REPORT OF FIRE RESEARCH INSTITUTE OF JAPAN
Serial No.49 March 1980

消防研究所報告

通 巻 49 号 1980年3月

目 次

研 究

煙到達時刻推測法の評価(英文)……佐藤晃由……(1)

燃焼木炭の消火……高橋 哲……(7)

CO, CO_2発生の燃焼条件による影響について……守川時生……(14)

実規模室内火災実験における火災性状と発生ガス……斉藤 直・箭内英治……(21)

消 防 研 究 所
東 京 都 三 鷹 市

REPORT OF FIRE RESEARCH INSTITUTE OF JAPAN

Serial No. 49 March 1980

– Contents –

MEMOIR

The Evaluation of An Estimation Method of Smoke Arrival Time in Building Fires
..... Kohyu Satoh ..... (1)

Extinction of the Charcoal Fire
..... Satoshi Takahashi ..... (7)

CO and CO_2 Generations under Various Burning Conditions
..... Tokio Morikawa ..... (14)

Fire Behaviour and Combustion Products in Full Scale Room Fire Test
..... Naoshi Saito and Eiji Yanai ..... (21)

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

煙到達時刻推測法の評価
（概　要）

佐藤　晃由

（昭和54年10月24日受理）

建物内で火災が発生し煙が拡散しつつある時，火災に関する入力データを実時間で処理し，建物内の各場所にどれ程の時間後に煙が到達するかを予測する方法は現在のところ，山田による煙到達時刻推測法しかない。この方法により実際に種々の条件下で煙を拡大させ，その方法の評価を行なった。その結果，この方法は急激に危険が迫りつつある場所を探し出す目的に用いるのが適しているようである。

The Evaluation of An Estimation Method of Smoke Arrival Time in Building Fires

Kohyu Satoh

(Received October 24, 1979)

An Estimation method of smoke arrival time was proposed by Yamada, and except this system there is no computer-assisted evacuation guidance system on Japanese market. Of course such a system cannot always estimate the smoke arrival time accurately. As a first step of developing better systems, a simulation related to smoke spreading in building fires has been conducted using this estimation method. The experimental results shows that one of the best way to use this system might be to find out areas where a rapid evacuation might be demanded in a firing building due to dense smoke.

1. Introduction

If an information about fire smoke spread at a given time could be obtained when a building was on fire, it would be useful to decide effective measures for evacuation of occupants from the building. However it is very difficult and perhaps impossible to estimate fire smoke spread accurately. Recently, Yamada prposed a method which can roughly estimate the fire smoke arrival time in a firing building, in Real Time, but didn't make public its details and a report on the experimental evaluation of the system[1]. Considering the potentiality of computer-assisted systems, there might be demand of these systems including software in near future. To fill up a gap between fire protection engineering and system engineering, the simulation has been conducted using a microcomputer by making a run of the program based on Yamada's proposal.

2. Estimation Method of Smoke Arrival Time

Yamada proposed that smoke-polluted section would be derived on the basis of response of smoke detectors and the section could be momentarily adjusted from smoke-developing speed. The smoke-polluted section can be displayed in the form of map on Cathode Ray Tube (CRT), and a distribution of the estimated time to smoke arrival after the first smoke detection or from present time point can be also displayed on CRT. At the time of first response of a smoke detector at a certain position in the building, the nature of the fire smoke spread can not be estimated because of diversified fire behavior and ventilation systems, and only an a-priori value of smoke-developinng speed is given. Hereafter, the section where the occupants in the building cannot pass through smoke is called a Polluted position (P.P.). If a position is clear but at least

one of the neighboring position(s) has already been polluted by smoke, the clock located at that position starts to count time. This kind of position is called a Time Counted Position (C.P.). This clock will continue to count time until the position is polluted by fire smoke, and it will stop at that time. After that time the position belongs to the P.P. category and the clock will begin to count down. The reason for this decrement will be outlined below. The counted time varies with the reciprocal of smoke developing speed near the position concerned. However the smoke developing speed at a C.P. cannot be obtained unless the fire smoke arrives there and the clock stops to count time. Therefore the adopted smoke speed at a C.P. should be equal to that at an adjoining P.P.; namely the Estimated Smoke Arrival Time at a C.P. = Counted Time at an adjoining P.P.. If a C.P. is adjacent to more than one P.O., the maximum of the speeds at the neighborhood of P.P.'s; namely the minimum of the counted time should be selected. If fire smoke does not arrive at a C.P. even after several time increments have passed, the estimated smoke arrival time at a C.P. will decrease, while the clock at the C.P. contimues to count up. Because the time of fire smoke arrival at the position is imminent. Therefore the counted time at a P.P. should decrease incrementally. The position where smoke does not exist and which is not adjacent to any P.P.s is called an Unpolluted Position (U.P.). At this position the smoke arrival time is estimated by going back to the positions where the smaoke arrival times are already known. These procedures are shown in **Figs. 1-4**. The first stage of the procedure is the classification

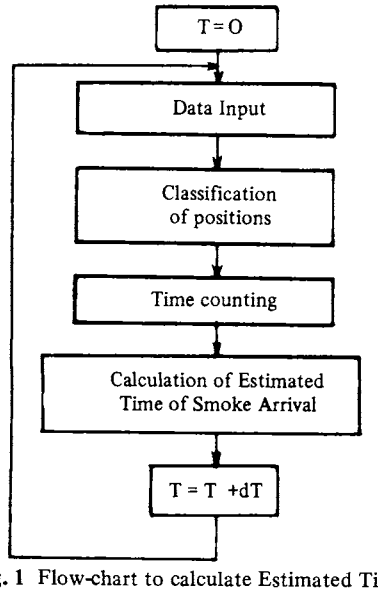
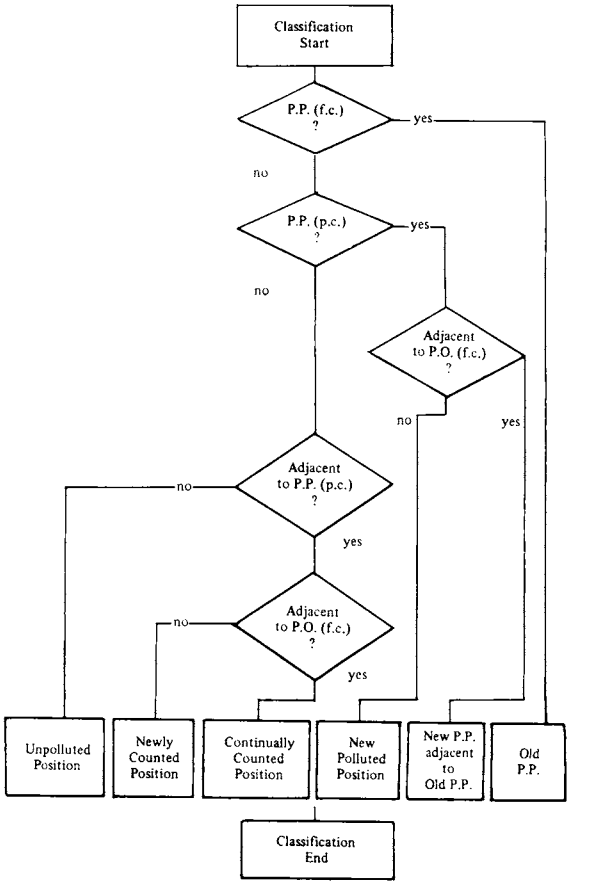


Fig. 1 Flow-chart to calculate Estimated Time of Smoke Arrival. dT means a time interval.



P.P.; Polluted Position
f.c.; former cycle, i.e. at dT seconds before
p.C.; present cycle

Fig. 2 Classification of positions in a building.

of the positions, i.e. in which category the position is included at the present cycle as shown in **Fig. 2.** The criteria of classification are based on whether the position has already been polluted by smoke or whether the position was polluted by the former cycle or whether there is a polluted position adjacent to it at this time or whether there has been a polluted position adjacent to it at some time since the beginning of the firebreak. After passing through these mesh strainers the positions are distributed into 6 different kinds. According to this classification the clocks at each position will operate as shown in **Fig. 3.** From the counted time obtained, the estimated time of smoke arrival will be obtained as shown in **Fig. 4.** These procedures will be repeated every dT second.

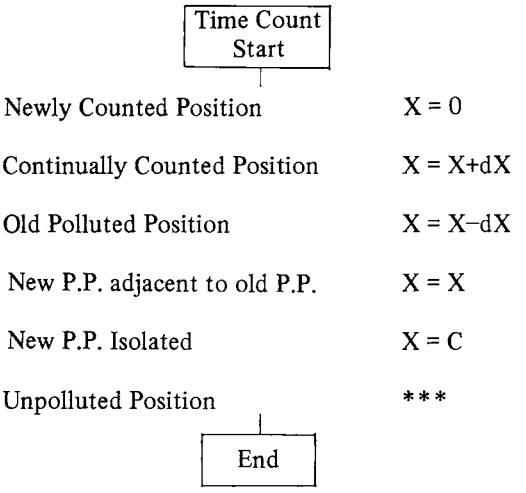


Fig. 3 Time Counting. dX is usually 1 second.

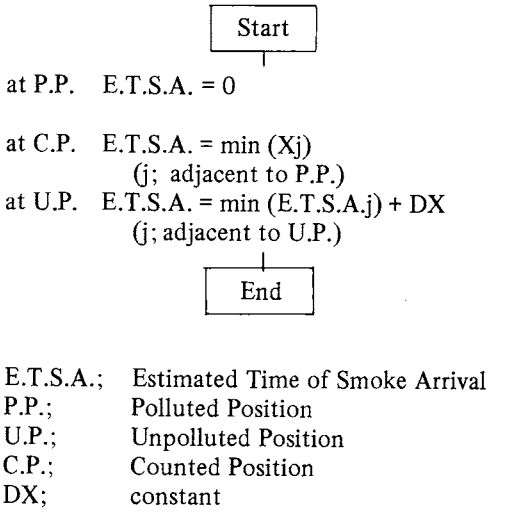


Fig. 4 Calculation of Estimated Time of Smoke Arrival

3. Evaluation

The evaluation was conducted using a microcomputer system and a simple model (5.5 X 3.5 m; floor height of 60 cm). Instead of fire detectors, a number of miniature smoke density meters were installed beneath the ceiling, and the threshold extinction coefficient was set at the value of 0.1 m^{-1} to 0.22 m^{-1}. Smoke was generated by putting wood into a furnace. The estimation subroutime of the program started to run in the computer when the smoke was introduced into the room through a hole on the floor. When the quantity of flowing smoke was constant or increasing gently, the smoke had arrived at about the same time as the estimated value shown in **Table 1. Table 1-1** shows the times occupied really by the smoke arrived at each position. **Table 1-2** to **1-4** shows the estimated times which will be left before fire smoke arrives at each position. Therefore the estimated time of smoke arrival after the first fire detection can be obtained by adding the time elapsed to it. The situations in **Table 1** were observed when the smoke temperature was low and the developing speed was also low. On the contrary when the quantity of the smoke increased abruptly, the smoke arrived faster than the estimated time. However as the estimation was renewed continuously, the difference reduced every moment even though the estimated values at the former cycles differed from the real one. This

is shown in **Table 2**. Therefore this method does not produce so much poor results in this case.

Table 1 The really elapsed time on smoke arrival (1-1) and estimated times at each position at 25 seconds (1-2), at 75 seconds (1-3) and 200 seconds (1-4) in the case when the smoke temperature was low and the developing speed was also low. * means that the remarkable smoke was not observed at 200 seconds after the start. The threshold extinction coefficient was 0.1 (1/m). DX = 30 sec.

(1-1)									
0 sec	*	*	*	*	*	*	*	*	*
	*	*	*	200	150	175	150	75	100
	*	*	200	100	75	50	50	25	25
	*	200	125	100	75	50	50	25	50
(1-2)									
25 sec	265	235	205	175	145	115	85	55	35
	235	205	175	145	115	85	55	25	5
	205	175	145	115	85	55	25	0	0
	185	155	125	85	65	35	5	0	5
(1-3)									
75 sec	175	145	115	85	55	30	30	25	30
	145	115	85	55	25	0	0	0	0
	115	85	55	25	0	0	0	0	0
	115	85	55	25	0	0	0	0	0
(1-4)									
200 sec	145	115	85	55	25	50	20	0	0
	135	105	75	0	0	0	0	0	0
	105	75	0	0	0	0	0	0	0
	80	0	0	0	0	0	0	0	0

Table 2 The really elapsed time on smoke arrival (2-1) and estimated times at each position at 20 seconds (2-2), at 35 seconds (2-3) and at 50 seconds (2-4) when the quantity of the smoke increased abruptly. The threshold extinction coefficient was 0.12 (1/m). DX = 15 sec.

(2-1)									
0 sec	45	55	50	40	35	40	70	65	85
	20	50	70	55	65	65	80	75	145
	25	45	60	40	80	50	55	60	95
	30	40	40	45	25	40	35	55	65
(2-2)									
20 sec	10	25	40	55	70	85	100	115	130
	0	10	25	40	55	70	85	100	115
	10	25	40	55	70	85	100	115	130
	25	40	35	70	85	100	115	130	140
(2-3)									
35 sec	0	15	25	10	0	10	25	40	55
	0	0	15	15	10	25	25	40	55
	0	0	15	15	0	15	10	25	40
	0	0	15	0	0	0	0	10	25
(2-4)									
50 sec	0	15	0	0	0	0	0	15	30
	0	0	15	0	0	0	15	30	45
	0	0	0	0	0	0	0	15	30
	0	0	0	0	0	0	0	0	15

The case which produces poor results was that when a new fire broke out at a separate location from the original position, for example an air conditioning outlet began to emit smoke. In this case most positions changed into the section where occupants in the building cannot pass through except for a few exception. This is shown in **Table 3**. This situation would be very possible in a real building fire. Therefore the system should be designed so that the occupants in the building can be evacuated safely, even if such a situation occurs.

Thus this method might be useful depending upon the operating method. However there might well be rooms for further improvements.

Table 3 The really elapsed time on smoke arrival (3-1) and estimated times at each position at 35 seconds (3-2), at 60 seconds (3-3) and 90 seconds (3-4) in the case where a new fire broke out at a separate location from the original position. The threshold extinction coefficient was 0.22 (1/m). DX = 15 sec.

(3-1)

0 sec	140	170	170	150	140	125	125	70	70
	95	80	170	70	55	110	110	45	55
	70	60	80	140	60	40	35	165	110
	160	100	135	120	60	55	130	145	100

(3-2)

35 sec	115	100	85	70	55	40	25	40	55
	100	85	70	55	40	25	10	25	40
	85	70	55	40	25	10	0	10	25
	100	85	70	55	40	25	10	25	40

(3-3)

60 sec	40	25	30	15	5	15	15	0	0
	25	10	15	0	0	0	0	0	0
	10	0	0	0	0	0	0	0	0
	25	10	25	0	0	0	0	15	15

(3-4)

90 sec	15	0	15	0	0	15	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	15	15

4. Supplement

This work was supported by special research expense of F.R.I., given for studies on evacuation and rapid rescue techniques in high-ries buildings, during the period from 1976 to 1978.

Reference

1) Y. Yamada: Electrical Engineering Magazine "OHM" (in Japanese) p. 57, December, 1975.

燃焼木炭の消火

高橋　哲

（昭和54年11月19日受理）

1.　まえがき

木材火災の消火にあたって，共存する生成木炭[注1]が消火効果を左右する大きな要因であることは，すでに多くの人々が認めている。特に碓井[1]は，消火必要水量を炭化深度と風速の関数として，火災温度毎に実験式で示したが，なおかつ現象の原理的解釈はなされていない。

発炎燃焼領域における消火実験では，生成木炭と木質部の燃焼熱分解に伴う作用とが重複してしまうので，そこから個々の成分の果たす役割を消火則として純化抽出することは非常に困難であると思われる。

すでに木材クリブの消火については，明瞭な規則のあることが高橋[2]によって報告されているが，木炭の消火については全く研究されていない現況にあると思われる。

そこでまず炭素単独の役割について解明すべく消火実験を行い，さらに物理的考察も加えて本稿に述べる。

2.　実験の方法と装置

2.1　試料

$3^2\times21-4\times8$ 配列[注2]の杉クリブを重量が約80%減じるまで燃焼させると発炎がほぼ完全に停止して，クリブの形状を保ったままの杉木炭がえられる。そこで試料としてこれをそのまま使用することとし，炭化し終えた時点で注水消火を開始した。

2.2　実験装置

実験装置には従来使用してきたもの[注3]をそのまま用いたが，注水ノズルには **Fig.1** に示すように，クリブ交又点の凸面中心に一点ずつ水を注げる構造としたものを新しく製作して使用した。

2.3　方法と測定項目

実験の方法は従来と全く同じであり，測定は消火段数，消火時間および重量変化であるが，本稿には前二者に焦点を絞って検討する。

なお，水の作用機構を考察するにあたり，木炭の水吸収度を調べた。すなわち，木炭の水の吸収速度は，水が高温の時と常温の時とではかなり異なると認められた。そこでビーカー中で水を沸とうさせながら，数種類の杉木炭片を投入し，標準的消火時間である1分後，および飽和度を調べるため30分後の重量を測定し，さらに水の加熱を止めた後，木炭片を浮かべたまま放置して20時間後にも秤量した。

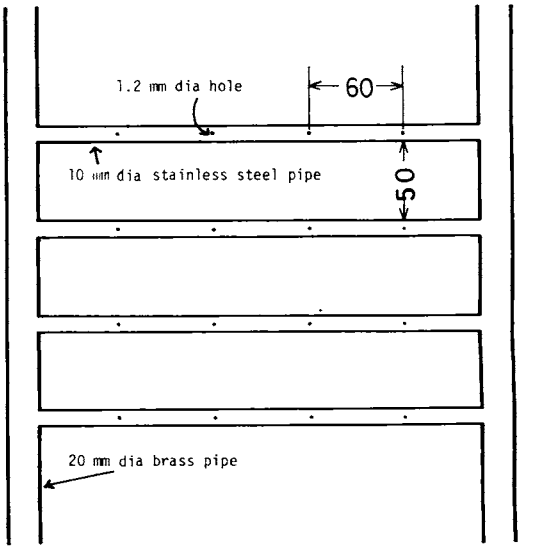


Fig. 1 Nozzle used in this experiment. For $3^2\times21-4\times8$ type crib

注1）普通には木材を窯で燻焼させ製造したものが木炭と思われているが，燃焼条件下に製造したものも木炭と称しており，両者の区別ははっきりしたものではない。[5]
注2）文献[2]参照
注3）　同上

3. 実験結果

3.1 消火時間と消火段数

消火段数 Ne と注水時間 t の間には，木炭の場合にも，木材の場合[注4]と同様に，(1)式で表わすことのできる良好な関係の成立することがわかった。

$$Ne = K_c t^n \qquad (1)$$

ここで K_c は注水率の関数，n は定数である。

但し，注水率Pを変えながら(1)式の関係をグラフにえがくと，**Fig.2** に例示するように，注水率が小さい時(P_3)には消火の末期近くになると，その時点までのグラフの延長線から予測されるよりも消火時間が短縮されること，他方注水率の大きい時(P_1)には，注水初期に，それ以後のグラフの延長線より消火段数が増加する傾向のあることが認められた。その理由は次のように考えられる。

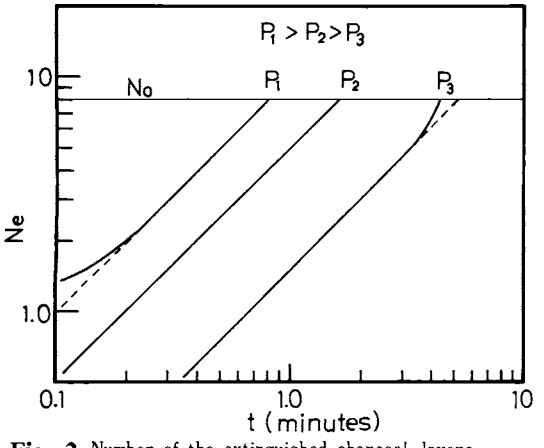
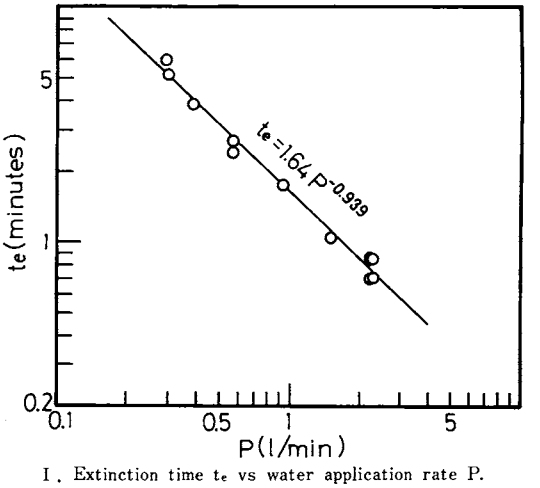


Fig. 2 Number of the extinguished charcoal layers Ne show different trends depending on the water application rate P.

即ち，注水率が小さい時には消火に時間を要するため，末期にはクリブ底部の木炭が極端に焼細り焼失してくる。そのため，それ以前の傾向より相対的に消火必要水量が少なくて済み消火が早まるとみられる。一方，これは一般的にいえることだが，生成木炭の新しい表面はかなり脂肪質な感じを与え水との親和性が乏しく，最初に注いだ水の相当部分が露がこぼれるような形で流れ下る[注5]。そして表面の疎水層を打破り一定の平衡的吸収速度に達するのに暫時時間を要する。その結果，注水率が大きい場合，注水初期に，予想されるよりも水が早く流れ下って消火段数が増加するとみられる。そこで **Fig.2** の一定の規則性を示す範囲の線分を延長して n，K_c および理想上の消火時間 t'_e を求め，他の測定数値と共に **Table 1** に示した。

Table 1 の消火時間 t_e と K_c 値の注水率との関係を求めるため，両者の対応をプロットして **Fig.3** のIおよびIIをえた。



I. Extinction time t_e vs water application rate P.

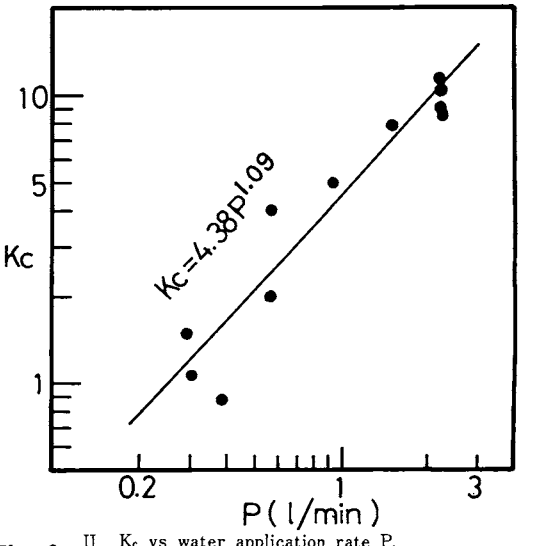


Fig. 3 II. K_c vs water application rate P.

注4) 文献[2] 参照

注5) これを，高温の金属や石が水と接触する時に目撃できる一種の水蒸気爆発と解する説もあるが，筆者は常温の木炭でも，加工していない面は仲々水を吸収しない事実（但し，一度浸透し始めると急速に吸水する），および木炭の熱含量と熱伝達率共に小さい事実から水蒸気爆発ではないと考えている。

Table 1 Results of the extinction tests of the charcoal crib fire. $3^2 \times 21 - 4 \times 8$ type crib

ϕ	M_O (g)	M_C (g)	P (ℓ/min)	$\dot{J}$ (g/s)	$\dot{r}_C^O$ (g/s)	$\dot{r}_O$ (g/s)	t_e (min)	t_e' (min)	n	K_C
0.791	2302	481	0.292	2.85	0.82	2.64	6.00	7.60	0.84	1.48
0.790	2522	530	0.302	2.53	1.18	2.49	5.18	6.08	1.12	1.06
0.790	2202	462	0.385	4.17	1.06	2.40	3.83	3.95	1.61	0.876
0.790	2232	469	0.566	7.30	0.98	2.56	2.40	2.90	0.67	4.00
0.791	2452	512	0.566	6.61	1.18	2.49	2.71		1.43	2.00
0.812	2142	403	0.940	13.0	1.18	2.78	1.75		0.86	5.00
0.787	2352	501	1.51	22.0	1.39	2.69	1.08	1.02	0.67	7.85
0.788	2087	442	2.21	33.1	1.89	2.65	0.72		1.02	11.5
0.790	2342	492	2.22	32.8	1.72	2.66	0.87		0.98	9.05
0.785	2522	542	2.25	33.4	0.70	2.69	0.87		0.61	8.70
0.789	2262	477	2.25	32.5	1.13	2.56	1.08		0.74	10.4
Average 0.791	2311	483			1.20	2.60			0.96	

Fig.3 から最適直線を計算すると

$$t_e = 1.64 P^{-0.939} \quad (2)$$

$$K_c = 4.38 P^{1.09} \quad (3)$$

が得られる。(1)式の消火段数は(3)式と **Table 1** の n の平均値から(4)式と表わすことができる。

$$Ne = 4.38 P^{1.09} t^{0.96} \quad (4)$$

Table 1 および **Fig.3**-II をみると n と K_c 値には相当なばらつきのあることがわかるが，この点については後述するように，炭素の質による水の吸収性の違いが大きく関係している様子である。再現性の高い値をえるためには，予め使用木材が均質となるようえらんでおく必要がありそうである。

3.2 杉木炭の水の吸収度

消火時間および消火段数を考察するための補足実験として，大小，硬軟取混ぜて数種類の杉木炭片の水の吸収量を経過時間毎に秤量し，**Table 2** のような結果をえた。

Table 2 Absorption of the water by the charcoal pieces

Charcoal weight (g)	Volume (mℓ)	Specific density (g/mℓ)	H_2O absorbed (g H_2O/ g charcoal) in boiling water, after 1 min	30 min	left at room temperature, after 20 hr
cracked pieces					
1.9845	–	–	3.17	5.26	5.76
0.6165	–	–	2.70	4.54	5.03
0.5135	–	–	4.53	7.28	8.31
0.3865	–	–	3.17	6.05	7.05
Average			3.39	5.78	6.54
Pieces cut off in square shape					
0.2365	2.72	0.087	3.99	8.88	9.77
0.2075	2.07	0.100	6.91	7.85	8.45

4. 考察

4.1 消火時間の実験的誘導

(2)式はPの指数が－1に近いので，次式(2′)でよく近似できる。

$$t_e \simeq 1.64 P^{-1} = 1640 p^{-1} \ (\text{min}) \quad (2')$$

(2′) 式の次元解析から定数1.64は消火に必要な水量(ℓ)，つまり **Talbe 1** の残留炭素483gを湿潤消火させるのに必要とした水量と考えることができる。このように考えると，(2′) 式は木炭の水の吸収度からも近似的に誘導できそうである。

Talbe 2 をみると，木炭片によって相当の開きのあることがわかるが，概して密度の高い固い試料は吸水性がわるいようである。すでに大川等[3]は燃焼条件下での実験から，木炭容量の約45%(0.45gH_2O/mℓchar)まで吸水すると飽和し，再燃阻止の見地からは含水率の高い程好ましいことを述べているが，筆者の行った実験では，**Talbe 2** にみられる如く，当然のことではあるが，木炭の性状と経過時間によって一定でなく，方形に削って吸水性のよくなったものでは，0.85gH_2O/mℓ char 位まで吸水し，[注6]消火時点では0.34gH_2O/mℓ char(3.4gH_2O/gchar)位であると測定された。そこで **Talbe 1** の木炭クリブ483gは蒸発水量と焼失重量を無視すると

$$483\times3.39=1637(g)\simeq1.64(\ell)$$

の水を吸収することになる。これから間接的に

$$t_e=1.64P^{-1}$$

が導かれる。数値の完全な一致は仮定上偶然性が強いが，消火実験から求める直接的方法と，水の吸収度から求めた間接的方法による方法は良く一致したことになる。

間接法による誘導が成功した理由は，直接法においては，水の蒸発による実質的注水率の減少と，消火中の木炭の焼失による消火必要水量の減少という二つの現象がかなり相殺的に作用するためと考えられる。

4.2 消火時間の理論的誘導

実験を基とする方法に対し，木炭の焼細り，水の蒸発という項を無視しないで，理論的に簡単なモデルにもとずいて誘導することを試みる。

まず次の仮定をおく。

1) 炭化クリブの消火中の燃焼速度r_cは，木材クリブの場合同様，燃焼段数に比例するとする。

$$r_c=r_c^{\circ}\ \frac{No-Ne}{No}$$

ここで r_c° は消火開始時の燃焼速度である。この式はクリブ段数Noが比較的小さい時適用できるだろう。

2) **Talbe 1** から，注水中の重量増加速度 I (g/min) は木材クリブの場合[2]と同様

$$I=ap-b$$

の形で示せることが導かれる。これを $\dot{I}$ (g/s)，P(ℓ/min) で表わすと　$\dot{I}=15.6P-1.85$　となる。ここでPの係数については別途詳述[4]するが，これはP(ℓ/min) を $\dot{I}$ の単位である g/s に換算する係数1000／60＝16.7であることはほぼまちがいない。[注7]そしてこの実験からは $b=1.85\times60=111$(g/min) と求まり，また$r_c^{\circ}=1.2\times60=72$(g/min)なので比較的近いものの$b\neq r_c^{\circ}$なので，実験値をそのまま用いる。[注8]

3) 後述するが(4)式から，消火段数Neの近似式として

$$Ne=4.38Pt$$

を使用する。

さて以上の仮定の上で，クリブの高さを H，消火領域の高さを h，木炭1gが消火するまでに必要とする水の量を$\rho_C^{H_2O}$ (gH_2O/gchar) とおくと，クリブの単位高さ当りの燃焼速度は r_c°/H となるので(5)式が成り立つ。

$$(p-e)dt=\rho_C^{H_2O}\left(\frac{Mc}{H}-\frac{r_c^{\circ}}{H}t\right)dh \qquad (5)$$

但し，eは水の蒸発速度

Mcは炭化クリブの注水開始時の重量である。

ここでeはtの関数であるが，上の三個の仮定と重量平衡速度式 $I=p-(r_c+e)$ とから，$e=p(1-a)+b-r_c^{\circ}+r_c^{\circ}\frac{\alpha P}{No}t$ と導かれる。ただしαは木材クリブの場合同様，$K_c=\alpha P^m$で定義される定数であり，ここでは $\alpha=4.38$，$m=1$ である。

(5) 式を$t=0\sim t_e$，$h=0\sim H$について積分し整理すると次式のようになる。

$$\frac{Mc-r_c^{\circ}t_e}{Mc}=exp\left[\frac{r_c^{\circ}(\rho_C^{H_2O}-1)}{\frac{Mc}{t_e}-ap+b-r_c^{\circ}}\right]$$

右辺の式はP(g/min) が比較的大きい範囲では近似的に

$$\frac{Mc-r_c^{\circ}t_e}{Mc}\simeq1+\frac{r_c^{\circ}(\rho_C^{H_2O}-1)}{\frac{Mc}{t_e}-ap+b-r_c^{\circ}}$$

となり，これを整理して

注6) さらに注意深く吸水させると，0.9gH_2O/mℓchar以上に達し水底に沈む。

注7) 木材クリブの場合にはこのことは証明できる。[4]

注8) b値は木材の場合，消火開始時の燃焼速度r_{c0}にほぼ等しかったが，炭化クリブの場合 r_c° に等しくなるか否かまだ明らかでない。

$$t_e \simeq \frac{Mc\rho_C^{H_2O}}{ap-b+r_c^\circ}$$

をうる。ここで$a=15.6/16.7\simeq 1$，かつ仮定によりpは充分大きいので(6)式と簡単になる。

$$t_e \approx \frac{Mc\rho_C^{H_2O}}{p} \qquad (6)$$

(6)式は**Talbe 1**の実験結果を良く示している。$\rho_C^{H_2O}$は実験的に求める外はないが，消火時間は燃料の種類，形態によらず，木炭による水の吸収量に強く規制されることを示している。

4.3 消火段数

(4)式から消火段数は良い近似で(4′)式と書直せる。

$$Ne=4.38\mathrm{P}\,t=4.38\times10^{-3}\,pt \qquad (4')$$

消火時間の考え方を用いると，消火段数は，一段当りの炭化層が吸収しうる水量で注水量を除してえられるはずだから(7)のように計算できる。

$$Ne=\frac{1000\mathrm{P}t}{\frac{483}{8}\times3.39}=4.89\mathrm{P}t \qquad (7)$$

間接的方法から求めた係数4.89は直接法による4.38とほぼ一致する。これからも木炭火災の消火が，水の吸収量に規制されていることがわかる。

$\rho_C^{H_2O}$は厳密に一定値とはならないはずだが，杉木炭における$\rho_C^{H_2O}=3.4$という数値は消火に必要十分な水量として妥当な線であろう。

5. 結論

木炭火災の消火が，木炭の水の吸収度に支配されていることを直接および間接的実験によって見い出した。

さらに理論的モデルからも消火時間は

$$t_e \approx Mc\rho_C^{H_2O}\,p^{-1}$$

となることを導き，実験の結果と一致させることができた。

Nomenclature

N_e	:	number of the extinguished layers
N_O	:	number of the crib layers
t	:	water application time (min)
t_e	:	time required for the extinction (min)
t_e'	:	corrected extinction time (See Fig. 2) (min)
P	:	water application rate (ℓ/min)
p	:	water application rate (g/min)
e	:	evaporation rate of the water (g/min)
r_C°	:	burning rate at the beginning of water application (g/min)
r_C	:	burning rate while extinguishing (g/min)
r_O	:	burning rate in flaming zone (g/min)
H	:	height of the crib layers
h	:	height of the extinguished layers
I	:	rate of mass increase (g/min)
M_O	:	initial crib mass (g)
M_C	:	mass of the charcoal left at the beginning of the water application (g)
$\rho_c^{H_2O}$	:	mass of the water absorbed by the charcoal at the time the glowing is extinguished (g H_2O/g char)
ϕ	:	mass loss ratio $(=\frac{M_O-M_C}{M_O})$
K_C	:	constant = $K_C(P)$
m	:	〃
n	:	〃
a	:	〃
b	:	〃

Superscript

$\cdot$: indicates g/s

参考文献

1）確井憲一，火災学会論文集，2，2，58(1953)

2）高橋　哲，　　同上　　，29，1，33(1979)

3）大川鶴二，村上茂直，川島厳，輪千正，同上，4，2，42(1955)

4）高橋　哲，火災学会論文集に投稿中

5）林業試験場編，木材工業ハンドブック，P 900，昭和48年，丸善KK

Extinction of the Charcoal Fire

(Abstract)

Satoshi Takahashi

(Received November 19, 1979)

It is of increasing interests to investigate on the extinction of the charcoal fire, because more quantitative and logical informations has been becoming obtainable on the wood fire these years.

In this research, the glowing charcoal was obtained by leaving the Japanese cedar crib burning until about 80% of the weight lost, through this process the flaming subside and the crib shaped glowing charcoal is formed.

The water was applied dripping on the top of the charcoal crib without swaying from the rake-like nozzle, then the water flows down keeping a certain equilibrium among the absorption and the evaporation.

With this method, very clear relationship was also found on the extinguished number of the layers N_e just like the case of the wood crib fire as follows,

$$N_e = \alpha P^m t^n$$

where α, m, n are constants, P is the water application rate and t is the time of the water application and m, n was found very close to 1.0.

The extinction time t_e was also visually measured and was found almost proportional to −1 power of the water application rate P as,

$$t_e = w\,P^{-1}$$

where the analysis of the dimension of w suggests that it must be the water required for the extinction of the charcoal residue and because it is a constant, it must be the water absorbed in the residual charcoal-layers.

From the above idea, the quantity of the water absorbed by the charcoal specimen was measured as a function of time, the results show that the absorbed water per gram of charcoal $\rho_c^{H_2O}$ after the rough standard extinction time (one minute) in this experiment is close to 3.4 (g H_2O/ g charcoal).

By multiplying the $\rho_c^{H_2O}$ to the residual charcoal amount M_C, we obtain the necessary water for the extinction as $M_C\,\rho_c^{H_2O}$, which was strictly coincided with the value w obtained from the extinction experiment.

The above facts imply that the extinction of the charcoal fire is strongly governed by

absorption, and very little by the other factors.

Simple theoretical model was constructed including the burning rate and the evaporation rate. The solution of the equation yields the extinction time as,

$$t_e \approx \frac{M_c \, \rho_c^{H_2O}}{p}$$

which is very clearly explaining the experimental results.

CO, CO_2 発生の燃焼条件による影響について

守川　時生

（昭和54年12月13日受理）

1. まえがき

今日の家屋には従来からある木材など天然高分子物質の他，プラスチックや合成繊維など合成高分子物質が，建材，家具，衣類，雑貨などの形で使われているため，火災の際に発生するガスや煙を構成する燃焼生成物の種類は極めて多い。燃焼生成物中の有毒成分の数もかなり多いものと思われるが，実際にその中毒作用により，致死，行動不能につながるものは，CO, HCN, HCl，アクロレイン，ホルムアルデヒドなど極く少数に限られているものと考える。これらの中で，CO は従来から火災ガスの主たる有毒成分であったが，今日でも火災の際の中毒作用の最も大きい物質であることに変りない。CO は有機物であれば何であれ，その燃焼時に発生する可能性があるが，その発生量は燃焼条件によって左右される。最近の耐火造建物火災と従来の木造建物火災とでは，燃焼条件が異なるため，可燃物の種類が同じ場合でも，CO の発生は当然異なるものと考える。これまでCOの発生に関する研究は数多く知られているし，燃焼条件とCO発生の関係を調べた研究もいくつかあるが，まだ十分とはいえない。また，CO の最大発生量やその条件を調べた例はみかけない。そこで，本研究において，CO の最大発生条件をCO_2発生と関連させて調べることにした。その第一歩として，ポリエチレン，ポリスチレン，セルロースのような高分子物質の代りに，それらの熱分解生成物と構造的に近いn-ヘキサン，ベンゼン，エタノールをそれぞれ用いて，その燃焼時に発生するCOおよびCO_2の測定を行ったので，その結果をこゝに報告する。

2. 実験方法

Fig.1 に示すように，長さ55cmの横型管状電気炉に貫通した内径3.6cmの石英管に空気または窒素ガスを流通させながら，可燃性液体をピストン式微量ポンプで導入し，それを燃焼あるいは熱分解させた。そのとき，

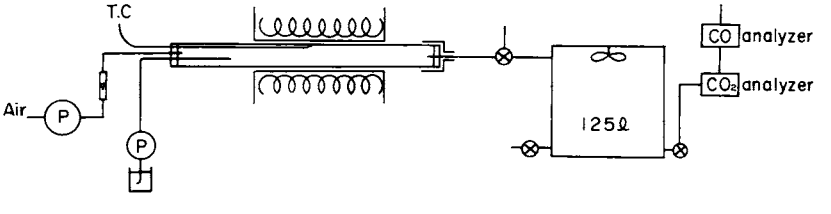


Fig. 1 Schematic diagram of apparatus

導入可燃性液体は，炉内に入る前にブンゼンバーナーで気化させた。炉内の温度はトランスにより入力電圧を変えることによって調節した。温度が一定に安定したとき，可燃性液体の導入を開始し，実験中は燃焼，熱分解による温度の昇降があるため，トランスの入力調整は行わなかった。

燃焼，熱分解の状態が安定したとき，石英管からの排気を50cm×50cm×50cm容積 125ℓのステンレス製ボ

ックスに一定時間だけ導入した。このとき，排気はボックス上部から導入し，その導入分に相当する分だけ内部の冷い空気が下部にあるバルブから排出されるようにした。ボックス内に溜った排気ガスはファンを用いて，内部の空気と混合させ，そのボックス内のCO，CO_2の濃度を測定した。その測定には，直列につないだ赤外線式 CO およびCO_2分析計を用いた。なお，これら分析計の導入部に用いる乾燥剤としては前者に対してはシリカゲル，後者に対しては無水塩化カルシウムを用いた。

供試可燃性液体は，ベンゼン，n-ヘキサン，エタノールの3種で，n-ヘキサンは純度90%以上のガスクロマトグラフ用で，他は試薬特級である。

3. 実験結果と考察

3.1 COおよびCO_2発生量

石英管内加熱温度は700, 800, 900℃の3通りとし，いろいろな空気供給条件Fで，ベンゼン，n-ヘキサン，および，エタノールを燃焼(熱分解)させたとき，発生するCO, およびCO_2の燃料単位g当りの重量を**Fig.2～4**に示す。このとき，燃料の導入速度，約0.3, 0.6 0.9g/minの3通りを用いた。

COは，ある値の空気供給速度で最大となり，その前後で急激に減少することがわかる。極端な場合は，空気供給速度の比が2のときCOの発生量の比は10にもなった。CO発生の最大値は，エタノールよりベンゼンやn-ヘキサンからの方が一般に大きい。これは，エタノールは他の2者に比べて炭素含有量が小さいためと思われる。CO発生が最大になる空気供給速度は，エタノールの場合，他の2者に比べて低く，また，窒素中の熱分解でもCOの発生が認められた。エタノールは分子中に酸素を持つため，熱分解しただけでもCOが生成するのは当然で，その分子中酸素のため，CO最大発生の条件を満足させるに必要な外からの酸素量が他の2者に比べて小さいものも当然である。

CO_2の発生は空気供給速度を増加させていくと，ある点以上で急激に増加するが，それもある点以上で急に飽和するという傾向がみられる。

加熱温度を3通りに変えたが，CO, CO_2とも結果にあまり大きな差がみられない。実験の加熱温度範囲700～900℃では，3種類の燃料とも有炎燃焼し，そのため

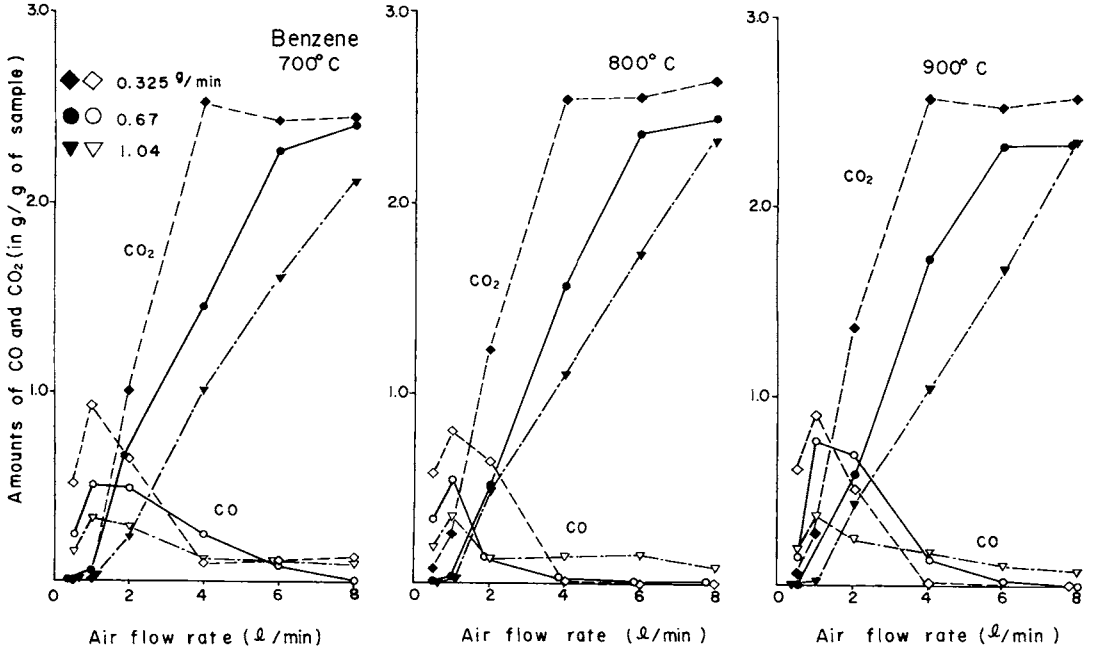


Fig. 2 CO and CO_2 generations from burning benzene

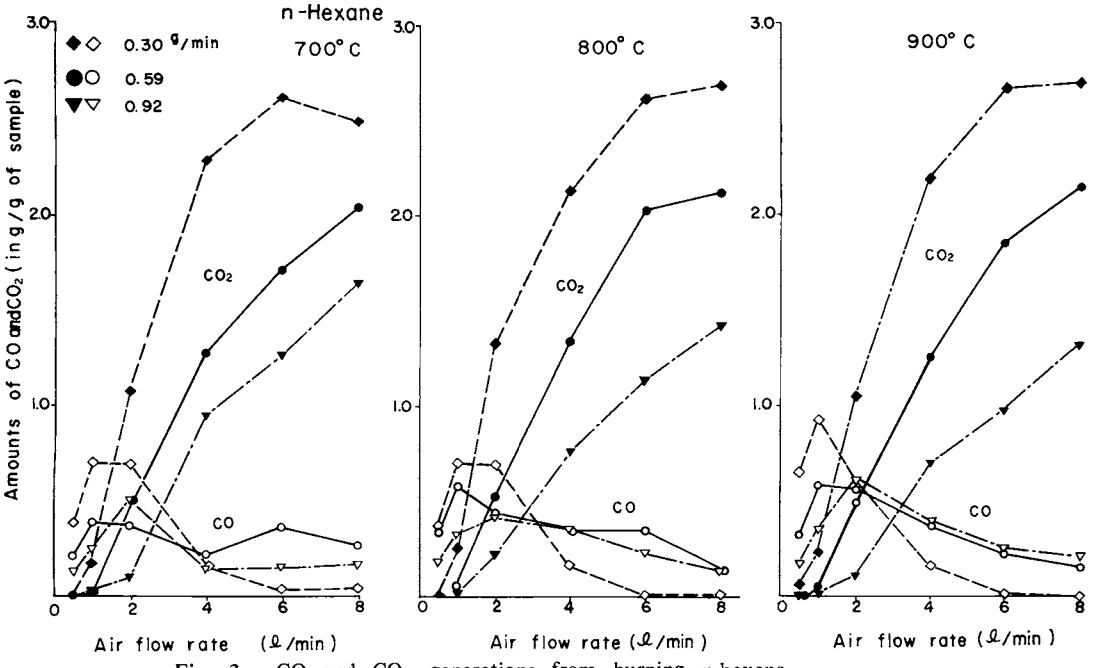


Fig. 3 CO and CO_2 generations from burning n-hexane

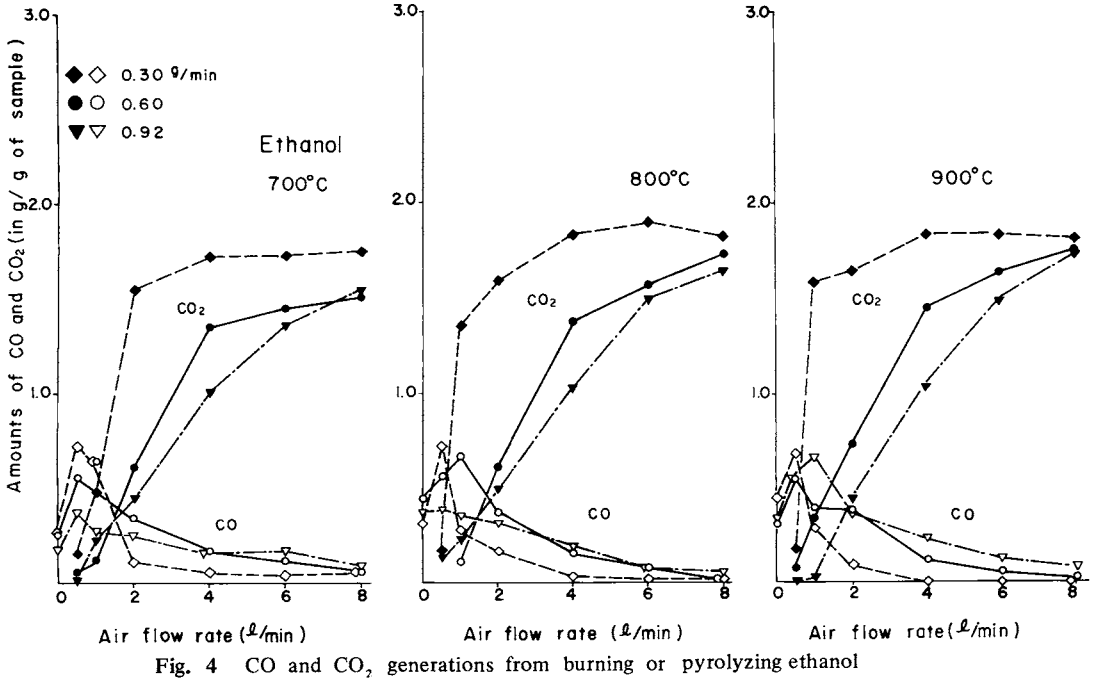


Fig. 4 CO and CO_2 generations from burning or pyrolyzing ethanol

実際の燃焼温度はそれ以上になり，燃焼は実験範囲の加熱温度の違いには，ほとんど影響されなかったものと思われる。

燃焼の単位重量当りの CO およびCO_2の発生量は一

般に燃料の導入速度が大きいほど小さくなっている。この理由は，燃料の導入速度が大きいと，燃焼管が燃料によって冷却されたり，燃料の膨張による通過速度の増加のため反応が燃焼管を通過する間に完了しなかったりするためと考えられる。このため，この種の実験では，実験条件を揃える必要があり，実験結果の絶対値よりは相対値に意味があるように思われる。

3.2 CのCOおよびCO_2への転換率とその最大条件

燃料分子のCのCOおよびCO_2への転換率を相対的空気供給速度 ϕ（空気供給速度／化学量論的空気供給速度）との関係を前述の結果のうち，ベンゼン900℃の例をプロットすると，**Fig.5** のようになる。CのCO転換率は燃料の導入速度が大きいほど小さいが，CO_2転換率ではむしろ逆の傾向になっている。その理由は，燃料の導入速度が大きい場合，燃料の一部があまり関与せず，燃焼管を通過してしまうためと思われる。そこで反応に関与する部分の燃料に対する空気の供給は見掛けより高くなるため，ϕが比較的小さい値に対してCO転換率は最大になったものであろう。CO_2の生成量は周囲にある酸素量とのバランスで決まり，COの生成量が小さい場合はCO_2になる酸素がそれだけ増えるため，CO_2の生成量が増えるものと思われる。また，**Fig.5**からCO_2の発生量は空気供給速度とともに増加するが，ϕが約1で飽和することがわかる。

900℃における燃料導入速度が最も小さい約0.3g/minの場合，燃料のCOあるいはCO_2転換率と空気供給速度の関係を **Fig.6** に示す。なお，燃料の純度はそれぞれ100%として計算した。すなわち，ベンゼンとエタノールの純度は100%に近く，n-ヘキサンは90%であるが，不純物は主にその異性体であるから，Cの含有率は純n-ヘキサンのものと変らない。燃料の単位重量当りからのCOの最大発生量はエタノールが最も小さかったが転換率の最大値は最も大きいことがわかる。CO発生最大のときの空気供給速度はエタノールの場合に小さいが，これは分子中に酸素を持つためであろう。エタノールは，CO_2転換率も大きいが，これも分子中に酸素を持つことが関係し，完全燃焼し易い性質をもつためであろう。**Fig.6**のCO転換率をϕとの関係で表わすと**Fig.7**が得られる。この図から，COの最大発生はϕが約0.25で起り，燃料による差がないことがわかる。

燃料の流入速度が最小の約0.3g/minの場合の結果について，三つの燃料中のCの$CO+CO_2$への転換率をϕとの関係で示したものが **Fig.8** である。エタノールの転換率の高いことが目立ち，これはすゝなどをほとんど生成せず完全燃焼し易いエタノールの性質のためであろう。この図でも加熱温度の違いによる影響はほとんど認められない。700～900℃という加熱温度では，前述したように，発炎燃焼が必ず起り，燃焼温度は加熱温度を上回り，加熱温度の差が結果に現れて来ないためと思われる。また，転換率の変化は，ϕが0～1.0の範囲で大きいといえる。

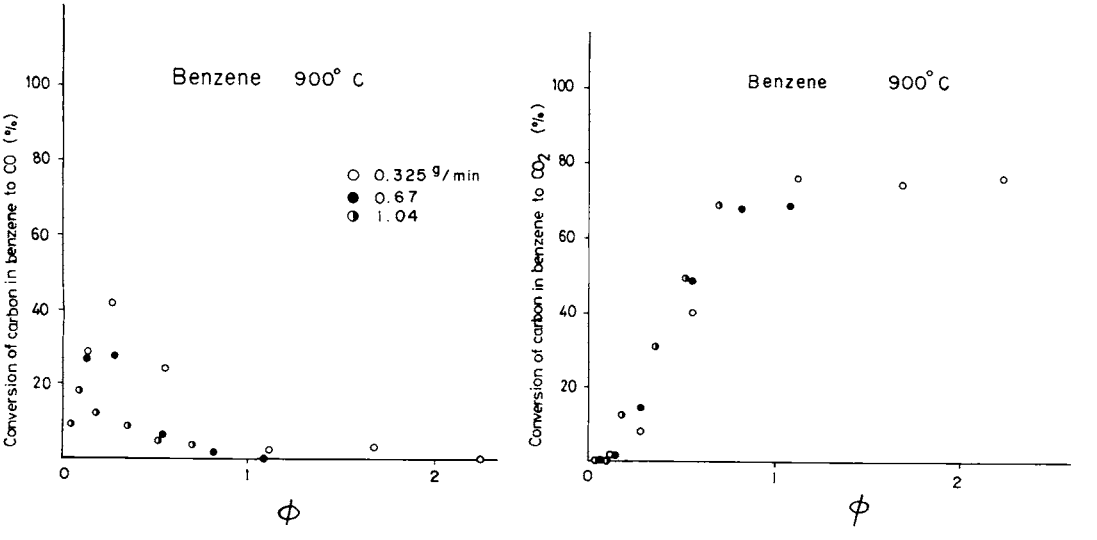


Fig. 5 Conversion of carbon in benzene to CO and CO_2 vs ϕ

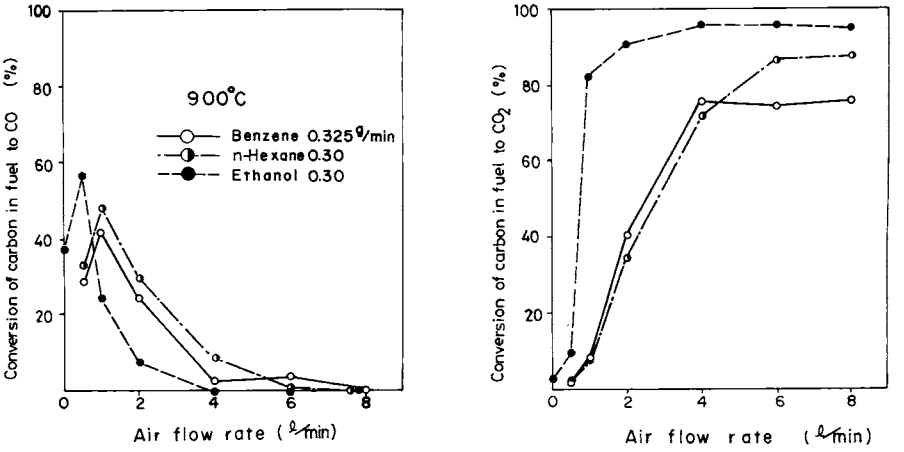


Fig. 6 Conversion of carbon in fuel to CO or CO_2 vs air flow rate

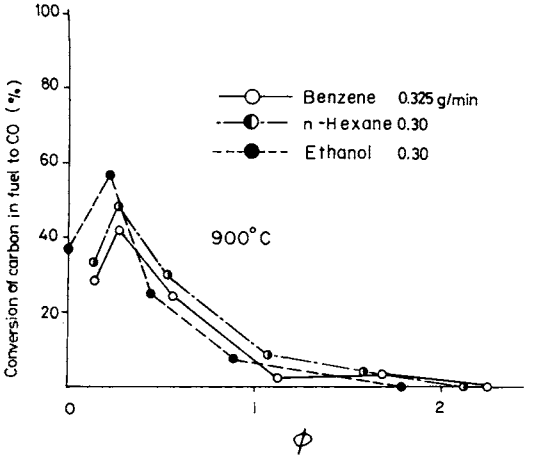


Fig. 7 Conversion of carbon in fuel to CO vs ϕ

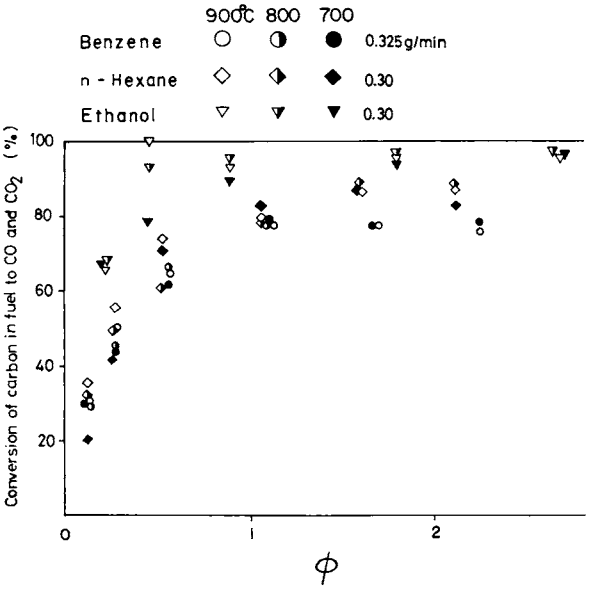


Fig. 8 Conversion of carbon in fuel to CO and CO_2 vs ϕ

3.3 結果の適用と今後の課題

実際の火災は一般に高分子固体の燃焼であるが，固体の場合，温度，空気流量などを一定に制御した小規模な燃焼管では，定常燃焼させるため試料を連続的に燃焼管に供給することは難しい。もっとも，管壁に沿って管内に置かれた細長い試料に対し，炉の方を連続的に移動させるという方法もあるが[1]この方法は予熱による障害が出て来るため本研究の目的に対しては好ましくない。液体燃料を本実験で用いたのは，任意な量を連続的に供給することが可能なためである。

代表的な高分子物質として，ポリエチレン，ポリスチレン，セルロースを選び，それらに対応する低分子化合物として，n-ヘキサン，ベンゼン，エタノールを選んだ。ポリエチレンの熱分解生成物はブテン，n-ブタン，ペンテン，n-ペンタンなど[2]ポリスチレンの分解生成物はスチレンモノマー，ベンゼンなど[3]また，

セルロースのそれは，酢酸，アセトアルデヒト，メタノールなど[4]が主体で，燃焼実験においては，それらはそれぞれn-ヘキサン，ベンゼン，エタノールによって代替できると考えた訳である。

これら低分子化合物を用いた実験結果を高分子物質に適用できると考えると，CO発生が大き殺と一般に信じられているセルロース系物質は，CO転換率は大きいが，単位重量当りのCO最大発生量はポリエチレンやポリスチレンより小さくなることは注目に値する。

ただ，今回の実験は，石英管内の温度，燃料供給および空気供給をすべて一定条件に保ったときの燃焼であるから，この種の実験結果を実際の火災へ適用できるようにするためには，この実験をさらに室内模型を用いたものへと発展させて行く必要があろう。

この研究結果から，COの最大発生のためのϕは燃料によって異ならないが，最大発生のための空気の供給速度は異なることがわかった。今回の実験では，試料の導入速度を変えることによって燃焼速度を任意の値にすることができたが，実際の場合，燃焼速度は燃料によって異なる。そこで，CO最大発生のための空気供給速度は当然燃料毎に異なる。現在，建築材料の燃焼に伴って発生するガスの有害性試験は発生ガスに動物をばく露させる方法によって行われている。ガスを発生させるための材料の燃焼は一定の方法によって行われる。[5]材料によって燃焼速度も異なれば，有毒ガス発生の最適空気供給速度あるいは最適酸素濃度も異なるので，画一的な設定条件で試験を行った場合には，個々の材料の最大毒性効果や典型的な火災条件での毒性効果を比較したことにならないという恐れがある。今後，実際の材料についても，燃焼条件を変えることによって，どの程度COなどの発生量が変わるかさらに検討してみる必要がある。

4. 結論

COの発生量が最大になるための燃料の単位重量当りの空気供給速度は燃料によって異なるが，いずれの燃料についても相対的空気供給速度ϕ（空気供給速度／化学量論的空気供給速度）が約0.25のとき，COの発生量は最大になる。CO_2の発生量はϕと共に増加するが，ϕが約1以上で飽和する。

燃料分子中のCのCOあるいはCO_2への転換率の変化はϕが0～1.0の範囲で大きい。

ポリエチレン，ポリスチレン，セルロースの代りにそれらの熱分解生成物に構造的に近いn-ヘキサン，ベンゼン，エタノールをそれぞれ実験に用いたが，前2者はセルロースの代替物エタノールより単位重量当りのCOの最大発生量は大きい場合があることがわかった。これは，条件さえ揃えば，ポリエチレンやポリスチレンからのCO発生量は木材からの量大CO発生量を上回る可能性があることを示唆している。

引用文献

1）N.Th.Hofmann, H.Oettel, *J.Combustion Toxicology*, **1**, 236(1974)

2）S.L.Madorsky, *J.Polymer Science*, **4**, 639(1949)

3）F.A.Lehmann, G.M.Brauer, *Analytical Chemistry*, **33**, 673(1961)

4）右田伸彦，木材化学(基礎編)，P227

5）昭和51年8月2日建設省告示第1231号

CO and CO_2 Generations under Various Burning Conditions

(Abstract)

Tokio Morikawa

(Received December 13, 1979)

Combustion experiments of three liquid fuels were carried out in a horizontal tube furnace under the conditions of different furnace temperatures and air flow rates. The three liquid fuels, n-hexane, benzene, and ethanol were chosen because they were similar in structure to major thermal degradation products of polyethylene, polystyrene and cellulose respectively. The generation of CO per mass of fuel was the largest when the ratio of air flow rate to stoichiometric air flow rate ϕ was about 0.25, while the generation of CO_2 per mass of fuel increased with increasing air flow rate until it levelled off at around stoichiometric air flow rate. Conversion ratio of C in fuel to CO, to CO_2, and to CO + CO_2 were found to significantly vary over the range, $0 < \phi < 1.0$. The maximum CO generation from either n-hexane or benzene per mass of fuel was larger than that from ethanol, although the maximum CO generation per carbon atom of fuel was larger with the burning of ethanol than the other fuels. This indicates that more CO will be generated per mass of fuel from polyethylene or polystyrene than from cellulose under the optimum condition for CO generation.

実規模室内火災実験における火災性状と発生ガス

斉藤　直・箭内英治

（昭和54年12月15日受理）

1. 緒　言

最近の日常生活で多く用いられている合成高分子材料から，火災時に発生するガスの成分および発生ガスの危険性を調べるため，これまで実験室規模の研究が数多く行われてきた[1]。

一方，実際の火災に近い実大規模火災実験の場合には，建物の火災性状等についての研究が中心であり，発生ガスの詳細な分析を行なった研究は少なく，実験室規模での測定結果を，実大規模の火災実験による結果と比較検討するための資料が不足している。

耐火建物の火災性状は，出火源の大きさ，収納可燃物の種類と量，それらの配置状況，室の区画構造，熱的性質，開口など多数の要因により影響されることが知られており[2]，火災の際に発生する燃焼生成ガスの組成およびその時間変化も，これらの要因により影響を受けると予想される。それゆえ，火災性状と発生ガスとの関係を実大の建物について実験を行い確かめるには，多大な労力と費用を要することになる。したがって，本研究では条件を限定した実大規模の室内で火災実験を行い，発生ガスの火災経過時間および可燃物の種類による変化を火災性状とともに調べ，発生ガスに関する実験室規模の実験や模形実験の結果と比較するための基礎資料を得ることにした。

2. 実　験

主な可燃物として木材を用いて実験を行なった。可燃物の種類を一部変えた場合の発生ガス組成の変化を測定するため，火災実験室の構造を単純化し，火災性状に大きな変化が現われない程度に可燃物を変えるなどの配慮をし，再現性のよい室内火災を実現した。

2.1. 火災実験室

この研究に用いた火災実験室は，縦2.7m，横2.7m，高さ3.0mのものである。**(Fig. 1)**

側壁には鉄筋入軽量コンクリートブロックを用い，屋根は鉄筋コンクリート製とした。建物西側の壁下部に0.7m×0.7mの空気取入口を，また天井中央部に0.5m×0.5mの排煙口を設けた。この排煙口に高さ0.5mの傘付き煙突を取付け，その中央から燃焼生成ガスの採取を行なった。実験室床はコンクリート製で，床中央1.75m×1.75mの部分を床面から0.5m下げ，試料重量測定用の荷重変換器，燃焼台を上下するための油圧

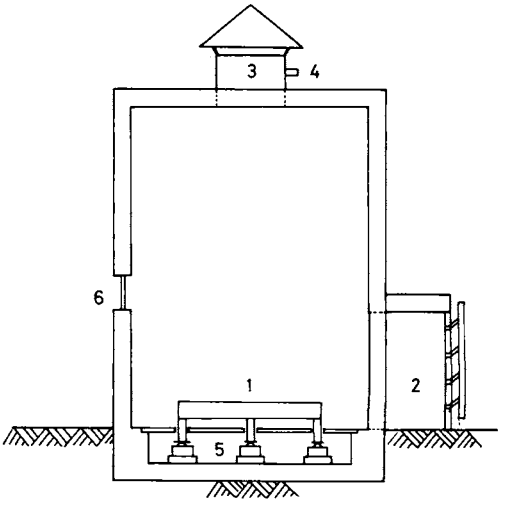


Fig. 1 Fire test room
1: Sample holder　2: Entrance for air　3: Chimney
4: Sampling pipe　5: Load cell　6: Window

ジャッキを設置した。これらの装置が熱により破損するのを防ぐため，グラスウール製断熱材でおおい，厚さ15mmのスレート板をかぶせて床面と同じ高さにした。測定用のケーブル類は地下を通し，建物外部に導びかれている。

実験室の出入口扉として鉄製のものを用い，熱による変形を防ぐために裏面にスレート板を取付けた。扉表面4個所に大形ラッチを取付け，扉の変形と空気の流入を防いだ。

2.2. 室内温度と試料重量変化の測定

室内温度を測定するために，線径0.6mmのクロメル－アルメル熱電対を**Fig. 2**の黒点の位置に取付けた。測定点の数は11で，壁際のものは壁面より10cm離してある。熱電対の出力をデジタル式多点記録計と自記平衡記録計で記録した。デジタル記録計のサンプリング時間間隔は30秒である。

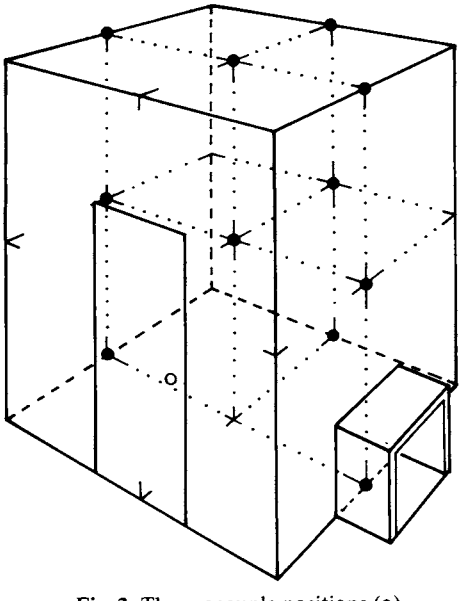


Fig. 2 Thermocouple positions (●)

可燃物の重量変化を測定するために，スレート板を張った角形鋼管製の燃焼台に試料をのせて実験を行った。この燃焼台は一辺75cmの正六角形をしており，頂点一つおきに計3本の脚を取付けてある。燃焼台の高さは30cmで，床面上には20cm出ている。燃焼台をこの形状にしたのは，荷重が各脚に均等にかかるようにするためである。これらの脚の下に荷重容量100kgの荷重変換器を取付けた。3個の荷重変換器はブリッジボックスに並列に接続され，その出力は動ひずみ計で増幅され記録される。油圧ジャッキとてこにより燃焼台を上下できるようにし，荷重変換器の校正および試料を積込む際の変換器保護に使用した。

2.3. 燃焼生成ガスの分析

室内から排出されるガスの組成を分析するために，煙突中央より，長さ3.7mの½Bガス管を用いてガスを吸引し，グラスウールのダストフィルターを通した後サンプリング装置に導びいた。吸引ポンプの排気速度は5ℓ/min.である。

サンプリング装置(**Fig. 3**)は，500mℓの捕集ビンを通過する流路とバイパスをもっている。ガスの流路は3個の電磁弁によって切換えられ，ガスは捕集する場合にのみ捕集ビン側を通過する。3分間隔でガスの捕集を行い，その際，試料ガスは1分間捕集ビンを通過する。この方式による捕集効率を炭酸ガスの標準試料により測定した結果，85.4±2.2%であった。

捕集したガス中の炭酸ガス，一酸化炭素，メタンなど分子量の小さい化合物を赤外分光光度計で，その他化合物をガスクロマトグラフで分析した。なおガスクロマトグラフの充填剤としてポラパックQSを用い，10℃／min.の昇温速度で室温より240℃まで昇温し分析した。ガスクロマトグラフによる分離成分を質量スペクトルにより同定した。

溶存酸素濃度計を用い，ガス中の酸素濃度を連続的に測定した。

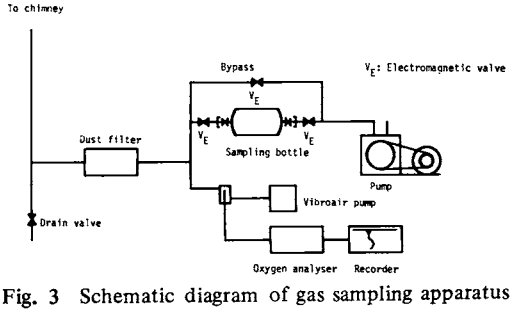


Fig. 3 Schematic diagram of gas sampling apparatus and oxygen analyser

2.4. 試料および点火方法

実験に用いた可燃物試料は，4.5cm角杉正割材のクリブ（2m×1m×0.9m），布地，プラスチック板など

である。用いた試料の種類と重量をTable 1に示す。これらの可燃物の種類別割合は，公団3DK住宅内にある可燃物の推定値[3]を参考にして決められたものである。単位床面積当りの重量は，火災時間等を考慮し推定値の½とした。クリブ以外の可燃物が全可燃物に占める割合は，いずれの場合にも重量で7％である。

布地やプラスチック板をクリブの上に広げて置いた。布地の一部にメチルアルコール300mℓを浸み込ませ，クリブ中央に置きそれにマッチで点火した。

Table 1 List of combustibles

Ex. No.	1	2	Remarks
Wood	181.5 kg	171.0 kg	Water content 13%
Polyester	3.0		Fabrics
PAN	4.0		〃
Nylon	2.0		〃
PU	1.0		Foam
PVC	4.0		Board
Cotton		8.4	Fabrics
Wool		4.0	〃
Total	195.5 kg	183.4 kg	

3. 結果と考察

3.1. 室内火災実験の火災性状

前述したように，火災時に発生する燃焼生成ガスの組成は，火災性状により影響されると考えられる。フラッシュオーバに至るまでの火災初期は，余りにも多くの要因により影響されるため，ここでは開口条件，壁体の熱伝導率により支配される火災最盛期の性状を中心に述べる。

3.1.1. 火災温度

2回の実験で測定した火災温度曲線をFig. 4に示す。これらの曲線は，熱電対により測定された各部分の温度の算術平均として求められたものである。ただし，床面上空気取入口に置かれた熱電対は，流入空気の温度を測定していること，および他の床面上の2点では，火災最盛期を過ぎても異常な温度上昇を示し，明らかに炭火の温度を測る結果になったので，これらの点を除いた。Fig. 4の両曲線を比較すると，温度が急激に上昇する部分を除けば両者はほぼ一致し，点火後25分に最高温度650℃に達する。これを川越，関根により計算されている火災温度曲線[4]と比較すると，壁体の熱伝導率$\lambda=0.5$kcal/m·h·℃としたときの温度因子$AB\sqrt{H}/A_T=0.02$（A_B：開口面積，H：開口高，A_T：室内全表面積）の曲線とよい一致を示している。Fig. 4の鎖線は計算値を示す。

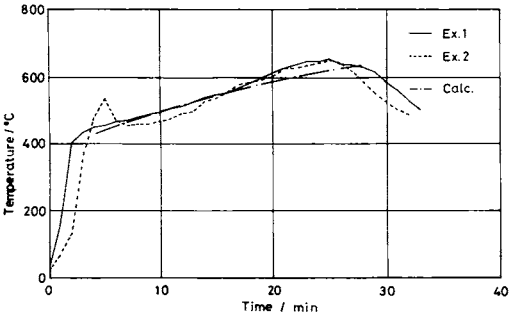


Fig. 4 Fire temperature-rise curves

3.1.2. 試料重量の変化

実験1および2で初めの試料重量が異なっているが，これは主としてクリブ重量の違による。しかし，Fig. 5に示した重量減少曲線は，点火後5分でほぼ一致する。

Fig. 5に重量減少速度をあわせて示した。これらは，重量変化を3点公式により数値微分し求められたものである。微分の時間間隔は30秒である。実験1の場合，

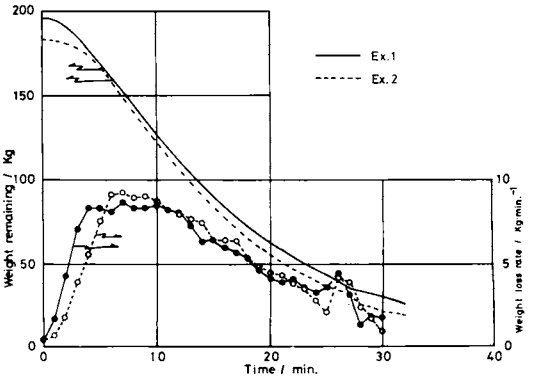


Fig. 5 Weight remaining and weight loss rate of combustibles

点火後4分より12分までの間，実験2では約3分間重量減小速度が一定となったのみで，この期間が短かかった。これは，単位床面積当りの可燃物量が少なかったためと考えられる。

最大重量減少速度は実験1では8.7kg/min.，実験2では9.2kg/min.とほぼ一致しており，点火5分以後の重量減少の様子も両実験で一致している。これらの最大重量減少速度と，火災最盛期の燃焼速度式 $R=5.5 A_B\sqrt{H}$ [4]を用いて温度因子を求めると，いずれも0.03となった。この値は，火災温度曲線より求めた0.02より大きいが，最大重量減少速度を用いた事によるもので，火災最盛期における平均値を用いれば一致する。なお,点火26分後に現われる大きな重量減少速度は，クリブの崩れによるものである。

3.1.3. 完全燃焼率

完全燃焼率の時間変化を**Fig. 6**に示す。完全燃焼率とは，川越らにより炭酸ガス濃度の炭酸ガス濃度および一酸化炭素濃度との和に対する比として定義されているものである[5]。実験1では，点火3分後に0.8まで小さくなっているのに対し，実験2ではほぼ1に近い値であった。点火後10分前後に両者とも0.75近くまで下り，その後次第に大きくなり点火24分後に1に近づいた。火災温度が下降し始めると再びいく分小さくなる傾向があった。点火3分後の値を除けば，両実験の完全燃焼率もきわめて類似したものであった。

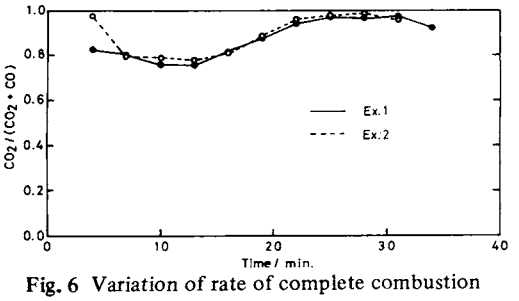


Fig. 6 Variation of rate of complete combustion

3.1.4. 酸素濃度

排出ガス中の酸素濃度変化を**Fig. 7**に示す。実験1では酸素濃度計の故障により,実験開始後6分間のデータを得ることができなかった。実験2の酸素濃度は，火災温度の上昇と共に急激に低下した。火災最盛期における酸素濃度は，両実験ともほぼ零となり，火災後期に至り温度が低下し始めると再び増大する。この継過を完全燃焼率の変化と比較すると，完全燃焼率が1付近のとき，排出ガス中の酸素濃度は高いが，0.9以下となる火災最盛期には酸素濃度がほぼ零であり，空気過剰率は1以下であったことを示している。この事情は，火災時に発生する燃焼生成ガスの危険性を論ずる際に考慮されなければならない。

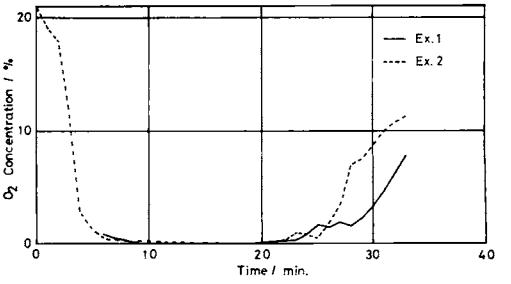


Fig. 7 Variation of oxygen concentration with time

以上述べてきたことにより，この2回の室内火災実験の性状について次のようにいえる。

i） 点火後数分間を除けば，これらの火災性状はきわめて類似し再現性がよいものであったので，可燃物の種類による発生ガス組成の比較が可能である。

ii） 温度因子は0.02～0.03と見積られ，比較的窓の小さい建物の火災に相当する。

iii） 火災最盛期の空気過剰率は1以下で，酸素不足な状態での火災であった。

iv） 点火後数分間，実験1が実験2より燃焼が激しかったが，これは合成繊維など木材以外の可燃物が火の回りをよくしたためと考えられる。

3.2. 発生ガスの組成

赤外吸収スペクトルおよびガスクロマトグラフにより同定できた成分は21種類であった。そのうち18種類の化合物について定量することができた。分析結果を**Tables 2～3**に示す。ただし表中の濃度はサンプリングの際に凝縮した水を除いて求めたものである。木材の組成をC 43.5%, H 5.2%, O 38.3%, H_2O 13.0% と仮定し[6]，空気過剰率を0.6～1.0，温度450～700℃として平衡計算により水蒸気の割合を推定したところ，15～20%であった。

発生ガス中濃度の大きいものは，炭酸ガスおよび一酸化炭素であった。その他，メタン，エチレン，ベン

ゼン等の炭化水素類，アセトアルデヒドなどのアルデヒド類，シアン化水素などのシアン化合物，さらにメタノールも検出された。しかしながら，実験1で発生が予想された塩化水素は検出されず，凝縮した水分に吸収されたものと思われる。

Table 2 Concentrations of various combustion products during Ex. No. 1

Compound:	Unit	Sampling time (min.)											Remarks
		3–4	6–7	9–10	12–13	15–16	18–19	21–22	24–25	27–28	30–31	33–34	
Carbon dioxide	%	16.4	18.3	18.1	18.1	18.8	19.5	19.6	18.9	17.0	11.5	9.6	IR
Carbon monoxide	"	3.3	4.6	5.5	5.9	4.4	2.5	1.3	0.5	0.6	0.2	0.8	"
Hydrogen cyanide	PPM	60	130	125	100	60	35	–	–	–	–	–	"
Methane	%	1.0	1.4	1.7	1.7	1.3	0.7	0.3	0.1	0.1	–	–	"
Ethylene	"	0.37	0.45	0.48	0.42	0.32	0.17	0.07	0.01	–	–	–	"
Acetylene	"	0.18	0.18	0.19	0.17	0.12	0.17	0.03	0.01	–	–	–	"
Ethane	PPM	190	336	417	319	209	122	37	5	4	2	–	GC
Propylene	"	399	390	432	292	175	95	24	2	2	–	–	"
Propane													"
Methyl acetylene		( )	( )	( )	( )	( )	( )	( )	( )	( )	–	–	"
Methyl alcohol	PPM	34	80	101	137	62	80	48	10	9	1	–	"
Acetaldehyde	"	50	162	193	98	67	36	11	5	3	1	2	"
Butene, Butane	"	10	20	21	15	9.5	6	2	*	*	–	–	"
Acetonitrile	"	36	94	100	68	23	12	4	1	–	–	–	"
Acrolein, Furan	"	25	36	43	28	13	8	2	1	–	–	–	"
Aceton	"	22	40	63	47	22	16	2	–	–	–	–	"
Acrylonitrile	"	183	221	186	88	28	20	2	1	1	–	–	"
Cyclopentadiene		( )	( )	( )	( )	( )	( )	–	–	–	–	–	"
Methyl furan	PPM	20	39	41	16	5	2	–	–	–	–	–	"
Benzene	"	462	652	640	569	321	196	70	22	19	2	4	"
Toluene	"	29	66	73	53	35	22	9	4	–	–	–	"

* Trace. – Undetected, ( ) Not determined.

Table 3 Concentrations of various combustion products during Ex. No. 2

Compound:	Unit	Sampling time (min.)											Remarks
		3–4	6–7	9–10	12–13	15–16	18–19	21–22	24–25	27–28	30–31	33–34	
Carbon dioxide	%	13.7	18.3	18.5	18.4	18.7	19.5	20.1	20.2	13.9	11.1		IR
Carbon monoxide	"	0.4	4.9	5.0	5.2	4.5	3.0	0.8	0.3	0.1	0.5		"
Hydrogen cyanide	PPM	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–		"
Methane	%	–	1.4	1.6	1.4	1.2	0.7	0.1	*	–	–		"
Ethylene	"	–	0.42	0.44	0.30	0.23	0.14	0.01	–	–	–		"
Acetylene	"	–	0.16	0.15	0.13	0.08	0.06	0.01	–	–	–		"
Ethane	PPM	–	313	350	229	224	95	14	1	–	–		GC
Propylene	"	3	301	317	180	145	71	7	–	–	–		"
Propane													"
Methyl acetylene		–	( )	( )	( )	( )	( )	( )	–	–	–		"
Methyl alcohol	PPM	20	70	148	150	129	85	71	52	18	10		"
Acetaldehyde	"	4.7	189	153	71	42	22	6	2	–	–		"
Butene, Butane	"	–	12	13	7	8	4	*	–	–	–		"
Acetonitrile	"	–	22	21	19	20	15	9	1	–	–		"
Acrolein, Furan	"	–	59	57	26	11	4	1	–	–	–		"
Aceton	"	–	43	42	31	22	12	3	1	–	–		"
Acrylonitrile	"	–	19	23	13	12	8	1	–	–	–		"
Cyclopentadiene		–	( )	( )	( )	( )	( )	–	–	–	–		"
Methyl furan	PPM	–	18	21	13	9	2	–	–	–	–		"
Benzene	"	2	399	388	320	288	154	46	10	2	2		"
Toluene	"	5	40	49	36	37	23	13	9	4	2		"

* Trace. – Undetected, ( ) Not determined.

3.2.1. 炭酸ガスおよび一酸化炭素

炭酸ガス，一酸化炭素濃度の変化を**Fig. 8**に示す。炭酸ガス濃度は火災温度曲線と類似の傾向を示した。すなわち，火災室温度が高くなるにつれ炭酸ガス濃度が増大し，火災後期に至り温度が降下し始めると炭酸ガス濃度も減少する。一方，一酸化炭素濃度は重量減少速度の大きい時期に発生量が大きくなる。最大濃度は炭酸ガスの場合約20%，一酸化炭素で5～6%であったが，一酸化炭素の毒性を考慮すれば，火災時の有毒ガスの主要なものと言える。これらの濃度変化に，実験1，2ではほとんど差はなかった。

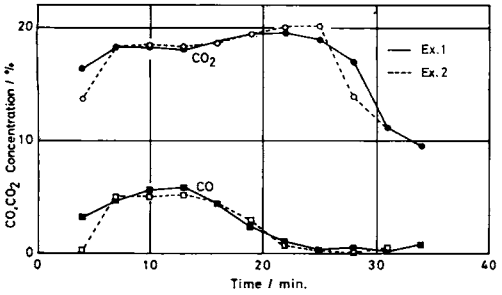


Fig. 8 Variations of concentrations of CO and CO_2 with time

3.2.2. 炭化水素類

メタン，エチレン，アセチレン等の炭化水素類の濃度変化は，一酸化炭素のそれに類似していた。ベンゼン，トルエンなどの芳香族炭化水素は，合成繊維などの合成高分子材料を可燃物とした実験1の場合に，より高濃度で検出されたが，その他のものは両実験で大きな濃度差がなかった。

3.2.3. アルデヒド類

アセトアルデヒドおよび少量のフランが混入しているアクロレインの濃度変化を**Fig. 9**に示す。それらの濃度変化を一酸化炭素の濃度変化と比較すると，一酸化炭素濃度の増大と共に増大するが，一酸化炭素より速やかに減少する。排出ガス中の酸素濃度がほぼ零となり，重量減少速度が最大となる火災最盛期初期にこれらの化合物が高濃度で現われたが，両実験の濃度に大きな差は認められなかった。それゆえ，これらの化合物は，主として木材より発生したものといえる。守川[7]は空気中で杉材を加熱し，アクロレインの発生量の加熱温度による変化を報告している。それによれば，350℃で発生量が最大となり，発炎温度以上では発火燃焼の際に酸化分解が起るためアクロレインの発生量が著るしく減少するとしている。この実験においても，排出ガス中の酸素濃度がほぼ零となる期間の単位重量減少速度当りのアクロレイン濃度は，火災温度の上昇とともに急速に減少し類似の結果が得られた。しかしながら，火災経過時間とともに可燃物組成が変化したためとも考えられ，さらに検討する必要がある。

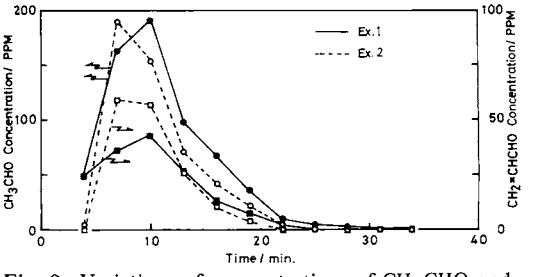


Fig. 9 Variations of concentrations of CH_3CHO and CH_2CHCHO with time

3.2.4. シアン化物

シアン化物のうち，アセトニトリルおよびアクリロニトリルの濃度変化を**Fig. 10**に示す。実験1ではアルデヒド類と類似の増減を示したが，実験2ではこの傾向は見られず，むしろ一酸化炭素濃度の変化に似ていた。これは，含窒素系可燃物の燃焼性の違に起因すると考えられる。

実験1および2で発生したシアン化物濃度には，大きな差が認められ，最大濃度は**Fig. 10**に示したシアン化物の場合，実験1の方が実験2の5～10倍も大きかった。この事情は，シアン化水素の発生についても同様であり，実験1では最高130 ppm発生しているが，実験2では検出が困難であった。このシアン化物の発生量の差は，実験1，2に用いられた含窒素系可燃物の量の差以上に大きく，この実験で用いた含窒素系合成高分子材料が羊毛に比べてシアン化水素を多量に発生するといえる。これは，Sumiら[8]のシアン化水素の発生に関する実験室規模での実験結果と傾向が一致している。

以上のガス分析結果は

i） 火災全般にわたり，高濃度で発生する一酸化炭

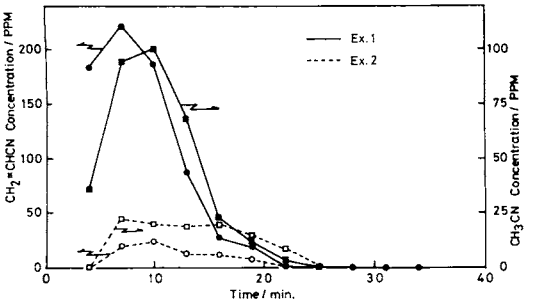


Fig. 10 Variations of concentrations of CH_3CN and CH_2CHCN with time

素が最も危険なものである。

ii） アルデヒド類は，排出ガス中の酸素濃度がほぼ零で，重量減少速度の大きい時期に高濃度で発生し，火災温度の上昇とともに急速に減少する。

iii） この実験で用いた含窒素系合成高分子材より発生するシアン化物は，アルデヒド類と類似の濃度変化し，羊毛より発生量が多い。羊毛より発生するシアン化物の濃度変化は，一酸化炭素と類似の傾向を示し，排出ガス中の酸素濃度がきわめて低い期間全般にわたって発生する。

iv） iii)の事情は，可燃物の燃焼性の違に起因すると考えられ，火災時に発生する燃焼生成ガスにより各種材料の危険性を評価する際，この点を考慮する必要がある。

事を示している。

4. 結　論

i） 本研究で行なった2回の実大規模室内火災実験は，点火後の数分間を除けば再現性がよく，発生ガス組成の変化を相互に比較できた。

ii） この室火災実験の温度因子は，0.02～0.03と見積られ，比較的窓の小さい建物の火災に相当する。

iii） この実験の燃焼生成ガス中の最も危険なものは，一酸化炭素であり，火災全般にわたり高濃度で発生する。

iv） アルデヒド類は，燃焼生成ガス中の酸素濃度がきわめて低く，重量減少速度の大きい火災最盛期初期に濃度が最大となり，以後急速に減少する。

v） この実験に用いた含窒素系合成高分子材料からのシアン化物発生量は，羊毛のそれより多く，アルデヒド類と類似の濃度変化を示した。羊毛より発生するシアン化物の濃度変化は，一酸化炭素に類似し，燃焼生成ガス中の酸素濃度がきわめて低い期間全般にわたり発生する。

vi） v)の事情は，含窒素系可燃物の燃焼性によると考えられ，火災時の発生ガスによる各種材料の危険性評価は，この点を含めてなされるべきである。

vii） 火災最盛期における燃焼生成ガス中の酸素濃度はきわめて低く，この危険性も検討されるべきである。

viii） 本研究により分析された燃焼生成ガス成分の種類は多く，実験室規模あるいは模形による実験と対比するための資料となりうる。

参考文献

1） J.P.Wagner：Fire Research Abstracts and Reviews, **14**, 1 (1972)
岸谷孝一："火災時に発生する燃焼生成ガスの毒性に関するわが国における研究"，UJNR防火専門部会第2回合同部会 (1976)

2） 斎藤文春：災害の研究，**8**，186 (1975)

3） 斎藤直・箭内英治：火災，**26**，115 (1976)

4） 関根孝：日本建築学会論文報告集，**85**，38 (1963)
川越邦雄・関根孝：日本建築学会論文報告集，**86**，40 (1963)

5） 建築学大系編集委員会編："建築学大系"，**21**，P125，彰国社 (1970)

6） 中田金市編："火災"，防災科学技術シリーズ，**14**，P132，共立出版 (1969)

7） 守川時生：日本火災学会論文集，**26**，1 (1976)

8） K.Sumi,Y.Tsuchiya：J. Fire and Flammability, **4**，15 (1973)

Fire Behaviour and Combustion Products in Full Scale Room Fire Test

(Abstract)

Naoshi Saito and Eiji Yanai

(Received December 15, 1979)

Full scale room fire tests have been carried out for the purpose of obtaining the data on toxic gases evolved from burning wood and other polymeric materials. Their fire behaviours show good reproducibility. Twenty one combustion products including carbon monoxide, aldehydes and cyanides are identified and 18 products of them are analysed quantitatively. Cabon monoxide is considered to be the most dangerous product because of its high concentration formed during fire situations. The maximum concentrations of aldehydes and cyanides formed from synthetic polymers containing nitrogen atoms are obtained several minutes after a period showing the small rate of complete combustion and large weight loss rate. The cyanides are found to be formed more efficiently from synthetic polymers than from wool.

消防研究所報告

通巻 49 号

昭和55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)