REPORT OF FIRE RESEARCH INSTITUTE OF JAPAN
Serial No.45 March 1978

消防研究所報告

通 巻 45 号 1978年3月

目 次

研 究

火災と消火時に発生する水蒸気(第2報)
——木材の燃焼で放出される水蒸気と関連する諸現象——……高橋 哲……(1)
木材の燃焼重量曲線から残留炭素量を推算する方法とその応用……高橋 哲……(7)
燃焼による煤と多環芳香族炭化水素の発生(英文)……守川 時生……(13)
雛壇地形上のクリブの延焼速度……山下 邦博・山本 忠彦……(25)
模型による家屋間延焼の実験的研究……山下 邦博……(33)

消 防 研 究 所
東 京 都 三 鷹 市

REPORT OF FIRE RESEARCH INSTITUTE OF JAPAN

Serial No. 45 March 1978

– Contents –

MEMOIR

The Steam Generated by Fire and Extinguishing
– II. The Steam Generated from The Combustion of
Wood and The Relating Phenomena – ..... Satoshi Takahashi..... (1)

The Method to Estimate The Remaining Char Yield
from The Combustion Curve of The Wood Crib Fire
and Some Application of It ..... Satoshi Takahashi.....(7)

Evolution of Soot and Polycyclic Aromatic
Hydrocarbon in Combustion ..... Tokio Morikawa.....(13)

Experimental Study on The Fire Spread Rate of
Wooden Cribs on The Terraced Ground
..... Kunihiro Yamashita and Tadahiko Yamamoto.....(25)

Experimental Study on House-to-House Fire Spread
..... Kunihiro Yamashita.....(33)

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

火災と消火時に発生する水蒸気（第2報）
—木材の燃焼で放出される水蒸気と関連する諸現象—

高橋　哲

（昭和52年11月29日受理）

1. 緒　言

クリブを燃焼させ，燃焼ガス中の水蒸気濃度を測定してみると，予想外の発生形状を呈することについては前報[1]に一部分触れた。本稿では，さらに系統的にクリブの段数を変え，また絶乾クリブとの比較，燃焼ガス温度との対応関係を通して，放出水蒸気の生成機構を検討した。また燃焼ザス中の凝縮成分の紫外域における吸光度と水蒸気濃度との間に関連性があることについても言及し，最後に，水蒸気の発生形態の導出方法についてモデル化して考察を加えた。

2. 実　験

木材クリブには2.5cm×2.5cm×22.5cmの杉角材を方形配列に組み，その段数を3段から14段まで変化させて使用した。また，吸着水が放出される機構と発生形態に占める役割を知るため，5段および10段の絶乾クリブについても燃焼させ比較に供した。

サンプリングは，クリブ上端面中心上1～2cmの位置で行い，同じ位置でガス温度も測定した。

水蒸気濃度はガスクロマトグラフで決定し，今回はさらに，凝縮物質のエタノール溶液について紫外部の及収スペクトルを島津ダブルビーム分光々度計UV-200で測定した。

クリブの点火に液体燃料を使用すると，クリブ全体が過度に加熱され水蒸気発生機構に乱れを生ずるため，少量のまるめた紙を用い底面から均等に点火した。そしてサンプリングは，点火用の紙が焼失するか，またはこれを除去してから開始した。

なお，この燃焼のさせ方は一斉点火とは異なり，炎が底面から上方に向って一斉に拡大するような方法である。

3. 結果と考察

3.1 水蒸気濃度とガス濃度

クリブの段数毎の放出水蒸気濃度と燃焼経過時間との関係を**Fig.1**に示す。

高温ガス中の水蒸気濃度C_oは，ガス中の水蒸気，凝縮性有機ガス及びその他のガスが占める体積をそれぞれV_{H_2O}，V_{HC}及びV_oとすると，$C_o = V_{H_2O}/(V_{H_2O}+V_{HC}+V_o)$となるが，$V_{HC}$はサンプリング時点で凝縮させてしまうのでその測定は困難であるからこれを省き，以後$C = V_{H_2O}/(V_{H_2O}+V_o)$で定義される値Cをもって水蒸気濃度とする。

Fig. 1から，絶乾クリブの水蒸気発生形態は，使用クリブ段数毎に気乾クリブの場合と類以であることは注目すべきであり，絶乾のものは燃焼速度が早いため気乾のものより早期にピーク値に達することを意味している。この事実は，少くとも気乾以下の含水率では，水の放出形態が吸着水の放出によるというより，燃焼熱分解で生成する水に多く支配されている証拠とみることができる。一般には，点火初期に多量の吸着水が放出されるかの如くいわれているようであるが，強熱時には，吸着水と燃焼熱分解で放出される水の，燃焼時点による差は明瞭ではない。この点，実験室的に少量の試料で熱分解を行なう場合とは機構が異なるとみ

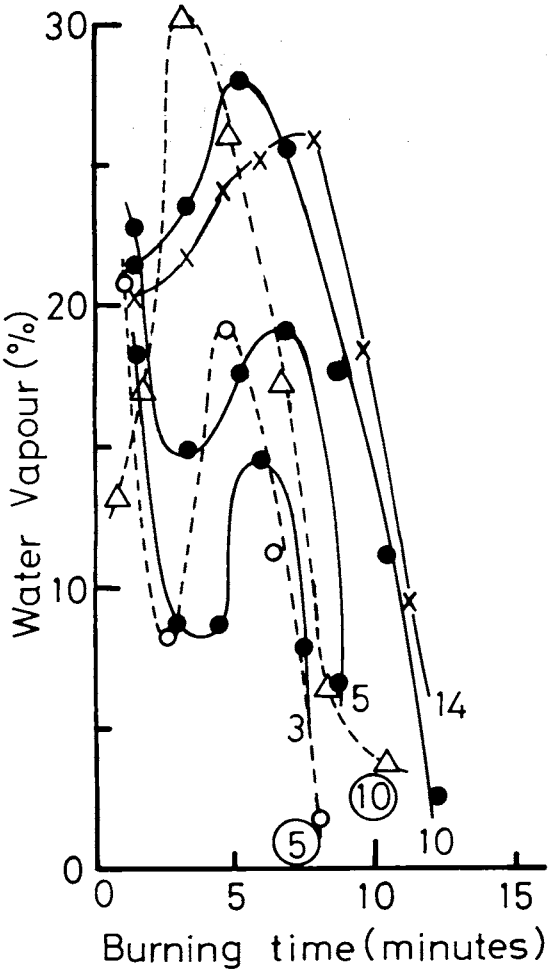

Fig. 1 Water vapour concentration vs. burning time.
—— air dried wood crib (moisture content: 13%)
----- water free wood crib
The number below the curve shows the number of the stick layers.

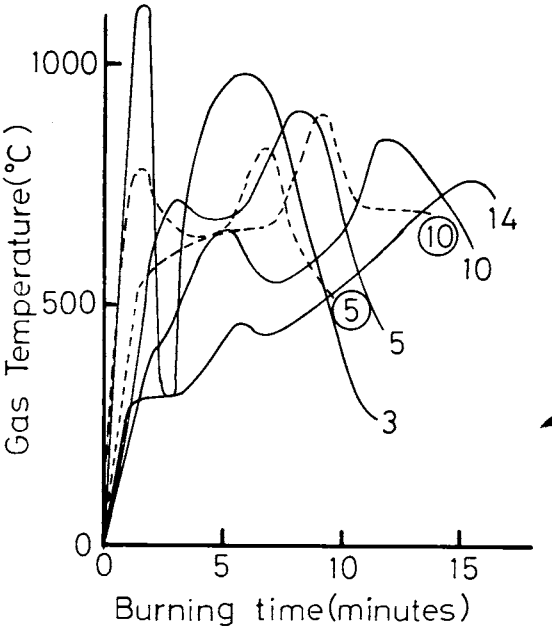

Fig. 2 Welling up gas temperature close to the upper surface of the crib.
The symbols in the graph are explained in **Fig. 1.**

られる。

一方，段数の多い場合程最高水蒸気濃度は高くなる傾向は認められるが，気乾グリブ14段の場合，再度の試験によっても**Fig. 1**の通りであり上述の傾向から外れた。したがってあらゆる範囲のクリブについても同じ事が言えるか否か目下のところ不明である。

つぎに**Fig. 1**の曲線形状を考察するのに先立ち，**Fig.2** にクリブ上端面のガス温度の推移を示しておく。

Fig. 2から，点火後の上端面の温度には二つの山のあることが認められる。前方の山は，炎の先端が上端面から湧出してくる時点と一致して鋭く，後方の山は，木質部の熱分解反応が終りに近付き，炭素の燃焼が盛んになる時点に一致している。段数の低いもの程山のピーク温度の高い事実は明瞭であり，これは恐らく段数の少い場合の方が相対的に空気供給が理論比に近くなっているためと考えられる。

そこで**Fig. 1**と**Fig. 2**を対比させてみると，かなり系統的対応が認められる。すなわち，一般に（**Fig. 1**の3段の場合には，着火後のごく初期の測定値がないので不明）着火初期に，段数の小さなもの程水蒸気濃度が高くなる現象は，**Fig. 2**からみてクリブ全体がより早く高温がスに包まれることと対応している。したがって熱分解反応はより活発となり，また一方この初期の時点では，クリブ表面が未炭化の新しい表面で構成されていることも一因として挙げられるであろう。

Fig. 1に示した曲線群の後半の山は，傾向として**Fig. 2**の後半の山に対応しており，ここは発炎燃焼が終止に近ずき，水蒸気の発生が急低下する直前であるから，恐らく残余の水素化合物が炭素の燃焼に伴なう高温にさらされて激しく分解し尽くすような理由が考えられる。このようにクリブ上端面のガス温度は，ク

リブ内部で起きている変化を把むための面白い指標となりうる。

3.2 燃焼熱分解生成物の吸光特性と水蒸気濃度

サンプリングで凝縮させた物質のエチルアルコール溶液は強い黄褐色を呈しており，肉眼で判断した呈色深度は**Fig. 1**の水蒸気濃度曲線に添ってそのまま変化する事実が認められた。そこで溶出アルコールと同一アルコールを対照として吸収スペクトルを測定したところ，**Fig.3** のように紫外部に強い吸収のある曲線がえられた。

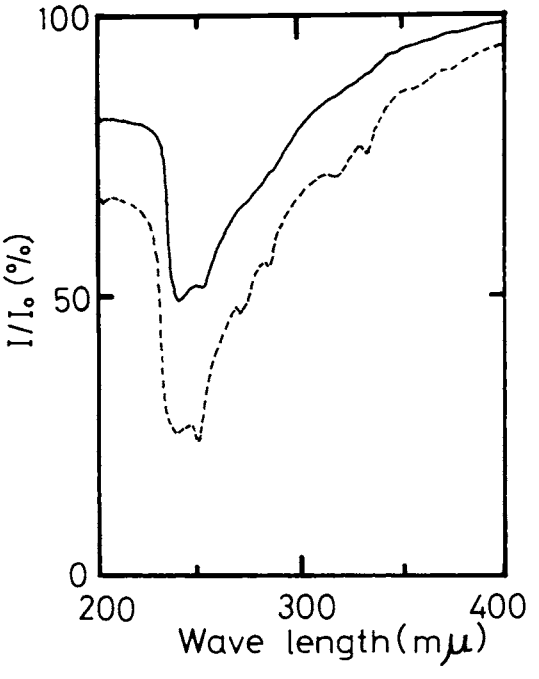

Fig. 3 Transmittance of the condensible substance in ethyl alcohol vs. UV-wave length.
-- lower part in the flame
— higher part in the flame

通常，炎の下端部から採取した凝縮性物質の場合，237.3$m\mu$に最大の吸収があり，250$m\mu$に隣り合うやや低い第２の吸収がある。この最大ピーク波長は，燃焼条件によって多少移動し，しばしば235.6$m\mu$，240$m\mu$または250.5$m\mu$に現われる。しかし，炎の頂部等加熱の進行した部分では250$m\mu$に一個の鋭いピークを持つだけである。リグニン分解物質には，一般にこの付近の紫外部に吸収のある化合物が多いので，主成分となるある種の物質群の構造が，加熱条件に応じて変化した結果と考えることもできる。

視覚的呈色深度を定量化するため，ひとまず237.3$m\mu$における吸光度を用いることにした。サンプリングは凝縮物質を凝縮させた残余の気体の1000mℓを採取し，えられた凝縮物質は200mℓのエタノール溶液として測定することを基準にしたが採取量は各回毎に一定せず，その上，濃度が高過ぎる場合には，溶液を何倍かに希釈しなければ測定できない。溶液は光の吸収に関する一般的指数法測によくしたがうので 1cmのセルで測定した時の吸光度をEとおくと任意のガス採取量 Vmℓ，溶出アルコール溶液量vmℓ，溶液の希釈倍率nに対し，基準となる，ガス量1000mℓ，溶液200mℓ，希釈倍率１の場合に換算した吸光度は(１)式で計算できる。

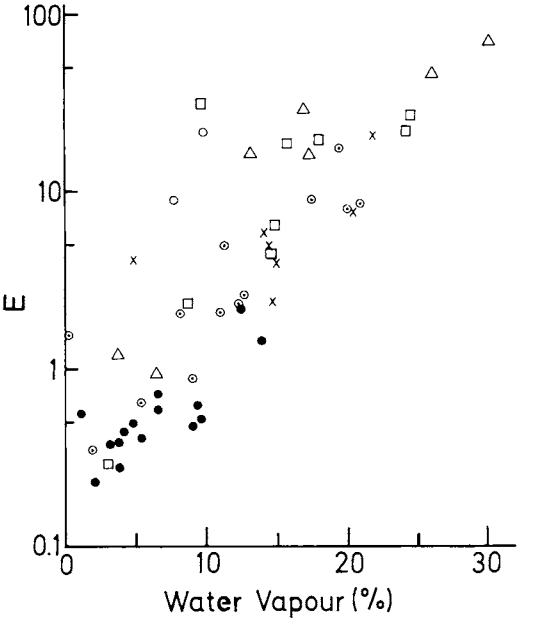

Fig. 4 Absorbance of the ethyl alcohol solution of the condensible substance vs. water vapour concentration

Symbols		Situation	n-N
●	×	air dried	5-5
⊙	○	moisture free	5-5
	△	moisture free	10-5
	□	air dried	14-5

left; at the bottom of the flame
right; at the top of the flame
n; layers number
N; sticks per layer

$$E=\frac{5nv}{V}\mathrm{I}_n\frac{\mathrm{I}_o}{\mathrm{I}} \qquad (1)$$

ここで；I_o，アルコール溶媒単独の透過度(＝1)

I，試料溶液の透過度

(1)式の吸光度Eを水蒸気濃度に対しグラフにプロットすると**Fig.4** がえられた。

Fig. 4 から，気乾，絶乾クリブの炎中，炎頂および経過時間を間わず規則性が認められ，水蒸気濃度が高い程吸光度が大きくなる傾向が明瞭である。ひるがえって煙を考えてみると，煙も結局同じ物質が凝縮したものにすぎないから，光学的濃度の高い煙には水蒸気の含有量も多いことが予想できる。このことは，水とそれ以外の物質とが密接な関連下に放出されていることを示しており，一方，水の放出機構として吸着水が必ずしも燃焼に先行して放出されるとは言えないことを示唆している。熱分解を放出水と関連付けて研究すれば，熱分解機構の解明に有力な手段となるかもしれない。

3.3 残留炭素と水蒸気

残留炭素量については別報[2]にのべた。水蒸気濃度は，炭素の残らない完全燃焼を想定すると，気乾材(含水率10%）の時15%，絶乾材では13%と計算できるのに対し，別報の残留炭素（含水率10%で炭素量22%）を想定すると気乾材25.7%，絶乾材22%と算出できる。

Fig. 1 の測定値は一般に不完全燃焼炎中の分析値となるので，揮発成分を化学量論的に燃焼させた場合の真の水蒸気濃度は今のところわからない。しかし**Fig. 1**，**Fig. 2** をみてみると，段数が比較的低くまた点火初期の炎が湧出してくるような時点では空気の混合比も理論値に近いに違いなく，このような場合，計算値に相当近い濃度が測定されている事実は見落すことができない。このように残留炭素を想定して考察を進めた方が，より正しく燃焼現象に関する理解を得ることができる。

3.4 水蒸気濃度曲線の模型的導出

Fig. 1 に示した水蒸気濃度曲線は段数によってきまった形状を呈している。これを**Fig. 2** の温度曲線と比較しながら考察をすすめると，曲線形状を支配する理由として次のような機構が浮び上ってくる。

すなわち，段数の小さいクリブでは，**Fig. 5** に示すように，点火直後の着火領域が全体に占める割合が，より段数の大きいものに比べて相対的に大きい。したがって，クリブ全体がより早期に炎に包まれ，しかもより高温に加熱されることは**Fig. 2** から明らかである。

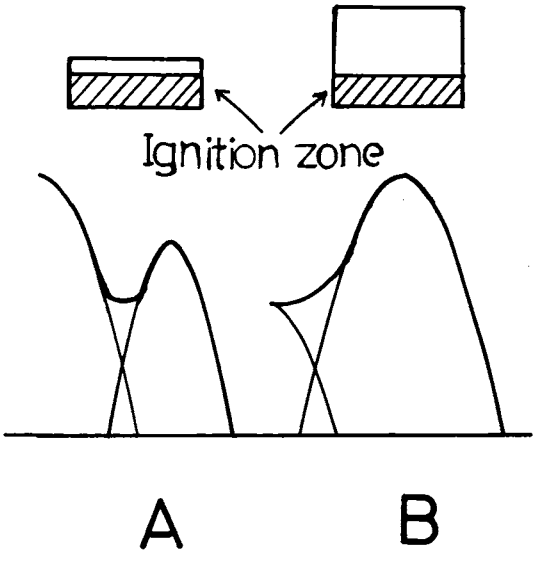

Fig. 5 Synthesis model of the water vapour concentration by changing the number of the layers.
The kindled part occupy relatively bigger volume in the left crib A, so the mountaineous water generation curve becomes smaller relative to the decreasing curve from the initially kindled part. By the synthesis of the two curve, we obtain the similar graph in **Fig. 1**.

水蒸気濃度の測定は，既述のように点火源を取除いてから行ったので，**Fig. 1** には加熱初期の形状は示されてない。しかし，小さな点火源によって点火される一個の木片の燃焼過程を考えると，初期には新らしい未炭化の表面がつぎつぎと加熱拡張されてゆくため，水蒸気の放出速度もある時点まで増大し，次いで炭化層の形成に伴って減少してくるような山形の放出曲線形状を呈するにちがいない。しかしすでに一部分が着火しているものを，その時点から考察するに際しては，この木材を着火都分と未着火の都分に分割して考えることにする。未着火都分は水蒸気を山形の曲線形状に放出するのに対し，着火部分ではすでに山形のピーク値付近まで放出が進行してしまっているため，それ以後はほぼ減少する形で放出するにちがいない。したがって，この木材からの水蒸気放出曲線形状を全体としてみる場合，二つの曲線の重畳合成されたものとなり，細かな形状の相違は，着火部分と未着火都分の相対的割合によって決まってくるものと考えることができる。

Fig. 5 のグラフは，この模様を模型的に示したもので，Aは着火部分の全体に占める率が大きく，Bではその反対となっている。合成曲線は段数毎に**Flg. 1**の形状となるので，空気の巻込み量等その他の要因もあるであろうが，ここに記述した理由で良く説明できる。

4. まとめ

木材クリブをモデルとした燃焼実験の結果，水蒸気濃度がクリブ上端面のガス温度，残留炭素量と密接な関係があり，また凝縮物質の紫外部吸収特に237.3mμにおける吸光度との間に関連性があることがわかった。そして絶乾クリブの燃焼実験結果とも併せて考察を進め，水蒸気の発生形態は吸着水よりも燃焼熱分解で発生する水に支配されていることをつきとめ，さらにクリブの積上げ段数による水蒸気発生曲線の形状の相違についてもモデル化した説明をおこなうことができた。

本稿の結果は，熱分解と酸化燃焼の混合した条件下のものであり，今後，木質部の熱分解単独および熱分解で生成した炭化水素がさらに熱分解減成される過程で放出される水蒸気を，各々別に解明してゆくことによって一層理解が深まるものと思う。

文　献

1）高橋　哲，火災と消火時に発生する水蒸気(1)消防研究所報告，No.43，7（1977）

2）高橋　哲，木材の燃焼重量曲線から残留炭素量を推算する方法とその応用，消防研究所報告No.45,7（1978）

The Steam Generated by Fire and Extinguishing —II. The Steam Generated from The Combustion of Wood and The Relating Phenomena—

(Abstract)

Satoshi Takahashi

(Received November 29, 1977)

The water vapour concentration at the bottom of the flame of the wood crib was measured and correlated with other experimentally obtained data like welling up gas temperature, char yield and UV-absorption of the condensible substance, and the mechanism of the water generation curve was considered.

A summary of the results is shown below.

As the experimental facts;

1. The water vapour concentration is ruled not by the absorbed water, but is dependent upon the water generated by the thermal decomposition of wood components and maybe upon the low degree oxidation of the volatile substance.
2. The water vapour concentration is intimately correlated with the combustion gas temperature, the concentration becomes higher when the gas temperature rise more.
3. The char yield should be counted so as to obtain a more reasonable water vapour concentration.
4. The absorbance at 237.3 mμ of the yellowish brown condensible substance in ethyl alcohol has deep correlation with the water vapour concentration in the evolved gas.

And the following water generation mechanism was assumed successfully.

5. The generation concentration of the water from a wood when kindled with a small fire source will show mountaineous shape to combustion time.
6. The generation concentration of the water from a wood when involved in the flame will show decreasing shape to combustion time.
7. The generation concentration of the water from a partially flaming wood can be obtained by the synthesis of the two foresaid curves No. 5 and No. 6.

The mechanism of water vapour generation will be studied successively.

木材の燃焼重量曲線から残留炭素量を推算する方法とその応用

高橋　哲

（昭和52年11月29日受理）

1. 緒　言

木材の燃焼に伴って残留蓄積する炭素量について知ることは，実際の火災に関連した諸現象を考察するに当って基礎となるものである。

実験室的に脱水木材試料を不活性ガス中で熱分解して炭素収量を求めた例についてはすでに多数報告[1)~4)]されているが，実際に燃焼を伴なわず，しかも全乾状態に近い実験室での結果が，そのまま実火災の解析に適用できるかどうかについては疑問がある。実火災に応用するためには，なによりも実際に近い条件で木材を燃焼させ，そこから炭素収率を求めてみることが必要である。

本稿には，クリブを燃焼させた時の重量減少曲線から残留炭素量を求める方法について検討し，さらに応用例についても触れた。

2. 実験方法

クリブは鉄枠に金網を張った皿にのせ，鉄線で吊るしてロードセルに結んだ。クリブを構成する木材は杉角材の2.5cm×2.5cm×22.5cmのものを用い，5段5列にクギ止めして実験に供した。点火は低面に均等に行い，炎が上方に向け一斉に拡大するように燃焼させた。

木材含水率はKett MT-8S型水分計（4～30%）で測定したが，測定可能範囲以下の含水率は，予め水分計で測定しておいた杉角材を乾燥器中 110℃で乾燥させ，必要な重量だけ減少乾燥した時点を見計らって取出し，デシケーター中で24hr以上放置してから再度計量して決定した。

重量変化は記録計に記録させたが，他にクリブの底部から開始されるグロー燃焼（炭素単独の酸化燃焼）の開始時点および主として頂部における発炎燃焼の終了時点をストップウォッチで計時しておき，重量減少曲線と対比させて燃焼相変化との関連を考察した。なお，使用したクギの重量は差引いて考察した。

3. 結果と考察

3.1 実火災における炭素収率

燃焼重量曲線は**Fig. 1**のようになることはよく知られている。しかし，筆者の実験では，発煙燃焼の終了後，グロー燃焼についても充分時間をかけ，クリブの形状を保った炭素塊が崩壊に致るまで注意深く観測した点が重要な意味をもっている。

筆者は燃焼重量曲線を**Fig. 1**のように4つの領域（Region）に分割して考察を進めるが，いうまでもなくRegion－Ⅰは炎の拡大伝播域，Region－Ⅱは発炎定常燃焼域である。Region－Ⅲは肉眼での観察に頼る以外に方法がないが，常に底部のグロー燃焼の開始と対応して始まり，頂部又はその他の部位の発炎燃焼の終了に対応して終了する。Region－Ⅳはグロー燃焼域で，Region－Ⅲの終了と同時にたいてい定常的に燃焼が進行し，炭化した木材が細るか又は崩壊する時点から曲線となることが認められた。そこでこのRegion－Ⅳの定常燃焼域に接線を引く。しかし，気乾状態で含水率13%位の場合に比較的定常燃焼しないものが多いので，この時は観察によってRegion－Ⅳが開始される時点で曲線に接線を引いた。そしてRegion－ⅡとRegion－Ⅳ

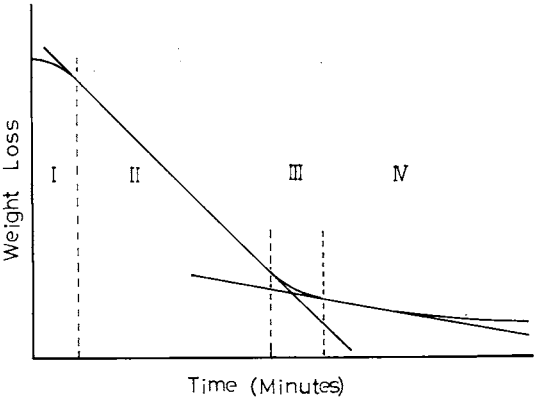

Fig. 1 Weight loss vs. combustion time.
The intersectin of the two tangent gives char yield.

の接線の交点の重量を求める。Region－Ⅲは発炎燃焼とグロー燃焼の混在域での重量曲線であるから，Region－Ⅱの接線の交点方向への延長線分は，仮想的に木質部による発炎燃焼がクリブ全体を通して均等に進行し，ある瞬間に木質部が消失して全体が炭化しグロー燃焼に移行することを示している。したがって元の木材の化学組成から交点の炭素重量を差引いたものは，Region－ⅠとRegion－Ⅱを含めた発炎燃焼部分の平均燃焼組成を与えるものとみなせる。そこでこの交点の重量率Y′を含水率ϕに対してプロットしてみると**Fig. 2**のようになる。

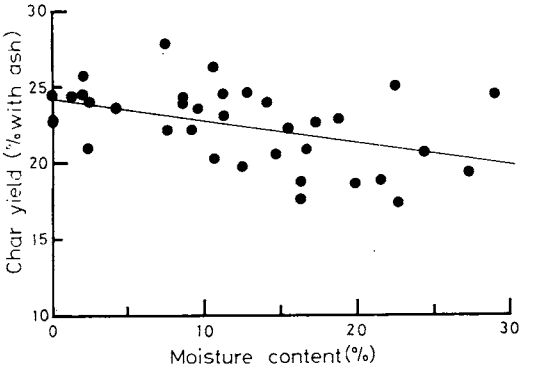

Fig. 2 Char yield depend on the moisture content.

通常，杉材は 0.5%位の灰分を含んでいるので，真の炭素収量YはY＝Y′－0.005で示すことができ，**Fig. 2** から最小自乗法で計算して(1)式が得られた。

$$Y=0.237-0.143\phi\ (\phi=0\sim0.3) \qquad (1)$$

吸着水を除いた木質部に対し，炭素が一定収率kで生成すると仮定するとY＝k(1－ϕ)となるはずであるが(1)式は含水率の高い方が木質部に対して炭素収率も高くなることを示している。

炭素収率についての既述の報告は概ね15～25%位の範囲にあり，加熱程度や灰分量等の条件によってかわる事もA.F. Robert[4] F.J. KILZER[5] 等が述べている。(1)式の結果は一般にそれ等文献値より少し大きいが，完全に発炎燃焼が停止して炭化した時点でも20%をはるかに越す残存重量のあることが普通に観測されており，この値は実際の燃焼に伴う炭素収量として決しておかしくはない。

3.2 木材の燃焼に必要な空気量，排ガス量および発熱量

実火災現象の解析にあたって必要空気量，排ガス量，発熱量を用いる場合残留炭素を顧慮することなく，完全燃焼時の量を使用している場合[6]がほとんどである。したがってそのような場合，完全燃焼率や空気過剰率等の持つ実質的意義は便宜的なものでしかなくなる。そこで改めて(1)式に基づいて，木材1kg中の揮発成分の完全燃焼に必要な最少空気量L_o^f，排ガス量G_o^fおよび発熱量Q_o^fを求めてみる。

木材含水率がϕ＝0.1の場合，木材組成をC＝45.04，H＝5.45，O＝39.01，H_2O＝10，灰分＝0.5(以上%)[7)脚注]および杉材1kgの完全燃焼時の発熱量を4000 Kcal/kgとおくと簡単な計算によって次のように求まる。

$$\left.\begin{aligned} L_o^f &= 2.175\,(m^3/kg\,;\ 0\,℃,\ 1\,atm) \\ G_o^f &= 2.875\,(m^3/kg\,;\ 0\,℃,\ 1\,atm) \\ Q_o^f &= 2\,253\ (Kcal/kg) \end{aligned}\right\} \qquad (2)$$

L_o^f, G_o^f, Q_o^fを実験的に測定される重量燃焼量に換算した時の値をL_o^m, G_o^m, Q_o^mとおく。ϕ＝0.1の時，式(1)からY＝0.223となるから，実際には(1－0.223－0.005)kgの重量しか失なわれていない。そこで1kgの重量損失に換算するにはL_o^f, G_o^f, Q_o^fを(1－0.223－0.005)で除して，

$$\left.\begin{aligned} L_o^m &= 2.817\,(m^3/kg\,;\ 0\,℃,\ 1\,atm) \\ G_o^m &= 3.724\,(m^3/kg\,;\ 0\,℃,\ 1\,atm) \\ Q_o^m &= 2\,918\ (Kcal/kg) \end{aligned}\right\} \qquad (3)$$

を得る。

脚注）元素組成は樹種間にほとんど差がないので，ここでは文献の針葉樹の平均値をとった。又灰分量は生育条件でも異なるが文献7)その他を参考にして，大略0.5%が妥当と考えた。

3.3 火災室内の木材の燃焼速度

火災室内の燃焼速度については川越[8]によって実験および理論式が導かれ，一般式$R=KA\sqrt{H}$(kg/min)が与えられている。川越は定数Kを5.5とし，Thomas[9]は6.0，その他多くの研究者の実験ではK[10]はおおむね5～9の範囲にあるが，中には10を越す値[11]も測定されている。

筆者は発炎燃焼によって実質的に焼失する木材量と実験的に重量損失として観測される量を区別して考慮し(2)および(3)の値を使用し文献[12]にしたがって，計算して次式をえた。

発炎燃焼速度　$R_f=10.7A\sqrt{H}$ (kg／min)　(4)

重量燃焼速度　$R_m=8.3A\sqrt{H}$ (kg／min)　(5)

ただし，ここで次のように定義する。

発炎燃焼速度：単位時間に木質部が発炎燃焼によって炭化する部分の重量を，燃焼前の木材組成に換算した重量変化

重量燃焼速度：単位時間の木質部の重量損失（熱分解による気化損失重量と残留炭素の一部が酸化して失われる重量の和）

上記研究者等の値は重量損失量に基づくものであり筆者の得た値 8.3はそれらの値と比べて特にかけ離れたものではない。ただし，空気過剰率，開口係数等その他の数値は川越，関根の使用した値をそのまま使用した。特に開口係数と流入空気の温度は，計算式上直接燃焼速度に影響するので，それ等を含め今後，残留炭素を考慮に入れることによって，より信頼性のある理論式が導出できるものと思う。

3.4 含水率と燃焼速度の関係

重量燃焼曲線から求めた含水率と重量燃焼速度 γw およびグロー燃焼速度 γc の関係を **Fig. 3** に示す。

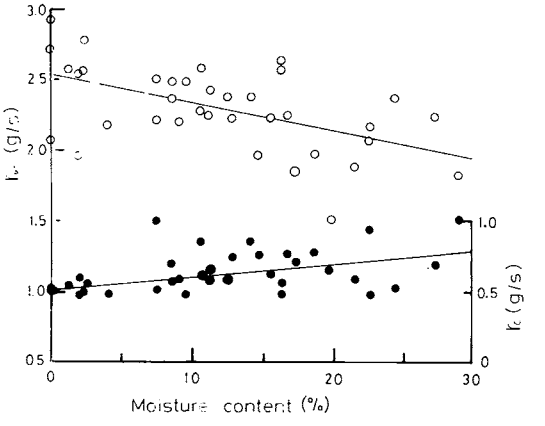

Fig. 3 Flaming and glowing combustion rate vs. moisture content.
$\gamma w = 2.53 - 1.98\phi$ (g/min)
$\gamma c = 0.511 + 0.935\phi$ (g/min)

残留炭素の燃焼速度が，一見関係のない元のクリブの含水率とも関係しており，含水率の高い程燃焼速度の大きくなる現象が認められた。

5. まとめ

実火災において，定常発炎燃焼域およびグロー燃焼域の接線の交点重量が残留炭素量を与える。そして木材の化学組成からこの量を差引くことによって，発炎燃焼物質の平均化学組成が得られる。

すなわち，木材含水率 ϕ と炭素収率Yとの間に

$Y=0.237-0.143\phi$

の実験式を得，この残留炭素量を考慮して，実火災における発炎燃焼に必要な空気量，排ガス量，発熱量を算出した。また室中における燃焼速度にも残留炭素を考慮し，発炎燃焼速度と重量燃焼速度を区別すべきであることを示した。

References

1）新居六郎：消防研究所報告，3，2，17～24（1952）

2）A.F.Roberts：Combustion and Flame，8，245～46（1964）

3）ibid，8，345～46（1964）

4）ibid，17，79～86（1971）

5）F.J.KILZER，A.BROIDO：Pyrodynamics，2，151～63（1965）

6）火災学会消防戦術専門委員会報告：火災，27，4，38～45（1977）

7）石田伸彦，米沢保正，近藤民雄編：木材化学(上) p.65，共立出版（昭和49年）

8）Kunio Kawagoe：Report of the Building Research Institute，27，Sept（1958）

9) P.H.Thomas : The institution of Fire engineers Quarterly, 197～219 (1961)
10) A.J.M.HESELDEN, P.H.THOMAS, MARGARET LAW : Fire Technology, May, 123～25 (1970)
11) 斉藤文春, 火災, 22, 4, P7 (1972)
12) 川越邦雄, 関根孝 ; 火災学会論文集, 13, 1, 1～12 (1963)

The Method to Estimate The Remaining Char Yield from The Combustion Curve of The Wood Crib Fire and Some Application of It

(Abstract)

Satoshi Takahashi

(Received November 29, 1977)

It is becoming increasingly important to know about the chemical composition that is concerned in flaming combustion of the real wood fire so as to analyse and appreciate properly about the fire phenomena, but at present it seems that many papers describe only about laboratory results depending not on the real fire, and also limited to moisture free bases, maybe because there lies difficulties and no measures are cultivated yet to obtain from it.

In this paper, the model fire of the Japanese cidar wood crib of the geometry five layers x five sticks per layer (the size of sticks 2.5 cm x 2.5 cm x 22.5 cm) was used, and weight curve was recorded until the glowing combustion terminate almost completely or collapse, then it was observed that the glowing combustion curve, when the flaming combustion terminated, showed straight line for almost all cases.

On this fact, the author divided the combustion curve into four region, that is, the propagation zone Region I, the flaming constant combustion zone Region II, the mixed state of flaming and glowing combustion Region III and then the glowing combustion zone Region IV.

The mass of the intersection of the tangent of Region II and Region IV must give the remaining weight of carbon when the wooden part assumed to decompose constantly and change to carbon in an instant. So, by reducing the amount of carbon from the original wood composition, we obtain the average volatile composition.

In this way, the correlation between char yield Y and moisture content ϕ was obtained as follows.

$$Y = 0.237 - 0.143\phi \ (\phi = 0 \sim 0.3)$$

From the above equation, by discriminating the real fire, viz. the flaming combustion and experimentally observed mass loss, the necessary quantity of air, evolved gas volume and the calorific value were calculated.

The other interesting application is on the combustion rate in a room. The flaming combustion rate R_f based on real loss of wooden part and the mass combustion rate R_m were calculated separately, that must have more essential meaning than conventional one.

燃焼による煤と多環芳香族炭化水素の発生

概　要

守川時生

（昭和52年12月６日受理）

最近の建物火災では，多量の煙，特に黒煙の発生を伴うことが多い。この黒煙は，主として，プラスチックなど合成高分子物質の燃焼によって発生する煤によるものと思われる。そこで，本研究においては，煤の発生量と，その中に含まれる多環芳香族炭化水素，特にベンゾ(ａ)ピレンの量を調べた。各種合成高分子物質の中から，芳香環を含むものの代表としてポリスチレン，含まないものの代表としてポリエチレンを選び，主にそれらについての実験を行なった。煤の発生は，一般に，温度が高くなるほど，多くなった。空気の供給は，ある程度大きいほど，ポリエチレンでは煤の量が増大したが，ポリスチレンでは減少した。煤の中のベンゼン不溶物は，温度，空気供給が高く（大きく）なるほど増大した。ベンゾ(ａ)ピレンも，温度が高いほど，発生量は増大したが，空気の供給は，それを増大させると煤の量とは無関係に減少する傾向がみられた。900℃という高温においては，ポリエチレンからの煤の発生量は，ポリスチレンからのものに比べて，1/3～1/4であったが，ベンゾ(ａ)ピレンの発生量は，逆にポリエチレンからの方が少し多かった。ポリ塩化ビニルや，ポリアクリロニトリルからも煤の発生量は多かったが，ベンゾ(ａ)ピレンの量は少なかった。以上のことから，ベンゾ(ａ)ピレンと煤の生成の間に相関々係はないといえる。さらに，ベンゾ(ａ)ピレンと他の多環芳香族炭化水素の発生量の間には，相関々係がみられるのでベンゾ(ａ)ピレンにとどまらず，他の多環芳香族炭化水素も，必ずしも煤の中間生成物ではないといえそうである。

Evolution of Soot and Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Combustion

Tokio Morikawa

(Received December 6, 1977)

The evolutions of soot and polycyclic aromatic hydrocarbons, especially, benzo(a)pyrene, were determined, when various polymers were burned or pyrolyzed in a furnace under different conditions. The evolutions of both soot and benzo(a)pyrene generally increased with increasing temperature. The increase of air supply rate did not always contribute to the decrease of their evolutions unless the air supply rate was too high. At high temperatures with relatively low air supply rate, more benzo(a)pyrene was evolved from polyethylene than from polystyrene, while 3 to 4 times greater amount of soot was evolved from the latter. Benzo(a)pyrene evolution was very small from polyvinylchloride, polyacryl nitrile, and also from polyethylene in halogenated hydrocarbon-containing air, though a considerably great amount of soot was evolved from them. It can be said that there is no direct relationship between soot and benzo(a)pyrene productions, and that polycyclic aromatic hydrocarbons will not necessarily be intermediate products of soot.

INTRODUCTION

Great evolution of black smoke is one of the features about recent fires. It is considered that synthetic polymers or plastics are the main source of the black smoke, and that soot is responsible for the black color.

Very few works have been done on production of soot in fire situations. Smoke density, or amount of smoke is usually measured optically, not by weight. But, in a way, soot-containing black smoke is more dangerous than white smoke. That is, (1) Black smoke could induce fear and panic because soot particles not only shorten the visibility but also darken the place by absorbing light. (2) Soot particles could affect the respiration by plugging the lungs especially when synegistic effects due to other combustion products are added.

It has been believed that soots contain polycyclic aromatic hydrocarbons, some of which are carcinogenic. A number of workers have been studying on polycyclic aromatic hydrocarbons in airborne dusts, cigarret smoke, auto-exhausts, soots from the combustion of gaseous fuels, etc. But, few works have been done on the evolution of polycyclic aromatic hydrocarbons from the combustion of polymeric materials. Benzo(a)pyrene and other polycyclic hydrocarbons are not considered to have acute toxicity. But, people who are often exposed to fires, fire fighters, fire engineers, fire researchers, etc. should have knowledge about chronic toxicity of fire products.

In the present study, the evolutions of soots and solid products, and polycyclic aromatic hydrocarbons, especially benzo(a)pyrene, from burning various polymers under different conditions were determined.

EXPERIMENTAL

Combustion or pyrolysis was carried out in a quartz tube inserted into a cylindrical electric furnace. Soot and other products, which are solids at normal temperature, were collected with fine glass wool in a intake port, a cold trap, and a glass fiber thimble, as shown in Fig. 1. This collecting system was used for the purpose of polycyclic aromatic hydrocarbons determination. For the collection of soot only, the cold trap was omitted., and for the determination of carbonaceous residue after extracting soot with a solvent, soot was collected directly into a glass fiber thimble packed with fine glass wool.

The temperature in the quartz tube was controlled automatically using a chromel-alumel thermocouple inserted into the quartz tube. But, to minimize the fluctuation of the furnace temperature, the regulation of the output voltage of the transformer connected to the furnace was necessary. The thermocouple was situated a little upstream from the specimen so as not to be affected by decomposed products and flames. The specimen was placed in an aluminum foil boat and inserted by a spoon into the quartz tube 25 cm from the outlet of the furnace. When the specimen finished burning, another one was inserted, and this process was repeated until usually 1 gram of the sample was consumed. During the experiment, air was supplied into the quartz tube usually at the rate of 1.83 ℓ/min. Twenty centimeters of the quartz tube were outside the furnace outlet, and the solid products and soot deposited on this part of the tube were scraped into the soot intake port.

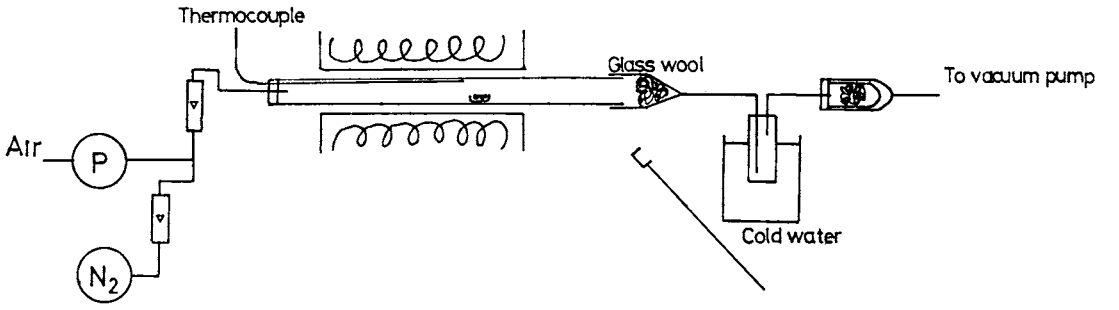

Fig. 1 Schematic diagram of apparatus.

For the determination of soot evolution, the soot intake port was dried in a vacuum oven with silicagel in it at the room temperature before and after collecting soots, and weighed. It was also weighed immediately after collecting soots to determine the weight of undried soots.

The determination of the ratio of benzene extract to carbonaceous residue in soots was made by extracting the soots collected in a glass fiber thimble in a Soxhlet apparatus with benzene for over 8 hours. All the drying processes were made in a vacuum oven mentioned above, except that the glass fiber thimble after benzene extraction was dried at 105°C.

For the determination of polycyclic aromatic hydrocarbon, samples for gas chromatography were prepared in the following process: 1. All the soot and glass wool in the intake port was transfered into the thimble in the soot collecting line. 2. All the parts before the thimble in

the soot-collecting line were washed a few times with cyclohexane, and the washings were poured into a Soxhlet apparatus through the thimble. 3. After adding an adequate amount of cyclohexane, the Soxhlet apparatus was heated to near 100°C, and the extraction was made for over 8hours 4. The extract was evaporated to a volume of about 10 mℓ. 5. The concentrated extract was shaken 5 times with 10 mℓ of nitromethane each to recover the aromatic hydrocarbons.[1] 6. The combined nitromethane fractions were evaporated to 5 – 10 mℓ of volume, which was used as the sample for gas chromatography.

The determination of polycyclic aromatic hydrocarbons was carried out by means of gas chromatography using a glass capillary column (30 m long, 0.3 mm I.D.) and a flame ionization detector. The working conditions were: column temperature, 258°C constant, or 200 – 258°C with the temperature rise rate of 4°C/min; injector temperature, 310°C; detector oven temperature, 280°C; carrier gas, nitrogen; column flow rate, 1 mℓ/min; splitter, 1:50 ratio; sample size, about 3 μℓ. As an internal standard 1,3,5-Triphenylbenzene was used.

RESULTS AND DISCUSSION

Evolution of Soot and Solid Products

Polyethylene and polystyrene were taken to be the representatives of aliphatic and aromatic polymers respectively. The evolutions of soot from them were determined with regard to the heating temperature and the sample weight in each insertion. The results are presented in Table 1. The evolution of soot from both of them was generally greater at higher temperatures with the exception of the combustion of polyethylene at 600°C. The soot from polystyrene decreased in quantity with increasing relative air supply rate (the air supply rate / the sample weight in each insertion) at such high temperatures as 900°C. It is believed that oxygen served to rupture the aromatic rings from polystyrene in the atmosphere, thus leading to less soot formation. On the other hand, the evolution of soot from polyethylene at 900°C increased with increasing relative air supply rate until the rate exceeded a certain level. It is probably because the presence of oxygen raised the reaction temperature thus leading to greater amount of soot formation. It can be said from the above that the increase of air supply is not always unfavorable for soot formation.

The evolution of soot from polystyrene was approximately 3 to 4 times greater than that from polyethylene at high temperatures when the relative air supply was not too high.

The percentage of the carbonaceous residue in soot and solid products (materials insoluble in benzene) increases with increasing relative air supply rate and increasing temperature, as presented in Table 2. The carbonaceous residue is believed to be mostly polybenzoid hydrocarbons. Under the conditions of higher heating temperatures and considerably higher air supply rates, the percentage of carbonaceous residue was higher, presumably because the higher temperature and more oxygen in the atmosphere helped decomposition, polymerization, oxidation, and dehydrogenation reactions to become more active leading to the formation of polybenzoid hydrocarbons.

Polystyrene soot contained more carbonaceous residue than polyethylene soot, when these soots are produced under the same condition. It suggests that polybenzoid hydrocarbons are produced more easily from aromatic polymers than from aliphatic polymers.

Table 1 Soot evolution

No.	Materials	Heating temperature (°C)	Weight of sample in each insertion (mg)	Soot evolution $\frac{\text{Undried(mg)}}{\text{Sample(mg)}} \times 100(\%)$	$\frac{\text{Dried(mg)}}{\text{Sample(mg)}} \times 100(\%)$
1	Polyethylene	600	1000	26.8	24.8
2	〃	〃	500	19.8	18.4
3	〃	〃	250	13.3	12.1
4	〃	〃	167	8.2	7.6
5	〃	〃	125	6.7	6.2
6	〃	700	1000	5.1	4.7
7	〃	〃	500	4.3	3.9
8	〃	〃	250	4.8	4.6
9	〃	〃	167	4.9	4.6
10	〃	〃	125	5.2	5.0
11	〃	800	1000	6.3	5.5
12	〃	〃	500	7.1	6.5
13	〃	〃	250	7.2	6.6
14	〃	〃	167	8.2	7.6
15	〃	〃	125	9.1	8.6
16	〃	900	1000	10.8	9.3
17	〃	〃	500	12.8	11.5
18	〃	〃	250	15.2	14.3
19	〃	〃	167	16.4	15.5
20	〃	〃	125	17.9	17.3
21	〃	〃	63	19.1	18.6
22	〃	〃	63*	22.2	22.0
23	〃	〃	32*	21.5	21.4
24	〃	〃	16*	16.6	16.4
25	Polystyrene	600	1000	19.5	17.9
26	〃	〃	500	20.5	19.0
27	〃	〃	250	22.6	21.0
28	〃	〃	167	22.5	21.6
29	〃	〃	125	21.4	20.5
30	〃	700	1000	25.8	23.4
31	〃	〃	500	26.9	24.9
32	〃	〃	250	25.7	24.1
33	〃	〃	167	27.0	26.0
34	〃	〃	125	27.2	26.2
35	〃	800	1000	38.6	36.0
36	〃	〃	500	39.5	37.7
37	〃	〃	250	38.8	37.9
38	〃	〃	167	39.5	39.0
39	〃	〃	125	38.6	38.0
40	〃	900	1000	50.9	49.3
41	〃	〃	500	49.3	48.4
42	〃	〃	250	49.2	48.5
43	〃	〃	167	47.8	47.5
44	〃	〃	125	45.7	45.2
45	Polyvinylchloride	700	250	14.8	13.7
46	〃	900	〃	20.0	18.4
47	Polymethylene methacrylate	700	〃	3.5	3.3
48	〃	900	〃	7.5	7.3
49	Polypropylene	700	〃	6.8	6.5
50	〃	900	〃	21.0	20.0
51	Polyacrylonitrile	700	〃	15.2	14.6
52	〃	900	〃	20.8	20.1
53	Cellulose	700	〃	0.5	0.5
54	〃	900	〃	1.0	1.0

Air supply rate: 1.83 ℓ/min
*Air supply rate: 3.66 ℓ/min

Table 2 Benzene extract in soot

No.	Materials	Heating temperature(°C)	Weight of sample in each insertion(mg)	Benzene extract in soot(%)
1	Polyethylene	600	1000	90
2	"	"	250	78
3	"	"	125	69
4	"	900	1000	77
5	"	"	250	61
6	"	"	125	53
7	Polystyrene	600	1000	68
8	"	"	250	52
9	"	"	125	46
10	"	900	1000	45
11	"	"	250	33
12	"	"	125	22

Air supply rate: 1.83 ℓ/min

The evolutions of soot from other polymers are also presented in Table 1. It is found that at high temperatures all the synthetic polymers used in the Prpresent study produced 1-2 orders of magnitude greater amounts of soot than celluloze did. This is the reason why genereally smoke from synthetic polymers looks darker than that from wood.

Among the synthetic polymers used here, other than polystyrene, polyvinylchloride and polyacrylonitrile produced a noticiably great amount of soot. These two readily release HC1 or HCN when heated, and possibly turn into conjugated polyenes which are considered to be intermediates to polybenzoid hydrocarbons.

Evolution of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons

Gas chromatographic analysis was used for the determination of polycyclic aromatic hydrocarbons.

First, an attempt was made to select a column suitable for this determination by testing Silicone rubber SE 30 (1%)-packed column, OV-101 and OV-17 glass capillary columns. As expected, SE-packed column was poor in separating some of polycyclic aromatic hydrocarbons. Both OV-101 and OV-17 glass capillary columns were satisfactory in separating them, provided that their boiling points were relatively low. Finally the latter was employed because of its higher maximum working temperature.

The standard materials available were limited to those shown in Fig. 2. All the standards were well separated except 8 and 9 when the temperature rise of the column oven was programmed at 4°C/min from 200 to 258°C. At the constant temperature of 258°C, the peaks of 6, 7, 8, and 9 were satisfactorily separated, as shown in Fig. 3. It is noted that 1,3,5-triphenylbenzene eluted earlier than pelylene from OV-17 column, while the latter did earlier from OV-101 column.

For the qualitative and quantitative analyses, the programmed temperature and the constant temperature were respectively used. The identification of polycyclic aromatic hydrocarbons were made by the retention time.

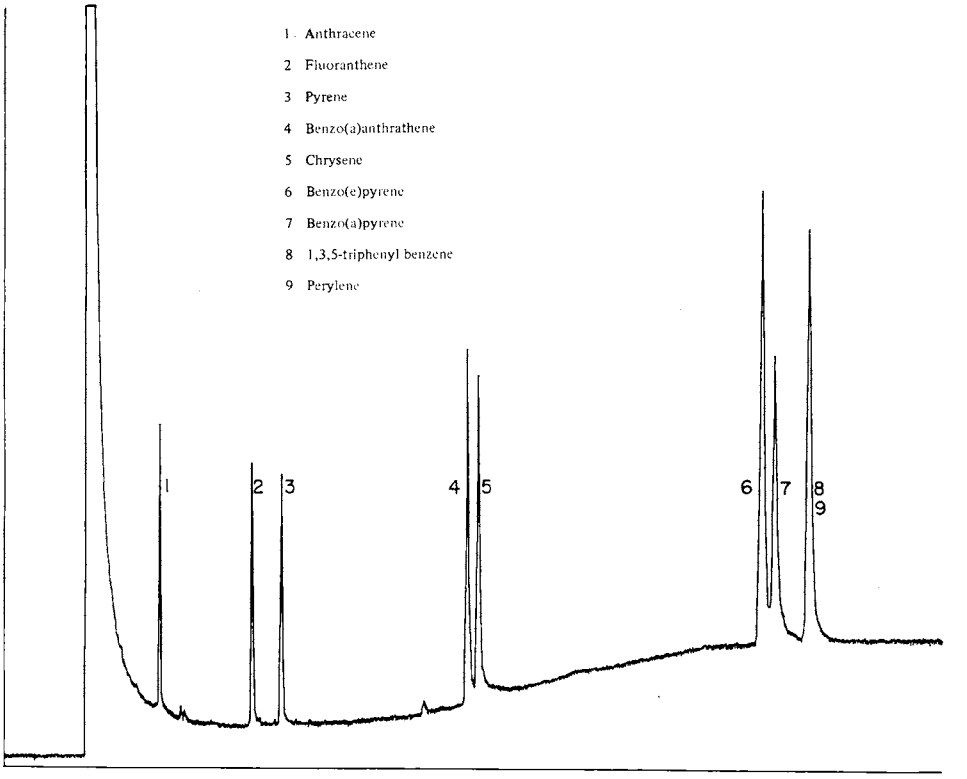

Fig. 2 Gas chromatogram of standard polycyclic aromatic hydrocarbons. The peak numbers correspond to the materials given above.
Column temperature: 200 – 258°C 4°C/ min (programmed)

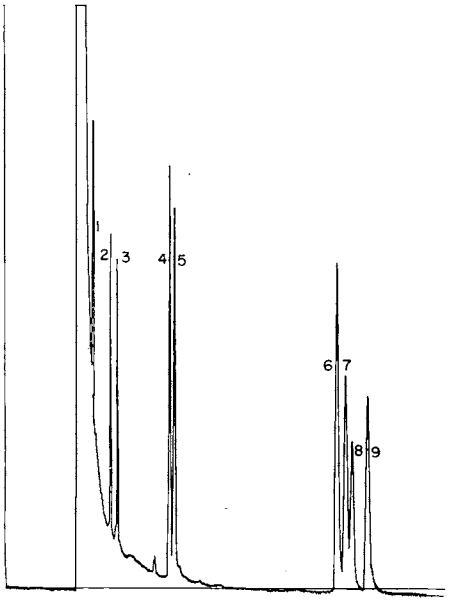

Fig. 3 Gas chromatogram of standard polycyclic aromatic hydrocarbons.
Column temperature: 258°C

As shown in Fig. 4, all the standard materials were found in the soot from polyethylene. The evolution of polycyclic aromatic hydrocarbons from other materials was roughly similar in pattern to that from polyethylene. Benzo(a)pyrene was adopted as an indicator of polycyclic aromatic hydrocarbons, as was done by others,[2] and the quantitative determinations were only made for benzo(a)pyrene. 1,3,5-triphenylbenzene was selected as an internal standard, because not more than trace amount of it was detected in all cases, and because its retention time was quite close to benzo(a)pyrene's.

The evolution of benzo(a)pyrene from polyethylene and polystyrene was determined with regard to the heating temperature and the sample weight in each insertion which is inversely proportional to the relative air supply rate. The results are presented in Table 3.

For both polyethylene and polystyrene, the evolution of benzo(a)pyrene increased with increasing heating temperature, but it decreased at a high temperature of 900°C, when a high relative air supply rate was given.

The evolution of benzo(a)pyrene from polyethylene was a little greater than that from polystyrene, when burned at 900°C, with a rather low relative air supply rate. This means that the content of benzo(a)pyrene in polyethylene soot is more than 3 to 4 times higher than that in polystyrene soot, because the evolution of soot from polystyrene is 3 to 4 times greater.

In addition to the evolutions of benzo(a)pyrene from these two polymers in different conditions, those from other polymers are presented in Table 3.

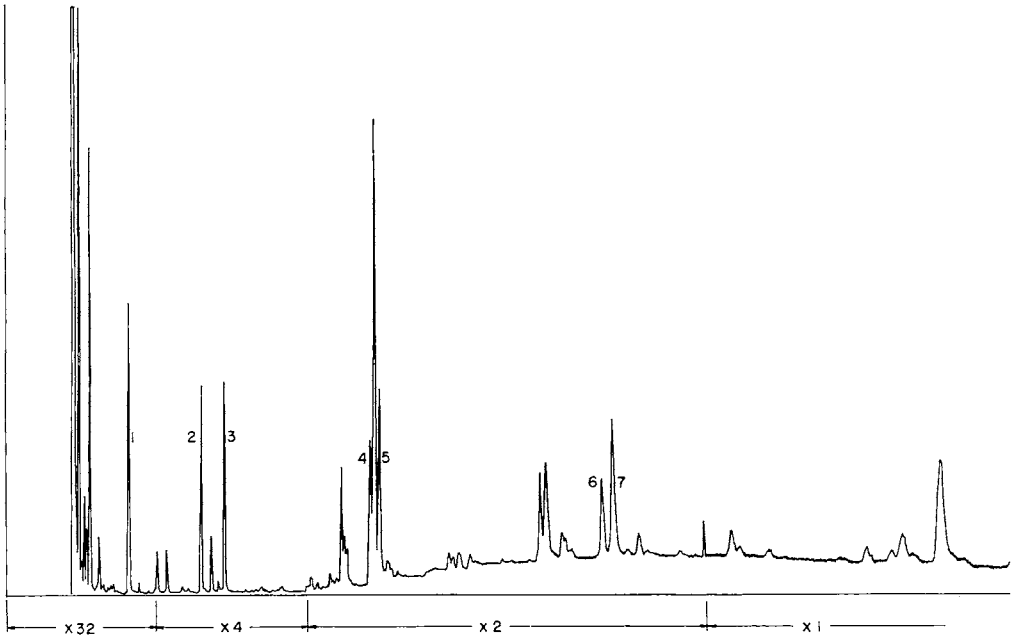

Fig. 4 Gas chromatogram of polycyclic aromatic hydrocarbons from polyethylene soot (nitromethane fraction).

Conditions of burning polyethylene: Heating temperature 900°C Sample amount in each insertion 500 mg
Column temperature: 200 – 258°C 4°C/min (programmed)

Table 3 Evolution of benzo(a)pyrene

No.	Materials	Heating temperature (°C)	Weight of sample in each insertion (mg)	$\frac{\text{Benzo(a)pyrene(mg)}}{\text{Sample weight(mg)}} \times 100\%$
1	Polyethylene	600	1000	0.01
2	〃	〃	500	0.01
3	〃	〃	250	0.01
4	〃	〃	125	0.01
5	〃	700	250	0.01
6	〃	800	1000	0.05
7	〃	〃	500	0.05
8	〃	〃	250	0.06
9	〃	〃	125	0.06
10	〃	900	1000	0.15
11	〃	〃	500	0.15
12	〃	〃	250	0.15
13	〃	〃	125	0.11
14	〃	〃	63	0.10
15	Polystyrene	600	1000	0.01
16	〃	〃	500	0.01
17	〃	〃	250	0.02
18	〃	〃	125	0.02
19	〃	700	250	0.03
20	〃	800	1000	0.07
21	〃	〃	500	0.07
22	〃	〃	250	0.08
23	〃	〃	125	0.06
24	〃	900	1000	0.12
25	〃	〃	500	0.11
26	〃	〃	250	0.09
27	〃	〃	125	0.06
28	〃	〃	63	0.04
29	Polypropylene	〃	500	0.18
30	Polymethylene methacrylate	〃	〃	0.04
31	Nylon-6	〃	〃	0.02
32	Polyacrylonitrile	〃	〃	trace
33	Polyester	〃	〃	0.02
34	AS resin	〃	〃	0.07
35	Vinylon	〃	〃	0.03
36	Polyvinylchloride	600	〃	0.01
37	〃	700	〃	0.01
38	〃	800	〃	0.02
39	〃	900	〃	0.02
40	Cellulose	600	〃	0.00
41	〃	700	〃	0.00
42	〃	800	〃	trace
43	〃	900	〃	0.01
44	Polyethylene*	800	〃	0.00
45	〃	〃	125	0.00
46	〃	900	500	0.00

Air supply rate: 1.83 ℓ/min

* Atmosphere: Halon 2402-containing air

It is noted that benzo(a)pyrene evolution from polyvinylchloride and polyacrylonitrile was surprisingly small, even though soot evolution from them was considerably great. When polyethylene was burned in Halon 2402-containing air, the evolution of soot was prominent, but benzo(a)pyrene and other polycyclic aromatic hydrocarbons were not appreciably detected. In the case of polyethylene, when the relative air supply rate was increased, the soot production increased, while the benzo(a)pyrene production decreased. So, it can be said that there is no direct relationship between soot and benzo(a)pyrene productions.

From the results obtained in the present study, benzo(a)pyrene and other polycyclic aromatic hydrocarbons do not seem to be involved in the process of soot formation from polyvinylchloride and polyacrylonitrile, but as for polyethylene and polystyrene, it seems to be still too early to draw a conclusion as to whether polycyclic aromatic hydrocarbons are intermediates to soot or side products.

It is also noted that the evolution of both soot and benzo(a)pyrene from cellulose was very small. It is probably because carbon atoms connected with oxygen in the structure turned to the carbon in CO, CO_2 or other oxygen-containing decomposition products.

Many peaks are seen in a gas chromatogram of the cyclohexane extract of soot and solid products of polyethylene burned at 600°C, as shown in Fig. 5. But when a nitormethane extract of the cyclohexane solution was subjected to gas chromatography, most of the peaks in Fig. 5 were eliminated, as shown in Fig. 6. The peaks eliminated must be alipahtic compounds. At 700°C, or over, little aliphatic compounds appeared when cyclohexane extracts were injected into the gas chromatograph.

The solid products of polyethylene burned at 600°C with a low relative air supply rate

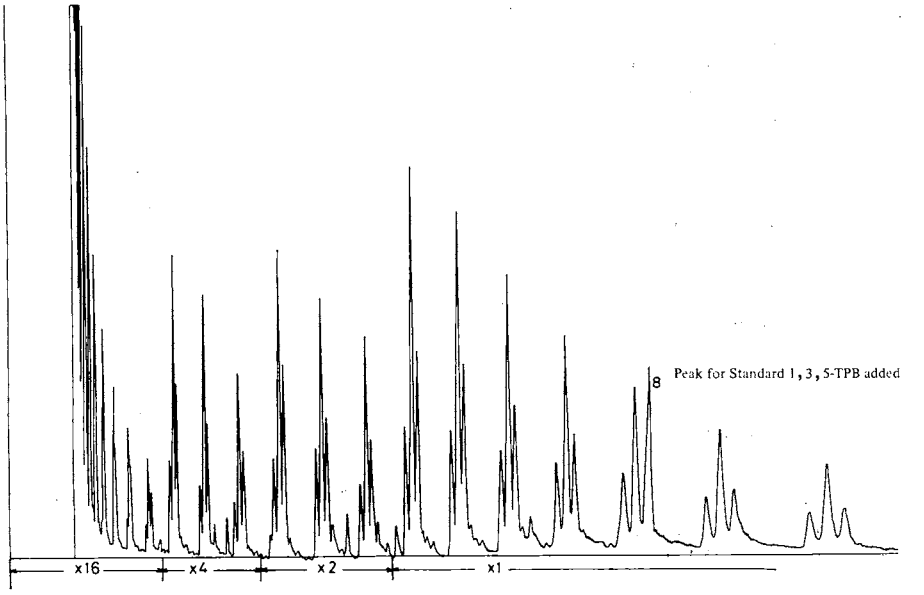

Fig. 5 Gas chromatogram from polyethylene soot (cylohexane extract).

Conditions of burning polyethylene: Heating temperature 600°C Sample amount in each insertion 1000 mg
Column temperature: 200 – 258°C 4°C/min (programmed)

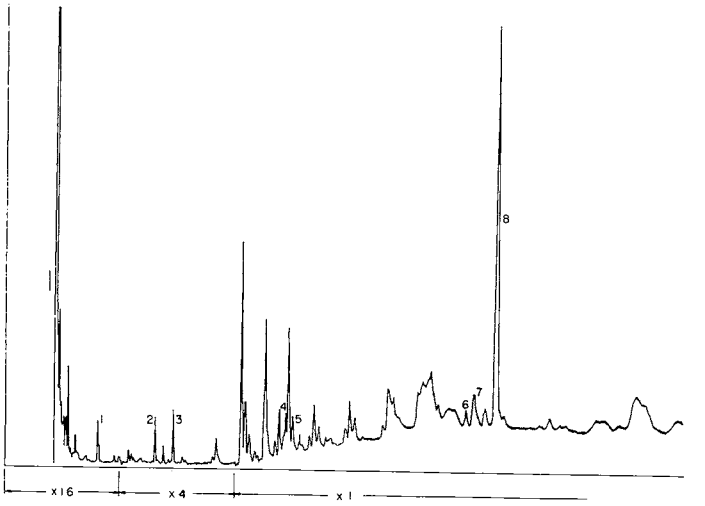

Fig. 6 Gas chromatogram from polyethylene soot in Fig. 5 (nitromethane fraction).
Column temperature: 200 – 258°C 4°C/min (programmed)

were considerably great in quantity and mostly soluble in a solvent, as mentioned above. It is believed that at low temperatures, solid products from burning polyethylene are mostly aliphatic compounds.

The content of benzo(a)pyrene in urban airborne particulates has been reported to be 0.0336–0.041% in maximum.[3,4] In the present study, the average content of benzo(a)pyrene in the soot from polyethylene burned at 900°C was 1.06%, based on Tables 1 and 3. The low content of benzo(a)pyrene in airborne particulates probably is attributed to the fact that soots are from different materials burned under different conditions, and the fact that soots and dusts comprise airborne particulates.

CONCLUSION AND SUMMARY

Soot evolution generally increased with increasing temperature. The increase of air supply rate did not always contribute to the decrease of soot evolution, unless the air supply rate was too high. Carbonaceous residue after benzene extraction of soot was higher in percentage for the soot produced at higher temperatures and air supply rates. Polystyrene, polyvinylchloride, and polyacrylonitrile were polymers which produced a noticeably great amount of soot when burned. All the synthetic polymers used in the present study produced at high temperatures 1 to 2 orders of magnitude greater amount of soot than cellulose did.

For gas chromatographic analysis, OV-17 glass capillary column was found satisfactory in separating benzo(a)pyrene and many other polycyclic aromatic hydrocarbons of relatively low boiling temperatures. The evolution of benzo(a)pyrene generally increased with increasing temperature. However, at high temperatures, it decreased drastically when a high air supply rate was given. Polyethylene soot contained 3 to 4 times more benzo(a)pyrene than polystyrene soot, when both were produced at high temperatures with considerably low relative air supply rate. The average content of benzo(a)pyrene in soot was 1.06% when polyethylene was burned

at 900°C with each insertion of sample ranging between 125 mg and 1000 mg under the air supply rate of 1.83 ℓ/min. A surprisingly small amount of benzo(a)pyrene was produced from polyvinylchloride and polyacrylonitrile, and also from polyethylene in a halogenated hydrocarbon-containing atmosphere, even though soot production from them was considerably great.

It can be said that there is no direct relationship between soot and benzo(a)pyrene productions and that polycyclic aromatic hydrocarbons will not necessarily be intermediates to soot.

REFERENCES

1. A. Liberti et al., J. Chromatog., **15**, 141 (1964)
2. H. Matsushita et al., Bunseki Kagaku, **26**, 488 (1977)
3. K. Fujie, Taikiosenkenkyu, **3**, 126 (1969)
4. E. Sawicki, Nat. Cancer Inst. Mnnogr. 9 (1962)

雛壇地形上のクリブの延焼速度

山下邦博　山本忠彦

（昭和52年12月24日受理）

1. 目　的

雛壇地形上の住宅は，現存のものに加えて，宅地造成地の開発に伴ってますます増加しており，そのためにいくつかの消防活動上の問題が表面化しつつある。雛壇地においては水利が不足・偏在し，消防活動が地形に阻害される。そのうえ，家屋の延焼速度とその地形特有の風の乱れが大きくなるため火災による被害予測が困難になり，避難及び消防活動時の人命危険が高まる。地形は延焼を促進させる場合もあるが，ときには火災を抑制し，焼止り等の要因になる。大火時の延焼を取り扱うには地形効果を無視できない。過去の大火において，比較的規模の大きい傾斜地または雛壇地形を含んだ事例として，熱海市大火（昭和25年４月）,[1] 大館市大火（昭和31年８月）,[2] 大島町大火（昭和40年１月）[3] 等がある。また，一部の農村漁村は地形的に起伏の著しい場所にあり，焼失棟数は多くないが，出火延焼した事例は多い。

しかし，各種地形がその上にある可燃物の延焼及び焼止りに及ぼす効果については東京理科大の浜田研究室で行った焼止りに関する調査研究を除けば理論的にもまた実験的にも殆ど検討がなされていない。今回の実験ではクリブを用いて延焼実験を行い，延焼過程を詳細に観察し，雛壇地形が延焼速度に及ぼす効果を検討した。

2. 実験方法

消防研究所の構内に土盛りの台形状の築山（底辺の長さ12m，上辺の長さ５m，高さ2.1m）の南側斜面の一部に斜面角が29度の雛壇地（雛壇数は７段，一段は高さ28cm，幅50cmで，床は土の上にコンクリートを打ち側壁は土の外側を耐火ボードで覆う）を作り，この雛壇地とその近くの平坦地にそれぞれ91個（７行×13列），36個（６行×６列）のクリブを配置させ，一つのクリブに点火して，延焼実験を行った。クリブの大きさは40cm×40cmで高さ15cmの４段積みのものである。クリブ間の距離は予備実験の結果から，風向に平行な方向には10cmで，風横方向には９cmとした。クリブの下に鉄製の容器を置き，その中にエタノールを入れて，点火した。

台形状の築山の寸法を **Fig. 1** に示す。この図の①地点の地上2.4mの高度にエアロベーンを設置して，記録紙を3,600mm／hの極めて速い速度で送り，風向風速の時間変化を詳細に観測した。燃焼域の風上側から30秒毎にスチール・カメラで燃焼状況を撮影して火炎前線及び火炎後線の位置を求めた。

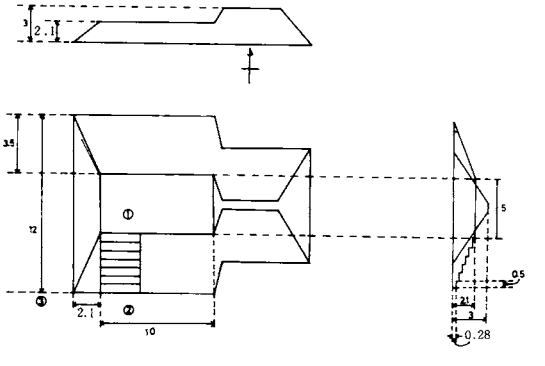

Fig. 1 The size of terraced ground. Values are expressed in meter. Observation points of wind are expressed as ①, ② and ③.

風速プロフィールを求め，雛壇地周辺の流れの状況

について観測するため，**Fig. 1**に示す各地点に小型ビラム風速計を，高さを変えて5個ずつ取付けた。

延焼実験は9月の下旬に実施した。その日の気圧配置は南高北低型で，低気圧が日本海を通過中で，関東地方では比較的強い南風（ほぼ雛壇を吹き上る）が吹き，平均風速は本庁舎の屋上で6.5m/s，**Fig. 1**の①地点の地上2.4mの高度では3.0m/s，地上0.2mの高度では2.4m/s，②地点の地上0.2mでは1.0m/sであった。

3. 実験結果

雛壇地及び平坦地にあるクリブ群の延焼実験の結果から5分間隔の火炎前線の位置を求めたものをそれぞれ**Fig. 2(a)**，**(b)**に示す。図においてクリブ間の細線は雛壇の稜線で，数字は点火後の時間である。点火してから5分位までは，雛壇地よりも平坦地のクリブの燃焼の拡大速度が大きい結果となった。この理由は風向に平行な方向のクリブ間の水平距離を雛壇地及び平坦地のどちらの場合にも10cmにしているが，雛壇地では点火クリブと風下隣接クリブの高さが異なるためにクリブ間の最短距離が16.4cmと長くなったためである。また，自然風の乱れに地形に起因する乱れが加わって炎の位置を左右に動揺させたために，点火クリブのすぐ上段にあるクリブへの加熱速度が減少して雛壇地の延焼が遅延したものと思われる。

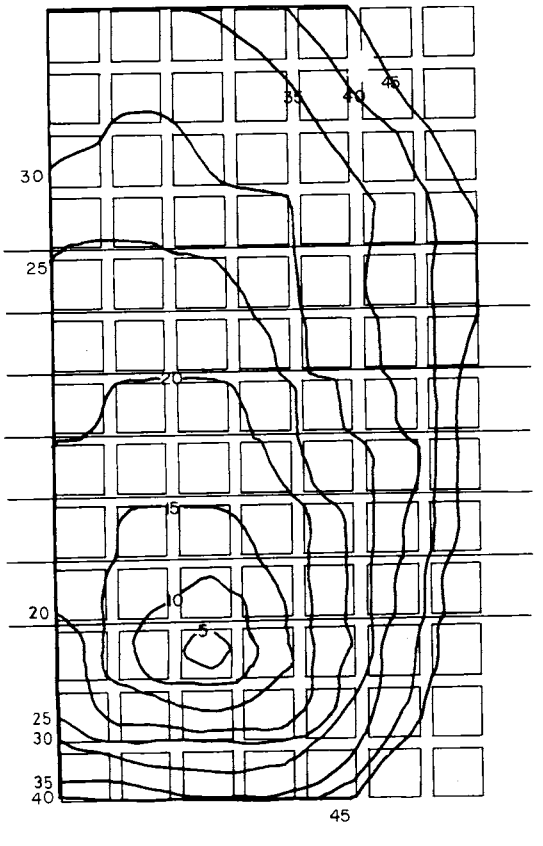

Fig. 2 (a) Contours of flame front (terraced ground). Numerical values are elapsed time after ignition in minite.

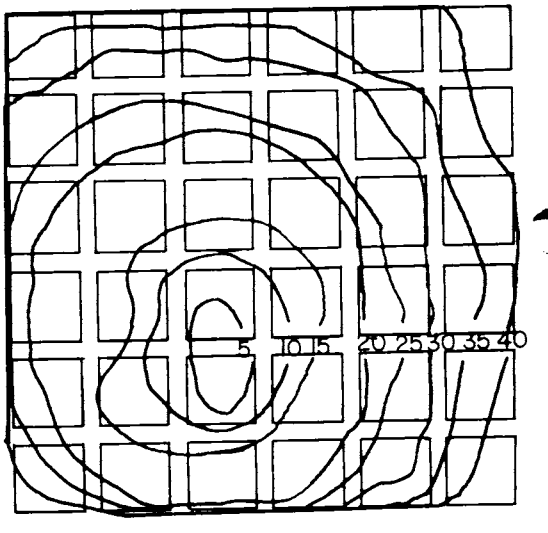

Fig. 2 (b) Contours of flame front (flat ground). Numerical values are elapsed time after ignition in minite.

点火後7～8分では雛壇地と平坦地にあるクリブの燃焼域が殆ど同じになり，それ以後は平坦地では燃焼域が定常的に拡大したのに対して雛壇地では風下方向（雛壇を上る方向）の燃焼域が加速度的に増加した。

点火クリブを中心として風横方向の延焼速度を雛壇地と平坦地の場合について比較してみると余り差がなく，わずかに雛壇地の方が大きくなった。

雛壇地では，その周辺の風の乱れが平坦地よりも大きくなるために風横方向の延焼を促進させる要因になるが，その効果は室内実験の結果から予測された程大きく現れなかった。

Fig. 2において，燃焼域が拡大するに従ってやや左側に移る傾向がみられた。この理由は実験中においては南寄りの風が卓越していたが，一時的に東寄りの風

が吹いたためである。

雛壇地においては，火炎前線は点火後約25分で雛壇の最上段に到達した。**Fig. 1** に示したように，実験場所が台地形状の山で，雛壇の最上段は長さ５ｍの平坦地になっており，この最上段にもクリブが28個（７行×４列）配置されていた。火炎前線の移動速度（延焼速度）は火炎が最上段に達する時には特に大きくなった。この理由は燃焼によって生じた熱気流の一部がこの部分に収束しかつ地形効果のために風速が局所的に増加したためと思われる。

雛壇地と平坦地における火炎後線の５分毎の位置を **Fig. 3(a), (b)** に示す。今回使用しているクリブはその一点に着火してから鎮火するまでの燃焼継続時間(T_b)は10分～15分であり，雛壇地の一地点についてみると，

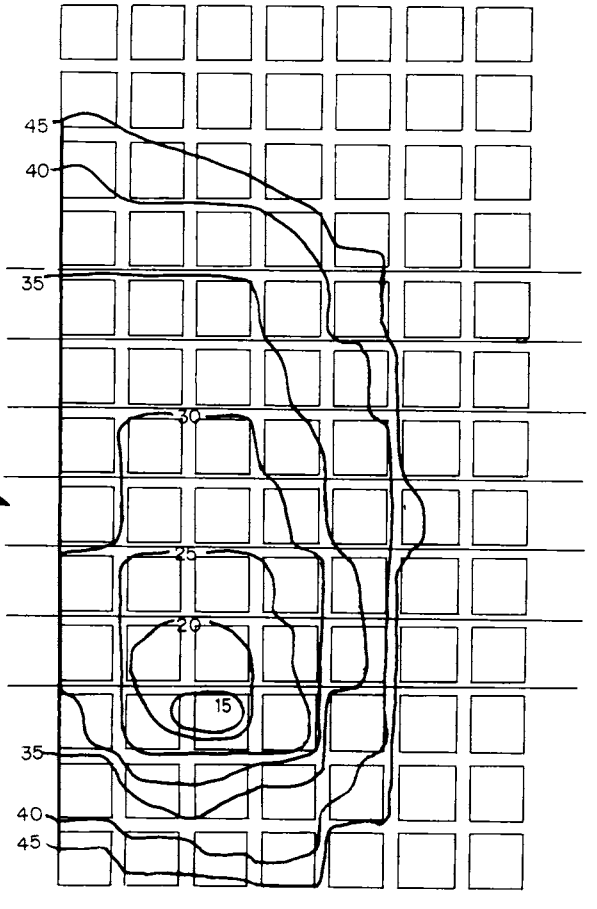

Fig. 3 (a) Contours of burn-out front (terraced ground). Numerical values are elapsed time after ignition in minite.

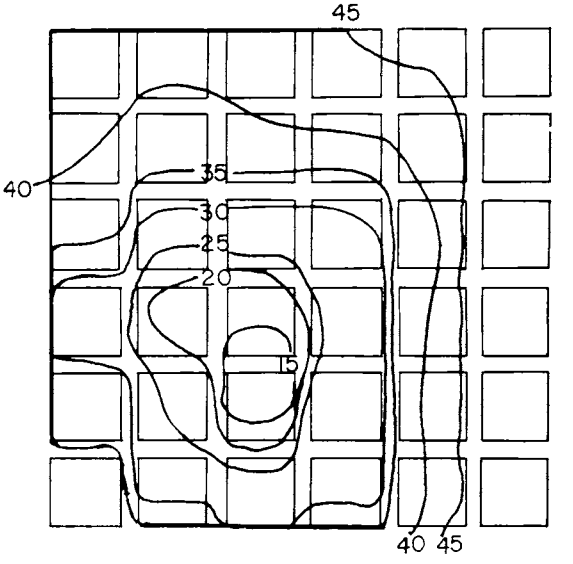

Fig. 3 (b) Contours of burn-out front (flat ground). Numerical values are elapsed time after ignition in minite.

火炎前線が通過してから，その時間だけ遅れて火炎後線が通過する。火炎前線と火炎後線に挟まれて活発に燃焼している区域の幅が同時炎上幅であり，それは延焼速度等に比例して変った。

雛壇地は斜面地と平坦地の要素を合わせて持っているために，雛壇地における延焼距離を表わすのに２つ表現法がある。その１つは延焼した範囲を水平面に投影させた長さであり，他の１つは雛壇を斜面とみなして，斜面に沿って延焼した範囲の長さである。これらの表現法のいずれを採用するかはそれぞれ一長一短があるが，雛壇地と平坦地における延焼を比較する場合には前者の表現法の方がわかり易い。このため以下においては，雛壇地における延焼距離として前者に従うものとして，後者に従う場合には数値に括弧をつけて示す。延焼速度も延焼距離に準じて表わす。火炎前線と火炎後線（燃焼域と焼跡の境界線）の位置を点火クリブからの距離として求めたものを **Fig. 4** に示す。この図から平坦地においては延焼速度は時間的に余り変化しないでほぼ7.0cm/分の値になるが，雛壇地においては延焼速度が時間と共に増加し，雛壇の中段付近の値は18.5（21.1）cm／分で，上段に近い部分では24.0（27.4）cm／分になる。点火してから10分～25分後の平均値をとると雛壇地では19.0（21.7）cm／分，平坦

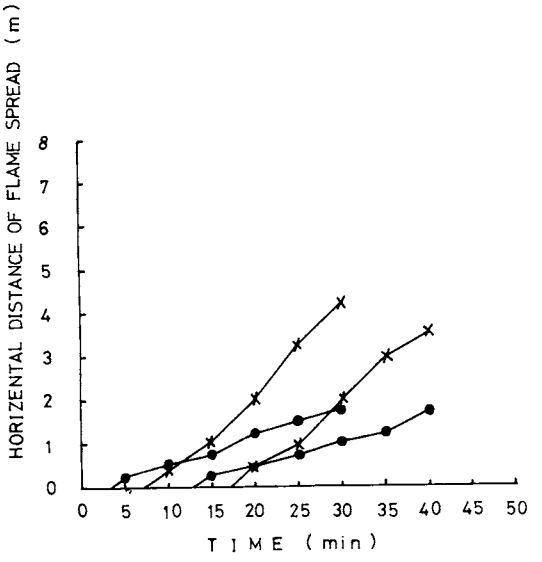

Fig. 4 Relation between the distances of flame spread and time. (x: terraced ground, ●: flat ground)

地では6.3cm/分になり，その比は3.0（3.4）である。

これらの値は5分ないし15分間の平均値を示しているが，微視的にみれば延焼速度も自然風のように時間的に著しく変動しており，最上段付近において 1.5分間平均の最大延焼速度は33.3（38.1）cm／分にも達し，平坦地の場合の5.3（6.0）倍にもなった。

同時炎上幅の時間変化を写真及び**Fig. 2**，**Fig. 3**から求めた結果を**Fig. 5**に示す。雛壇地の延焼の場合には，最大同時炎上幅が点火後15分頃から急激に増加していた。この頃には延焼速度が増加しており，延焼速

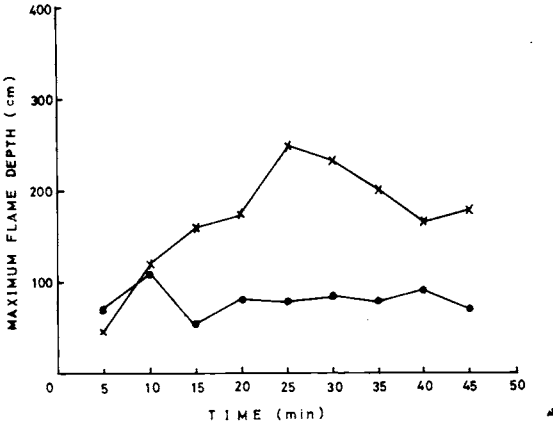

Fig. 5 Relation between the maximum flame depth and time. (x: terraced ground, ●: flat ground)

度と同時炎上幅が密接な関係があることが予想される。平坦地では同時炎上幅がほぼ一定で88cm程度である。雛壇地と平坦地において同時炎上幅（D）と延焼速度（V）の比（D/V）をとればおよそ10分，14分になるが，この値はクリブの燃焼継続時間にほぼ対応しており，この値が雛壇地と平坦地で異った。

Fig. 4により雛壇地における延焼速度が，雛壇の上段，下段の位置によって変わることがわかったが，これには雛壇地上及びその周辺の風速分布が関係していると思われる。**Fig. 1**の地点①，②の風速の値をそれぞれU_1, U_2としてその比（U_1/U_2）を求めると，地上1mで風が強い場合には 1.5程度で，風が比較的弱くなるとその比が大きくなって 1.8程度になることがわかった。地上高さを 0.2mにすると，この比が更に大きくなり5以上になった。

4. 検　討

雛壇地形は条件によってはその上にある可燃物の延焼を促進させる。燃焼しているクリブから一段上にある隣接クリブへの伝熱を考えると，風が雛壇地を吹き上る場合には風下の未燃のクリブが炎と上昇気流の主軸に接近するために加熱速度，予熱時間，加熱面積，つまり隣接クリブへの全伝熱量が増大して延焼が促進される。全伝熱量は火炎の形状，上昇気流の拡散状況，火の粉の発生状況に支配されるために，間接的には雛壇地周辺における風向変化，風速の増減，渦流の生成・消滅に影響される。

雛壇地形は延焼を阻止させる働きも有している。雛壇地では可燃物間距離が大である場合が多いために延焼し易い部分は狭い区域に限られ，雛壇地における大火事例が少ない要因になっている。更に，未燃クリブへの放射伝熱の一部が地形のために阻止される。雛壇地では，未燃クリブが上昇気流の中心に入るために，気流中の煙により放射伝熱が更に減衰し，そのうえ酸素分圧の小さい雰囲気に包まれるため，延焼着火及び着火した後の燃焼が抑制され，延焼速度が減少する場合もある。

雛壇地が急斜面地にあり，崖のようになっていれば延焼を抑制される効果が大きくなり，そこで焼止るが

一方，雛壇地の傾きが比較的ゆるやかな場合には延焼が促進されて延焼速度が大きくなる。

雛壇地と斜面地における火災を比較するといくつかの相違がある。斜面地においては山の斜面にある草木等の可燃物がほぼ連続して存在しているが，雛壇地では可燃物が不連続に存在する場合が多い。その他，可燃物の種類，地表面の粗度，周辺気流のパターン等も異なる。斜面地においては，水平に対する斜面角が大きい程延焼速度が大になるが，雛壇地においては斜面角が大きくなると，可燃物間の距離及び延焼阻止効果が大きくなり，延焼が停止するという点に，雛壇地と斜面地の間では延焼に及ぼす効果について大きな相違がある。

斜面地における延焼の実験的研究として，無風時の場合であるが，玉野[5] 永田[6),7)] 立花[8)] 橘[9)] によるものがあり，斜面の水平に対する角（θ）が大になる程，延焼速度が増大することが確認されている。**Fig. 6** に彼等の実験結果を示す。延焼速度の θ に対する依存性は可燃物の種類と周辺状況によって異る。一般に θ が0～10度の範囲では延焼速度は θ と共に僅かに増加する程度であるが，10～50度の範囲ではかなり増加し，約50度以上では急激に増加する傾向が示されている。

建物内の火災では障子及びカーテンのように可燃物が垂直方向に存在する場合が多いために，θ ＝90度の場合の実験的研究は比較的多い。また，可燃物が傾斜して保持されている場合の延焼の実験的研究が平野，柏木等によって活発に行われているが[10),11)] 雛壇地形における可燃物の延焼とは異なる。

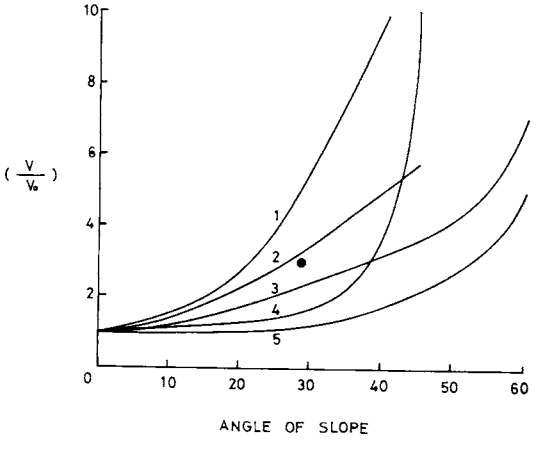

Fig. 6 Relation between flame spread rate and angle of slope in windless atomosphere. (● is a data for the terraced ground)
Experimental samples
1. absorbent gauze[7)] 2. sheet soaked in alchol[6)]
3. celluloid[8)] 4. sheet[9)] 5 sheet[9)]

雛壇地における延焼は斜面地の場合に比較すると焼止り要因等で大きな相違がある。しかし，延焼する限りにおいては雛壇地は粗度の大きい斜面地とみなし，斜面地での延焼に対する解析法が雛壇地の場合にも応用できる。

P.J.Pagni 等は斜面上の可燃物の延焼を解析する場合に斜面角を風速の増加に対応させて解析した。[12)] 彼等にならって雛壇の斜面角を風速の増加量に対応させ，平坦地における延焼速度と風速の関係式を用いて，著者らの実験結果について考察する。

平坦地における可燃物または市街地の延焼速度について，金原，畠山，浜田，川越，Thomas[13)] Anderson 等は火災事例の解析または火災実験結果を検討の上，風速と延焼速度の関係を図表または関係式で示している。

金原とThomasは延焼速度を風速（U）の一次式で示しているが，Thomasの提出した関係式は(1)式である。

$$Vd = 1 + U \qquad (1)$$

上式でdは嵩密度（bulk density）に関係する量であるが，この式を実験を基礎にして誘導している。浜田等のデータも風速の範囲が狭い場合には延焼速度は風速の一次式で近似できる。

平坦地の場合において風速が増加するにつれて延焼速度が大になる主な理由として，(1)炎と上昇気流が傾き，燃焼域から風下にある未燃可燃物への対流及び放射による伝熱効率が高くなる，(2)燃焼域が拡大して全放出熱量が増加する，の２つがあげられる。雛壇地においては無風時においても燃焼域の上段のクリブは炎と上昇気流の主軸に接近するために(1)の効果が高まる。

浜田は風速と垂直に対する炎の傾き（θ'）の関係を(2)式で示した。[14)]

$$\tan\theta' = \frac{U^2}{4D} \qquad (2)$$

この式を利用して雛壇の水平に対する斜面角 θ を風速の増大値に換算すると(3)式になる。

$$\Delta U = \sqrt{4D\tan\theta} \qquad (3)$$

雛壇地における延焼においては平坦地と異なり，延焼区域の高度が変化し，更に地形による局地風が発生するので，雛壇の位置による風速分布を考慮しなけれ

ばならない。雛壇の最下段における風速（U_w）（今回の実験では地上0.2mの値）を基準として，特定の位置の風速をaU_wと考える。このように考えると雛壇地上の任意の点の風速は(4)式で示される。

$$U=aU_w+\Delta U \tag{4}$$

同時炎上幅（D）は延焼速度（V）に比例して増加するが，出火してから火元家屋が燃え尽きるまではその比例係数（b）は点火してからの時間にも関係する。

$$D=bV \tag{5}$$

a，b，dが一定値であると仮定して(1)，(3)，(4)，(5)式から延焼速度（V）を求めると(6)式になる。

$$V=\frac{d(1+\bar{a}U_w)+2b\tan\theta}{d^2}+\frac{\sqrt{4bd(1+\bar{a}U_w)\tan\theta+4b^2\tan^2\theta}}{d^2} \tag{6}$$

今回の実験においては，$U_w=1.0$ m/s，$\bar{a}=3$，$\theta=29$度，$b=600$秒で，(b)式はMKS単位系で表わす。

平坦地の実験（$\theta=0$，$a=1.0$）から延焼速度が6.3cm／分になったことからdの値を求めると，$d=1.90\times10^3$になる。(6)式にa，b，d等の値を代入して雛壇地の延焼速度を求めると，$V=19.1$cm／分になる。この値は雛壇の斜面に沿って測った延焼速度と考えられるのでこれに cos 29° の値をかけ合わせた16.7cm／分が延焼速度の水平成分になるが，この値は実験結果とほぼ一致する。

aの値は雛壇上の任意の点の値であるが，(6)式の$\bar{a}$は雛壇の空間的平均値であり，雛壇の周辺状況，雛壇の斜面角及び風速等によって異なる量で，事前の観測により求められる。雛壇地形が山の中腹よりも低い位置にあればaの値は位置によって余り変化しない。しかし，今回の実験のように雛壇地形が山頂まで続く場合にはaの値は場所によって異なり，$\bar{a}$の値も1より大きくなる。火災が雛壇地または斜面地を燃え上る場合には、火災と地形に起因して上段に行くに従って風速が増大するのに加え，自然風の急激な強まり（火災周辺の乱れ）が起り，延焼速度が時間と共に増加する。大火災の延焼速度として1時間または数時間平均の値が一般に使用されるが，延焼速度も自然風と同じように時間的な変動が大きいものであり，最大瞬間延焼速度は平均値よりもはるかに大きくなる点に注目する必要がある。今回の雛壇地の延焼実験においても 1.5分間の平均延焼速度が平坦地の場合の5.3（6.0）倍に達したが，最大瞬間延焼速度はこれよりも更に大きかったと思われる。

(8)式はいくつかの仮定のもとに得られたものであるから適用範囲も限られてくる。bとdが一定であると仮定しているから，火災初期には適用できないし，また，風速の広い範囲にわたっては適用できない。今回の実験では回数が少なかったためにこの式の適用範囲が十分に検討されていないが，これは今後の研究課題の一つである。

平坦地においてはクリブ間に渦流が生じて燃焼中の家屋から未燃の風下家屋への対流伝熱が一部分阻止されるが，[15] 雛壇地では対流伝熱の阻止作用が消滅するために風下のクリブのほぼ全域が熱気流に包まれ，クリブの燃焼が最盛期に至る時間が短縮される。火災継続時間が雛壇地と平坦地で異なるのはこのことにも起因していると思われる。

5. まとめ

クリブを用い，雛壇地と平坦地において延焼実験を行い，延焼に及ぼす雛壇地の効果について考察した。実験の結果では，雛壇地における延焼速度が時間と共に増加するが，その場合にある範囲の平均延焼速度は平坦地の場合の約3倍になった。延焼速度に及ぼす地形の効果を検討するために雛壇の斜面角を風速の増大値に換算して，有風下の雛壇地上のクリブの延焼速度について検討した。

参考文献

1）星野常雄他：火災　**1**，22（1951）
2）今津　博　：火災　**6**，174（1957）
3）今津　博　：火災　**15**，125（1965）
4）東京理科大学浜田研究室：横浜市における大震火災時広域避難場所の現地調査と適地選定に関する調査研究報告書
5）寺田寅彦　：理研彙報　**9**，551（1930）
6）永田　武他：地震　**10**，150（1934）
7）永田　武他：理研彙報　**14**，781（1935）
8）立花太郎　：応用物理　**10**，361（1941）
9）橘房夫：第10回安全工学研究発表会講演要旨集（1977）

10) T.Hirano et al : *Combustion and Flame* **22**, 353 (1974)
11) T.Kashiwagi et al : *Combustion and Flame* **26**, 163 (1976)
12) P.J.Pagni et al : *Twelfth Int. Symposium on Combustion* 1099 (1969)
13) P.H.Thomas : *Forestry* **VL**, 155 (1972)
14) 浜田稔：日本火災学会論文集 1，41 (1951)
15) 山下邦博：消防研究所報告 第45号 (1978)

Experimental Study on The Fire Spread Rate of Wooden Cribs on The Terraced Ground

(Abstract)

Kunihiro Yamashita and Tadahiko Yamamoto

(Received December 24, 1977)

To clarify the effect of the terraced ground on fire spread, we performed the experiment of fire spread of wooden cribs on the terraced and flat ground. Ninety-one and thirty-six cribs were arranged respectively on the terraced and flat ground. One of cribs was ignited by the burning of ethanol that was put in the pan under the crib simultaneously on both ground. The experiment was conducted when wind blew up the terraced ground. The photograph was taken at the interval of thirty seconds and it was analyzed later to decide the position of flame front, flame depth and burnt-out front.

From the experimental result, it was found that fire spread rate increased with time on the terraced ground and mean value of it was larger than that on the flat ground approximately by three times. We discussed the fire spread rate of cribs assuming that the slope of terraced ground is reduced to the increase of wind speed.

模型による家屋間延焼の実験的研究

山下邦博

（昭和52年12月24日受理）

1. まえがき

大震火災対策の研究の一環として，大小屋程度の大きさの家屋模型を用いて延焼実験を行い，延焼速度について検討した。市街地火災においては可燃物（家屋）が分離独立しているため，燃焼している可燃物からある距離だけ離れている可燃物への延焼着火の有無，及び着火時間が問題になる。着火の基礎的現象に関する研究は比較的多くなされているが，例えば，熱放射または高温気によるセルロース物質の着火については，秋田[1]，N.J.Alvares[2]，S.B.Martin[3]，D.L.Simms[4] 等の研究があり，それらについての総合展望的な報文も見うけられる。[5),6),7)] しかし，火災の延焼と密着した着火の研究は少ない。その理由は，延焼着火の場合には炎上家屋から隣接家屋への伝熱が，主に放射及び対流伝熱の共存によって行われること，伝熱量の時間変化が著しいこと，及び燃焼域が時間的に移動すること等のため，延焼着火現象の理論的な取扱いが困難になるためと思われる。

また，連続体の可燃物の延焼に関しては，H.C.Hottel等[8)~13)] により多くの研究がなされている。しかし，これらの研究の対象は定常状態のみで，過渡現象については触れていない。

木造市街地の延焼に関しては，実大火災実験をもとにした延焼速度式が浜田により提出されて以来広く利用され，木造市街地の延焼速度の基本式になっている。[14)] この式は電算機に利用し易い形に一部修正された。また，堀内により，この式を基礎にして防火的木造市街地の延焼速度式が提出された。[15)] 実際の市街地においては木造，防火造及び耐火建物が無秩序に存在する場合が殆どである。このような市街地の延焼速度を表わすとき，木造市街地の場合を1とし，それに対する比率（延焼速度比）で表わす方法が提案され，市街地の延焼速度の算定に利用されている。[16)] この式は複雑な市街地の延焼速度の算定には有用であるが，その算定の確かさは明らかでない。

今回の実験の目的は延焼現象の問題点を明らかにし，延焼速度に及ぼす諸因子の効果を検討するとともに，延焼速度式を見直そうとするものである。

2. 実験方法

2.1 家屋模型

今回の延焼実験には，大小屋程度の大きさの4種の家屋模型を用いた。**Fig. 1** は1階建木造家屋模型の概略図である。家屋模型の幅及び奥行は各470mm，420mmで，高さは607mm（1階建），1,000mm（2階建）であり，屋根はいずれも厚さ0.3mmのトタン板製（重量1.1kg）であった。家屋模型内の火災荷重を大きくするため，床と天井に相当する部分に36mmの太さの木材で作った2段クリブを，また，このクリブの上側または下側に厚さ3mmのベニヤ板を取付けた。2階建の家屋模型では，床と1階の天井部分，2階の天井部分の3ヶ所に

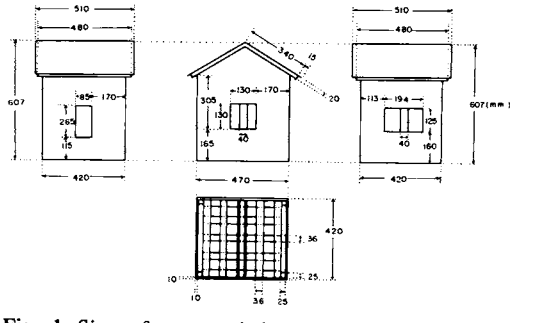

Fig. 1 Size of one-storied wooden house model. Numerical values are expressed in millimeter.

クリブとベニヤ板を取付けた。ベニヤ板を取付けた理由は，家屋模型内における垂直方向への燃焼の拡大を抑制するためである。木造家屋模型の外壁は，杉板の外側に厚さ10mmのモルタル（1階建のモルタルだけの重量11.7kg）を塗布したものである。各外壁部分には窓ガラス（厚さ2mmの板ガラス）を取付け，モルタル家屋の開口部は木造家屋の場合よりも一辺の大きさを1.5倍大きくした。木造家屋の重量は，1階建が11.8kg，2階建が18.9kgであり，モルタル造家屋模型の可燃物量は木造の場合と同じである。木材水分計で測定した実験実施時の木材の含水率はおおよそ8～10%であった。この木造家屋模型が点火してから燃焼により倒壊するまでの時間は12～20分であった。

2.2 点火法と家屋の配置

床下部分の木造クリブを地面から30mmの高さに取付け，エタノール50mℓを入れた直径9cmの燃焼容器をこのクリブの下側の一隅に置き，これに点火した。エタノールの炎から火はクリブに移り，ベニヤ板，内壁，天井の順に次第に燃焼域が拡大した。エタノールの燃焼時間は約5分であったため，家屋模型が燃焼の最盛期になる頃にはエタノールは燃え尽きていた。

各回の実験では，家屋模型5～7個を大型送風機(吹出口直径6m）の前に配列して，合計12回の延焼実験を行った。家屋模型の基本的な配置は，最前列に1階建の家屋模型3棟を30cmの間隔で風向に直角方向に配列し，それらの中央家屋模型の風下側に2個ないし4個の家屋を風向に平行に家屋間距離を変えて並べる方式とした。点火家屋はいずれの場合にも最前列の3棟の中央にある家屋の風下隣接側の家屋模型とした。

Fig. 2は12回の実験の家屋模型の配置と，実験実施時の風速（最前列の家屋模型の屋根上 100cmの地点における値）である。モ2，木1の表示はそれぞれ，2階建のモルタル造家屋，1階建の木造家屋を示す。モルタル家屋から木造家屋へ，または木造家屋からモルタル家屋へ延焼する場合には，延焼し難いため家屋間距離を小さくした。家屋模型の延焼状況を風横側から8ミリシネカメラ及び35ミリカメラで撮影して，燃焼の時間変化及び延焼着火の詳細について分析した。また，点火家屋及びその周辺に熱電対と放射計を配置して温度と放射照度の時間変化を測定し，延焼着火の熱的環境を測定した。特に第11及び第12回実験においては建物内に放射計をセットして，その建物が延焼着火するまでの放射照度の時間変化について測定し，その実験式を求めた。

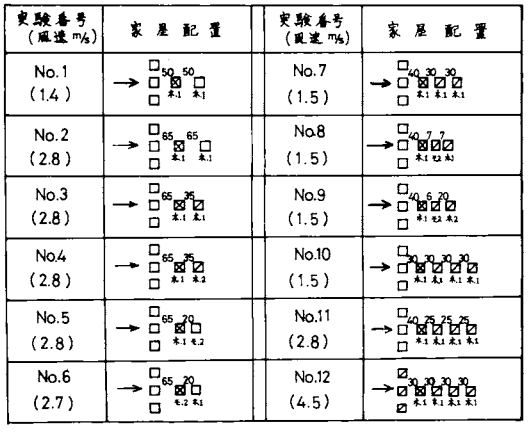

Fig. 2 The arrangement of the house models for each experiment. Numerical values are the distances between house in centimeter.
(⊠: ignited house, ⧄: burnt house)

3. 延焼家屋群模型の周辺気流の観測結果

建物周辺の流れについては比較的古くから研究されていたが，高層建築物が出現したのを契機に，亀井等によって飛躍的に促進された。[17), 18)]

Fig. 3(a), (b)はそれぞれ，建物が一棟ある場合の建物の前面と後面付近の流れのパターンの概念図である。[18)]

市街地では，家屋が密集しているために流れのパターンが一棟の場合と異なり，種々な流れが影響を及ぼしあう。このため，風が弱まる部分と強まる部分が複雑に形成されて延焼にも影響を与える。

Fig. 4は，16棟の家屋模型を4行×4列に配列して，種々の点において風速プロフィールを測定した時の家屋配置を示す。**Fig. 3**(a), (b)のD，Eに対応して，家屋の屋根の高さよりも低い地点においては渦流と逆流が生じた。

測定点①～⑫において，風速が1.5m/s，2.5m/s，5.0m/sの風を与えた場合の風速のプロフィールを求めたが，その結果の一例を**Fig. 5**(a)～(d)に示す。風速の測定においては，初めに風速計の回転方向から順流と逆流の差を読取り，その後風速の測定を行った。但し，風速は1分間の平均風速である。

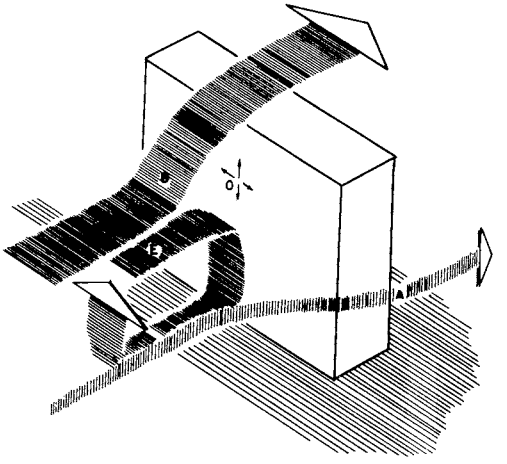

Fig. 3 (a) Flow pattern in front of a house (Ref. 17). (O: stagnation point)

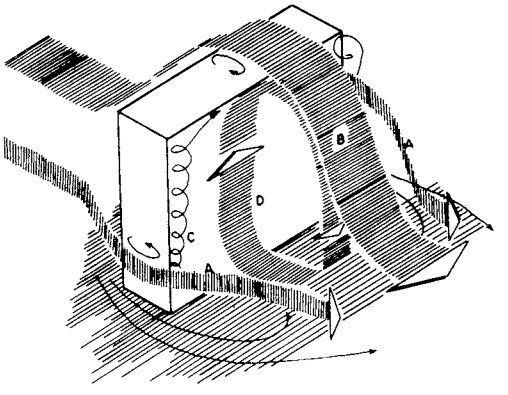

Fig. 3 (b) Flow pattern in the rear of a house (Ref. 17).

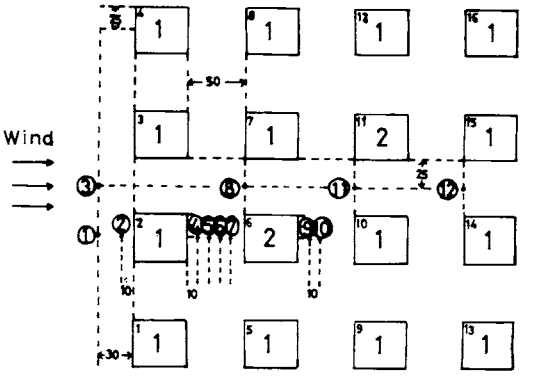

Fig. 4 The arrangement of houses when wind velocity profiles were measured. The distance between houses is fifty centimeter. Large numerical values are house story and small ones are house number. Measurement points are expressed as ①.

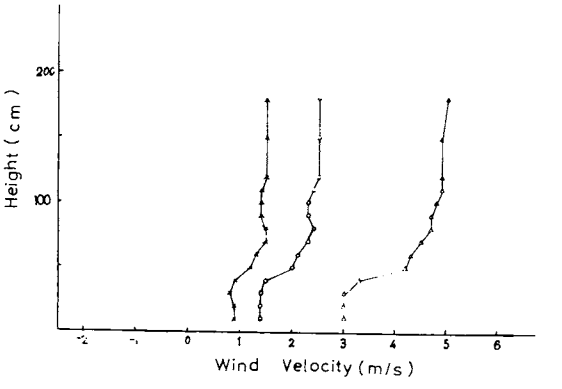

Fig. 5 (a) Wind velocity profiles (point ①)

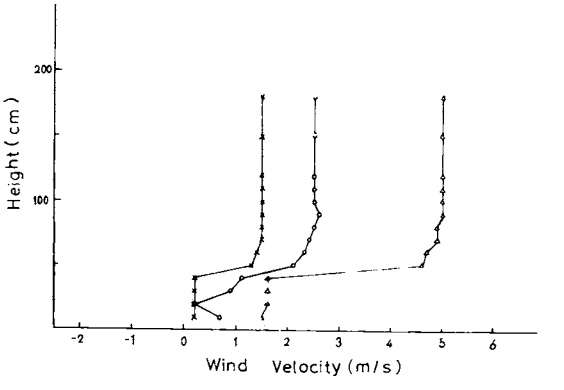

Fig. 5 (b) Wind velocity profiles (point ②)

Fig. 5(a), (b)図は，１階建の家屋模型（高さ60.7cm）からそれぞれ風上側に30cm，10cm離れた地点における風速プロフィールである。家屋模型に近い程家屋の影響による風速の減少が明確に観測された。**Fig. 3**のＥの流れに相当する渦の生成に伴う逆流は，**Fig. 5(a), (b)**の風速の値が正になっているため観測されていないが，瞬間的に逆流が生じていたことが線香の煙の動きから観察された。風速は建物の屋根の頂上（高さ60.7cm）ではなく，ひさしの位置（高さ47cm）の上から急激に大きくなった。

Fig. 5(c)は，**Fig. 4**の地点⑤（１階建の家屋と風下側の２階建の家屋との間の地点）における風速プロフ

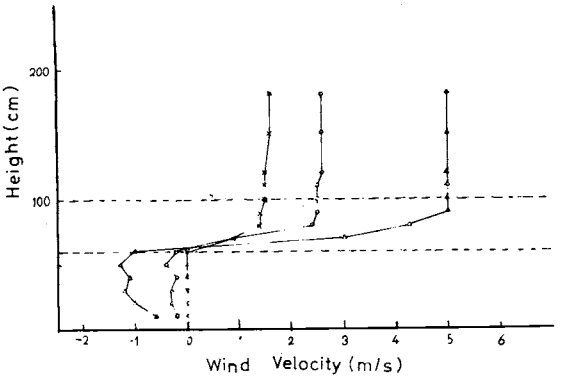

Fig. 5 (c) Wind velocity profiles (point ⑤)

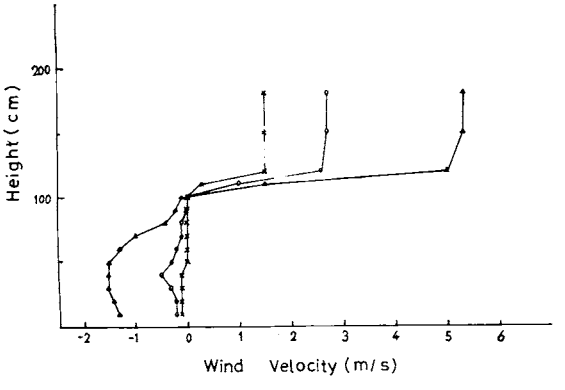

Fig. 5 (d) Wind velocity profiles (point ⑩)

ィールである。風上側にある１階建の屋根よりも低い部分では逆流になっているが，風速が強い場合程逆流風速も強くなった。

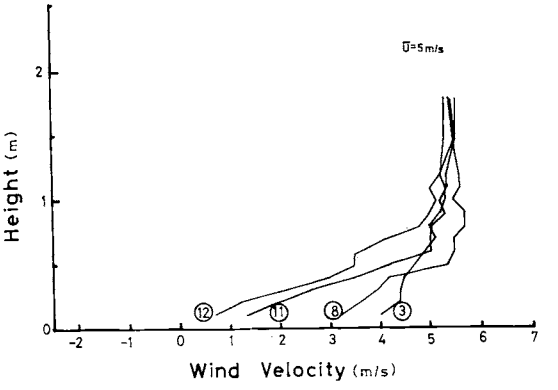

Fig. 6 Wind velocity profiles when houses were presented at the right and left sides of the measurement points.

Fig. 5(d)は，**Fig. 4** の地点⑩（２階家屋の風下側）における風速プロフィールである。逆流風速は順流風速の０～27%程度であり，それが最大になる高さは地上40cmの付近であった。

Fig. 6 は測定点③，⑧，⑪，⑫で，**Fig. 5** の測定条件と同じ条件下において風速が5.0m／sの場合の風速プロフィールを示したものである。測定点③，⑧，⑪，⑫を結ぶ直線上は道路に対応しているが，道路の両側にある建物の混み方の影響を受けて風速が減少することが観測された。また，道路の両側に高い建物が密接して建ち並んだ場合には，地面付近では建物群がない場合よりも強い風が吹く場合があることが補足実験から確認された。これは一般に谷間風と呼ばれるものであり，実際の市街地火災においても発生して，飛火の飛散と煙及び熱の拡散に影響を与えると推定される。

4. 延焼実験の結果

4.1 燃焼及び延焼状況

エタノールに点火後の家屋の燃焼状況及び延焼状況を肉眼及び８ミリシネカメラで観察・記録し，実験後，撮影した８ミリフィルムをもとに肉眼観察の記録を確認し，一部を補充した。

Table 1 に，点火後，種々な現象が発現するまでの時間と延焼状況の経過等を示した。

表中のＡ，Ｂ，Ｃ等の文字は家屋を表わし，点火家屋をＡ，それの風下側の家屋を順々にＢ，Ｃ，Ｄ，風上側の家屋をＥ，Ｆ，Ｇと表わした。計12回の実験のうち，風下隣接家屋へ延焼しなかったのは第１，第２，第５，第６回実験であった。点火してから炎が窓を通して見え始めるまでの時間は，燃焼によってベニヤ板に穴が生ずるまでの時間に大きく影響された。第３，第８，第11回実験においては，床下部分のベニヤ板が燃焼し始める以前にエタノールが燃え尽きて自然鎮火したために，エタノールを再び容器に入れて燃焼させて点火した。木造１階建の場合には，炎が見え始めてから燃焼により家屋が倒壊するまでに12～20分位かかっており，また，窓を通して炎が見え始めてから隣接家屋へ延焼着火するまでは６～10分位であった。風上へ濃い煙が拡散し始めてからこの煙が炎に変化するま

実　験　番　号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
8 ミリのコマ送り	180/分	180/分	60/分	60/分	100/分	100/分	100/分	60/分	100/分	100/分	100/分	100/分
1 点　　火	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2 薄い煙が出始める	1′	1′	3′	1′	1′	1′	1′	1′	1′	1′	1′	1′
3 窓から炎が見え始める	2′29″	2′50″	7′39″	1′40″	2′48″	0′54″	5′20″	13′21″	5′00″	6′36″	8′00″	4′20″
4 炎が風下窓から噴出し始める	7′37″	5′10″	9′24″	7′53″	5′43″	2′32″	7′09″	14′54″	6′30″	8′24″	8′30″	10′24″
5 濃い煙が風上へ拡散し始める	7′22″	5′50″	11′01″	7′46″	5′40″	2′40″	7′26″	16′28″	7′30″	9′30″	11′00″	8′28″
6 風上へ拡散している煙が炎に変化	8′48″	6′08″	11′40″	9′50″	6′42″	5′20″	9′32″	19′02″	8′50″	12′42″	11′30″	12′16″
7 Ⓐが倒壊する	17′00″	19′00″	22′05″	24′37″	18′45″	−	26′00″	31′19″	21′54″	22′40″	25′00″	17′25″
8 Ⓑへ延焼する	−	−	18′11″	18′37″	−	−	11′32″	20′06″	11′20″	17′40″	12′40″	14′03″
9 Ⓑの風下窓から炎が噴出し始める	−	−	19′30″	21′48″	−	−	15′33″	24′31″	12′20″	20′00″	20′10″	
10 Ⓑの2階の内部へ延焼する	−	−	−	−	−	−	−	−	17′24″	−		
11 Ⓒへ延焼する	−	−	−	−	−	−	28′23″	24′59″ (42′19″)	18′11″	35′00″	23′40″	17′05″
12 Ⓑが倒壊する	−	−	30′06″	36′46″	−	−	22′26″	−	−	30′24″	28′30″	24′10″
13 Ⓒの1階内部へ炎が侵入する	−	−	−	−	−	−	−	50′35″	24′12″	34′55″	26′30″	25′35″
14 Ⓒが倒壊する	−	−	−	−	−	−	中　止	51′47″	24′30″	46′57″		
15 Ⓕへ延焼する										13′50″		
16 Ⓔへ延焼する										35′00″		
17 Ⓓへ延焼する										40′30″	31′00″	24′00″
18 Ⓕが倒壊する										32′00″		
19 Ⓔが倒壊する										46′00″		
20 Ⓓが倒壊する										55′00″		
21 Ⓖへ延焼する										32′00″		
22 Ⓖが倒壊する										43′30″		
配置変更								26′35″				

Table 1 Relation between the fire spread phenomena and time.

での時間は，数十秒ないし百数十秒であったが，煙から炎へ，また，炎から煙へ断続的に変化する場合もあった。

燃焼によるガラス窓の破損の仕方には種々な型があり，ガラスを建物内から固定していた接着テープが高温のためにはがれたり，ガラス窓に割れ目が入ってそれが拡大して一部分が落下した。時にはガラスの一部に突然直径5cm程度の穴が生じた場合があった。加熱による窓ガラスの破損の難易が燃焼の拡大に大きく影響を与えている点が実験的に確認された。

延焼着火過程の実態を明確にする際に，火炎の挙動，焦げの発生場所，可燃性ガスの拡散状況，火の粉の飛散状況等が観察可能な項目であり，これらをもとにして着火過程を検討することができる。隣接家屋の焦げの発生場所は炎上家屋からの伝熱量が大きい場所，または昇温し易い場所（可燃物の角，突出部分等）であり，それは炎，可燃性ガス，飛火の有無，建物周辺の流れ等に支配された。**Fig. 7(a)**, **(b)**はそれぞれ第3，第4回実験における延焼着火場所と着火直前の炎の挙動を示しており，どちらも放射による着火と思われた。また，**Fig. 8**は1階建の木造及びモルタル造家屋模型の重量減少速度の一例を示したものであるが，重量減少速度は木造の場合にはほぼ時間の0.85乗に比例して増加していたのに対し，モルタル造の場合，火災の初期においては重量減少速度が小さいが，後で急激に増加した。

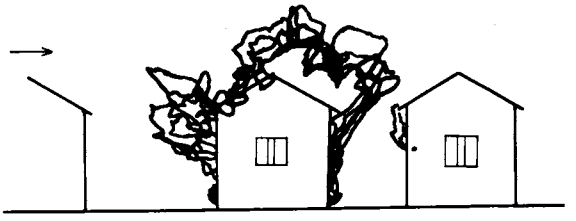

Fig. 7 (a) Behaviour of flame and ignition spot. (Experiment No. 3) ● : igntion spot

Fig. 7 (b) Behaviour of flame and ignition spot. (Experiment No. 4) ● : ignition spot

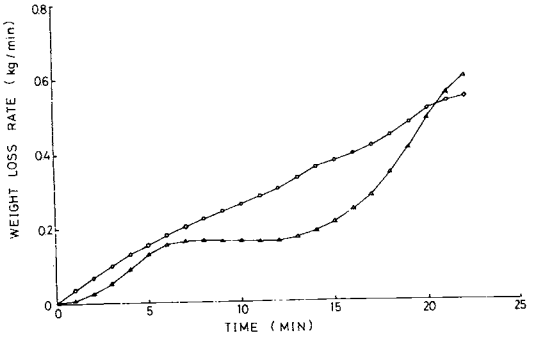

Fig. 8 Weight loss rate of a one-storied wooden and mortar-plastered houses.
(○: wooden house; △: mortar-plastered house)

炎上家屋の窓から噴出した炎と熱気流は，浮力と建物の風下部の渦流（**Fig. 3** のDの流れ）の影響を受けて上昇して，一般には隣接家屋の高い位置にある可燃物を初めに着火させる。実際には，風速，火炎長，建物状況によって高温気の流れのパターンが変化して，**Fig. 3** のBよりAの流れが活発になる場合には，延焼に及ぼす効果は1階建の場合と2階建の場合とでは明確な差がなくなる。建物の正面幅が小さく風速が強い条件下では，Aの流れが活発になり，加熱される部分が建物の風横部に生じる。このような場合には，建物の階数は延焼着火時間と延焼限界距離等に関係しなくなると思われる。2階建の家屋が燃焼している場合には，1階建の家屋が燃焼している場合に比較して発熱量が多くなるが，発生した熱の大部分は建物の上空に拡散するため，1階建の隣接家屋の加熱には余り影響を与えない。

第10回目の実験では，延焼速度が周期的に増減する傾向がみられた。この現象は以下に示すように，建物周辺の流れに関係していた。延焼は被延焼家屋の風上側の建物状況に影響され，風上に建物が密集している場合には上空の風も弱められるし，また，地上付近では逆流が生じて延焼が抑制される。延焼速度が大になると，被延焼家屋の風上側に家屋が焼失しないで残ってくるが，延焼速度が小さい場合には風上側の家屋が焼失しているために，障害物により弱められていない風が被延焼家屋周辺を吹き延焼が促進される。延焼の促進と抑制効果が交互に作用して，延焼速度が周期的に増減した。このような現象は，火災の正面幅が時間的に余り変化しない場合に多く観測されると思われる。

4.2 煙の拡散状況

火災の初期において，**Table 1** の第5項目に示す通り，点火家屋から濃い煙が風下及び風上側の窓から噴出する時期があった。その時の煙の拡散状況を8ミリシネフィルムから複写したものが **Fig. 9(a)**, **(b)**, **(c)** であり，それぞれ第5，第6及び第7回実験の1コマである。図において，点火家屋は真中にある家屋で，風速はそれぞれ2.8m/s，2.7m/s，1.5m/s であり，風速，家屋間距離，家屋の種類と階数が異なっていた。これらの図は点火家屋がフラッシュ・オーバーに至る前の段階であり，煙が風横側の窓でなく風上と風下側の窓から噴出し，かつ発生熱量が小さくて浮力も大きくないため，煙の拡散は家屋の中心線上付近の流れのパターンに支配されたようだ。上述の**(a)**, **(b)**, **(c)**図で共通している点は，点火家屋の風上側の窓から噴出した煙が逆流のために風上側に拡散し，風上隣接家屋の屋根部分でUターンして風下側に拡散していることである。点火家屋から出た煙が風上隣接家屋の方へ拡散するのに，図の**(a)**, **(c)**の場合と異り，**(b)**図の場合には煙が地面近くに接近した。この差は **Fig. 3** の建物の前に生ずる逆流に関係しており，2階家屋の前面に生じた渦のために煙がその部分に滞留したためと思われる。**(b)**図は，2階モルタル家屋に点火した場合であり，一部の煙は風上側に拡散するが，他の一部の煙は炎に混って風下側の外壁に沿って上昇し，その家屋の屋根の風

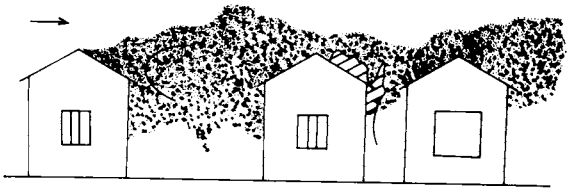

Fig. 9 (a) Situations of the diffusion of smoke among the houses. Central house was ignited. (Experiment No. 5)

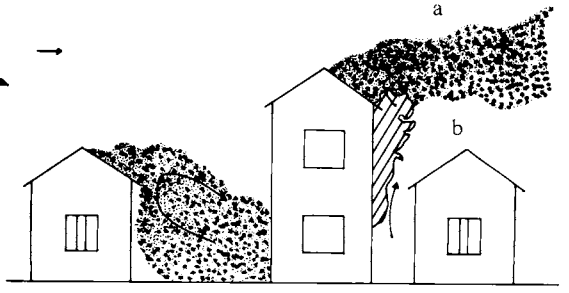

Fig. 9 (b) Situations of the diffusion of smoke among the houses. (Experiment No. 6)
a : smoke ; b : flame

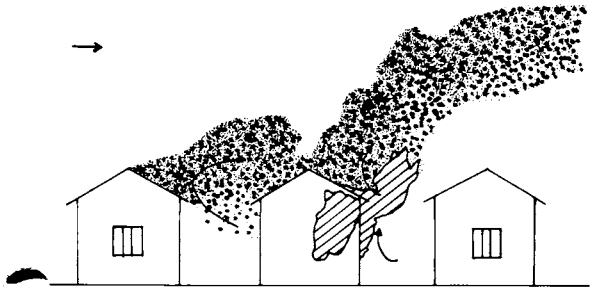

Fig. 9 (c) Situations of the diffusion of smoke among the houses. (Experiment No. 7)

下側斜面の部分から風下側に拡散した。(c)図の場合は，(a)，(b)に比較して風速が弱い場合であり，風下側に拡散している煙が炎の部分の浮力の強い領域で急激に上昇していることが認められた。煙の拡散状況は建物周辺の流れの観察に有用であるばかりでなく熱の拡散状況におおよそ相似しているものと考えられるので，炎上家屋に隣接した家屋の対流伝熱による加熱状況を推定するのにも役立つ。

4.3 放射照度及び気流温度の時間変化

点火家屋周辺における放射照度と気流温度は延焼に対しては基本的な量であり，それらの空間分布及び時

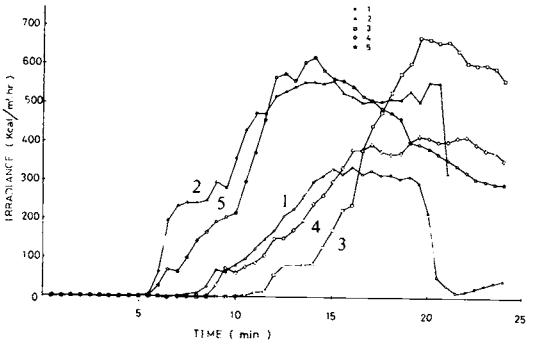

Fig. 10 Relation between the irradiance and time. Numerical values are the experiment number.

間変化が延焼に大きく関係するので，これらの量の時間変化を測定した。

Fig.10は，点火家屋の斜め風下側（点火家屋からの距離 1 m）において，放射計を点火家屋の方向に向けて放射照度の時間変化を測定した結果の一例である。放射照度は燃焼の拡大と共に増加して燃焼の勢力が弱まると減少するため，放射照度の時間曲線には一般に一つのピークが生じた。**Fig.11**からピークに達するまでの放射照度の時間変化をみると，第 1 及び第 2 回実験ではほぼ時間に比例して増加したのに対し，第 3，第 4 及び第 5 回実験では時間の自乗に比例して増加した。

Table 1 に示したように，第 3，第 4 回実験においては，それぞれ点火後18分11秒，18分37秒に風下隣接家屋へ延焼着火した。第 3 回実験の場合には放射照度がピークに達する以前に，また，第 4 回実験の場合には点火家屋周辺の放射照度がほぼピークに達した後で隣接家屋に延焼着火した。炎上家屋からの放射照度が増加している途上で隣接家屋へ延焼する場合には，火炎の噴出が盛んであるため接炎により延焼着火する場合が多い。放射照度が減少する途上で隣接家屋へ着火する場合には火炎が極端に短くて，接炎着火ではなく熱放射による自然着火が起きた。このような場合には延焼着火時間が長く，局部的延焼速度が小さくなった。

Fig.11は，第 3 回実験において，点火家屋内，風下隣接家屋の外壁付近及び室内の気流温度を測定したものである。第 3 回実験では点火後22分05秒で家屋が燃焼により倒壊しているが，この図は点火後18分11秒で延焼着火し，このために気流温度が急激に上昇している様子を示したものである。

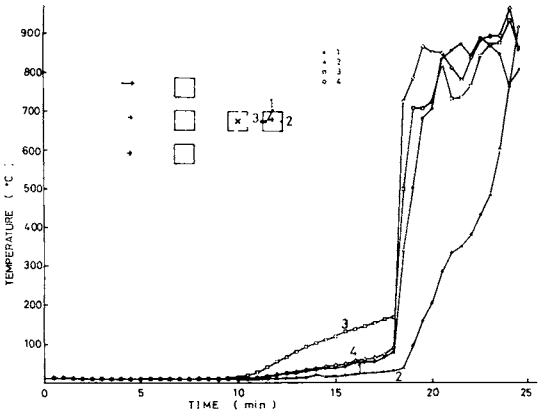

Fig. 11 Relation between the air temperature and time. (Experiment No. 3) ⊠ : ignited house

Fig.12は，第11回実験において，点火家屋に対し隣接家屋の外壁部分における放射照度及び対流熱流束 h（T_g-T_0）の時間変化を示したものである。隣接家屋の建物の中に放射計を置き，炎上家屋の方向に放射計を向けて測定したものであり，ガラス窓（厚さ 2 mm）による吸収を 0.5として補正した。気流温度はガラス窓の最上部（地上28cm）の地点の値であるが，熱放射による熱電対の出力誤差の補正を行っていない。隣接家屋へ延焼着火するまでの熱流束〔$I+h(T_g-T_s)$〕は，時間のほぼ三乗に比例して増加した。

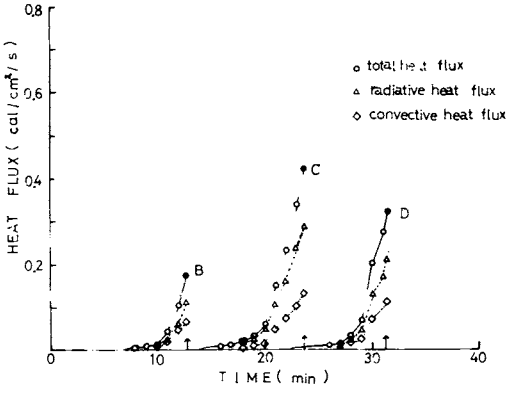

Fig. 12 Relation between heat flux and time. Leeward houses to the ignited house are expressed as B, C and D in close order.

4.4 延焼速度

家屋模型を用いた延焼実験により，現象的な延焼の流れを表に示したものが**Fig.13**であるが，木造家屋に延焼する場合とモルタル家屋に延焼する場合とで少々異なった。木造家屋に延焼着火する場合には初めに外壁に延焼着火するのに対して，モルタル家屋においては外壁が不燃物であるため，ガラス窓を破損して内部の可燃物に延焼着火した。**Table 3** のように建物の外部から観察した経過をたどって隣接家屋へ延焼着火することになる。家屋(Ⅰ)に延焼着火した時刻を 0 にして各現象が発現するまでの時間間隔をそれぞれ，$t_{i,1}$, $t_{i,2}$, $t_{i,3}$, $t_{i,4}$ とする。延焼着火時間（t_i°）は次式になる。

$$t_i^\circ=\sum_{j=1}^{4} t_{i,j}=t_{i,1}+t_{i,2}+t_{i,3}+t_{i,4} \qquad (1)$$

Table 2 は**Fig.13**の分類に従って，撮影した 8 ミリフィルムから$t_{i,1}$，$t_{i,2}$，$t_{i,3}$，$t_{i,4}$ を求めたものを示す。今回の実験においては，風下側の窓にガラスをはめていなかったために $t_{i,3}=0$ である。$t_{i,1}$は着火場所，ガラス戸の種類，開閉状態等に，$t_{i,2}$ は建物内の可燃物の状況，建物のサイズ，建物内の間仕切り状況等に，また $t_{i,4}$ は建物周辺に発散させる熱量の大小及び建物周辺の流れの状況に支配される。微視的に考えた場合には，木造家屋の局所的な延焼速度は次式で表わすことができる。

$$V=\frac{a+d}{t_i^\circ} \qquad (2)$$

モルタル家屋の場合にも，(1)式において $t_1=0$ とすることによって(2)式で延焼速度を表わすことが可能である。

延焼着火時間と延焼速度を同じく **Table 2** に示した第 3 回及び第 4 回の実験では，木造 1 階建の炎上家屋から風下にある木造 1 階と木造 2 階への延焼である。今回の実験では木造 1 階への延焼が比較的早い時期に発生した。木造 2 階への延焼が熱放射によって発現したために，延焼に及ぼす階数の効果が明確に表れなかった。

Table 3 は，各実験毎の火炎の傾きと点火場所を示したものであるが，隣接家屋へ延焼する場合には家屋よりも低い位置にある炎の形状が関係する。火炎の傾きは，建物の上空の風ではなく建物の屋根よりも低い位置の風速に支配されるために，建物の屋根よりも上空の風速と火炎の傾きの間には明確な相関がみられない。また，延焼着火した地点（X, Y）（但し，原点は炎上家屋の風下側の床とする）のY/Xの値は 1 に近い

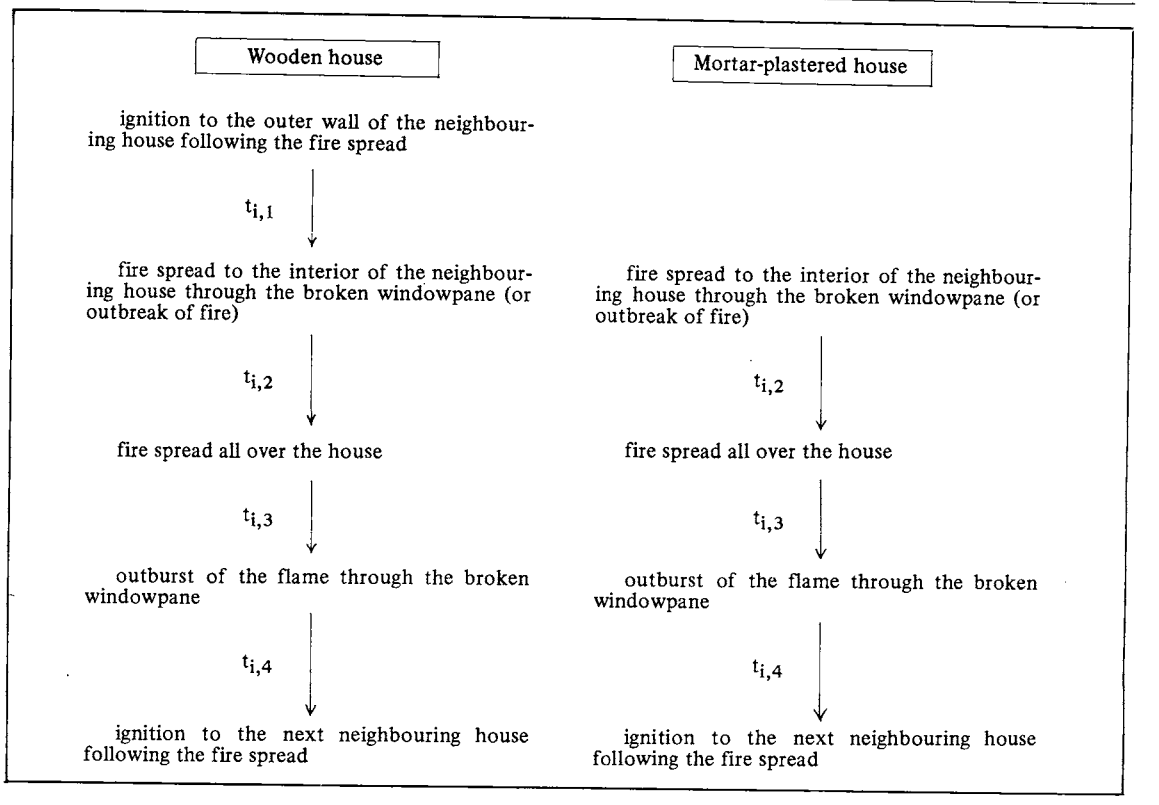

Fig. 13 The process of fire spread.

Experiment	$t_{i,1}$	$t_{i,2}$	$t_{i,4}$	t°_{i}	V(m/h)
3	0′	2′00″	8′30″	10′30″	4.7
4	0′	3′00″	10′00″	13′00″	3.8
7	0′	3′30″	7′30″	11′00″	4.2
	3′00″	3′30″	15′00″	21′30″	2.2
8	0′	0′30″	4′00″	4′30″	7.2
	1′30″	5′00″	12′00″	18′30″	1.8
9	0	3′00″	5′30″	8′30″	3.7
	0′30″	0′30″	4′30″	5′30″	7.3
10	0′	2′00″	9′30″	11′30″	4.0
	1′00″	1′30″	14′00″	16′30″	2.8
	1′30″	1′30″	2′30″	5′30″	8.4
11	0′	3′30″	3′30″	7′00″	6.2
	4′30″	0′30″	4′00″	9′00″	4.8
	4′30″	1′00″	2′00″	7′30″	5.8
12	0′	10′00″	4′00″	14′00″	3.3
	3′00″	1′00″	3′00″	7′00″	6.6
	1′00″	1′00″	1′00″	3′00″	15.4

Table 2 The data for t°_{i} and V. (t°_{i}: ignition time, V; flame spread velocity (m/s)

Experiment	U(m/s)	L(cm)	θ (°)	Y/X
1	1.4	63.0	46	——
2	2.8	59.0	58	——
3	2.8	71.2	70	1.03
4	2.8	67.8	71	0.53
5	2.8	55.0	61	——
6	2.7	45.0	55	——
7	1.5	75.4	59	1.28
8	1.5	44.3	67	1.47
9	1.5	93.1	71	3.0
10-1	1.5	70.5	64	1.0
10-3	1.5	63.0	62	1.43
11	2.8	73.4	89	
12-1	4.5	61.3	69	1.03
12-2	4.5	38.3	67	1.09

Table 3 Ignition spot (Y/X) and tilt of leeward side of flame. (U: wind velocity, L: flame length, X: distances between houses, Y: height of ignition spot, θ: tilt of flame)

値であるが，この値が大きい場合には延焼着火の要因が対流伝熱による場合が多くなると考えられる。

5. 考 察

出火家屋（A）から風下に距離（S）だけ離れたP番目の家屋（P）に延焼着火するまでの時間（t_p）を求めれば平均延焼速度（V）は(2)式を拡張した(3)式で求められる。

$$V=\frac{S}{t_p}=\frac{S}{\sum_{i=0}^{p-1}\sum_{j=1}^{4}t_{i,j}} \tag{3}$$

この式で$t_{i,1}$，$t_{i,2}$，$t_{i,3}$，$t_{i,4}$は家屋（I）から家屋（$I+1$）に延焼着火する場合の時間間隔である。t_pを求めるのに個々の家屋の$t_{i,j}$を決定するのも一つの有力な方法であるが，熱流束函数F_p及び延焼速度の時間関係が予めわかっていれば直接 $t_p\left(=\sum_{i=0}^{p-1}t_i^{\circ}\right)$ または$t_i^{\circ}\left(=\sum_{j=1}^{4}t_{i,j}\right)$ を求めることが可能である。

燃焼家屋から家屋（P）への伝熱量は火災前線と家屋（P）との距離（x）に左右されるが，その距離は延焼速度（V）の函数として(4)で表される。

$$x_p=S-\int_0^t V(t)\,dt \tag{4}$$

家屋（P）の外壁表面が$F_p(t)$の熱流束を受け，かつ外壁が半無限固体とみなされる場合の温度上昇は(5)式で与えられる。[19]

$$T-T_0=\frac{1}{\sqrt{\pi k\rho c}}\int_0^t F_p(t-\tau)\frac{e^{-\frac{\xi^2}{4\kappa\tau}}}{\sqrt{\tau}}d\tau \tag{5}$$

但し，ξは外壁表面からその内部への距離である。熱流束函数F_pは外壁と火災前線との間の距離（x）に左右されるが，xが(4)式で示されるように時間の函数であるためにF_pもまた時間の函数となる。熱流束F_pはxの他に同時炎上幅（D），火炎正面幅（B），火炎長（L），全熱放出速度（Q），外壁表面温度（T_s），気流温度（T_g）等の影響を受ける。

延焼速度が一定であるかまたは時間の一次式で示される場合には外壁の表面温度が発火または引火温度（T_i）に達した時点で延焼着火すると仮定して直接時間（t_p）を求めることができる。t_pは次の(6)，(7)式を満足する。

$$S=\int_0^{t_p}V(t)\,dt \tag{6}$$

$$T_i-T_0=\frac{1}{\sqrt{\pi k\rho c}}\int_0^{t_p}F_p(t-\tau)\frac{e^{-\frac{\xi^2}{4\kappa\tau}}}{\sqrt{\tau}}d\tau \tag{7}$$

理論的に熱流束$F_p(t)$を求めるには燃焼建物から被延焼建物への対流及び放射による伝熱量を記述する必要があるが，燃焼建物周辺の気流温度分布，建物から噴出する火炎の形状，立体的な火炎に対する放射伝熱の形態係数等が明らかでないために数式化するのは容易でない。

家屋（P）に対する熱流束函数$F_p(t)$の時間変化は**Fig.12**からその概要を把握することができる。$F_p(t)$はある時間までは徐々に増加するが，それ以後は急激に増加する傾向がある。急激に増加し始める時期は家屋（P−1）の外壁に延焼着火し，その火が建物内に侵入して急激に火勢が拡大する時があることが実験的に確認された。このことから熱流束函数$F_p(t)$は(8)式で近似できる。

$$\left.\begin{aligned}&F_p(t)=F_0\ (\text{一定})\qquad(0\leqq t\leqq t_c)\\&F_p(t)=A_p(t-t_c)^n+F_0\ (t\geqq t_c)\end{aligned}\right\} \tag{8}$$

$$t_c=t_{p-2}+t_{p-1,1} \tag{9}$$

家屋が密集し，かつ家屋（P）が火災前線から十分離れている場合には放射伝熱の多くは家屋（P−1）等に遮断されて家屋（P）に到達しないが，風下に拡散した高温気の影響を受けて対流伝熱により家屋の外壁が加熱される。火災の接近に伴って高温気の温度（T_g）も上昇するが，外壁の表面温度（T_s）も上昇するので，近似的に外壁への対流伝熱量$h(T_g-T_s)$は一定とみなせる。外壁への伝熱量が一定の場合の固体の表面温度上昇は(10)式で表される。[19]

$$T-T_0=\frac{2F_0}{k}\left[\left(\frac{\kappa t}{\pi}\right)^{\frac{1}{2}}\right] \tag{10}$$

また，熱流束が時間的に変化する場合には，(7)式に対する近似式から(8)式を代入して(11)式が得られる。

$$T_p(t)-T_p(t_c)=\frac{\sqrt{t-t_c}}{\sqrt{\pi k\rho c}}\left[\frac{2A_p}{(-1)^n}\sum_{r=0}^{n}(-t+t_c)^r\binom{n}{r}\times\frac{(t-t_c)^{n-r}}{2n-2r+1}+2F_0\right] \tag{11}$$

(11)式において$n=2$の場合には(12)式になる。

$$T_p(t_p)-T_p(t_c)=\frac{\sqrt{t-t_c}}{\sqrt{\pi k\rho c}}\left[\frac{16}{15}A_p(t-t_c)^2+2F_0\right] \tag{12}$$

F_0が小さい場合には$T_p(t_p)=T_i$，$T_p(t_c)=T_0$として局所的な延焼速度V_{p-1}が(13)式（CGS単位）で求められる。

$$V_{p-1}=\frac{(a+d)}{\sum_{j=1}^{4} t_{p-1,j}}=\frac{(a+d)}{t_{p-1,1}+\left[\frac{15\sqrt{\pi k\rho c}\,(T_i-T_0)}{16A_p}\right]^{\frac{2}{3}}} \tag{13}$$

(13)式に対して$n=3$の場合には(14)式になる。

$$V_{p-1}=\frac{(a+d)}{\sum_{j=1}^{4} t_{p-1,j}}=\frac{(a+d)}{t_{p-1,1}+\left[\frac{35\sqrt{\pi k\rho c}\,(T_i-T_0)}{32A_p}\right]^{\frac{2}{3}}} \tag{14}$$

(13), (14)式において時間間隔（$t_{p-1,1}$）は外壁に延焼着火してから火が建物内に侵入するまでの時間である。

nの値は風速が強く，かつ燃焼家屋が小さい場合には大きくなるが，第11回実験の結果ではnは3に近い値になった。(14)式において，$a+d=77$cm，$k\rho c=8\times10^{-5}$cal^2/cm^4/sec/℃，$T_i-T_0=350-20=330$℃，$t_{p-1,1}=270$sec，$A_p=1\times10^{-8}$としV_{p-1}の値を求めると$V_{p-1}=4.7$m/hになり実験の結果とほぼ一致した。

外部加熱標準曲線から延焼速度を推定することができる。浜田は燃焼家屋からxだけ離れた点（高さy）にある隣接家屋の外壁温度を1級～4級に分類している。[21] 2級，3級，4級の温度はそれぞれ1級の3/4，1/2，26/11としている。燃焼家屋が木造の場合，その周辺の任意の点（x，y）にある外壁温度の空間分布は(15)式で近似される。但し，T_sは燃焼家屋が1級の場合の外部加熱温度標準曲線で，bは0.27である。

$$\frac{T}{T_s}=e^{-b\frac{x}{\sqrt{y}}} \tag{15}$$

火災の初期段階ではT_sは時間(t)の5/2乗にほぼ比例して増加するから(16)式で表わされる。

$$T_s=B_1 t^{\frac{5}{2}} \tag{16}$$

隣接家屋の外壁表面の温度が発火または引火温度(T_i)に達するまでの時間から延焼速度は(17)式になる。

$$V=\frac{a+d}{t_i^{\prime}}=(a+d)\left(\frac{B_1}{T_i}e^{-b\frac{x}{\sqrt{y}}}\right)^{\frac{2}{5}} \tag{17}$$

(17)式は(13)式において$t_{p-1,1}=0$の場合，即ち延焼着火前に窓ガラスが破損していたことに相当する。

延焼は家屋，気象，消防，地形，道路，空地等の多くの因子の影響を受ける。家屋では，燃焼家屋及び被延焼家屋の種類（木造，防火，耐火），面積，階数，火災荷重，開口部の位置と大小，家屋内の可燃物の配置等に関係し，家屋間距離にも左右される。延焼はさらに火の粉の飛来の多小，昇温し易い場所の有無，ガラス窓の開閉状況，瞬間的な接炎の有無等の不確定な要素にも大きく影響される。

延焼の基本的な問題は延焼限界条件と延焼速度であるが，これらに及ぼす防火造建物及び2階建家屋の効果について吟味する。延焼限界条件を熱的に考えれば(5)式で求められる被延焼家屋の外壁の表面温度が可燃物の発火または引火温度に達しないことである。(15)式を利用すれば延焼しない近似的な条件は(18)式で表わされる。

$$b\frac{x_d}{\sqrt{y}}>\log_e\frac{T_{sm}}{T_i} \tag{18}$$

上式でT_{sm}は，1,110℃であり，bは燃焼家屋が木造の場合には0.27であるが，防火造及び耐火造の場合には異なった値になる。

防火造建物は延焼を抑制させるが，その効果は防火建物が燃焼建物のときと被延焼建物の場合では異なる。両方とも防火造建物の場合には延焼抑制効果は更に強まると考えられる。浜田は燃焼建物が防火造の場合には燃焼家屋の周辺にある外壁の加熱が1級ずつ下るとしているが，このことは(15)，(17)，(18)式のbの値が2倍になることを意味している。出火してから火災の最盛期に至る時間は木造の場合には7.3分で，防火造の場合には16.6分というデータは防火造家屋の温度上昇が木造の場合と異なることを示唆している。防火造建物の火災初期の温度上昇が時間の5/2乗に比例して増加していても，(16)，(17)式の防火造建物のB_1の値は木造建物の場合よりも小さくなる。燃焼建物が木造で，被延焼建物が防火造の場合には建物内の可燃物が不燃物で遮断されて，延焼着火個所は開口部周辺にある可燃物に制限される。延焼経路は加熱により破損した窓ガラスの一部から炎と熱気が侵入し，窓ガラスの近くにある可燃物が着火する。窓ガラスが破損するまでは，建物内への放射伝熱の一部と対流伝熱が遮断されるが，破損した後では建物内への伝熱量は急激に増加する。このため窓ガラスの破損時期が延焼速度に及ぼす効果は大きくなる。延焼のうちの特定な問題に対しては火災実験から求めるよりも実際の火災の報告書を分析した方が望ましい場合も多い。東京消防庁では一般建築物焼失所要時間，隣棟着火所要時間，延焼限界距離に及ぼす延焼経路（木造→木造　木造→防火造，防火造→木造等）については，[22] また，佐々木と神は延焼確率に及ぼす延焼経路の効果等について[23]の分析結果を発表している。(18)式から分るようにbの値は近似的に条件が変化した場合の延焼限界距離（bx_d）の変化率に比例

するので，これらのデータから b の値を推定する。東京消防庁のデータでは木造から木造家屋の場合を1とした場合には b の値はおおよそ2（木造→防火造），5(防火造→防火造）になるが，佐々木と神のデータでは1（木造→防火造），1.5～2.5（防火造→防火造）になり，風速が増加すると b の値が減少する傾向がみられる。

今回の延焼実験では木造家屋から木造家屋の延焼では延焼限界距離は風速が1.5m/s～2.8m/sの範囲で約35cmであった。第5，第6回実験のように燃焼家屋と被延焼家屋のいずれかが防火造建物の場合には家屋間距離（x）が20cmでは延焼しなかったが，第7回実験のように $x=7$ cmの場合には容易に延焼した。このことは延焼経路が防火造から木造へ及び木造から防火造の場合の b の値が1.75～5の範囲にあることを示している。b の値は風速，火災正面幅，出火してからの時間等によって変るが，火災統計及び延焼実験の結果を基礎にして近似式を求めることができる。

一般に2階建の家屋は1階建の家屋に比較して延焼を促進させると考えられている。浜田は被延焼家屋が2階建の場合には(18)式にも示されているように，延焼限界距離が1.3倍大きくなるとし，堀内は2階建家屋を平均建ぺい率の増加におきかえて火災危険性の増大を示している。燃焼家屋が2階建の場合と被延焼家屋が2階建の場合では階数が延焼を促進させる仕方に差がある。被延焼家屋が2階建の場合には燃焼家屋の火炎と被延焼家屋の最短距離が短くなるために延焼着火時間が短縮される。燃焼家屋が2階建の場合には燃焼区域が大きくなるために発熱速度及び被延焼家屋への伝熱量が増加する。建物が高くなると延焼を促進させる作用が生じる一方で熱気流をより多く上空に拡散させるために発熱量の増加分が被延焼建物にそのまま伝達されない。また，建物が高くなると逆流域も上に拡大して風下への延焼を抑制する作用が強まる。このように階数が多くなると延焼の促進及び抑制作用が同時に強まるために，2階建の家屋が延焼速度を一方的に増加させるとは限らない。木造家屋が密集している地域においては2階建の家屋は延焼を促進させるが，防火建物が十分に離れて存在する場合には建物周辺の風の乱れが強まり，延焼に対する抑制効果を高める。

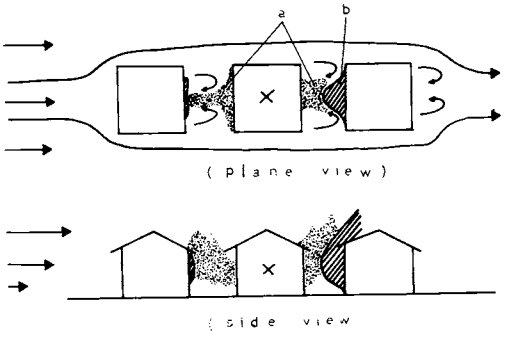

Fig. 14 Control and promotion of the attachment of flame to the neighbouring houses by the air flow around houses. (x: ignited house, a: flame, b: flame-checking air layer)

建物群の中の一つ家屋から出火した場合には建物周辺に形成されている逆流及び渦流の影響を受けて火炎が噴出し，熱気及び煙が拡散する。**Fig.14**は延焼に及ぼす流れの効果を示しており，延焼は建物及び火災の周辺気流に左右される。燃焼家屋から風下の隣接家屋に延焼する場合にはその間に生じた逆流域の影響を受けて火炎が被延焼建物に接触するのを阻止させる。このため，この逆流域が接炎遮断層の働きをする。

一方，風上側の隣接家屋に延焼する場合には風上側の逆流は接炎を促進させる。一般に延焼着火時間が短くなると延焼速度も大きくなるが，風上に延焼する場合には逆流に促進されて着火時間が条件によっては風下側よりも短くなる。しかし，着火した後での火災の拡大が速くないために延焼速度が大きくならず，風下方向と風上方向の延焼速度が異なる原因の一つとなるようである。

7. 結論及びまとめ

犬小屋大の家屋模型を用いて延焼実験を行い，家屋群周辺の流れと着火直前の炎の挙動を観測し，延焼に及ぼす効果について現象論的に検討した。着火場所と8ミリフィルムに撮影されている炎の位置及び乱れの度合から判断して延焼着火が接炎ではなく飛火または放射によって起る場合が多いことが実験的に確かめられた。家屋間の地面に近い部分には逆流が生じており，この逆流が風上に延焼する場合には延焼を促進させ，風下に延焼する場合には局所的であるが接炎遮断層となり延焼を抑制していることが明らかになった。延焼着火が飛火または放射伝熱によってなされる場合には被延焼家屋の階数は延焼速度及び延焼限界距離に著し

い影響を与えなくなる。家屋間距離が延焼限界距離に近い場合には燃焼建物の焼失の度合に影響されて延焼速度が周期的に増減する場合のあることが確かめられた。

市街地火災の延焼速度を理論的に求めるには燃焼家屋から被延焼家屋への伝熱量を予測しなければならないが，伝熱量の時間変化を仮定して延焼速度の近似式を求めて今回のデータと比較検討した。

記　号

a ：家屋幅
A_p ：定数
B ：火災正面幅
B_1 ：定数
b ：定数
c ：比熱
d ：家屋間距離
D ：炎上幅
F ：熱流束函数
F_0 ：定数
h ：熱伝達係数
I ：放射照度
L ：火炎長
k ：熱伝導率
Q ：発熱速度
S ：出火家屋からの距離
T_g ：気流温度
T_i ：発火または引火温度
T_0 ：初期温度
T_s ：隣接外壁温度標準曲線
T_{sm} ：T_sの最大値
$t_{i,j}$ ：時間要素
t_i^o ：$=\sum_{j=1}^{4} t_{i,j}$
t_p ：$=\sum_{i=0}^{P-1} t_i^o$
t_c ：$t_{p-2} + t_{p-1,1}$
U ：風速
V ：延焼速度
V_{p-1} ：局所的延焼速度
x ：水平距離
y ：高さ
X, Y ：それぞれ延焼着火した位置の水平距離と高さ
x_d ：延焼限界距離基準値
κ ：$k/c\rho$
ρ ：密度
ξ ：外壁表面からその内部への距離
θ ：炎の傾き角

引用文献

1）秋田一雄：消防研究所報告，**9**，32（1959）
2）N.J.Alvares et al：*Combustion Science and Technology*，**1**，407（1970）
3）S.B.Martin：*US NRDL TR*－102（1956）
4）D.L.Simms and Margaret Law：*Combustion and Flame*，**11**，377（1967）
5）E.W.Price et al ：*AIAA Journal*，**4**，1153（1966）
6）A.M.Kanury：*Fire Research Abstracts and Reviews* **14**，24（1972）
7）J.R.Welker *J.Fire and Flammability*，**1**，12（1970）
8）H.C.Hottel and G.C.Williams：*10th Inter. Symposium on Combustion*，997（1965）
9）P.H.Thomas：*Forestry*，**XL**，139（1967）
10）W.H.Frandsen：*Combustion and Flame*，**16**，9（1971）
11）P.J.Pagni and T.G.Perterson：*10th Inter. Symposium on Combustion* 1099（1965）
12）F.A.Albini：*10th Inter.Symposium on Combustion* 553（1965）
13）F.R.Steward：*Combustion Science and Technology*，**4**，177（1971）
14）浜田稔：火災の延焼速度について：火災の研究，35，相模書房
15）堀内三郎：都市の消防施設に関する研究，京都大学，学位論文
16）浜田稔：東京大震火災への対応：日本損害保険協会（1974）
17）鹿島建設技術研究所資料：建築物周辺気流，18
18）亀井勇：ビル風ー動向・分析・対策：建築技術，**281**，512（1975）
19）H.S.Carslaw et al：Conduction of Heat in Solids:Clarendon Press 57（1959）
20）建築防火論：建築学大系（**21**），彰国社，139（1956）
21）坂本正：火災防ぎょ論，全国加除法令出版
22）佐々木弘明・神忠久：都市火災の延焼確率，災害の研究 **IX**，220（1977）

Experimental Study on House-to-House Fire Spread

(Abstract)

Kunihiro Yamashita

(Received December 24, 1977)

The behaviour of house-to-house fire spread was experimentally investigated using house models comparable in size to ordinary dog-house. The work consists of a preparatory examination of wind velocity profiles around the house models and the succeeding twelve runs of fire spread experiments, where five to seven house models of both wooden and mortar-plastered type were employed in each run. Every fire experiment was started by igniting one of the house models at one corner under its floor, and the progress of fire spread, diffusion of smoke and turbulence of flame were observed by the aid of 8 mm cine record. Measurements were also made with the irradiance and air temperature around the burning house models.

On the basis of experimental results, the effect of air-flow pattern on fire spread was clarified and discussion was made on the rate of fire spread according to both theoretical and empirical methods.

消防研究所報告

通巻 45 号

昭和53年3月31日発行

編集
発行　自治省　消防庁　消防研究所

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