プロパン／酸素／塩化水素混合気には、1：12プロパン／酸素混合気と同様に、遅延炎域が存在した。前者の遅延炎の上限界は、後者のそれより高温低圧側に位置した。1：12：0.5プロパン／酸素／臭化水素混合気では、測定温度範囲に遅延炎域を認めることができなかった。前報と同様の考察から、この現象は、プロパンの燃焼反応において重要な役割をもつ水素原子を、塩化水素および臭化水素が失活させたことにより生じたものである。臭化水素のこの効果は、塩化水素のそれより大きいといえる。

塩化水素および臭化水素は、燃料過剰、希薄なプロパン／酸素混合気いずれに対しても、それらの正常炎の圧力限界を低下させた。また、これらの添加剤は、混合気の正常炎域における自然発火の誘導時間を短縮した。臭化水素によるこれらの効果は、塩化水素の効果より大きかった。臭化水素のこれらの作用は、自然発火に至るまでの炭化水素の酸化反応を、臭化水素が触媒的に加速することによる。臭化水素の効果に比べその効果は小さいが、塩化水素も臭化水素と同様に作用する。

プロパン／酸素混合気の自然発火後の燃焼は、セル内いたるところで同時に進行しているのではなく、発火中心より燃え拡がる伝播火炎を形成し燃焼が進むと推測された。

塩化水素および臭化水素は、燃料過剰、希薄なプロパン／酸素混合気の、加熱温度590～640℃における自然発火後の燃焼を、窒素と同程度に遅れさせるのみであった。すでに報告した、ハロゲン化メタン類の高温における燃焼抑制効果を考慮すると、難燃高分子に含まれるハロゲンは、高分子の熱分解の際に、ハロゲン酸としてではなく、四塩化炭素あるいは臭化メタンなどのような高温においても化学的燃焼抑制効果をもつ化合物として発生させることができるなら、ハロゲンの気相燃焼反応の制御による、より有効な難燃化が可能となる。

参考文献

1）斎藤寅之助：化学と工業，31，274（1978）
2）秋田一雄：高分子の熱分解と耐熱性（神戸博太郎編），p. 253、培風館（1974）
3）奈良茂男：同上，p. 281
4）斎藤　直：消防研究所報告，52，35（1981）
5）斎藤　直：同上，54，1（1982）
6）Minkoff, G.J. and Tipper, C.F.J.：Chemistry of Combustion Reactions, p. 216, Butterworths (1962)
7）Pollard, R.T.：Comprehensive Chemical Kinetics (Banford, C.H. and Tipper, C.F.J. Ed.), Vol.17, p. 249, Elsevier (1977)
8）Dixon－Lewis, G. and Williams, D.J.：*ibid* p. 182
9）Shtern, V.Ya.：The Gas Phase Oxydation of Hydrocarbons, p. 651, Pergamon Press (1964)
10）Cullis, C.F., Fish, A. and Ward, R.B.：Proc. Roy. Soc., A276, 527 (1963)
11）Hinck, E.C., Seamans, T.F. and Vanpeè, M.：*Tenth Symposium (International) on Combustion*, p. 21, The Combustion Institute (1965)

Combustion Inhibition Effects of Hydrogen Chloride and Hydrogen Bromide at High Temperature

(Abstract)

Naoshi Saito

(Recieved May 20, 1983)

The combustion inhibition effect of hydrogen chloride and hydrogen bromide for the propane/oxygen mixture was investigated in the temperature range 590 ~ 640°C using a static system equipped with a cylindrical cilica cell with 30 mm diameter and 80 mm length.

The upper limit of weak explosion region of 1:12 C_3H_8/O_2 mixture was affected by these additives. In the case of 1:12:0.5 $C_3H_8/O_2/HCl$ mixture, it displaced toward lower pressure and higher temperature than that of nonadditive mixture. While the mixture of 1:12:0.5 $C_3H_8/O_2/HBr$ did not have a weak explosion region in this temperature range. This result was attributed to a hydrogen atom scavenging reaction by halogen acids. Then, hydrogen bromide showed greater effect than hydrogen chloride.

With all the propane/oxygen mixtures studied, hydrogen bromide appeared to have a promoting effect on the propane oxydation until an ignition occured. The same effect was observed in the mixtures containing hydrogen chloride, however, its effect was smaller than that of hydrogen bromide.

The combustion after ignition did not progress uniformly in all the space of cell, but it seemed that a propagative combustion wave was formed.

Both hydrogen chloride and hydrogen bromide retarded the combustion of mixture after ignition only as effective as nitrogen which acts as a physical diluent on inflammable mixtures. Therefore, when a polymer including halogens is decomposed thermally, if halogens change into some halomethanes, for example CCl_4 and/or CH_3Br, it can be expected that a flame retarding efficiency based on the suppression of gas phase combustion by halogens becomes greater than the case of which the polymer evolves halogen acids.

防火木造建物の火災初期における発生ガス

箭内英治・守川時生

（昭和58年5月26日受理）

1. はじめに

実大規模火災実験における発生ガス分析は過去においていくつか行なわれているが[1-3]，主要なガスに限られており，詳細なガス分析を行ったものはわずかな例[4-5]にとどまる。また，発生ガスは建物構造や開口面積および建物内に収納されている可燃物の量，種類，配置さらに周囲の雰囲気など種々なパラメーターが変化すると大きく異なってくることが予想される。そこで，火災時に発生する有毒ガスによる危険性を評価するためには実大規模実験による基礎データを十分に集積する必要がある。また，実験室規模で得た発生ガスに関するデータは多数報告されているが[6-9]，これらデータと実火災時に発生するガスを直接結びつけることは，パラメーターの数が多いため現段階では難しい。したがって，種々なタイプの実大規模火災実験における発生ガスに関するデータを集積することは意義のあることである。

昭和58年2月23日(火)に消防研究所構内の防火木造建物で火災実験が行われた際，有毒ガスに関するデータ集積のよい機会と考え，発生ガスの分析を行ったのでその結果について報告する。

2. 実験

2.1 実験建物の概要

供試建物は幅9m×奥行4.5mのトタンぶき屋根（片流れ式，北側の高さ：4.5m，南側の高さ：3.5m）の木造平家（外壁モルタル塗り）で揚水ポンプ室として使用されていたものである。北側中央部には木製のドアがあり，地上2mの位置には高さ90cm，幅8.6mの窓が北側と南側にある。さらに，北側には地上3.4mの位置に高さ60cm，幅8.6mの窓があり，これにはひさしが取り付けられていた。南東から撮影した建物の全景をFig.1に示す。

Fig. 1 Mortar-plastered wooden house used for fire experiment

建物内には，角材を二段にクリブ状に敷き詰め，その上にタンス，ソファー，机，マットレス，二段ベッドなどの積載可燃物を収納させた。その配置の概要をFig.2に示す。また，積載可燃物の内訳をTable 1に示す。なお，この実験の火災荷重は，約56kg/m²で，固定可燃物（推定値）と積載可燃物はそれぞれおよそ30kg/m²，26kg/m²である。

2.2 温度測定と発生ガス分析方法

温度の測定は，建物の東側壁から2m，北側壁から1.5m離れた位置にポールを立て，高さ1m及び4.1mの点にシース型クロメルアルメル熱電対（素線径:0.3mm）を設置して行った。

発生ガス分析は，建物の北側壁から約1m，東側壁の天井下約30cmの位置に2本の銅パイプの吸入口を設

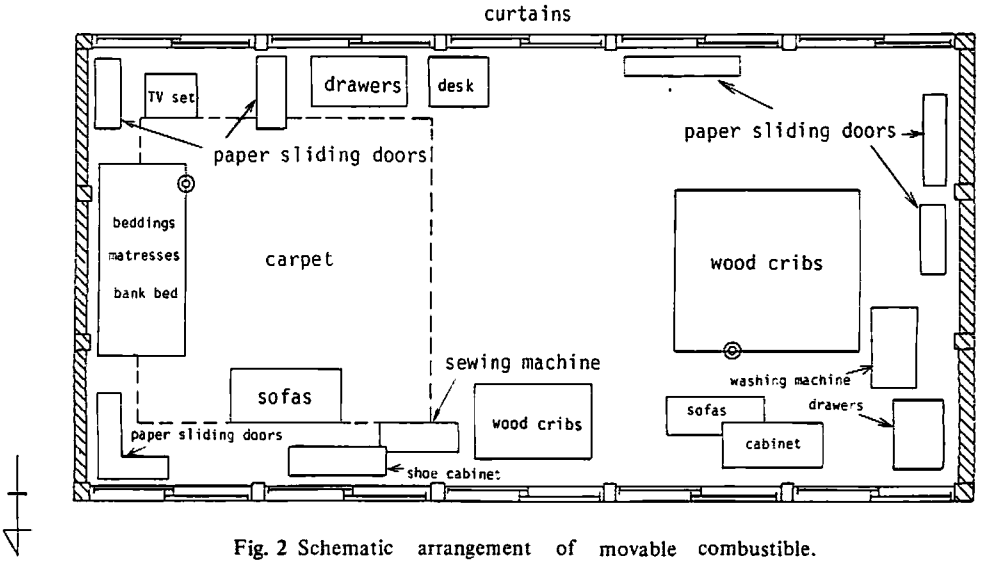


Fig. 2 Schematic arrangement of movable combustible.

定し，1本は柳本製ＥＣＬ－7Ｓ型ＮＯx分析計に，他の1本は，吸収液として1規定の水酸化カリウム溶液50mlの入ったガス吸収びんを直列に2個つないだものと連結し，吸入ポンプで燃焼ガスを吸引した。なお，吸引ガス量は積算式ガス流量計によって測定した。ガス吸収びんに連結した方の吸引パイプは，2分間隔で200ml注射器に切り換え，燃焼ガスをサンプリングした。また，後者の吸引パイプは，燃焼生成物の凝縮を防ぐためにフレキシブルリボンヒーターによって加熱した。

ガス吸収びんに吸収させたガスの分析は，シアン化水素とホルムアルデヒドについては，ピリジン－ピラゾロン法とクロモトロプ酸法を用いて比色法で行い，塩化水素については，Mohr法とLiebig－Dénigés法の組み合せを用いて滴定法によって行った。

注射器によってサンプリングしたガスの分析は，ガスクロマトグラフ，ガスクロマトグラフ－質量分析計（ＧＣ－ＭＳ），赤外分光光度計を用いて，各種ガスの定性定量を行った。ガスクロマトグラフの分析条件をTable 2に示す。また，GC－MS のガスクロマトグラフの分析条件は，充填剤がポラパックQS（80～100メ

Table 1 Movable combustible items.

Item	Weight (kg)	Item	Weight (kg)
Wood cribs (3)	393.2	Cabinet (2)	31.2
Sofas (6)	121.5	Washing machine (1)	30.4
Bank bed (1)	80.8	Desk (1)	23.0
Drawers (3)	79.5	Sewing machine (1)	22.1
Beddings	56.9	Carpet (1)	18.4
Curtains	55.7	Shoe cabinet (1)	18.4
Matresses	39.4	TV set	18.0
Paper sliding doors	36.9	Besides	28.7
Total Weight: 1054.1 kg			

Table 2 Condition for gaschromatographic analysis

Gaschromatograph	Detector	Column length	Support	Carrier gas	Oven Temperature	Object gases
Shimadzu 4AIT	TCD	3 m	Molecular Sieve 5A (80 ~ 100 mesh)	He: 50 ml/min.	80°C	CO O_2 N_2
Shimadzu 4APT	TCD	2 m	PorapakQ + PorapakN (80 ~ 100 mesh)	He: 5 ml/min.	40°C	CO_2
Shimadzu 7A	FID	3 m	PorapakQS (80 ~ 100 mesh)	He: 50 ml/min.	110°C	Acrolein

ッシュ）でカラム長2mのガラスカラムを用い，初めの5分は室温，次いで10℃/minで240℃まで昇温させ，250℃で定温という温度プログラムで，キャリヤーガスはヘリウム，その流量は40mℓ/minである。さらに，赤外分光分析では，5cmの気体セルを用い，メタン，エチレン，アセチレン，シアン化水素を波数それぞれ1305 cm^{-1}，946cm^{-1}，726cm^{-1}，706cm^{-1}で分析した。

3. 結果と考察

火災室の温度変化をFig.3に示す。高さ1m点の温度は，点火後1分30秒ぐらいから，また，高さ4.1m点の温度は点火後2分ぐらいから急激に上昇し，点火後3分には800～1100℃に達している。すなわち，点火後3分以内にフラッシュオーバーを起こしたことを示しており，このように火災拡大が短時間で進行した理由として，火源が大きいこと，同時に二ヶ所で点火したこと，さらに火災荷重が一般家屋に比べてやや大きいことなどが考えられる。

発生ガスのガスクロマトグラムパターンをFig.4に，その生成物リストをTable 3に示す。また，点火後2分における燃焼ガスの赤外吸収スペクトルをFig.5に示す。生成物には炭化水素類，アルデヒド類，アルコール類，

Table 3 Peak identification for fire products by GC-MS.

Peak identification for fire products

Peak No.	Mass spectrometric identification
1	Methane
2	Ethylene + Acetylene
3	Ethane
4	Propylene
5	Propane
6	Unknown
7	Methylacetylene
8	Methanol
9	Acetaldehyde
10	Butadiene + 1-Butene-3 ine
11	Unknown
12	〃
13	Di-acetylene + Formic acid
14	Methyl cyanide
15	Furan
16	Acetone
17	Acrylonitrile
18	Cyclopentadiene
19	Isoprene
20	Ethyl cyanide
21	Methyl furan + Methy ethyl ketone
22	Benzene
23	Toluene

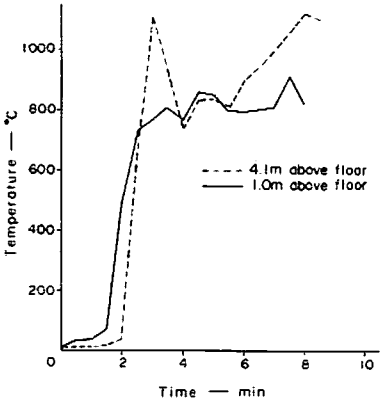


Fig. 3 Fire temperature vs. time after start of fire.

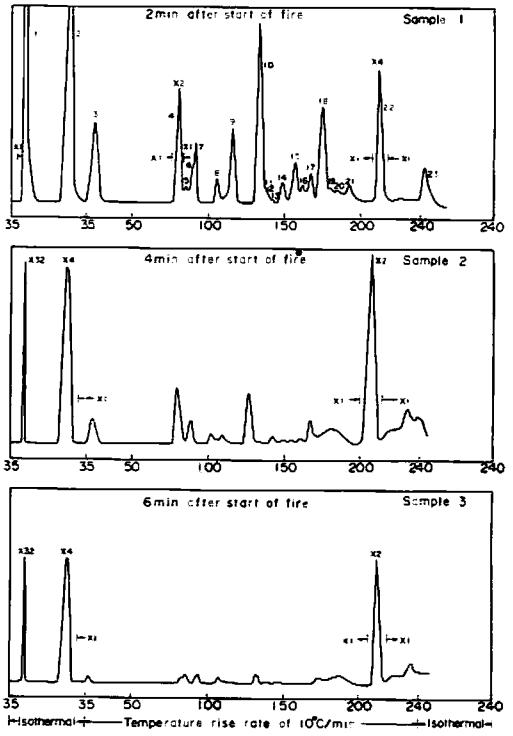


Fig. 4 Gaschromatograms of fire products.
Column condition for gaschromatography: 2 m, Porapak QS (80 ~ 100 mesh).

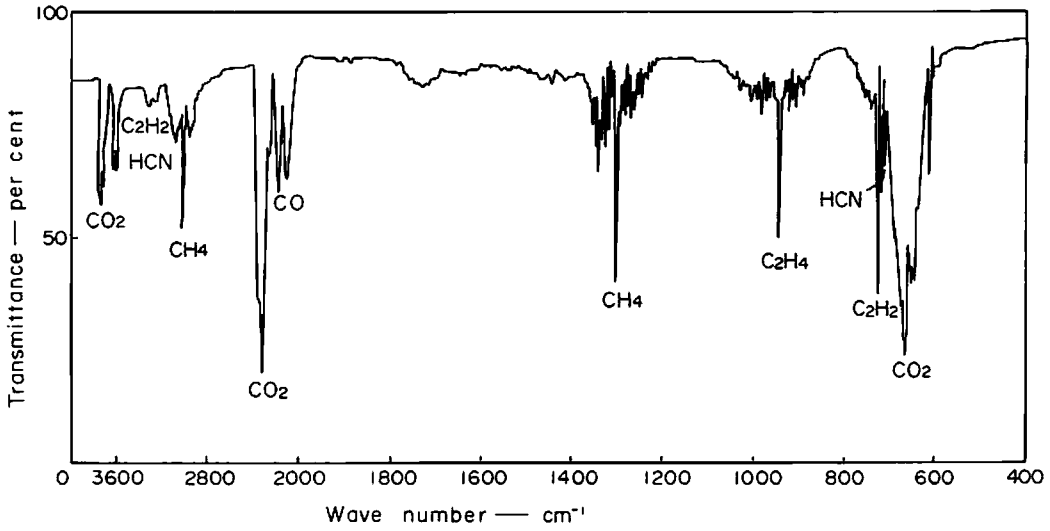


Fig. 5 IR spectrogram of fire products at 2 min. after start of fire.

フラン類，芳香族化合物など約23種が検出され，これらの生成物は，点火後2分において最も多く発生し，時間の経過と共に減少している。これは初期の発生ガスが熱分解生成物を多く含んでいることを示しており，時間の経過と共に室内の温度が上昇し，熱分解的に生成したガスが二次分解や二次燃焼を起こし，炭酸ガスや水などの単純な分子に変化していったものと思われる。

Fig.6は，火災室内のガスの中で，二酸化炭素，一酸化炭素，酸素，窒素の濃度時間変化である。二酸化炭素濃度と一酸化炭素濃度は，点火後2分でほぼ最大値に達し，それぞれ約18%と約8%となり，その後は徐々に減少している。また，酸素濃度も点火後2分で最低値の約4%に達した後，点火後6分には約10%に増大している。この酸素濃度の増大は，窓などが破れたために火災室内への流入空気が増大したためと思われる。これは，窒素濃度が酸素濃度と同様に点火後4～6分にかけて増大しており，このことを裏付けている。

Fig.7は，メタン，エチレン，アセチレンの濃度時間変化である。いずれの化合物も点火後2分でそれぞれ約2.4%，約0.8%，約0.6%とほぼ最大になり，その後時間の経過と共に減少している。

Fig.8は，アクロレインの濃度時間変化である。アクロレインも他の生成物と同様に点火後2分で最大値の約180ppmに達し，それ以後は急激に減少している。アクロレインは，くん焼状態で多く発生し，発炎を超こ

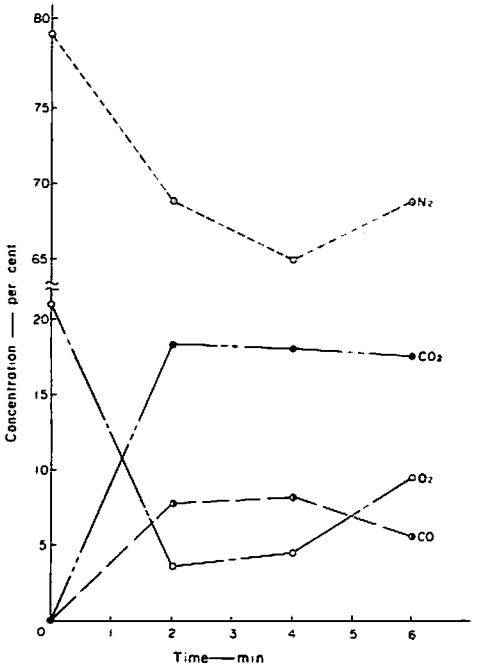


Fig. 6 Concentrations of CO, CO_2, O_2 and N_2 vs. time after start of fire.

すような高温では二次分解する[10]。点火後2分の発生は，窓ガラスが破れる前に，木材などの可燃物が熱分解的に燃焼した際に発生したものと思われる。その後の急激な減少は，アクロレインの二次分解や二次燃焼

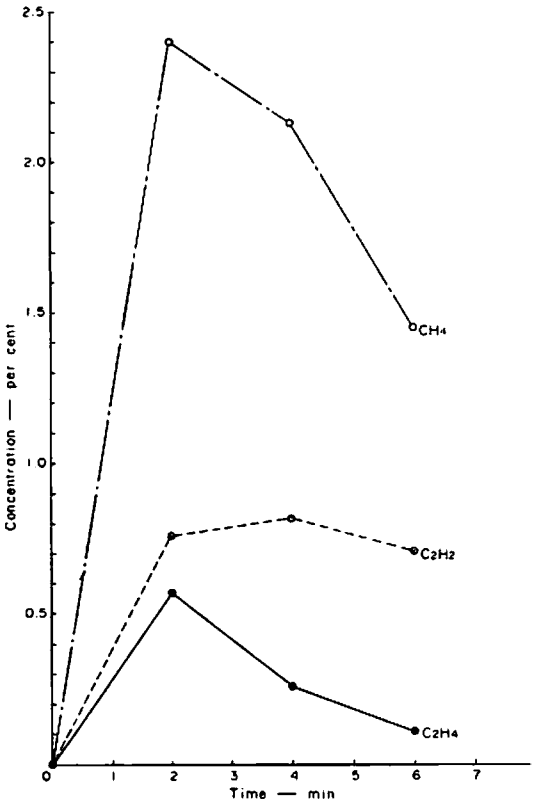


Fig. 7 Concentrations of hydrocarbons vs. time after start of fire.

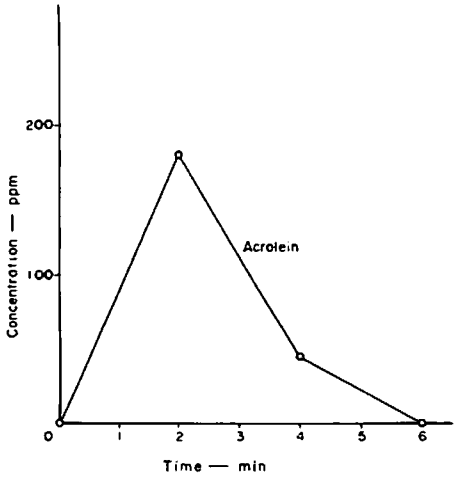


Fig. 8 Concentration of acrolein vs. time after start of fire.

が考えられる。

Fig.9は，窒素酸化物とシアン化水素の濃度時間変化である。窒素酸化物は点火後1分から2分30秒の狭い時間範囲に発生が見られ，やはり点火後2分で最大値の約120ppmに達し，その後は急激に減少している。それに対し，シアン化水素は，点火後4分で最大値の約0.22%に達しており，他の生成物と異なる。シアン化水素は，高温，酸素不足のとき最もその発生が大きい[11]。このことから，点火後2分に比べて酸素濃度はほとんど同じであるが，火災室の温度が高い点火後4分に最大値に達したものと思われる。その後の濃度減少は，窒素含有可燃物の減少および酸素濃度の増大によるものと思われる。一方，窒素酸化物は，高温で酸素濃度が高いときに発生が大きいことは良く知られたことである。しかし，この時点の温度は，それ以後の温度よりも低く，また酸素濃度も低い。このことは，窒素酸化物の発生条件と矛盾する。これは，窒素酸化物用のサンプリング管に銅管を用いたための窒素酸化物と銅との反応や，窒素酸化物分析計での冷却部で窒素酸化物全部が反応あるいは凝縮吸着した恐れもあるが，生成した窒素酸化物全部が反応あるいは吸着するとは

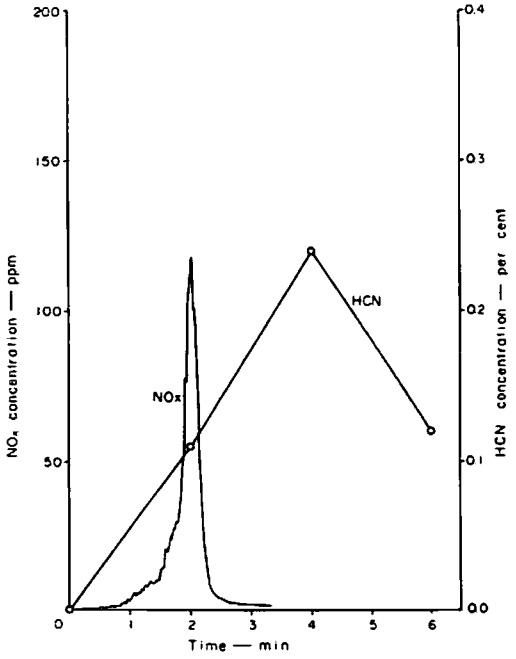


Fig. 9 Concentrations of NO_X and HCN vs. time after start of fire.

考え難い。したがって，窒素酸化物濃度が急激に減少した付近で，窒素酸化物分析計が故障したことも考えられる。

Table 4に吸収びんに吸収させたガスの分析結果を示す。この結果は，点火後5分間の平均値であり，塩化水素については，吸収液から検出されたが，注射器にサンプリングしたガスの赤外分析やガスクロマトグラフ分析では検出されなかった。この理由としては，注射器壁への凝縮や一緒に生成した水への吸収などが考えられる。

Table 4 Determination of bubbler-sampled gases by colorimetric and titrimetric methods

HCN	372 ppm
HCl	354 ppm
Formaldehyde	trace

Each concentration is the mean value for the first 5 minutes after the start of fire.

Methods of Analysis,

HCN: Pyridine-pyrazolone method

HCl: A combination of Mohr method and Liebig-Deniges method

Formaldehyde: Chromotropic acid method

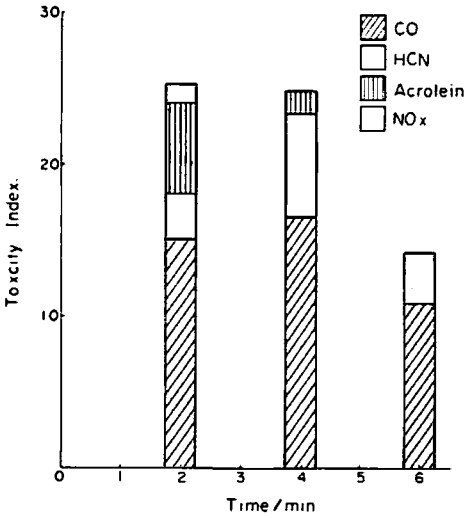
短時間吸入毒性の点では，アクロレインが最も強く，次いで，窒素酸化物，シアン化水素，一酸化炭素の順になる。アクロレインは，一酸化炭素の約170倍，シアン化水素の約12倍，窒素酸化物の約7倍の毒性がある。これらの物質の毒性指数[12]の時間変化を表わしたのがFig.10である。点火後2～4分で総毒性指数が約25となり，そのうち，一酸化炭素による指数の割合が最も大きく全体の約65%にもなる。火災死因として，ガス中毒，酸素欠乏，および熱傷（温度）の三つを考えるのが一般的である。酸素欠乏および熱傷による短時間ばく露の致死レベルとして，それぞれ6%，200℃を用いて[13]致死限界までの希釈率を計算すると，ガス中毒による致死の可能性が一番大きいことになる。

4. 結　論

防火木造建物に比較的多量の可燃物を収納して火災実験を行った。ガス発生および毒性に関し次のような結論が得られた。

1）火災最盛期初期に最も毒性の強いガスが発生する。

2）毒性ガスの中で，一酸化炭素による毒性寄与が最



Toxicity index $T = \Sigma\, C_e/C_f$, where C_e is the concentration of a product in fire gas, C_f is the fatal concentration of the same product for a short time exposure CO 0.5% acrolein 30 ppm HCN 350 ppm, NO_X 200 ppm.

Fig. 10 Toxicity index of fire gas vs. time after start of fire.

も大きく，その濃度は火災全体を通じて高い。

3）アクロレインやシアン化水素による毒性寄与も無視できない程度に高く，それらは火災最盛期初期に発生量が大きい。

本実験は比較的多量のメタノールを用いて，人為的に火災を起こし，さらに，火源も大きかったため，一般的な建物火災に比べ燃焼拡大がかなり大きいものであった。種々な燃焼条件によりガス発生は異なるため，他のいろいろな場合の火災についても各種有毒ガスの発生傾向を調べ，毒性に関する基礎データを集めることは，火災死者を減少させるために必要である。

（謝辞）この実験の実施にあたって，実験の企画，準備には，消防研究所の多数の方々に，また，火災室の温度測定に当っては，消防研究所，火災物理研究室長の山下氏に，さらに，実験中の警戒にあたっては調布消防署及び三鷹消防署の多大の協力を頂いた。ここに記して謝意を表します。

参考文献

1）東京消防庁：火災，12，105（1962）

2）F.E.T.Kingman, E.H.Collman and D.J.Rasbash：*J. appl. chem.* p. 463, October (1953)

3）科学技術庁研究調整局：高層複合用途建築物の煙害防止に関する特別研究報告，p. 171（1969）
4）W.D.Woolley：*J.Macromol. Scl.-Chem.*, A 17 (1), p. 1～33（1982）
5）斉藤直，箭内英治：消防研究所報告，49，p. 21（1980）
6）美馬宏三，国岡越郎，越英夫：安全工学，6，3 p. 229（1967）
7）R.E.Dufour：*Bulletin of Research* No. 53（1963）
8）S.L.Madorsky：Thermal Degradation of Organic polymers, John Wiley & Sons. Inc.（1964）
9）守川時生：火災，32，No.1，p. 136（1982）
10）守川時生：消防研究所報告，No.41，p. 62(1976)
11）守川時生：火災学会論文集，22，No.1, 2（1972）
12）Kikuo Sumi and Yoshio Tuchiya：*J.Combustion Toxicology*, vol. 2, 8（1975）
13）J.B.Terrill, R.R.Montogomery, C.F.Reinhardt：*Science*, 200, 1343（1978）

Analysis of Effluent Gas in Initial Stage of Mortar-plastered Wooden House Fire

(Abstract)

Eiji Yanai and Tokio Morikawa

(Received May 26. 1983)

In a fire experiment of a mortar-plastered wooden house, the effluent gas in the early stage of fully developed fire was analyzed chemically and instrumentally. The sampled gas for analysis was drawn from near the ceiling of the house. The analysis of the sampled gas was conducted using gaschromatography, infrared spectroscopy, GC-MS, and other methods. The results are summarized as follows:

1) Most organic species evolved more at initial (flashover) stage than at any other stage of fire.
2) Carbon monoxide was found to be a decisive toxic product when the toxic index was calculated.
3) NO_X was detected in the early stage of fully developed fire.
4) Evolution of acrolein and HCN was not negligibly small in estimating toxicity index of fire gase.

樹木の延焼防止効果に関する実験的研究

山下　邦博・林　幸司・稲垣　実

（昭和58年5月31日受理）

1. まえがき

木造モルタル建物を使った火災実験で樹木の燃焼状況と延焼防止効果について観測した。樹木の防火効果についてはすでにいくつかの研究があり、各種の樹木の耐火性[1),2),3)]加熱温度と樹葉の変化の関係[2)]樹木の放射熱遮断性能[1),5)]樹木の気流温度低下作用等[6)]について明らかにされている。このように樹木の防火性・耐火性については多くの研究があるにもかかわらず、樹葉の発火のための最低放射照度及び樹木の燃焼の詳細などの高放射照度環境下における樹木の反応特性などが明らかでない。これらの理由は、高放射照度を測定する器具が開発されていなかったことと安定した高放射熱源がないことなどによると思われる。

今回の観測では水冷ヒートシンク型熱流計により火災周辺の高放射照度環境を観測し、この環境下における樹木の燃焼挙動（発火の仕方、燃焼継続時間など）と延焼防止効果を調べた。

2. 観測方法

供試建物は昭和17年（推定）に建てられたトタン葺き木造モルタル平屋で、自家水道用揚水ポンプ室として使用されていた。この建物の大きさは幅9m×奥行4.5m、屋根は片流れ式（北側の高さ4.5m、南側の高さ3.7m）で、北側と南側の立面図をFig. 1(a), (b)に示す。北側外壁には地上2mに高さ90cmの窓（横幅8.6m）があり、また地上3.4mに高さ60cmの窓があった。北側外壁の中央には出入口があり、実験時には片方（左側）が開放されていた。窓ガラスの個々の部位をFig. 1(a), (b)に示すようにW1～W15とした。

建物内部には積載可燃物がなかったため、角材をクリブ状に2段に積み、その上にタンス、椅子、机、マットレス、フトン、2段ベッドなどを置いた。この実験の火災荷重は約56kg/m²で、固定荷重と積載荷重はそれぞれ30kg/m²、26kg/m²である。点火は建物の東側外壁近くと出入口（北側外壁中央部）付近に置いた容器にメタノールを入れ点火棒により点火した。

樹木の燃焼状況と放射熱遮断効果を調べるため、供試建物の1.75m北側に2本の樹木TN1, TN2（キンモクセイ、樹高4m、葉張り2.2m）を1.9m離して植えた。このうちの1本（TN2）に実験実施直前に園芸用噴霧ノズルで注水して、注水による燃焼抑制効果を観察し

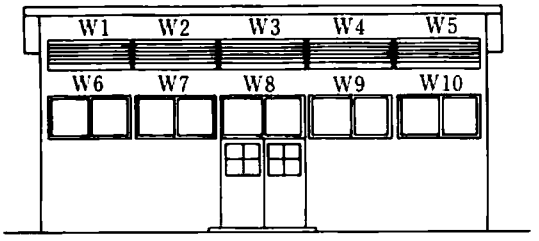
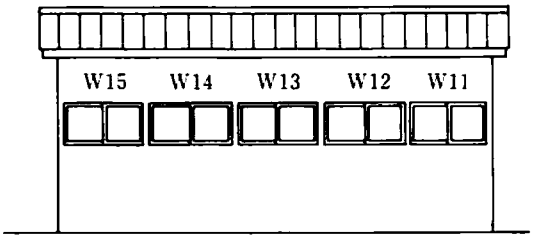


Fig. 1 (a) North side elevation of employed house.



(b) South side elevation of employed house.

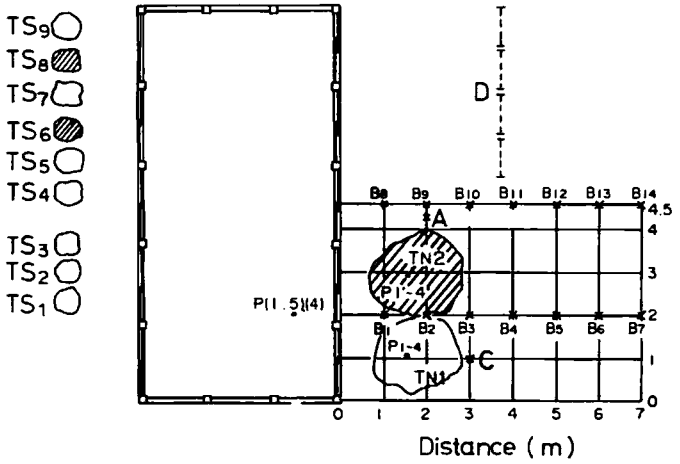


Fig. 2 (a) Plan of measurement points of air temperature and irradiance around house.

Trees
TN1: Kinmokusei (Osmanthus fragrans var. aurantiacus)
TN2: Kinmokusei (Osmanthus fragrans var. aurantiacus). water-supplied
TS1: Mokkoku (Ternstroemia gymnanthera)
TS2: Kinmokusei (Osmanthus fragrans var. aurantiacus)
TS3: Sangoju (Viburnum awabuki)
TS4: Chabohiba (Chamaecyparis obtusa cv. breviramea)
TS5: Sazanka (Camellia sasanqua)
TS6: Sazanka (Camellia sasanqua), water-supplied
TS7: Sazanka (Camellia sasanqua)
TS8: Sazanka (Camellia sasanqua), water-supplied
TS9: Sazanka (Camellia sasanqua)

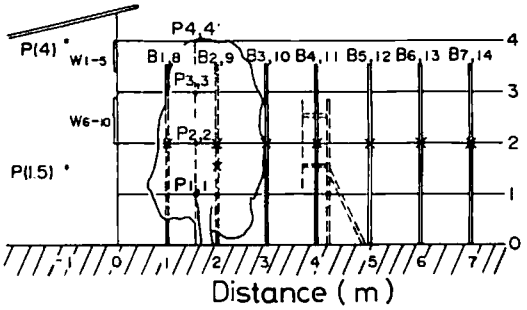


Fig. 2 (b) Elevation of measurement points of air temperature and irradiance around house.
● thermocouple　× heat flux meter

た。樹冠内部で幹よりも20cm南側の地点に鉄棒を立て，この上に高さ１m間隔に熱電対を固定して，樹冠内部の気流温度を測定した。

樹種の耐火性の差を観測するため鉢植え樹木５本TS1～TS5（モッコク，キンモクセイ，サンゴジュ，チャボヒバ，サザンカ）を供試建物の南側1.5mの地点に並べて，着火および燃焼状況を観測した。樹木の配置順序は耐火性の大きいものと大きくないものを交互に置き，放射照度の空間分布の差の効果が少なくなるようにした。樹高と葉張りはそれぞれ約２m，0.6m程度のものを選んだ。また，注水の効果を調べるため鉢植え樹木４本TS6～TS9（サザンカ，樹高２m，葉張り１m）を建物南側に注水したものと注水しないものを交互に並べた。

樹木配置の平面図と立面図をFig. 2(a),(b)に示す。この図のD地点ではベニヤ板を立てて外壁に注水した場合の注水効果を確かめる実験が行なわれた。建物周辺の放射照度の時間変化を調べるため，Fig. 2のA地点（建物の北側２m，高さ1.5m）に水冷ヒートシンク型熱流計（昭和電工製）を置き，C地点には放射計を置いた。建物周辺の放射照度の空間分布を推定するため14本の角材（３cm×４cm，高さ3.6m）をFig. 2のB1～B14地点に立て，火災の全期間にわたる角材の炭化深さを求めた。角材の高さ２mの地点に熱流計（昭和電工製，ESタイプ）を置き，角材の表面温度変化と熱流束を測定した。供試建物，樹木及び角材の燃焼及び火災拡大状況についてビデオとカメラにより撮影し分析した。

3.　実験結果及び検討

(1)　建物周辺の放射照度分布

(a)　開口部からの火災の噴出状況

建物内の燃焼領域はメタノール火炎を火源として急激に拡大し，二段ベッドの下段マットレス，上段マットレスから2分後には天井に達した。他の1つの火源からは床上のクリブ，建物内壁を伝わり1～2分遅れて天井に達した。開口部W1から1分20秒後には火炎が噴出し始めた。また，2分20秒後には開口部W6からも火炎が噴出し始め，2ヶ所の開口部から噴出した火炎が合流して大きな火炎となった。建物の外壁がモルタル塗りであったため，火災成長期と火災最盛期における火炎の噴出箇所は開口部だけに限られていた。火災減衰期の後半にはいるとモルタルが落下して建物内部が露出した。開口部からの火炎の噴出が激しかった時期は4～10分頃で，火炎の長さは5～6m（開口部の下端より）で時には7～8mに達した。

(b)　放射照度の時間変化

水冷ヒートシンク型熱流計及び放射計により測定した観測点AとCの放射照度をFig.3に示す。この熱流計は水循環カロリーメータ型とサーモパイル型を組み合わせた高熱流束測定器で，放射伝熱量と対流伝熱量の和を計るものである。火災実験中は弱い南風が吹いていたものの，火災で生じた熱気は上空に流れたため対流伝熱量は小さく，熱流束の大部分は放射伝熱量と考えられる。観測点Aにおける熱流束は3分頃より8分まで急上昇し8分30秒頃に最大になり，その後は徐々に減少した。その後リード線が断線したため10分以降の記録はない。観測点C（樹木の背後）の放射照度は点火8分後頃までは非常に小さく，樹木の放射熱遮断効果が顕著に認められた。火災減衰期における火災放射照度の減衰の仕方は一般に火災成長期の上昇の仕方よりも勾配がゆるやかであることから，観測点Aの放射照度の10分以降の減少の度合はゆるやかであると予想される。これと火炎の噴出状況から観測点Aにおける熱流束が4×10^4kcal/m^2·hrであった時間は，5分から17分頃までの12分程度と推定される。主な放射熱源は開口部（上下の窓及び出入口）から噴出する火炎と高温のモルタル外壁であるが，モルタル外壁の温度は火炎温度に比較して低く，その伝熱量も無視できる。

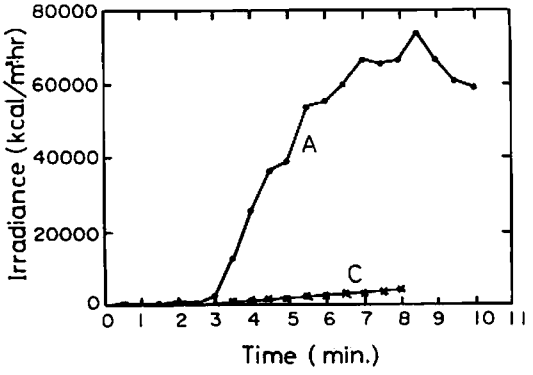


Fig. 3 Relation between heat flux and time.

● Heat flux meter: Point A (S=2 m, H=1.5 m)
× Radio-meter: Point C (S=3 m, H=2 m)

放射源としては窓から噴出する火炎（高さ5m，幅9mと近似する）と出入口から噴出する火炎（高さ2m，幅1.8m）の2つの短形放射源があると仮定して観測点Aにおける形態係数F（放射伝熱に対する）を求めると$F=0.59$になる。この値とFig.3の5～8分の間の熱流束の平均値6×10^4kcal/m^2·hrから火炎の放射発散度を求めると1.1×10^5kcal/m^2·hrになる。建物の周辺の放射照度の空間分布は，この放射発散度と火炎の形状から求められる形態係数を使って推定できる。樹木TN1の地上2mの幹付近の放射照度は樹葉がないと仮定して計算すると3.5×10^4kcal m^2·hrになった。

(c)　放射照度の空間分布

建物周辺の放射照度は，角材の有炎燃焼の場所と時間及び炭化深さを分析することにより推定することができる。建物から4m以内にあった角材B1～B4，B8～B11は2～6分30秒の間に燃え始めた。燃焼箇所は角材の上半部が中心で燃焼継続時間は1～2分であった。実験終了後配置した角材を採取し，炭化深さを調べた結果をTable 1に示す。建物の近くにあった角材の上半部は焼失し，下半部は炭化したりあるいは表面が変色したりして焼け残った。角材の炭化部分は火災放射熱を受けた側で，同じ1つの角材でも炭化深さは西側と東側では異なった。角材B1～B7は東側よりも西側で炭化深さが大きかった。実験終了後，シュバンクバーナーを使って加熱時間を12分として放射照度と炭化深さの関係を求めた。シュバンクバーナーで較正できる範囲は約3×10^4kcal/m^2·hrまでそれ以上は外挿して求めた。厚さ3cmの角材が12分間の加熱で焼失する放射照度は4×10^4kcal/m^2·hrと推定された。

角材の炭化深さと補足実験の結果をもとにして推定した放射照度の空間分布をFig.4に示す。建物から7m離れた地点の角材の上端の放射照度は1×10^4kcal/

Table 1 Relation between maximum charring depth and height above ground.

No.	Thickness of square timber (mm)	Height above ground		
		1 m	2 m	3 m
1	–	Burned out		
2	34	31.5 (31)	–	–
3	29	0	18 (9)	28 (20)
4	34	0	11 (10)	24 (19.5)
5	30	0	0	29 (15)
6	30	0	0	0
7	30	0	0	0
8	–	Burned out		
9	30	–	–	–
10	30	26 (18)	–	–
11	34.5	19.5 (9)	33.5 (16.5)	–
12	28	14 (4)	22 (11.5)	–
13	30	0	0	–
14	30	0	0	0

(　　) : Minimum values

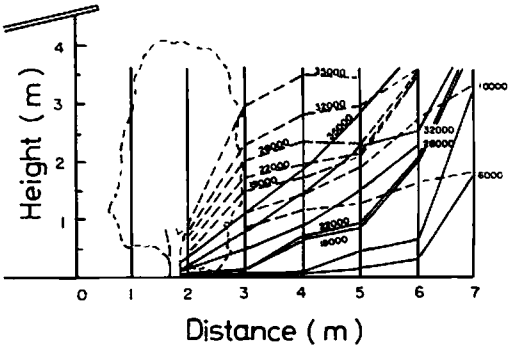


Fig. 4 Estimated distribution of irradiance.

——— B8 ～ B14
– – – – B1 ～ B 7

(Unit of irradiance: $\frac{\text{kcal}}{\text{m}^2 \cdot \text{hr}}$)

m^2·hr 程度でこれは角材B7とB14の地点で余り差がなかった。火災実験中に燃焼した角材の建物からの最長距離は4mで、この地点の放射照度は3.2×10^4～6×10^4kcal/m^2·hr と推定される。

(2) 樹木の燃焼

(a) 燃焼状況

樹木の燃焼は開口部からの火炎の噴出状況に左右され、火炎の噴出が上方の窓から下方の窓に拡大するにつれて樹木の燃焼領域も下方に移った。樹木の燃え出した時刻は点火開始2分頃で、開口部W1から火炎が激しく噴出すると間もなく30～50cmの炎をあげて10～20秒間燃えた。樹木の燃焼はその後不活発になり、火炎の長さは5～10cm程度まで減少した。樹木の燃焼は全体的に不活発であるがときおり火炎長がいちぢるしく長くなった。

建物外壁からの火炎の噴出状況及び樹木の火炎前線の時間変化をFig. 5に示す。樹木が活発に燃えた時間は点火3～8分後であった。点火前及び点火5分後の樹木の様子をFig. 6(a),(b)に示す。樹木の燃焼は、初め樹葉が火炎を出して燃え出すが小枝は燃えないで残る。そのうち、小枝は無炎燃焼により徐々に焼失した。有炎燃焼している領域の幅は5～10cm程度であった。

樹冠内の気流温度の時間変化をFig. 7に示す。図中の点線は建物内の気流温度で、実線はそれぞれ高さ1, 2, 3, 4mの地点（P_1, P_2, P_3, P_4とする）の温度を示す。観測点P_4は、ときおり噴出火炎の内部に入るため気流温度が高くなった。その他の地点では150～300℃程度

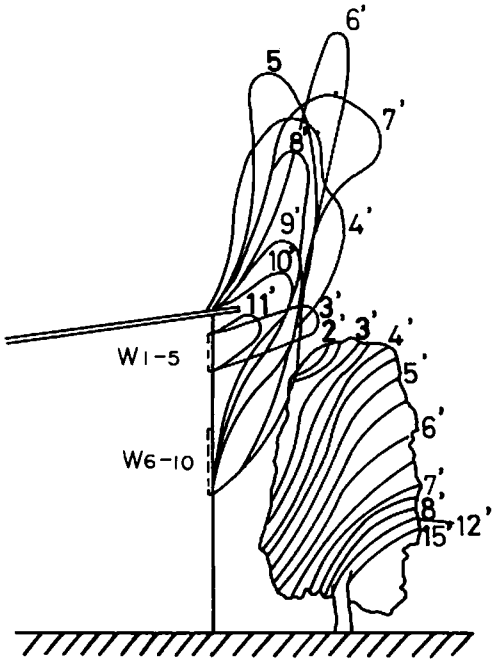


Fig. 5 Contours of flame front

Tree: Kinmokusei (Osmanthus fragrans var. aurantiacus) TN1

Fig. 6 (a) Appearance of trees. (b) Burning behaviour of trees. (five minutes after ignition)

Tree: Kinmokusei (Osmanthus fragrans var. aurantiacus) TN1

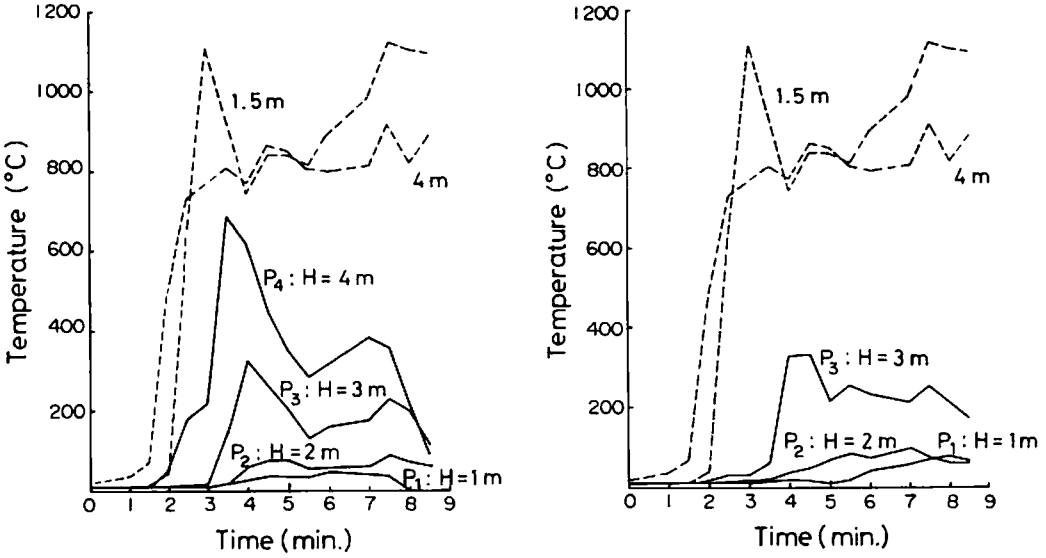


Fig. 7 Relation between air temperature and time within trees.

(a) Tree : TN1　　(b) Tree : TN2

— air temperature within tree crown

---- room air temperature

で予想外に低かった。これは樹冠の内部では枝葉の量が少なく燃焼が不活発になったためと思われる。

注水した樹木TN2の燃焼は火災成長期には注水していない樹木TN1よりも燃焼が不活発であったが、火災最盛期になると注水による燃焼抑制効果はほとんど認められなかった。火災減衰期になると注水した樹木の方がむしろよく燃えた。予備注水の効果は付着水量と放射照度の大小に依存する[1]。注水の効果が顕著に観測されなかったのは放射照度が非常に高かったことと樹葉への付着水が少なかったためと推定される。

(b) 樹種と燃焼の関係

供試建物の南側では開口部は北側よりも少なく、火炎の噴出が激しくなかった。実験中は南寄りの弱い風が吹いており、煙と火炎は北側に流れた。供試建物の南側にあった各種の樹木は点火後4～6分頃に火災放射熱によって自然発火し、短時間に樹葉の大部分が燃えた。樹木が自然発火する直前に樹葉の水分が急激に蒸発し、多量の白煙が生じた。開口部からの火炎の噴

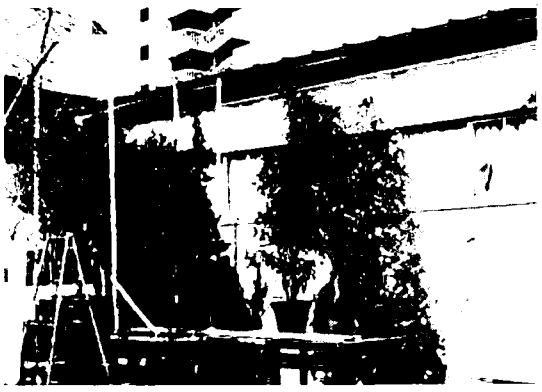


Fig. 8 (a). Appearance of arrangement of trees.

(b) Burning behaviour of trees. (eight minutes after ignition)

Tree
TS1: Mokkoku (Ternstroemia gymnanthera)
TS2: Kinmokusei (Osmanthus fragrans var. aurantiacus)
TS3: Sangojyu (Vibrunum awabuki)
TS4: Chabohiba (Chamaecyparis obtusa cv. breviramea)
TS5: Sazanka (Camellia sasanqua)
TS6: Sazanka (Camellia sasanqua), water-supplied
TS7: Sazanka (Camellia sasanqua)
TS8: Sazanka (Camellia sasanqua), water-supplied
TS9: Sazanka (Camellia sasanqua)

出は窓ガラスW11の部分が早く，次いでW10，W12，W13の順に東側から西側に1～2分遅れて移動した。火炎の噴出の影響を受けて水蒸気の発生位置もTS1，TS2，TS3の周辺からTS4～TS9の方向に移動した。樹木TS1，TS2，TS3が燃え出した時刻はほぼ同時で樹種によって余り差がなかった。樹木の着火時間に樹種の差が観測されなかったのは，岩河[5,6]が指摘しているように放射照度が高かったためと推定される。チャボヒバの南側小枝の一部は樹葉が燃えない状態で地上に落下した。この現象は樹葉が燃えるよりも小枝の焼失が早かったため起こったと推定されるが，他の樹種では観測されなかった。

樹木TS6～TS9は樹木TS1～TS5よりも多くの部分が燃えないで残っていた。この理由は窓ガラスW15付近の火炎の噴出が弱く，この付近の放射照度が低かったためである。注水したサザンカTS6，TS8は注水していないサザンカTS7，TS9よりも燃えが悪く，これは注水の効果が出たためと推定される。

実験実施前と点火8分後の樹木の葉張り状況をFig. 8 (a),(b)に示す。キンモクセイとチャボヒバの木の燃焼が他の木よりも進んでいるのがわかる。

(3) 樹木の延焼防止効果

樹木はFig. 3に示すように火災放射熱を遮断するばかりでなく，火災上昇気流の温度を低下させかつ多量の水蒸気を放出して樹木背後の可燃物の着火を抑制する。今回の実験でも樹木によってその背後にある角材の温度上昇が抑制されることが確かめられた。供試建物から2，3及び6m離れた地点の火災成長期の温度上昇をFig. 9に示す。観測点B2は樹木の内部にあり，温度上昇が6分頃から急増した。観測点B3，B6では2分30秒頃から増加して4～5分で100℃以上に達した。観測点B6は観測点B3よりも供試建物から離れているにもかかわらず角材の表面温度が高い。樹木の周辺の表面温度分布（点火4分後）をFig. 10に示す。樹木の背後の角材の表面温度は樹木のなかった別の角材の表面温度よりも低く，樹木の可燃物の温度上昇抑制作用が認められた。炎上建物の噴出火炎が樹木よりも高く上った

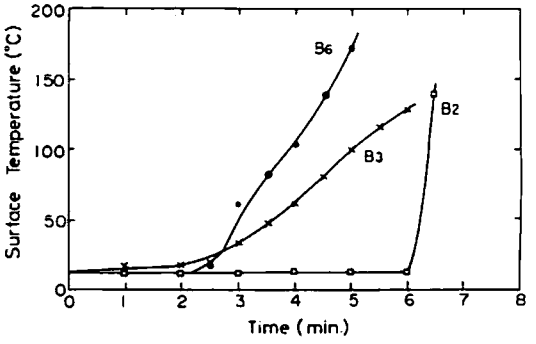


Fig. 9 Relation between the surface temperature of square timbers behind trees and time.

ため，樹木の放射熱遮断範囲は1～5mまでで著しく狭くなった。また，樹木の延焼防止効果が角材の炭化深さにも認められた。観測点B3とB10の角材は供試建物から同じく3m離れた地点にあったにもかかわらずB10の角材は1.5mしか焼け残っていないのに対し，B3の角材は3mまで焼け残った。角材の炭化深さの差が顕著に現われたのは樹木に近かったB3，B4で，観測点B2は樹木が燃えるときに焼失した

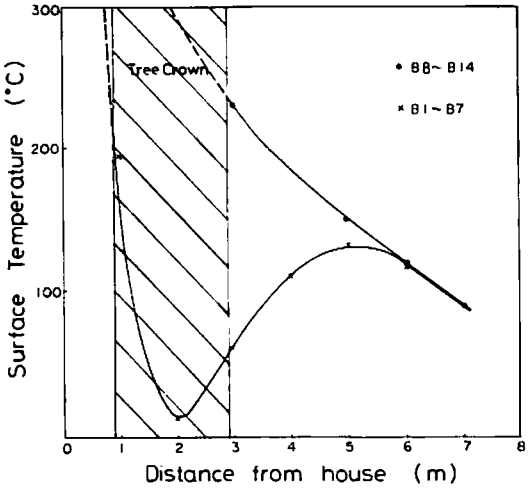


Fig. 10 Relation between surface temperature of square timber and distance from house. (four minutes after ignition)

(4)　樹木の被害状況

樹木の焼残り状況をFig. 11(a),(b)に示す。樹木の幹よりも南側(左側)はきれいに焼失しているのに対し，北側の下層部は焼け残った。焼け残った範囲は幹を中心として60～90度の範囲で，残りの300～270度の領域の小枝と樹葉が焼失している。樹幹の炭化深さと地上高度の関係をTable 2に示す。幹の炭化深さは高さによって大きくかわり，地上0.5mまでは樹皮のみ，地上1.5mまでは樹皮と辺材の一部が焦げている。これに対して地上2m以上では幹の内部まで焦げた。炭化深さが高さによって異なったのは，火炎の噴出が地上2m以上でそこから上では放射照度が特に大きかったことと上層では小枝の径が小さかったためである。樹幹の断面の焦げ具合をFig. 12に示す。地上1～1.5mまでは焦げが幹の辺材までは達していないことがわかる。

4.　まとめ

1. 今回の火災実験では開口部からの火炎の噴出が激しく，供試建物から2m離れた地点(地上高さ1.5m)の放射照度は最高で7×10^4kcal/m^2·hr以上にも達した。また，供試建物の周辺に立てた角材の

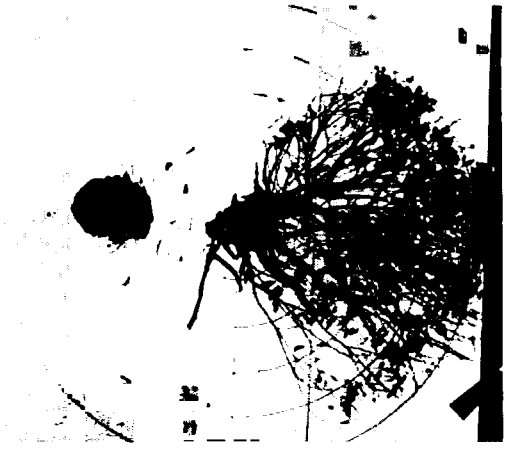


Fig. 11 (a) The state of fire damage of tree.

Tree: Kinmokusei (Osmanthus fragrans var. aurantiacus) TN1
This photo was taken from a point just above tree. Minimum radius is 25 centimeters.

(b) The state of fire damage of tree.

Tree: Kinmokusei (Omanthus fragrans var. aurantiacus) TN1

Table 2 Fire damage of trunk and branches (Tree: TN1)

Height above Ground (m)	Estimated Irradiance (kcal/m²・hr)	Fire Damage of Tree		
		North Side Branches of Tree	Trunk	South Side Branches of Tree
0 ~ 1	14000	Unburned; 1.1 cm in dia. Unburned; 0.6 cm in dia. Unburned; 0.3 cm in dia.	Several parts of barks cracked induced by the spout of steam vapor. 11 ~ 15 cm in dia. and thickness of barks are 2.6 ~ 4.0 cm.	Burned out
1 ~ 2	30000	Unburned; 1.3 cm in dia. Unburned; 0.8 cm in dia.	Parts of barks and alburnum are scorched. 5 ~ 9 cm in dia. and thickness of barks are 2.6 cm.	Burned out
2 ~ 3	60000	Partialy burned; 1.0 cm in dia.	Barks, alburnum and duraman are scorched. Diameter of trunks are 2 ~ 3 cm and thickness of barks are 1.2 ~ 2.6 cm.	Burned out
3 ~ 4	67000	Burned out	Burned out	Burned out

Fig. 12 Charring depth of fire-damaged tree.

Tree: Kinmokusei (Osmenthus fragrans var. aurantiacus) TN2

炭化深さから放射照度の空間分布が推定できた。

2．供試建物より1.75m離れた所にあるキンモクセイ（樹高4 m）の燃焼状況を詳細に観察した。この樹木の燃焼状況は供試建物の燃焼に左右され，供試建物に点火してから3分後に燃え始め8～10分頃までにその大部分が焼失した。1回の予備注水による注水の燃焼抑制効果は放射照度が大きいため顕著には観測されなかった。

3．樹木の延焼防止効果は火災成長期において樹木のすぐ背後の下層部で大きく，角材の温度上昇が抑制されていた。火災最盛期をすぎると樹木が焼失して樹木の延焼防止効果が著しく減少した。

4．樹木の幹と小枝についての被害調査から，生きた立木の被害は角材の被害よりはるかに小さく，火災放射熱に対して抵抗力が大きいことが確かめられた。また，一棟火災の火災放射熱と幹の被害状況の関係が明らかになった。

（謝　辞）

この実験の実施にあたって実験の企画，準備及び写真撮影について消防研究所の職員の方々に，また延焼防止のための警戒にあたっては東京消防庁とくに三鷹消防署と調布消防署の方々に多大な御協力を頂き，無事に実験を終了することができたことをここに記して感謝の意を表します。

参考文献

1）河田杰，柳田由蔵：土木学会誌，第10巻，第2号
p. 403（大正13年）
2）木村英夫，加藤和男：造園雑誌（昭和23年）
3）中村貞一：京都大学農学部演習林報告26号 p. 10
（昭和31年）
4）建設省：昭和54年度研究開発概要報告書 p. 41
（昭和55年）
5）建設省：昭和55年度研究開発概要報告書 p. 29
（昭和56年）
6）山下邦博：消防研究所報告No.54 p. 55（1983）

Experimental Investigation of the Protection of Fire Spread by Trees

(Abstract)

Kunihiro Yamashita, Kōji Hayashi and Minoru Inagaki

(Received May 31. 1983)

Fire-protective effect of trees was measured in the fire experiment of mortar-plastered house. Two fragrant olive tree (Osmanthus fragrans var. aurantiacus), one of which was supplied by water-spray, were planted 1.75 meters away from north side of house and nine various potted trees were placed 1.5 meters south side of house.

Heat flux meter was set up at the north side of house and fourteen timbers were arranged in two rows to estimate the irradiance distribution. Burning behaviour of trees was recorded on the video tape recorder and analysed after fire experiment.

As a result of this study, it has been found that the trees burned out for four or five minutes under the intense irradiation which was estimated to be over 7×10^4 kcal/m^2·hr. and fire-protective effect of trees was recognized both on the surface temperature and cherring depth of timbers behind trees.

ヘリコプターからの音声による避難誘導について(その1)
——平坦地での明瞭度，了解度——

渡部　勇市・神　　忠久

(昭和58年6月9日受理)

1.　まえがき

地震に伴う火災，津波等で危険にさらされている住民を安全に避難誘導することは人命安全対策上重要なことである。そのために，ラジオ，テレビ，屋外に設置した非常用スピーカーによって情報をいち早く伝えようとすることが実際に行なわれている。しかし，これらの方法は地震情報を伝えるといった点ではよいが，危険区域の特定な場所における住民の避難誘導に関しては，必ずしも十分とはいえない。又広報車によっても避難誘導が行なわれているが，地震時における建物等の倒壊，あるいは道路での群集の流れによって使用出来ないことも考えられる。このようなところで火災状況の急変，情報伝達の混乱等が生じた場合，避難誘導体制の補助的な手段としてヘリコプターからの音声による避難誘導を行なう方法が考えられる。

この報告は，ヘリコプターからの音声による避難誘導の実用性を確かめるために，実際にヘリコプターを平坦地（田圃）で飛ばし，ヘリコプターからの音声の明瞭度，了解度試験，音圧測定，群集の避難誘導実験を行ったもののうち，単音の明瞭度，数字，単語，質問の了解度について報告するものである。

2.　実験場所

実験は，茨城県竜ヶ崎市長峰町の稲の刈取ってある平坦な田圃で行なわれた。実験場所及び周辺には，民家がなく，車も通らない静かな所である。

3.　使用ヘリコプター及び拡声装置

実験に使用したヘリコプターは，ベル206B型ジェットレンジャーである。この機種は，ヘリコプターの中でも比較的騒音の少ない5人乗りの小型機種である。

アンプは最大電気的出力200Wのものを2台使用し，計400Wである。スピーカーは，ホーン型スピーカー（20×32cm　楕円型）を2個ヘリコプターの脚に，真下方向に取付けた。

明瞭度，了解度試験の音声は，あらかじめ録音されている試験用テープを使用し，カセットレコーダの出力をアンプに入力し音声を出した。

4.　実験方法

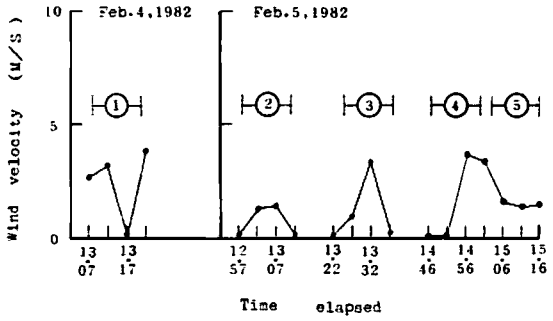
Table 1に示すように，昭和57年1月4日と5日に第1実験，同年2月26日に第2実験を実施した。第1実験は，明瞭度，了解度試験の音声が女性で，風の比較的少い（0～3m/s）日に行った。第2実験は，明瞭度，了解度試験の音声が男性で，風の比較的強い（6～8m/s）日に行った。第1実験，第2実験共に，ヘリコプターはホバリングの状態で，高度300，200，150，100，50mの5種類について，高い方から低い方の順番に実験を行った。第1実験，第2実験時の風速，風向をFig. 1 (1)から(4)に示す。

明瞭度，了解度試験のための聞き取り検査員13名をFig. 2に示すように，ヘリコプターの直下を中心として半径450m内に十字形に配置した。聞き取り検査員は，オージオメータで検査した結果，聴力損失が20dB以下の耳の健康な男子である。

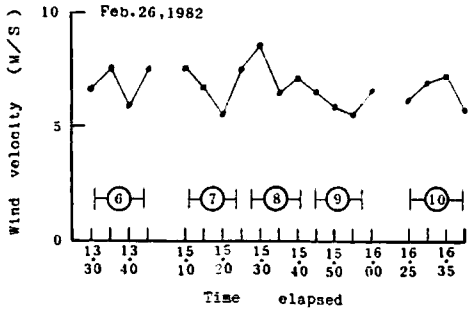
明瞭度，了解度試験には，日本オージオロジー学会で作成した標準語音聴力検査用テープ[1]を利用した。試験時間は，約13分であり，各高度について明瞭度，了解度試験が行なわれた。第1実験では，アンプ出力を0（ピーク400W），－3，－10，－20dBと4段階に変えて行った。第2実験室では，ピーク400Wの電気的

Table 1 Experimental conditions

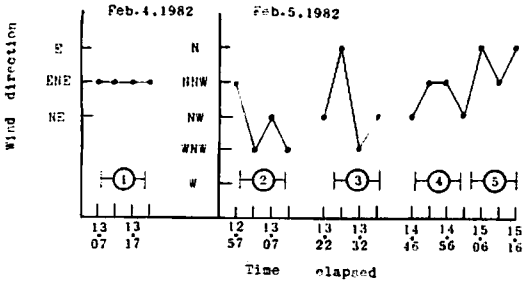
Experimental classification	Date	Time	Experimental No.	Attitude of helicopter	Velocity of wind	Direction of wind	Direction of helicopter	Weather	Temperature and humidity at 15:00	Hearing test personnel	Sex of voice
The first experiment	Feb. 4 1982	13:08 ~ 13:21	1	300 m	0 ~ 3 m/s	ENE	E	Cloudy	7°C 62%	13	Female
	Feb. 5 1982	12:58 ~ 15:16	2	200 m	0 ~ 3 m/s	WNW ~ N	N	clear	6°C 44%	13	
			3	150 m							
			4	100 m							
			5	50 m							
The second experiment	Feb. 26 1982	13:10 ~ 16:39	6	300 m	6 ~ 8 m/s	WNW ~ NNW	W	clear	7°C 23%	13	Male
			7	200 m							
			8	150 m							
			9	100 m							
			10	50 m							



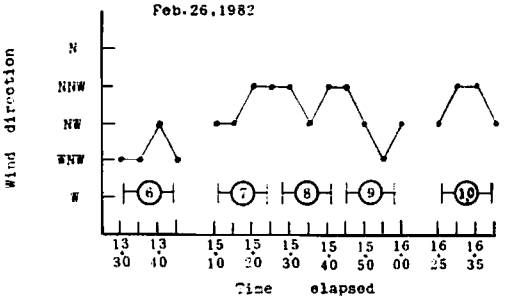
(1) Wind velocity (The first experiment)



(3) Wind velocity (The second experiment)



(2) Wind direction (The first experiment)



(4) Wind direction (The second experiment)

Fig. 1 Wind velocity and direction (numerals in circles show the experimental No.)

出力で行った。明瞭度，了解度試験の項目は，次の通りであり，各試験の検査数はTable 2に示す。

(1) 単音の明瞭度試験

五十音のアからワまでの20個の単音を3秒置きにスピーカーから出し，聞き取られた単音を用紙に記入する。

(2) 数字の了解度試験

2から7までの数字を3秒置きにスピーカーから出し，聞き取られた値を用紙に記入する。

(3) 単語の了解度試験

カラス，リンゴ等の単語を3秒置きにスピーカーから出し，聞き取られた単語を騒音計に向って言う。騒音計は，聞き取り検査員の近くに配置され，音声出力はデータレコーダに記録されるようになっている。

(4) 質問の了解度試験

"雪は白いですか，黒いですか"等の質問を5秒間隔でスピーカーから出し，その答を騒音計に向って言う。

5. 実験結果

5.1 ヘリコプターの直下地点からの距離による明瞭度，了解度の違い

ヘリコプターの直下とその位置を中心とする半径450m内の周辺部の単音の明瞭度，数字，単語，質問の了解度をヘリコプターの高度別に，第1実験についてはFig. 3 (1)から(5)に，第2実験についてはFig. 3 (6)から(10)に示す。後述のように，東西南北の方向によって明瞭度，了解度が大きく変化することがないので，ヘリコプターの直下から離れた地点では，東西南北の4方向の平均値で示した。第1実験では，アンプ出力を変えて明瞭度，了解度試験を行っているが，ここでは，0（ピーク400W），－3，－10dBのデータを平均して示した。Fig. 3に示したデータを算出するために集計した検査数をTable 3に示す。

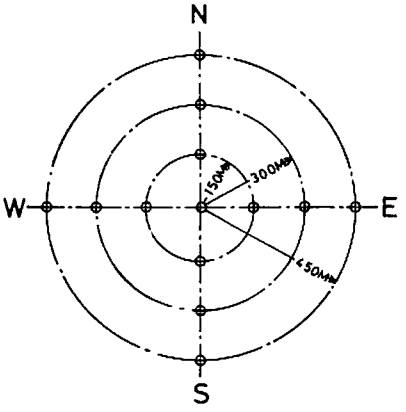


Fig. 2 Hearing test personnels and sound level meters layout drawing.
o: Hearing test personnel with sound level meter

第1実験では，ヘリコプターの直下地点から半径450mの範囲内では明瞭度，了解度が第2実験と比較してあまり低下していない。第2実験では，ヘリコプターの直下地点から離れるに従い，明瞭度，了解度が大きく低下している。この傾向は，ヘリコプターの高度が低い場合に顕著に表われている。第1実験の方が，第2実験の時に比べて，音声が遠くまで届いていることが分った。

5.2 ヘリコプターの高度による明瞭度，了解度の違い。

ヘリコプターの高度による明瞭度，了解度の違いを各地点別に，第1実験についてはFig. 4(1)から(4)に，第2実験についてはFig. 4 (5)から(8)に示す。

第1実験のヘリコプターの直下地点では，Fig. 4(1)に示すように高度50～300mの範囲内では，高度100mで明瞭度，了解度がやや高く，高度100mを境にして少し低下する傾向を示している。第2実験のヘリコプターの直下地点では，Fig. 4 (5)に示すように高度によって明瞭度，了解度は大きく変らずに，ほぼ一定であった。

第1実験のヘリコプターの直下から離れた地点では，Fig. 4 (2)から(4)に示すように，高度が低下すると明瞭度，了解度は少し高くなる傾向を示している。第2実験のヘリコプターの直下から離れた地点では，Fig. 4 (6)から(8)に示すように明瞭度，了解度は高

Table 2 The number of the articulation and intelligibillity test

C* / S* / E*	The first experiment				The second experiment
	0	-3	-10	-20	0 dB (400W)
Single sounds	20	20	20	20	80
Numerals	6	12	12	12	42
Words	5	5	5	5	20
Questions	4	5	5	5	19

E*: Elements of the speach and questions
S*: Sound volume (dB)
C*: Experimental classification.

度によって一定していないが，ヘリコプター高度が低下するに従ってやや低下する傾向が見られる。第1実験と第2実験では逆の傾向を示した。

5.3　方向による単音明瞭度の違い。

ヘリコプターからの音声がどちらの方向に強く聞こえたかを調べた。その結果をヘリコプターの高度別に，第1実験についてはFig. 5 (1) から (5) に，第2実験についてはFig. 5 (6) から (10)に単音明瞭度で示す。第1実験では，アンプ出力を0（ピーク400W），−3，−10dBの3種類のアンプ出力のデータを平均して示した。Fig. 5に示した各データを算出するために集計した検査数をTable 4に示す。

第1実験，第2実験共に，ヘリコプターの直下から離れた150m地点では，いずれの高度でも方向による単音明瞭度の差異はほとんど見られなかった。しかし，第1実験では，ヘリコプター高度が200m以上に高くなると，ヘリコプターの直下から遠く離れた300，450m地点で，Fig. 5 (4)，(5)に示すように，ヘリコプターの後方側の単音明瞭度が低下した。

5.4　アンプ出力による明瞭度，了解度の違い。

第1実験では，アンプ出力を0（ピーク400W），−3，−10，−20dBの4段階に変えて実験を行った。各アンプ出力における明瞭度，了解度をFig. 6に示す。Fig. 6に示す各データは13地点，5種類の高度のデータを平均して示した。Fig. 6に示した各データを算出するために集計した検査数をTable 5に示す。

Fig.6 に示すように，アンプ出力が低下するに従い，明瞭度，了解度がほぼアンプ出力（dB）に比例して低下する傾向を示した。

Table 3 The number of inspection to show the mark of Fig. 3 and Fig. 4.

C* / B* / E*	The first experiment		The second experiment	
	Just under	150 300,450 meters away	Just under	150 300,450 meters away
Single sounds	60	240	80	320
Numerals	30	120	42	168
Words	15	60	20	80
Questions	14	56	19	76

B*: Bx spot

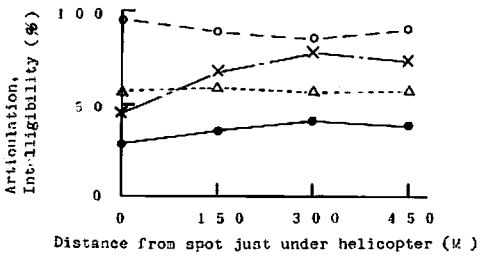
Table 4 The number of inspection to show the mark of Fig. 5.

C* / D* / E*	The first experiment	The second experiment
	All direction	All direction
Single sounds	60	80

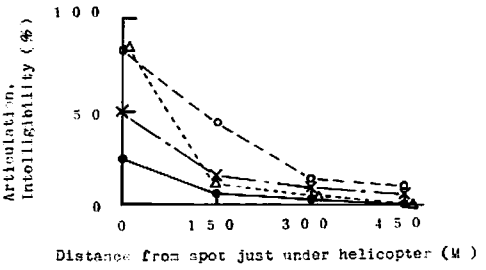
D*: Direction taken from helicopter

Table 5 The number of inspection to show the mark of Fig. 6.

S* / E*	0 dB (400W)	-3, -10, -20 dB
Single sounds	1300	1300
Numerals	390	780
Words	325	325
Questions	260	325

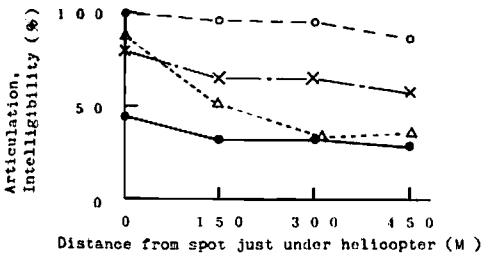


(1) Altitude of helicopter 50M (The first experiment)

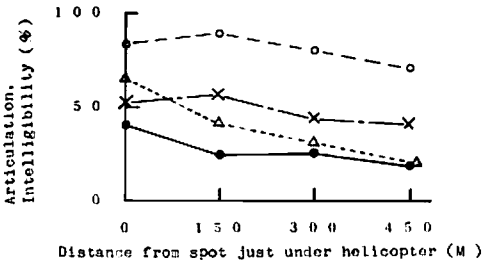


(6) Altitude of helicopter 50M (The second experiment)

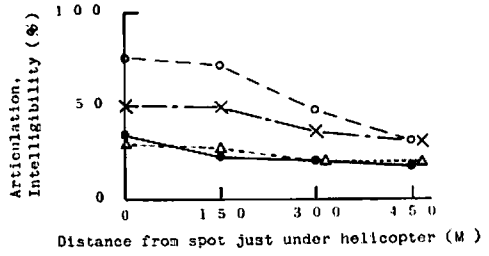
Fig. 3 Relation between articulation and intelligibility, and distance from spot just under helicopter. (Solid circle: Single sound, Open circle: Numeral, Cross: Word, Triangle: Qeustion)



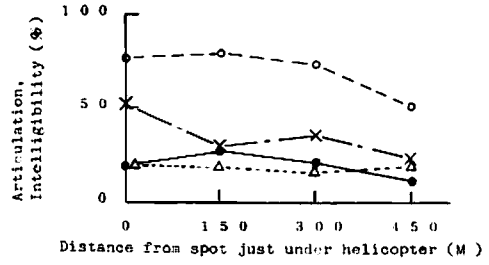
(2) Altitude of helicopter 100M (The first experiment)



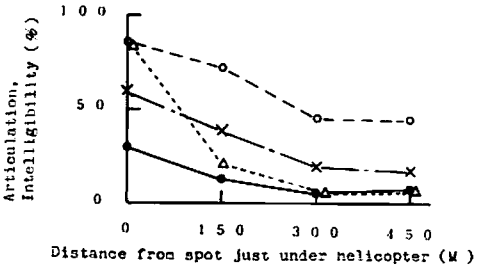
(3) Altitude of helicopter 150M (The first experiment)



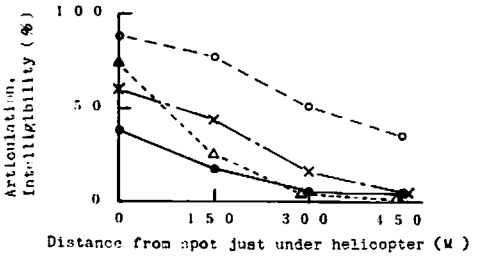
(4) Altitude of helicopter 200M (The first experiment)



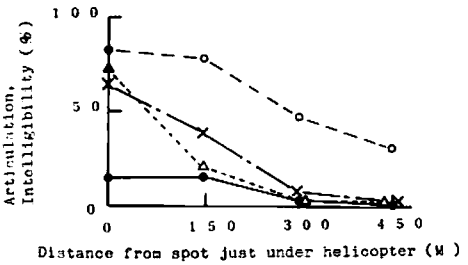
(5) Altitude of helicopter 300M (The first experiment)



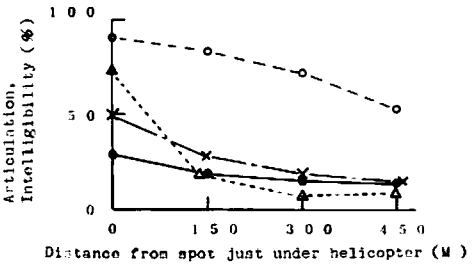
(7) Altitude of helicopter 100M (The second experiment)



(8) Altitude of helicopter 150M (The second experiment)

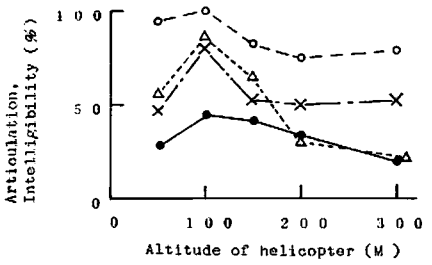


(9) Altitude of helicopter 200M (The second experiment)

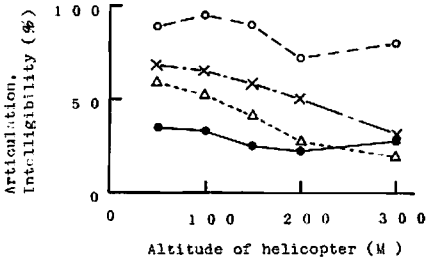


(10) Altitude of helicopter 300M (The second experiment)

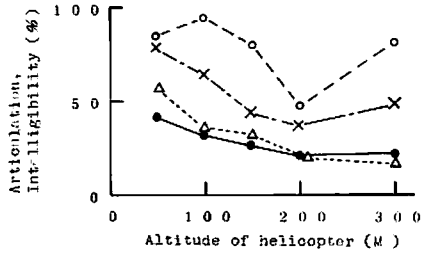
Fig. 3 (continued)



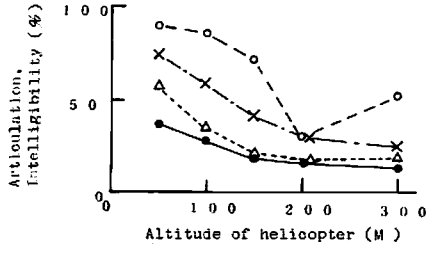
(1) Just under (The first experiment)



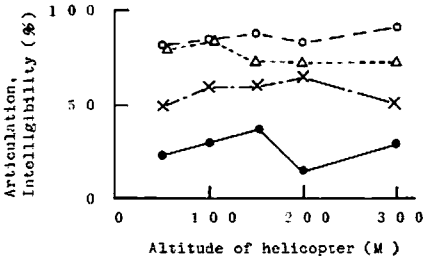
(2) Spot 150 meters away (The first experiment)



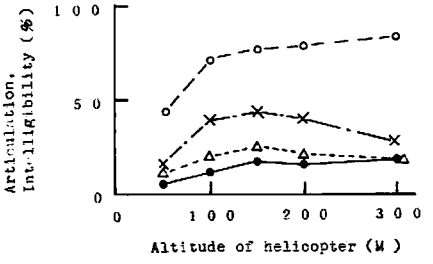
(3) Spot 300 meters away (The first experiment)



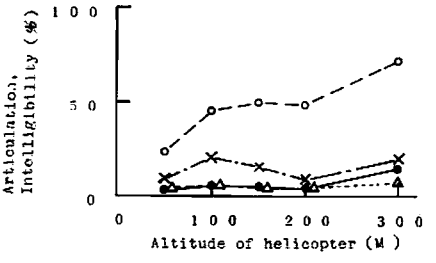
(4) Spot 450 meters away (The first experiment)



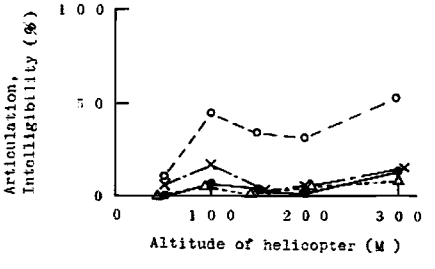
(5) Just under (The second experiment)



(6) Spot 150 meters away (The second experiment)

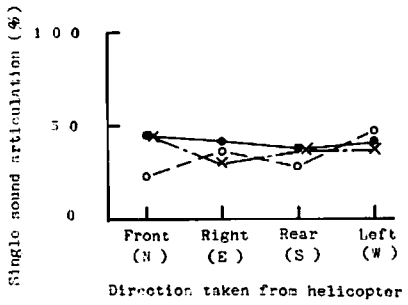


(7) Spot 300 meters away (The second experiment)

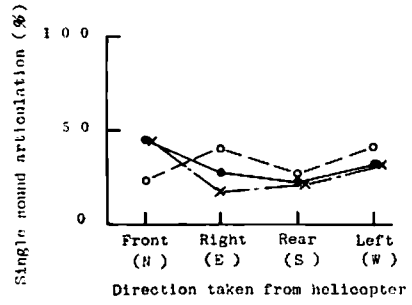


(8) Spot 450 meters away (The second experiment)

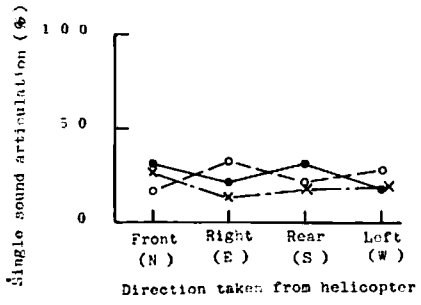
Fig. 4 Relation between articulation and intelligibility, and altitude of helicopter.
(Solid circle: Single sound, Open circle: Numeral, Cross: Word, Triangle: Qeustion)



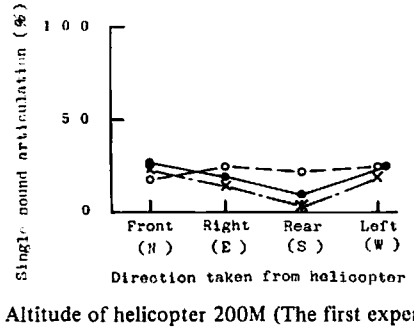
(1) Altitude of helicopter 50M (The first experiment)



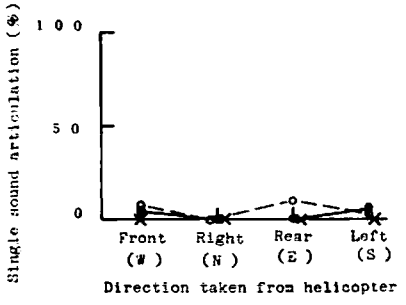
(2) Altitude of helicopter 100M (The first experiment)



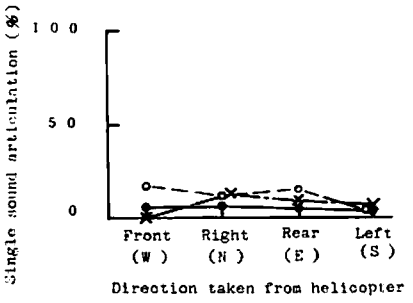
(3) Altitude of helicopter 150M (The first experiment)



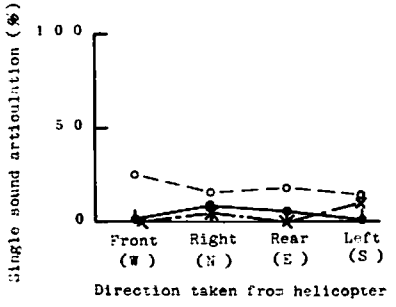
(4) Altitude of helicopter 200M (The first experiment)



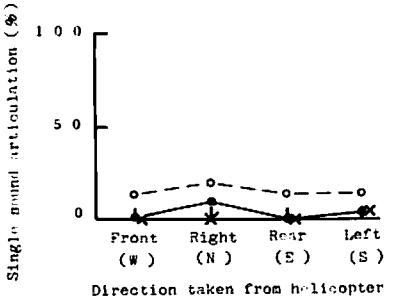
(6) Altitude of helicopter 50M (The second experiment)



(7) Altitude of helicopter 100M (The second experiment)

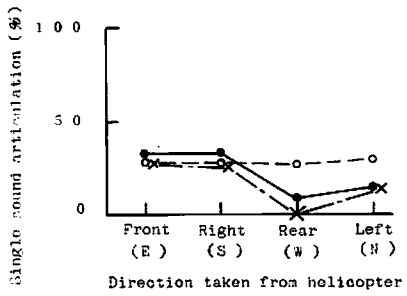


(8) Altitude of helicopter 150M (The second experiment)

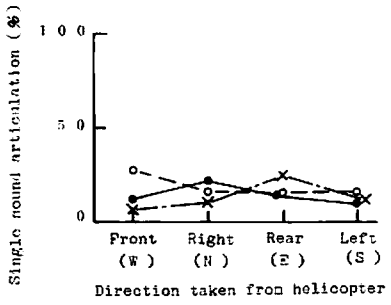


(9) Altitude of helicopter 200M (The second experiment)

Fig. 5 Relation between articulation and intelligibility, and direction. (The sign given in parentheses represents the direction) (Open circle: Spot 150 meters away, Solid circle: Spot 300 meters away, Cross: Spot 450 meters away)



(5) Altitude of helicopter 300M (The first experiment)



(10) Altitude of helicopter 300M (The second experiment)

Fig. 5 (continued)

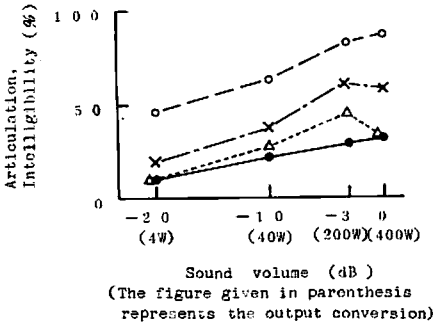


Fig. 6 Relation between articulation and intelligibility, and sound volume. (The first experiment) (Solid circle: Single sound, Open circle: Numeral, Cross: Word, Triangle: Question)

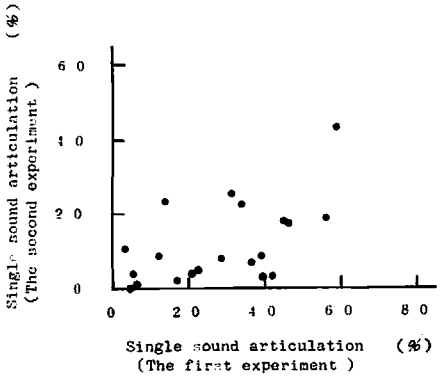


Fig. 7 Scatter diagram of single sound articulation on the first and second experiments.

Table 6 Difference of rate correct interpretation depending upon elements of the speech and questions.

E* \ C*	The first experiment	The second experiment
Single sounds	0.28	0.12
Numerals	0.75	0.54
Words	0.52	0.22
Questions	0.35	0.15

Table 7 Intelligibility of each numeral.

Numeral C*	2	3	4	5	6	7
The first experiment	0.75	0.91	0.66	0.63	0.75	0.77
The second experiment	0.50	0.42	0.46	0.59	0.57	0.71

5.5　言葉の種類による明瞭度，了解度の違い。

13地点，5種類の高度における単音の明瞭度，数字，単語，質問の了解度の平均値を，第1実験，第2実験についてTable 6に示す。第1実験，第2実験共に，数字，単語，質問，単音の順に値が低下している。最も値の大きい数字と最も小さい単音とを比較すると，その差が数倍にもなっており，言葉の種類によって大きく異なる。

次に，第1実験，第2実験の個々の数字の了解度を

Table 7に，個々の単音の明瞭度をTable 8に示す。個々の数字の了解度はあまり異ならないが，個々の単音によって明瞭度は著しく異なり，0～60%内に分布している。従って，単音の種類によって聞き易いものと，聞きにくいものが含まれていることが分る。

次に，第1実験，第2実験での個々の単音の明瞭度の相関を見るために，散布図をFig. 7に示す。第1実験，第2実験の単音明瞭度のスピアマンの順位相関係数γsoを求めると0.437である。$n=20$，有意水準0.05の時，γsoは0.377，有意水準0.01の時，γsoは0.534である。第1実験，第2実験の個々の単音明瞭度には有意な相関がある。第1実験は女性，第2実験は男性の音声で，性別が異なっているが分りにくい単音は共に同じように分りにくい傾向を示した。

6. 考　察

6.1 ヘリコプターの直下地点からの距離による明瞭度，了解度の違い。

ヘリコプターの直下地点から離れた所では，スピーカーから地上までの距離による音圧の逆二乗則による減衰と，ホーンスピーカーの指向特性によるため明瞭度，了解度は低下すると考えられる。しかし，第1実験のヘリコプターの高度が低い場合には，Fig. 3 (1), (2)に示すようにほとんど明瞭度，了解度が低下していない。これは，大気の気象条件あるいは，ヘリコプターの回転翼による後流（Dawn Wash）等によって，音声の伝搬方向が屈折し音声が遠くまで届いたことによると思われる。

第2実験の方は第1実験に比較して，Fig. 3 (6)から(10)に示すようにヘリコプターの直下から離れるに従い，明瞭度，了解度が大きく低下した。この理由としては以下の点が考えられる。第2実験は，男性の音声を使用しているために，第1実験の女性の音声と比較して少し聞きずらかったと思われる。第2実験は，風の比較的強い（6～8 m/s）日に行なわれたので，風の弱い第1実験に比べて，ヘリコプターの回転翼の風切音等によって明瞭度は低下することが考えられる。第2実験時と第1実験時の湿度を比較すると，第2実験時の湿度が23%と大変低い。空気中の湿度によって音声の伝搬の際，高音部の音圧が減衰することが知られている[2]。第2実験時の低い湿度は，第1実験時の湿度と比較し，高音部の音圧の減衰により多く作用し，明瞭度を低下させたと思われる。

気象条件等によってヘリコプターの直下から離れた所では明瞭度，了解度が大きく低下することもあるが，ヘリコプターの周辺部の中でヘリコプターの直下地点が様々な気象条件でも最も明瞭度，了解度が高いことが分った。

6.2 ヘリコプターの高度による明瞭度，了解度の違い。

第1実験のヘリコプターの真下地点では，高度100 mを境にして明瞭度，了解度が少し低下する傾向を示ししている。これは，高度100 m以下になると，ヘリコプターの騒音が大きすぎて，聞きずらくなること，また高度100 m以上になると，スピーカーから地上までの距離の増大により多少聞きずらくなっていることによるものであると思われる。第2実験のヘリコプターの直下地点では，明瞭度，了解度がほぼ一定で，第1実験のような傾向をあまり示していない。気象条件，音質等の違いによって異なる傾向を示したと思われる。

ヘリコプターの直下から離れた地点では，第1実験，第2実験でヘリコプターの高度によって明瞭度，了解度が逆の傾向を示している。第1実験では，前6.1で述べたように，高度が低下するほど，気象条件やヘリ

Table 8 Articulation of each single sound

C* \ A single sound	The first experiment	The second experiment
A	0.59	0.44
U	0.39	0.09
O	0.46	0.18
Ki	0.14	0.24
Ku	0.31	0.25
Shi	0.04	0.11
Su	0.06	0.04
Ta	0.29	0.08
Te	0.12	0.09
To	0.23	0.05
Ni	0.56	0.19
Ne	0.06	0.01
Ha	0.45	0.19
Mo	0.42	0.03
Yo	0.34	0.23
Ri	0.40	0.03
Wa	0.36	0.07
Ga	0.21	0.04
Ji	0.05	0.00
Ba	0.17	0.02

コプターの回転翼の後流等によって音声の伝搬方向が屈折しているために、ヘリコプターの高度が低下するほど明瞭度，了解度が高くなったと考えられる。第2実験では，ヘリコプターの高度が低下するほど，ホーンスピーカーの指向特性により明瞭度，了解度が低下したと考えられる。この違いによって，第1実験，第2実験では逆の傾向を示したと考えられる。

6.3　方向による単音明瞭度の違い

第1実験では，ヘリコプターの高度が200m以上高くなると，ヘリコプターの直下から遠く離れた300m，450m地点では，ヘリコプター後方側の単音明瞭度の低下が見られた。この理由としては，次のように考えることができる。第1実験のように風の比較的少ない（0～3m/s）日にホバリングする時には，ヘリコプターが少し後方側に傾いている。このため，ホーンスピーカーの中心軸は少し前方に傾いてしまうので，ホーンスピーカーの指向特性によりヘリコプター後方側の単音明瞭度が低下してしまったと考えられる。ヘリコプターの高度が低い場合に，この傾向が出なかったのは，前の6.1で述べたように音声の伝搬方向の屈折により後方側にも音声が遠くまで伝搬したためと思われる。

第2実験のように風が比較的強く（6～8m/s）吹いている日にホバリングする時は，ヘリコプターの傾きは，ほとんどなくなり，ほぼ水平に近くなる。ホーンスピーカーもほとんど真下を向くようになる。このため，第2実験では，第1実験のようにヘリコプター後方側の単音明瞭度の低下は特に生じなかったと考えられる。

第2実験では，風が北西方向（ヘリコプター前方，右方）から比較的強く吹いていたが，風上側，風下側による単音明瞭度の差異は特に認められなかった。

6.4　拡声器の出力

ヘリコプター機種ベル206B型の場合，明瞭度，了解度を低下させないためには，Fig. 6に示すように少なくても400W以上のアンプの出力が必要であると考えられる。さらに，より高出力のアンプを使用すると，明瞭度，了解度をさらに高めることが期待できる。

7.　結　　論

ヘリコプター（ベル206B型）の拡声器から発生する音声の明瞭度，了解度試験を田園（半径450m）で行った結果，次のようなことが分った。

(1)　気象条件等によってヘリコプターの直下から離れた周辺部では，明瞭度，了解度が大きく低下することもあるが，ヘリコプターの周辺部の中でヘリコプターの直下地点が様々な気象条件でも最も明瞭度，了解度が高い。

(2)　ヘリコプターの直下地点では，高度50～300mの範囲で，高度によって明瞭度，了解度は，大きくは変わらないが，高度100mでやや高い傾向を示し，質問の了解度80%の高率が得られた。

(3)　風によって，風上側，風下側の明瞭度，了解度の差異は認められなかった。ヘリコプターの傾きによって生じるホーンスピーカーの傾きによって周辺部の方向による明瞭度，了解度の差異は認められた。

(4)　ベル206B型の場合，明瞭度，了解度を低下させないためには，少なくても400W以上の出力アンプが必要である。

この実験を実施するに当り，消防研究所の橘　房夫，佐藤晃由，小峰喜三蔵，岸野誠一，若松啓二の諸氏の協力を得た。記して，ここに謝意を表する。

参考文献

1）境　久雄，中山　剛：「聴覚と音響心理」P299，コロナ社（1978）
2）前川純一：「建築音響」P36，共立出版（1968）

Voice Guidance for Evacuation from Helicopter Part 1. Articulation and Intelligibility on Flat Ground

(Abstract)

Yuichi Watanabe and Tadahisa Jin

(Received June 9, 1983)

Practicality of voice communicating safe routes to the evacuating crowd in conflagrations has been examined using a helicopter. Measurements have been made on the sound pressure and on the recognition aspect of speech from speakers on the helicopter flown over a flat ground to people, and the followings are revealed:

(1) Depending on weather conditions, intelligibility may be lowered to a great extent at a periphery away from a spot just under the helicipter. At the spot just under the helicopter, however, the highest intelligibility can be expected under any weather conditions.

(2) Within the range of alititudes of 50 to 300 meters at the spot just under the helicopter, there is no remarkable change in intelligibility depending on the altitude. At an altitude of 100 meters, slightly better results have been obtained with a high intelligibility rate of 80% in response to questions.

(3) No difference is found of intelligibility on both windward and leeward depending upon the direction of the wind. The difference of intelligibility in the direction of the periphery have been observed because of the directivity of horn speakers due to the inclination of the helicopter.

(4) With the BELL helicopter Model 206B, that an amplifier of at least 400W output capacity is required to prevent the intelligibility.

ヘリコプターからの音声による避難誘導について(その2)
——平坦地での音圧レベル，周波数特性——

渡部　勇市・神　　忠久

(昭和58年6月9日受理)

1.　まえがき

ヘリコプターからの音声による避難誘導の実用性を確かめるために，前報[1]では，明瞭度，了解度試験について報告した。この報告は，騒音計の音圧レベルからヘリコプターの騒音，音声の音圧レベル及びこれらの周波数特性を求め，ヘリコプターからの音声による避難誘導の有効性について検討したものである。

2.　実験方法

実験は，前報で述べたように，ベル206B型ヘリコプターがホバリングの状態で，高度300，200，150，100，50mの5種類の高度でヘリコプターから音声を出し，地上で音圧レベルの測定を行った。第1実験は，音声が女性で，風の比較的少ない（0～3m/s）日に行い，第2実験は，音声が男性で，風の比較的強い（6～8m/s）日に行った。

騒音計は，前報で示したように，半径450m内に聞き取り検査員と同じ位置に13台を配置した。各地点の音圧レベルの記録は，ヘリコプターの直下に配置した14チャンネルのデータレコーダにより行った。

ヘリコプターに使用したホーンスピーカー（20×32cm楕円形）の出力音圧特性をFig. 1に示す。実効周波数範囲は，300～4000Hz（偏差10dB以内)で，1.2KHz附近で，最大音圧を示している。

3.　実験結果と考察

3.1　ヘリコプターの騒音レベルについて

ヘリコプターの直下とその位置を中心とする半径450m内の周辺部のヘリコプターの騒音レベルを測定した。その結果を，第1実験については，Fig.2 (1)から(4)に，第2実験については，Fig.2 (5)から(8)に黒丸で示す。図の横軸の下側に示す目盛は，ヘリコプターのスピーカーから地上までの距離を，図の横軸の上側に示す目盛は，下側の目盛に対応するヘリコプターの高度を示している。各地点のデータは，3秒間隔で6点の値を読み取り，その平均値で示した。

ヘリコプターの直下地点では，Fig. 2 (1)，(5)に示すように，第1実験，第2実験共に，スピーカーから直下までの距離の倍数に対して6dB（A）の割合で騒音レベルが低下している。つまり，このことを言い換えると，騒音の音圧は距離の逆二乗則によって低下していると言える[2]。ヘリコプターの騒音レベルは，飛行高度が100m以下になると80dB（A）にも達し，会話も困難になってくる。したがって，ヘリコプター高度は，騒音レベルを小さくするために150m以上取ることが望ましい。前に報告した，直下地点の明瞭度，了解度試験では，ヘリコプター高度（50～300mの範囲）によって，明瞭度，了解度は，大きく変わらない結果が得られているので，ヘリコプター高度は，150

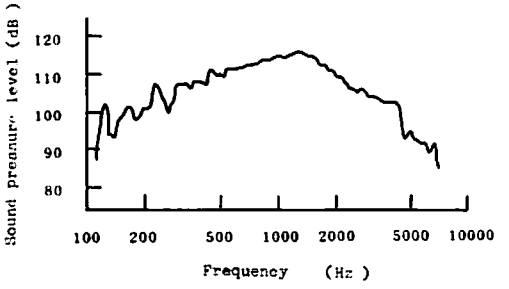


Fig. 1 Frequency characteristics of horn speaker used in hearing test.

～300mが適当と思われる。

ヘリコプターの直下から離れた地点では，Fig. 2 (2)から(4)，(6)から(8)に示すように，ヘリコプターの高度が高い時には，スピーカーから各地点までの距離の倍数に対して6dB(A)の割合で騒音レベルが低下している。しかし，ヘリコプター高度が低下すると，地表面の吸収により，その分だけ余分に低下している。そのため，距離が最も短くなる場合，つまりヘリコプターの高度が最も低い場合に，騒音レベルが最も大きくなるのでなく，Fig. 2 (2)，(6)に示す150m地点では，高度約100m，Fig. 2 (3)，(7)に示す300m地点では，高度約150m，Fig. 2 (4)，(8)に示す450m地点では，高度約200mで最も大きい。又，ヘリコプターの騒音レベルは，直下地点から遠く離れるに従い，低くなり，ヘリコプター高度によって，あまり変化せず，一定の値を示すようになる。

ヘリコプターの直下地点から離れた地点の音圧レベルは，点線で示したヘリコプターの直下地点の騒音レベルより，低く出ている。これは，ヘリコプターの回転翼のため直下の方向に騒音が強く出ているためである。第1実験，第2実験を比較すると，第2実験の方が騒音レベルがやや低い。これは，後の3.2の騒音の周波数特性で述べるが，低い湿度のために高音部が減衰しているためである。

ヘリコプターの騒音レベルの東西南北の方向による違いは，Fig. 2 (2)から(4)，(6)から(8)に示すように，あまりなかった。特に，第2実験では，風が比較的強かった（6～8m/s）が，風上側，風下側による騒音レベルの差異は認められなかった。

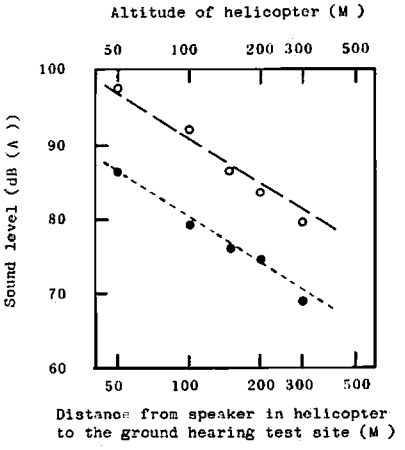
3.2　ヘリコプターの騒音の周波数特性について

地上（半径450m内）におけるヘリコプター騒音の周波数特性を各地点別にFig. 3 (1)から(4)に示す。各地点のヘリコプターの騒音の周波数特性は，⅓オクターブバンドパスフィルターで，3秒間隔で6点の値を読み取り，その平均値で求めた。各地点のヘリコプターの騒音の周波数特性は，ヘリコプター高度，方向によってほとんど変わらなかったので，5種類の高度，4方向の平均値で示した。

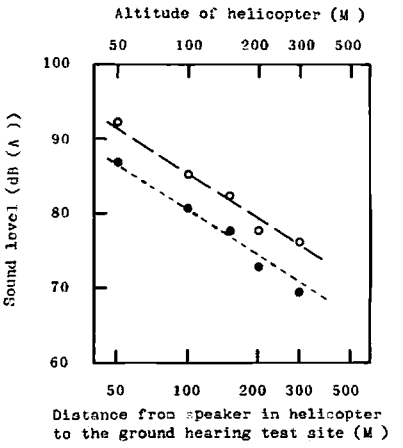
ヘリコプターの騒音の周波数特性は，125～2000Hzの範囲内では，160Hzと315Hzにピークが見られる。ヘリコプターの直下地点では160Hz，直下地点から離れた地点では315Hzで最大音圧レベルを示している。第1実験，第2実験のヘリコプター騒音の周波数特性を比較すると，Fig. 3 (1)に示すように，ヘリコプターの直下地点では，ほぼ同じようなパターンである。しかし，ヘリコプターの直下地点から離れた地点では，Fig. 3 (2)から(4)に示すように，第2実験では，高音部がより大きく低下している。これは，前報に示したように，第2実験時の湿度が23%で，第1実験時に比較して湿度が低かったために，高温部が減衰したものと考えられる[3]。

3.3　ヘリコプターから出した音声の音圧レベルについて

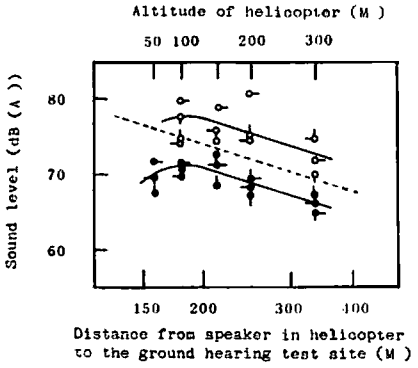
ヘリコプターの直下とその位置を中心とする半径450m内の周辺部のヘリコプターから出した音声の音圧レベルを，騒音レベルと同じように，各地点別に，第1



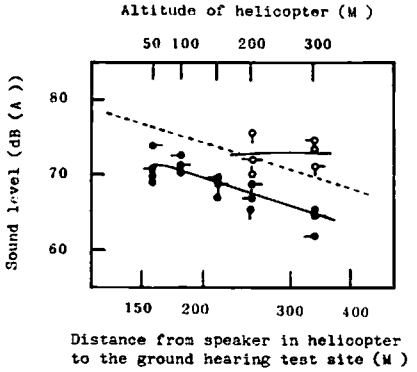
(1) Just under (The first experiment)



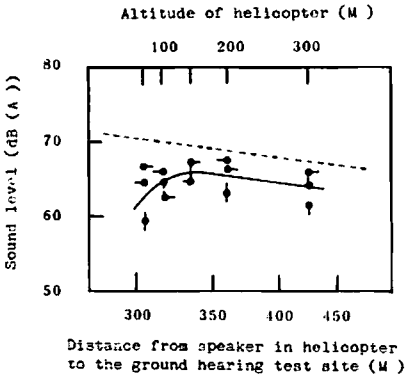
(5) Just under (The second experiment)



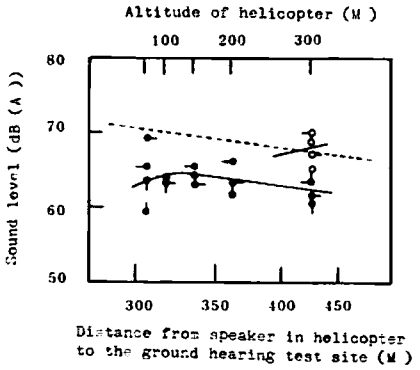
(2) Spot of 150 meters away (The first experiment)



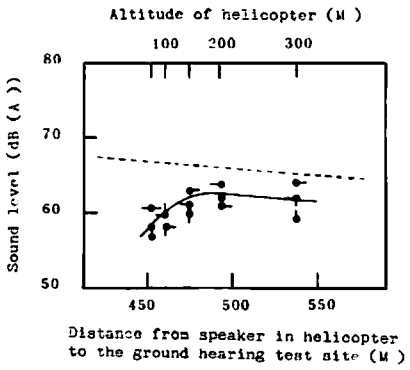
(6) Spot of 150 meters away (The second experiment)



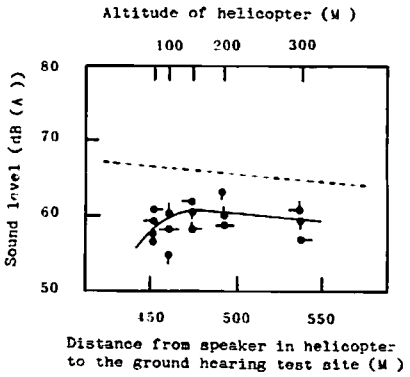
(3) Spot of 300 meters away (The first experiment)



(7) Spot of 300 meters away (The second experiment)



(4) Spot of 450 meters away (The first experiment)



(8) Spot of 450 meters away (The second experiment)

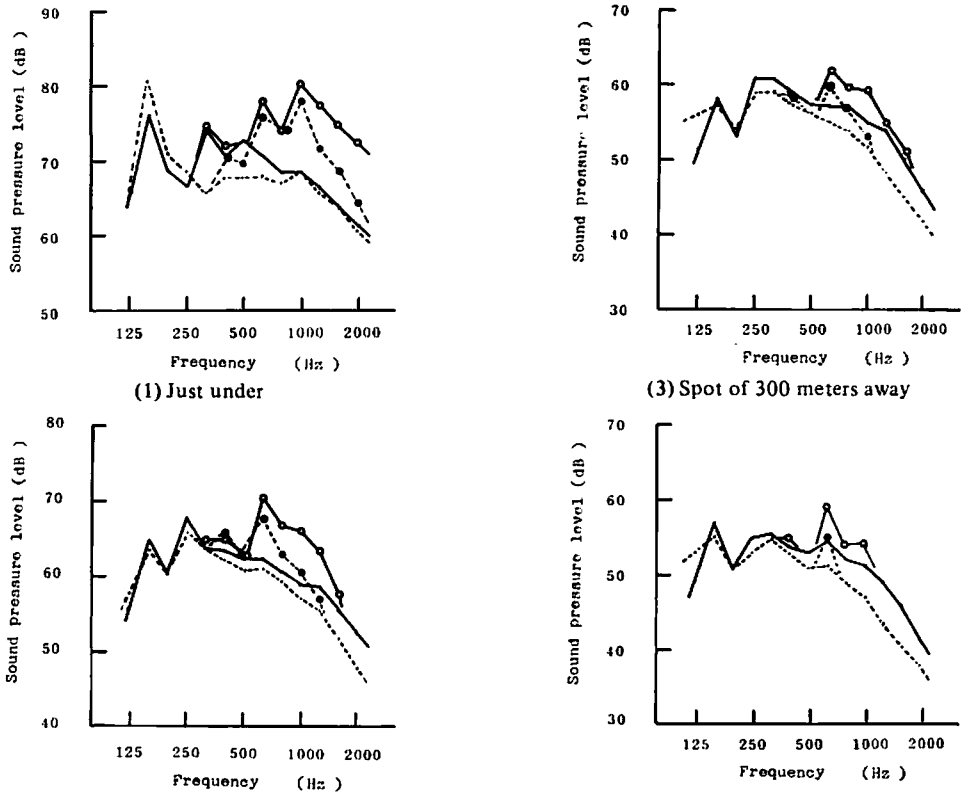
Fig. 2 Noises of helicopter and sound level on the ground within a radius of 450 meters from a spot just under helicopter.

(.... : Noises at spot just under helicopter
Noises: ♦ Front, •– Right, ♦ Rear, –• Left,
Sound level: ♁ Front, o– Right, ♀ Rear, –o Left)

実験について Fig. 2 (1), (2)に，第2実験について Fig. 2 (5)から(7)に白丸で示す。ヘリコプターからの音声が，ヘリコプターの騒音より小さく，測定出来なかった所は，Fig. 2に記入されていない。各地点の音声の音圧レベルは，スピーカーから出した数字の音圧ピーク値をFAST特性*)で読み取り，その時のヘリコプター騒音を暗騒音として補正を行った。各地点は，6点の数字の平均値で示した。

ヘリコプターの直下地点では，Fig. 2 (1), (5)に示すように，ヘリコプター騒音と同様に，スピーカーから直下までの距離の倍数に対して6dB(A)の割合で音声の音圧レベルが低下している。音声に対するヘリコプター騒音の比S/N (dB)は，第1実験では約10.8dB(A)，第2実験では約4.9dB(A)である。これは，後の3.4の音声の周波数特性で述べるが，第2実験で使用した男性の声の高音部が，第1実験の女性の声に比較して出ていないために，第2実験のS/Nが低下したと考えられる。

ヘリコプターの直下から離れた地点では，音声の音圧レベルは，ヘリコプターの高度に対して，第1実験，第2実験で異なる傾向を示した。第1実験では，Fig. 2 (2)に示すように，ヘリコプター高度に対してS/N約6dB(A)で騒音レベルと同じように音声の音圧レベルが出ている。一方，第2実験では，Fig. 2 (6)に示すように，ヘリコプターの高度が低下するに従い，スピーカーの指向特性のためにS/Nが低下している。第1実験では，前報でも報告したように，音声が，気象条件やヘリコプターの回転翼による後流 (Dawn Wash) 等によって音声の伝搬方向が屈折したために，ヘリコプター高度が低下しても，あまりS/Nが低下しなかっ



(1) Just under
(2) Spot of 150 meters away
(3) Spot of 300 meters away
(4) Spot of 450 meters away

Fig. 3 Comparison of noises with voice from helicopter in frequency characteristics.
(—o— : Voice, —— : Noises, The first experiment
····●···· : Voice, ---- : Noises, The second experiment)

注＊　時定数：125ms

たと考えられる。

ヘリコプターから出した音声の東西南北方向による音圧レベルの違いは，Fig. 2 (2), (6), (7) に示すように，騒音と同様にあまり認められない。特に，第2実験では，風が比較的強かった（6～8 m/s）が，騒音と同様に，風上側，風下側による音声の音圧レベルの差異は認められない。

3.4 聞き取り検査に用いた音声のスペクトルについて

聞き取り検査に用いた第1実験の女性の声，第2実験の男性の声のスペクトルをFig. 4に示す。スペクトルは，録音されたテープから⅓オクターブバンドパスフィルターで数字のピーク値をFAST特性で6点読み取り，その平均値で求めた。女性，男性の声を比較す

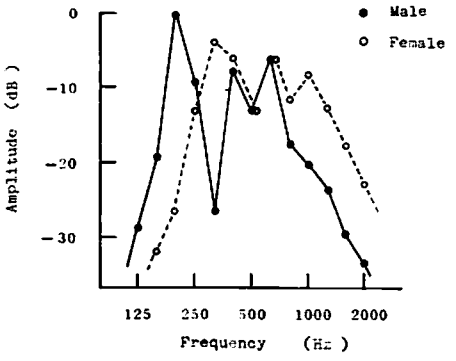


Fig. 4 Spectra of male and female voices used in hearing test.

Table 1 S/N ratio (dB) of the speach to the helicopter noise in 1/3 octave band center frequency (The first expriment)

D*1	H*2 (m) \ F*3 (Hz)	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000
Under the Helicopter	50						4.3	3.2	16.7	13.5	10.6	13.1
	100			2.0	4.6		0.6	0.6	13.8	6.0	18.2	14.2
	150				0.9		7.5	6.9	4.2	14.2	12.2	13.2
	200						10.6	6.0	14.8	11.5	9.3	8.4
	300						11.5	10.1	10.1	6.6	6.6	5.7
150 m point	50			1.1	1.9		2.6					
	100			2.9	4.1		9.1	8.8	8.1	3.5		
	150			0.7			8.5	4.1	9.3	5.5	2.1	
	200			0.4			12.5	9.3	8.6	4.5		
	300					3.2	8.6	7.8	11.2	9.3	7.7	6.2
300 m point	50			2.9	2.9		3.6					
	100				2.1		6.3	3.3	2.8		3.5	
	150						2.3	2.0	7.6	2.1		
	200						6.3	3.1	5.3			
	300						5.8	5.1	5.5	3.5	2.1	0.4
450 m point	50		0.9	1.7	2.5		1.1					
	100			0.2	2.8		5.4	1.1	2.6	0.4		
	150				0.6		3.8	1.8	3.8			
	200						6.6	2.8	5.1			
	300					0.2	6.3	5.0	4.3	2.2		

*1) D: Distance from the grand point under the helicopter.
*2) H: Height of the helicopter.
*3) F: Frequency

ると、男性の声が1 KHz以上の高音部で、約10dB低下している。特に、第2実験に用いた男性の声は高音部の出ない人であった。このため、前報に報告したように、第2実験の明瞭度が悪かったのは、高音部の出ない男性の声を用いたことが大きな要因であると考えられる。

3.5 ヘリコプターから出した音声の周波数特性について

ヘリコプターから出した音声の地上（半径450m内）における周波数特性を、騒音と同じようにFig. 3 (1)から(4)に各地点別に5種類の高度の平均値で示した。Fig. 3に示す音声の周波数特性は、ヘリコプターの騒音より小さい音声の音圧レベルをヘリコプターの騒音と同等にし、5種類の高度の平均値を求めた。

又、各地点および各高度における音声に対するヘリコプター騒音の比S/N (dB) を⅓オクターブバンド周波数ごとに求めた。その結果を、第1実験についてはTable 1に、第2実験についてはTable 2に示した。直下から離れた地点での4方向のパターンはあまり変わらなかったので、Tabl 1, 2は同距離の各方向の4地点の平均値で示した。

尚、音声の周波数特性は、⅓オクターブバンドパスフィルターで数字のピーク値をFAST特性で読み取り、その時のヘリコプターの騒音を暗騒音として補正を行い求めた。各周波数の音圧レベルは6点の数字の平均値で示した。

Table 2 S/N ratio (dB) of the speech to the helicopter noise in 1/3 octave band center freqnency, (The second experiment)

D*1	H*2 (m) \ F*3 (Hz)	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000
Under the Helic-opter	50					1.6	5.7	4.9	7.0	2.6	2.8	1.5
	100				2.4	2.9	7.0	5.4	6.6	3.1	1.1	0.7
	150				0.9		9.3	10.0	9.2	5.4	4.2	2.1
	200				3.8	3.1	7.7	8.5	10.9	7.6	8.3	8.4
	300				9.2	2.4	10.5	7.3	13.1	8.4	6.8	2.6
150 m point	50						2.0					
	100							1.8	0.2			
	150				3.5		9.1	3.9	3.8			
	200				4.9	1.6	8.1	5.8	5.9	2.9	0.4	
	300				8.4	7.4	15.5	6.9	9.3	4.2	4.9	
300 m point	50											
	100						2.8					
	150				1.1		6.2	2.9	1.3			
	200						3.5	4.2	0.7			
	300				5.0	1.3	13.0	7.3	5.1	2.4		
450 m point	50						2.0					
	100						3.2					
	150						3.0	0.3				
	200						3.2	1.5				
	300				1.8		8.5	2.0				

*1) D: Distance from the grand point under the helicopter.
*2) H: Height of the helicopter.
*3) F: Frequency

地上での音声の周波数特性は，Fig. 1に示すスピーカーの出力音圧周波数特性の影響を受け，ヘリコプターの直下では，Fig. 3 (1)に示すように1KHz，直下から離れた地点では，Fig. 3 (2)から(4)に示すように630Hzが最大音圧になっている。直下から離れた地点では，スピーカーの指向特性により高音部が低下するために，直下より低い630Hzで最大音圧になっている。

又，Fig. 4に示すテープに録音された音声のスペクトルと同様に，第1実験の女性の声に比べて第2実験の男性の声の高音部が低下している。

ヘリコプターの騒音より大きい音声の周波数範囲は，Table 1，2に示すようにヘリコプターの直下から離れるに従い，又ヘリコプターの高度が低下するに従い第2実験の方が第1実験と比較して狭くなっている。

その理由として，第1実験では高音部の出る女性の声を用いたこと，ヘリコプターの高度が低下しても，気象条件により音声の伝搬方向の屈折により音圧が第2実験ほど低下しなかったこと等を前報と同様に考えることが出来る。

前報に報告した明瞭度とヘリコプターの騒音より大きい音声の周波数範囲を比較すると，この周波数範囲が広いほど明瞭度がよくなっている。つまり，ヘリコプターの騒音より大きい音声の周波数範囲が広いほど聞こえやすいことが分った。

4. 結　論

ヘリコプター（ベル206B型）の拡声器から発生する音声の音圧測定を田圃（半径450m内）で行った結果，次のようなことが分った。

(1) ヘリコプター高度が100m以下になるとヘリコプターの直下では，騒音が80dB（A）にも達する。ヘリコプターによる騒音を小さくするために，ヘリコプターの高度は150m以上取ることが望ましい。

(2) 地上での音声の周波数特性は，ヘリコプター騒音の周波数特性と比較し，音圧レベルの大きい周波数範囲が広いほど聞こえやすい。特に，高音部の出る女性の声の方が，ヘリコプターから出す音声としては適当である。

(3) 風によって，風上側，風下側の音声の音圧レベルの差は，前報の明瞭度と同様に，認められなかった。

この実験を実施するに当り，消防研究所の橘　房夫，佐藤晃由，小峰喜三蔵，岸野誠一，若松啓二の諸氏の協力を得た。記して，ここに謝意を表する。

参考文献

1) 渡部勇市，神　忠久：ヘリコプターからの音声による避難誘導について（その1，平坦地での明瞭度，了解度），消防研究所報告 No.56　投稿中

2) 五十嵐寿一：「音響と振動」 P.32，共立出版（1975）

3) 前川純一：「建築音響」 P.36，共立出版（1968

Voice Guidance for Evacuation from Helicopter Part 2. Sound Pressure Level and Frequency Characteristics on Flat Ground

(Abstract)

Yuichi Watanabe and Tadahisa Jin

(Received June 9, 1983)

To make sure of the practicality of guidance for evacuation through voice from a helicopter in conflagrations, the previous report[1] refers to the articulation and intelligibility test. This report relates to the study of effectiveness on guidance for evacuation through voice from a helicopter by evaluating noises from the helicopter, sound pressure level of voice and frequency characteristics from these sound pressures measured on a sound level meter.

The results are revealed as follows:

(1) When the altitude of the helicopter measures 100 meters or less, the noises will reach as much as 80 dB (A) at a spot just under the helicopter. It is desirable to keep the altitude of the helicopter more than 150 meters to reduce the noises from the helicopter.

(2) The wider is the range of frequencies of voice louder than the noises from the helicopter, the clearer is the voice. Particularly the voice of a male having no treble is not suitable as voice from the helicopter.

(3) No difference of the sound pressure level on the windward and leeward is found like the articulation reported in the previous report[1].

消防研究所報告

通巻 56 号

昭和58年9月30日発行

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)