

産業安全研究所技術資料

TECHNICAL NOTE OF
THE RESEARCH INSTITUTE OF INDUSTRIAL SAFETY

1977

某ビル煙道の爆発事故の実験的検討

木 下 鈞 一
内 藤 道 夫
杉 本 旭
深 谷 潔

某ビル煙道の爆発事故の実験的検討

木下 鈞一 内藤 道夫

杉本 旭 深谷 潔

Experimental investigation into the cause of an explosion in the flue duct of an oil-fuel boiler at a certain building

Kinichi KINOSHITA Michio NAITO

Akira SUGIMOTO Kiyoshi FUKAYA

At about 10 p.m on 30th November 1976, an explosion occurred in the flue duct of an oil-fuel boiler at a certain building in Tokyo. The explosion was so intensive that the whole wall between the duct and the rooms upward from the 4th to the top, 9th floor was demolished part by part. Of those who had been customers of stores in the complex building at the time, 25 suffered injuries from the scattered building materials.

The structural shape of the flue duct section was quite unusual, as shown in Fig.1 and the maintenance of a combustion controller had been insufficient. Frequent back- or miss-fires had been also experienced. From the survey in the disaster site, we assumed that the unfired gaseous mixture, resulted from the failure of ignition controll, had not exhausted smoothly to the outdoors and that these mixtures stagnated in the high combustible concentrations. The combustible gaseous mixture would be formed from decomposition of fuel oils in high temperature furnace with air. Also, the gas flow would have been disturbed near many girders within the flue duct.

The aim of this investigation was to confirm this hypothesis and to discuss the possible cause of an explosion with experimental results. The experiments were carried out with use of two model ducts, of which scale were 1/10 of the actual ones. One of models has a recommendable shape in the construction of the flue duct system and the other was relevant to the accident disaster. Instead of determining the concentration of the unfired decomposed gases, we measured optically the smoke concentration from a smoke candle, which is widely used as a simulator of gas flow.

From the experimental results, we could verify the above hypothesis. Also, it was elucidable that it would be possibly attained the lower explosible limit if the fuel gaseous mixtune flowed into flue duct continuously and accidentally more than two times. Then, it would be not necessarily impossible to have an explosion in the flue duct in the presence of suitable ignition sources, like the flame from successive trials of ignition in the boiler and the propagating flame.

1. はじめに

昭和51年11月30日午後9時50分頃、東京都新宿区某ビル内の暖房用温水ボイラーの煙道内において爆発があり、その爆風により同ビルの4階より9階までの各階とも煙道の壁の一部が破損した。その状況は Fig.1¹⁾に示す。またこの爆発のために同ビルに居た人々のうち25名が重軽傷を負い、通行人1名も負傷した。

この事故に対し、東京労働基準局より当研究所へ、模型実験による検討方の依頼があり、当所としても模型実験によりどの程度のことが分かるかが疑問であっ

たが、定性的でもよいから原因究明の手がかりが得られればと云う立場から、模型実験を実施することとした。以下に実験の概要および検討の結果について述べる。

2. 建物の概要

同ビルは耐火造地下2階、地上9階建、建築面積は223m²、延面積2,150m²で1階平面図、断面図を Fig.2に示す。ボイラーは地下2階に設置されている。建物には娯楽遊戯場、麻雀荘、酒場、料理店などが入居し、いわゆる雑居ビルである。

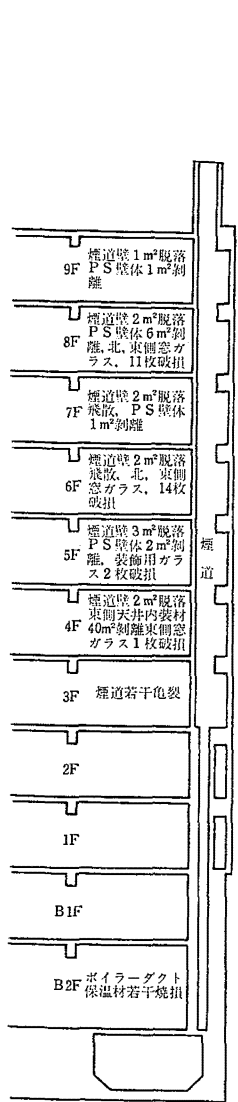
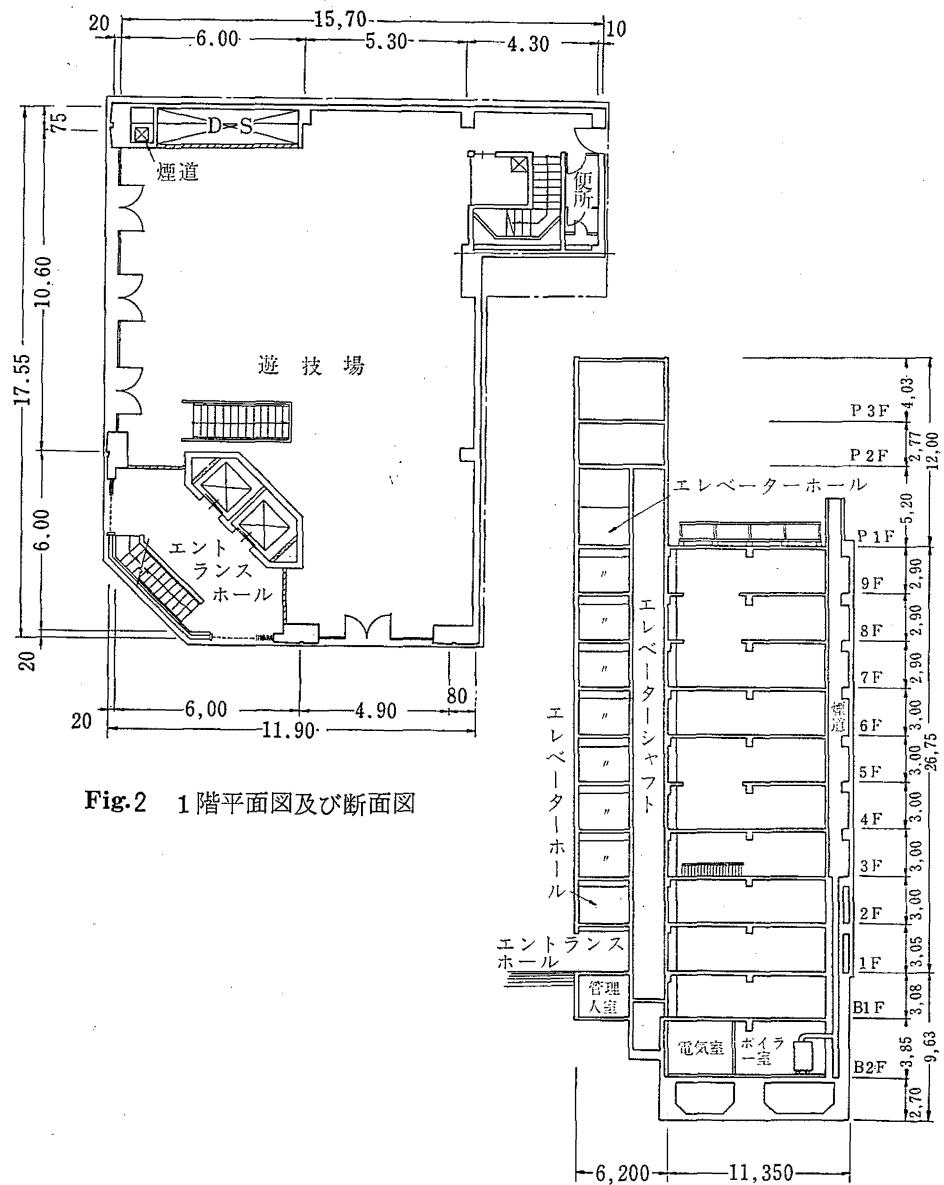


Fig.1 煙道爆発による被害状況



3. 同ビルのボイラーの構造及び運転状況

3.1 ボイラーの仕様の概要

- 1) ボイラーの型式；立型多管式温水ボイラー
- 2) 伝熱面積；13.7m²
- 3) 火格子面積；0.745m²
- 4) 効率；0.696
- 5) 煙管の径, 本数,；外径 50.8mm, 内径 44.4mm, 65本

- 6) ステー管の径, 本数；外径 50.8mm, 内径 38.1mm, 4本
- 7) 煙管の圧力損失；2.0mmAq (温度 300°C, 平均流速 1.6m/sec)
- 8) 外形寸法, 重量；高さ 2.450mm, 直径 1.000mm, 重量 1,578kg
- 9) 燃料；A重油
- 10) 運転；完全自動式電気火花着火方式
- 11) パーナーの制御装置；正常運転の場合にはスイッチオン→ギヤーポンプ送風機始動→電気火花→オイル噴霧→着火→カドミウムセルによる火焰のキャッチ→電気火花の停止→連続運転

もし, 燃料がないとき, 燃料に水, 空気の混入があり, またその他の条件で着火しないときには, 20~30秒間燃料を噴霧し, 安全スイッチが動作してパーナーは自動停止する。再スタートまでには2~3分を要する。

同ボイラーの断面図を Fig.3 に示す。

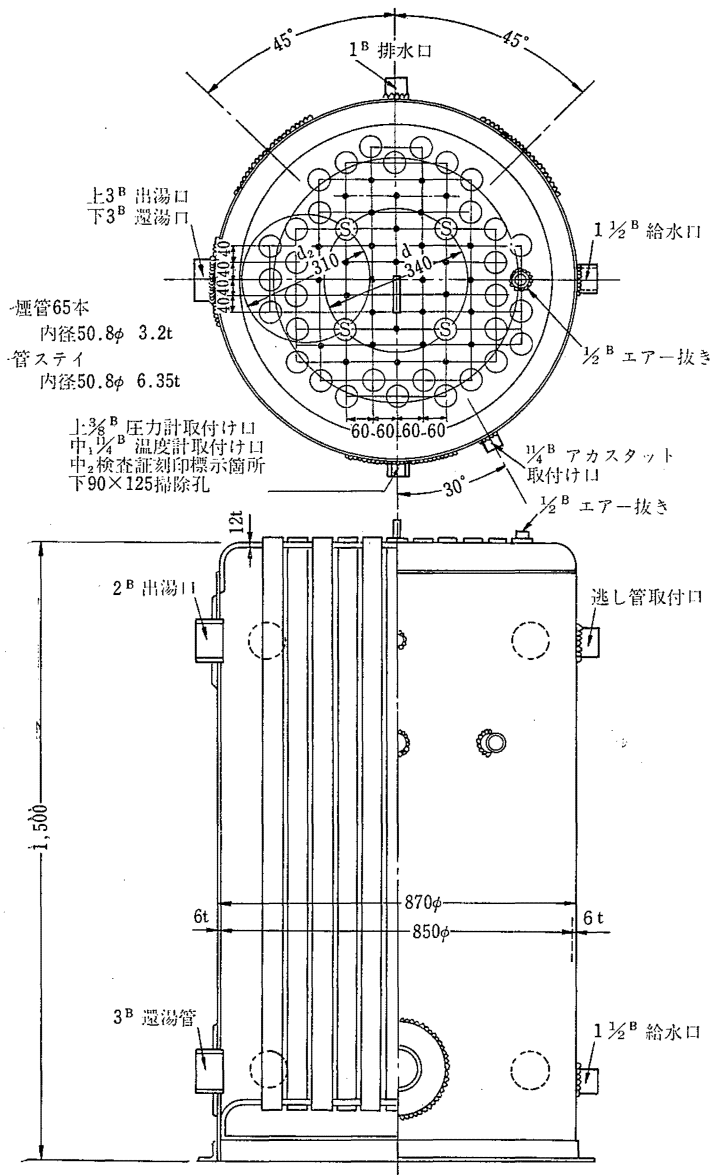


Fig.2b ボイラー断面図

3.2 ボイラーの管理, 運転状況

1) 管理状況

このボイラーは地下1階~地上3階の暖房用として昭和42年に設置されたが, 設置認可を受けず, また落成検査及びその後の性能検査を受けていないものである。メンテナンスは毎年暖房シーズンに入るとき, 清掃が行われる程度であり, 管理は充分に行われていなかった。

2) 運転状況

当日の温水の設定温度は着火に対し40°C, 消火に対し45°Cで, これを15~20分間隔で繰り返していた。燃料消費量は21.7l/hであった。過去しばしば不着火, バックファイアを起していたことがあり, また前記清掃時において多量のばい塵(ドラム缶の70%程度¹⁾)が出ていること, 事故後の検査で

69本の煙管中12本がばい塵で完全に塞がっていたことなどからバーナーの油の噴出量が多すぎたかまたは不完全燃焼を起していたまま運転がつづけられていたことも想像される。

4. 爆発原因についての仮定

爆発原因は次のようにいく通りか考えられる。

- 1) バーナーが不着火のまま 20 秒間燃料が噴霧され、プレパージされないまま、2 回以上噴霧が行われたため、未燃ガス（燃料蒸気）が滞留し何らかの着火源で爆発。
- 2) 噴霧された燃料が不完全燃焼し、煙道内にばい塵となって多量に滞留、浮遊しいわゆる粉塵爆発した。
- 3) 1), 2) の状態が同時に生じていて何らかの着火源で爆発。

以上のうち実験では爆発は主として 1) のような原因で生じたものと仮定して進めることとした。

5. 実 験

5.1 実験の目的

実験では模型によって煙道の温度、空気の流動状態、爆発性ガス濃度がどんな状況にあったかを調べ、爆発の原因の手がかりをつかむことにある。

5.2 模型実験の相似について²⁾

模型実験を行うに当り実大での物理的現象をよりよく再現させるためいくつかの相似条件を満足させねばならない。

本模型実験での主要な相似条件を列举すると次のようになる。ただし実大の代表値を

L : 長さ	u : 速度
t : 時間	λ : 壁体の熱伝導率
ρ : 空気の比質量	p : 圧力
g : 重力の加速度	θ : 温度
c_p : 定圧比熱	q_s : ボイラーの単位時間の発熱量
q_w : 壁体の熱容量	

で表し、模型の場合にはそれらにそれぞれ ' を付すものとする。

- 1) 幾何学的相似（模型の寸法を 1/10 にとる）

$$\frac{L}{L'} = 10 \quad (1)$$

- 2) 煙道全体の空気の流れの相似

フルード数 $F_r = \rho L / \Delta \rho g t^2$ とすると

実験では実大と同じ空気を用い、実温度で実験を行うので、 $\rho = \rho'$, $\Delta \rho = \Delta \rho'$, $g = g'$ と置けば

$$\frac{F_r}{F_r'} = \frac{L}{L'} \cdot \frac{t'^2}{t^2} = 1 \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \therefore \frac{u}{u'} &= \frac{t}{t'} = \sqrt{\frac{L}{L'}} \\ &= 3.162 \end{aligned} \quad (3)$$

を得る。ここではレイノルズ数は無視するものとする。

- 3) 単位時間当りの壁体の伝熱量と対流による放熱量の比, π_1 を

$$\pi_1 = \frac{\lambda L \Delta \theta}{c_p \rho u L^2 \Delta \theta} = \frac{\lambda}{c_p \rho u L} \quad (4)$$

とすると

$$\frac{\pi_1}{\pi_1'} = \frac{\lambda u'}{\lambda' u} \cdot \frac{L'}{L} = 1 \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \therefore \frac{\lambda}{\lambda'} &= \left(\frac{L}{L'} \right)^{1.5} \\ &= 31.62 \end{aligned} \quad (6)$$

を得る。

- 4) 壁体の熱伝導の相似 フーリエ数 $F_0 = \lambda t / q_w L^2$ とすると,

$$\frac{F_0}{F_0'} = \frac{\lambda t}{\lambda' t'} \cdot \frac{q_w' L'^2}{q_w L^2} = 1 \quad (7)$$

(3)および(6)式結果を用いれば

$$\therefore \frac{q_w}{q_w'} = 1 \quad (8)$$

を得る。よって煙道の壁体の熱容量は実大と同じ値のものが必要である。

- 5) 熱源の単位時間当りの発熱量 q_s の相似

$$\frac{q_s}{q_s'} = \frac{c_p \rho u L^2 \Delta \theta}{c_p \rho' u' L'^2 \Delta \theta'} \quad (9)$$

で表わされるが、(3)式を上式に代入すれば

$$\begin{aligned} \frac{q_s}{q_s'} &= \left(\frac{L}{L'} \right)^{2.5} \\ &= 316.2 \end{aligned} \quad (10)$$

となる。

- 6) ボイラーの煙管の圧力損失 p の相似

$$\begin{aligned} \frac{p}{p'} &= \frac{\rho u^2}{\rho' u'^2} = \frac{L}{L'} \\ &= 10.0 \end{aligned} \quad (11)$$

となる。

- 7) ガスの拡散の相似について

現在のところ未燃ガスの拡散係数が不明であり、ま

た実験で使用するトレーサーの選択にも限度があるので本実験においては、トレーサーとして用いる白煙を混合した空気と、未燃ガスを含んだ空気の拡散率は同じであると仮定する。

5.3 模型実験の材料の選定, 実験条件の決定

1) 模型の壁体の材料

i) 煙道の壁体の熱伝導率

コンクリートの熱伝導率 λ は $1.4 \text{ kcal/hm}^\circ\text{C}$ 程度であるので $\lambda' = 1.4/31.62 = 0.044 \text{ kcal/hm}^\circ\text{C}$ のものが必要となる。

ii) 同壁体の熱容量

コンクリートの熱容量は 0.4 cal/cm^3 程度である。相似則より模型でも同じ値のものが必要となる。

以上のような熱的数値を満足し、かつ模型実験では壁体に測定用の加工を要するので加工性のよい材料が必要となる。本報ではこの目的に近い材料として、ケイカル板（主成分はケイ酸カルシウムでこれに石綿その他を加え、圧延成型したもので、断熱建築材料として用いられている）を使用することにした。同材料の熱伝導率は $0.088 \text{ kcal/hm}^\circ\text{C}$ で熱容量は 0.12 cal/cm^3 程度で相似比より決定された値と差がある。このため、模型の壁体の厚さ方向の寸法の相似比のみを緩和し、相似比で決定される寸法の倍の厚みのものを用い、見かけ上上記 i), ii) の熱的条件をできるだけ満足させるように努めた。

2) 熱源

擬似ボイラー（以下ヒーター管という）の熱源はコントロールの容易さから 2 kW の電気ヒーターを用い、スライダックで適宜調節し所要の熱量を得るようにした。

3) バーナーの所要空気量³⁾

ヒーター管に供給する空気量を求めるため実大のボイラーのバーナーの所要空気量を求めると重油の低発熱量 $H_u = 9,100 \text{ kcal/l}$ 、空気の過剰率 $\mu = 1.4$ 、重油の比重 $\rho_f = 0.85$ とすると、重油 1 kg の燃焼に要する空気量 V は次式で与えられる。

$$V = \mu \left(\frac{\rho_f H_u}{1,000} + 2.0 \right) \text{ Nm}^3/\text{kg} \quad (12)$$

重油使用量を事故当時 21.7 l/h 、空気の温度を 20°C とすると

$$V_{20^\circ\text{C}} = \mu \left(\frac{\rho_f H_u}{1,000} + 2.0 \right) \frac{21.7}{\rho_f} \cdot \frac{273.1 + 20}{273.1} \quad (13)$$

$$= 373 \text{ m}^3/\text{h}$$

となる。よってヒーター管に供給されるべき空気量 V' は

$$V' = V_{20^\circ\text{C}}/316.2 = 19.7 \text{ l/min}$$

を得る。

4) バーナーの燃焼ガス量 V_d は上記の燃料消費量に対して、ガスの温度を 300°C とすると

$$V_d = \left[1.11 \frac{H_u}{1,000} + (\mu - 1) \left(\frac{\rho_f H_u}{1,000} + 2.0 \right) \right] \\ \times \frac{21.7}{\rho_f} \cdot \frac{273.1 + 300}{273.1} \\ = 750 \text{ m}^3/\text{h}$$

よって模型では

$$V_d' = V_d/316.2 = 39.5 \text{ l/min}$$

と推定される。

5) ボイラーの煙管の圧力損失

実大ボイラーの煙管の圧力損失の設計値は 3.1 の項で記した通りであるが全体の 17.4% の煙管が完全にばい塵で塞がっていたことが判明している。他の煙管もかなり断面が細くなっている可能性も強い。よって圧力損失もかなり大きくなるものと予想されるが、具体的な数値はつかみ難いので、やむを得ず圧力損失を設計値の 25% 増とすれば、実験で使用するヒーター管の圧力損失 p' は

$$p' = p \times 1.25/10 = 0.25 \text{ mmAq}$$

となる。

6) 時間の設定

時間はすべて相似比から実大の $1/3.16$ になるので、温水が所定の温度に達してバーナーを消し、次に点火するまでの時間を約 20 分位とすれば模型では約 6 分位、またバーナー不着火のとき燃料噴霧時間は $20 \sim 23$ 秒間であるので模型では約 7 秒、さらに不着火のときの再点火までの時間は実大では $2 \sim 3$ 分であるので、模型では 45 秒とする。

7) ボイラーの排ガス温度

実大ボイラーの排ガス温度は明白ではないが、 300°C 位であると推定される。本実験では相似比の項でも触れたように実温度で実験を行うのでヒーター管の排出空気温度を 300°C とする。

5.4 実験装置と方法

1) 煙道模型

以上のように相似条件によって煙道模型（模型 A）を製作した。この模型の他に通常の断面の煙道（煙道の内面に突出部のないもの）の模型（模型 B）を製作

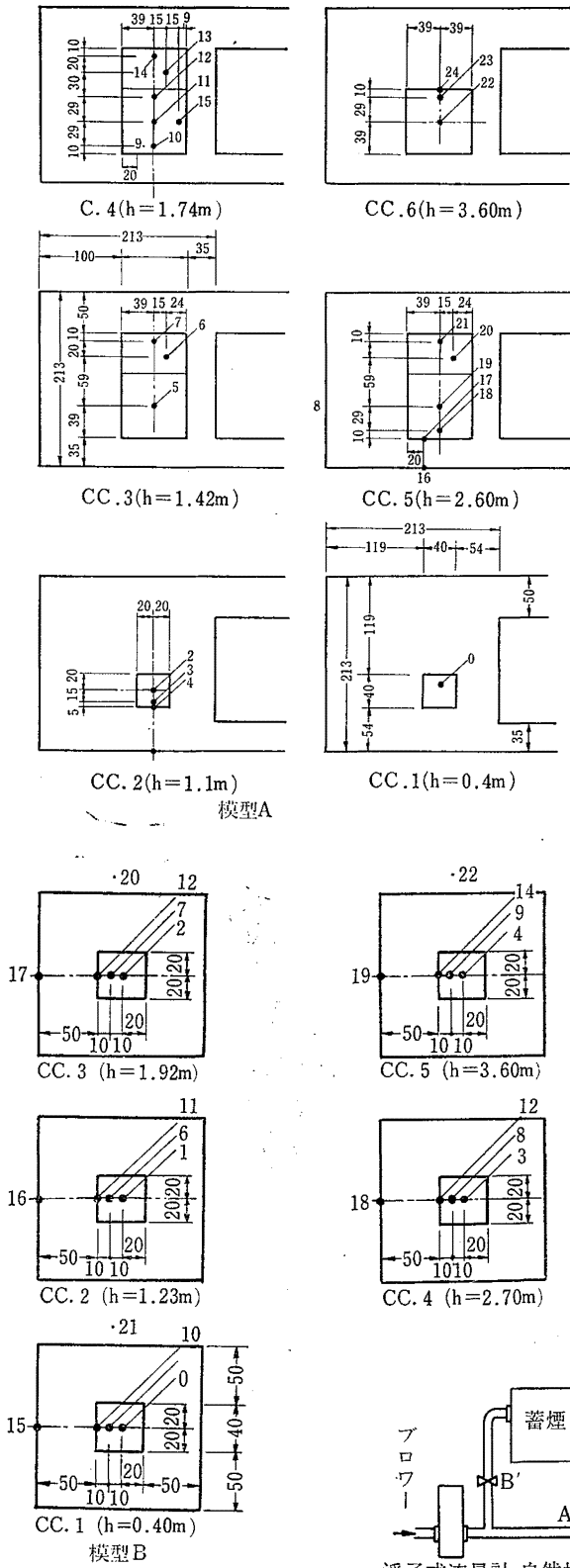


Fig. 5 熱電対の配置図および煙道模型断面図

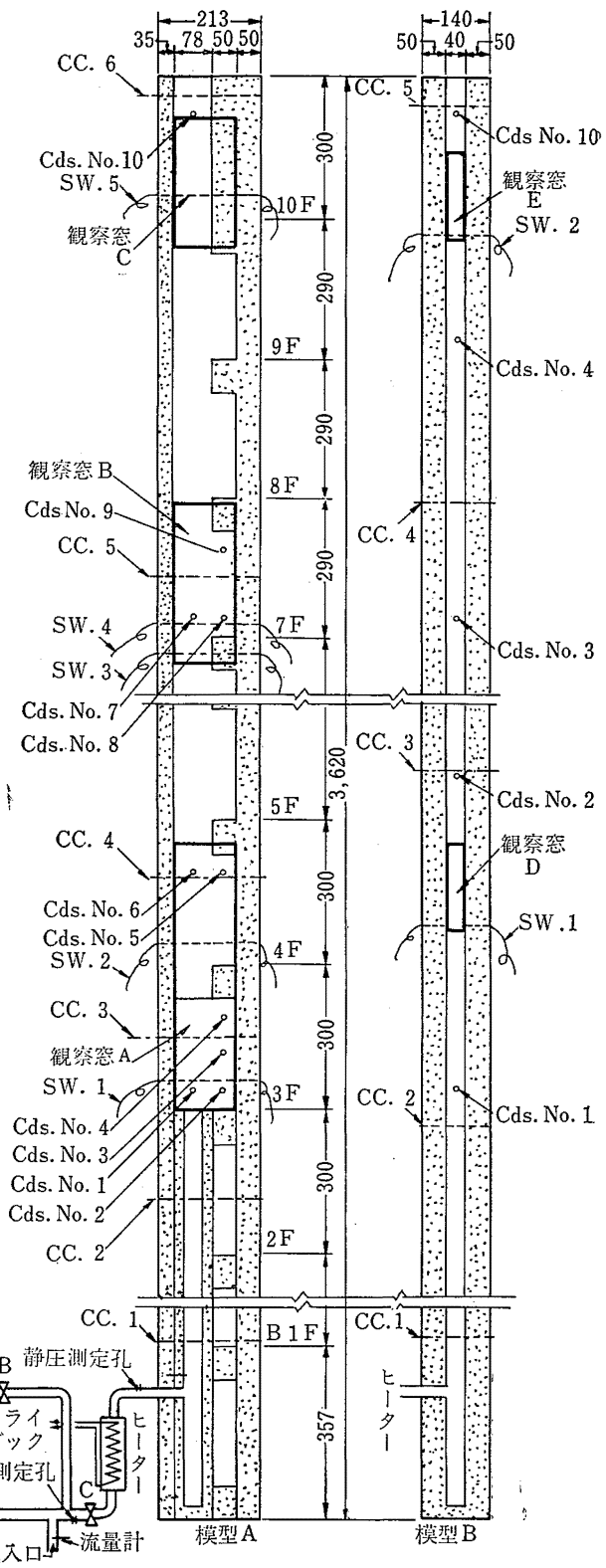


Fig. 4 煙道模型および擬似ボイラー装置 (SW はスモークワイヤ, CC は熱電対を示す)

し、煙道内の空気の流れ、温度分布、未燃ガスの推定濃度について比較することを考えた。両模型の寸法などは Fig.4 に示す。同図においてヒーター管加熱時にはバルブ A は開放、バルブ B, B' は閉じ、自然換気流入口（2次空気取入口）も閉じ、ブローにて所要空気量を押し込む。煙道内壁体の温度が定常状態に達するまでに約60~80分を要するが定常状態に達したあと加熱スイッチを切り以下に述べるような各項目の測定に入る。このとき自然換気流入口は開放、バルブ A, B および B' は閉じる。しかし白煙を煙道内に吹き込むときはバルブ B, B' は所要時間だけ開放し、未燃ガスが煙道内に噴霧された状態をシミュレートした。ここ際自然換気流入口は開放である。

2) 温度測定

温度の測定位置は Fig.4 において CC の記号で示した高さで、 Fig.5 (平面配置) に示すように煙道内の中心軸、内壁面より 10mm 離れたところ、内壁面、外壁面、室温などである。熱電対は 0.1mm の銅コンスタンタンを使用し、24点デジタル出力温度計および打点式温度計にて測定した。

3) スモークワイヤによる流速の測定及び観察

煙道内の流速分布を電氣的に計測することは困難であるので可視化することを考えた。本実験では Fig.4 に示すように耐熱ガラス板をはめこんだ観察窓を設け、煙道内を観察できるようにした。

流れの可視化の方法は両側の壁面に 0.15mm の穴

をあけ、壁面の外側にはグリースカップを設けておく。この穴に 0.1mm のニクロム線を通し、測定直前にグリースなどの粘性の高い油を塗布する。塗布の方法は、ニクロム線の両端を持って塗布したい長さだけ線を左右に数回往復すればよい、このような準備をしたあとこのニクロム線に数 *m sec* の微小時間に過電流を流し加熱すると油が燃え白煙を生ずる。この白煙を観察窓より写真撮影した。光源は 35mm スチール写真のときはストロボスコープを 10Hz で点滅させる。16mm シネカメラで撮影するときは 30W の蛍光灯に適当な線状光源となるようにカバーをして用いた。ニクロム線の加熱はカメラの X 接点と同期する装置を製作した。詳細は Fig.6 に示す。なおニクロム線を高温に熱するため無風状態においても白煙は上昇する。よって前もって上昇速度を調べておく必要がある。煙道上下端を閉じ対流が生じていない状態として白煙を撮影した結果を Photo.1 に示す。この場合ストロボスコープの点滅は 5Hz である。0.4秒後ではおよそ 5cm/sec の速さで上昇しているものと見られ、0.6秒後では白煙は見えないほど拡散していることがわかる。よって加熱直後白煙の速度はこの自然対流の影響があるが、ある時間後 (0.4~0.5sec) にはこの影響は少なくなるものと思われる。

4) 煙道の白煙の濃度の測定⁴⁾

未燃ガスの濃度を調べることは困難であるので、排烟設備点検用として製造された発煙片 (昭和火工製

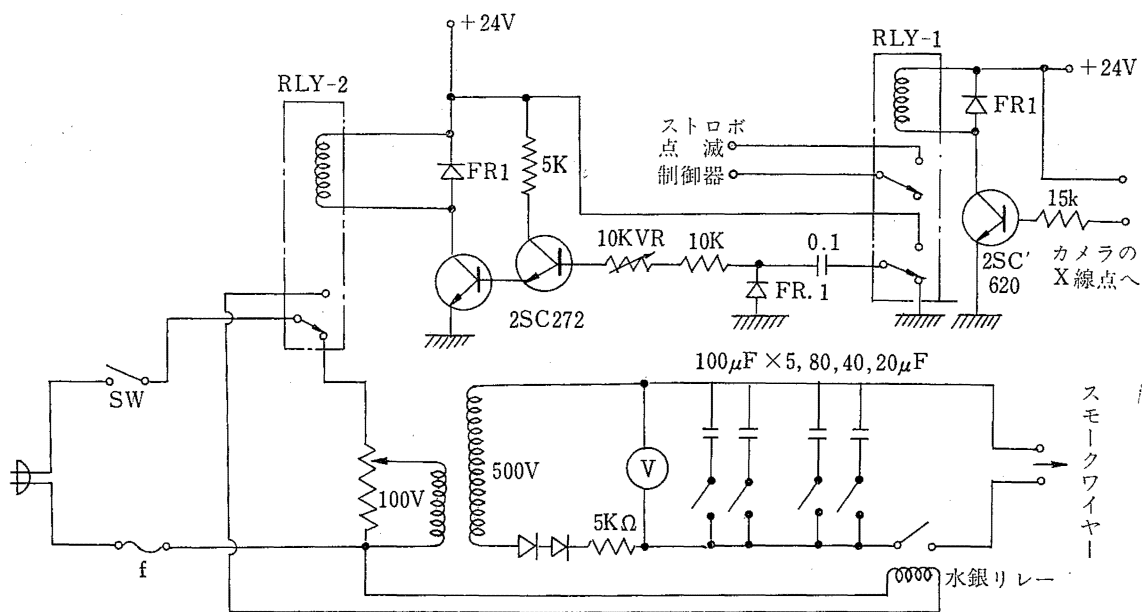


Fig.6 スモークワイヤ発煙制御装置

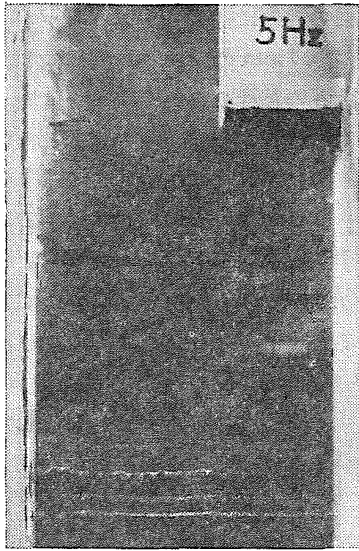


Photo. 1 自然対流による油煙の上昇
(白煙の時間間隔は0.2秒)

SK-7)の白煙の濃度から未燃ガスの濃度を推定することにした。この白煙が未燃ガスと同等の拡散率を有するかどうか不明であるが他に有効な方法がないので止むを得ず本品を用いた。

濃度の検出には Cds など光電素子を用い光学的に測定することが最も簡便かつ連続に測定できる点有用であるのでこの方法によるものとした。消防関係者の間では白煙の濃度は減光係数で表すので普通であるので⁴⁾本報でもそれに従うものとする。減光係数 μ は

$$\mu = -\frac{1}{l} \ln \left(\frac{F}{F_0} \right) \quad (15)$$

l : 光軸長(m), F/F_0 : 光の透過度

で計算する。

濃度の検出および測定は Cds セルを用いて Fig.7

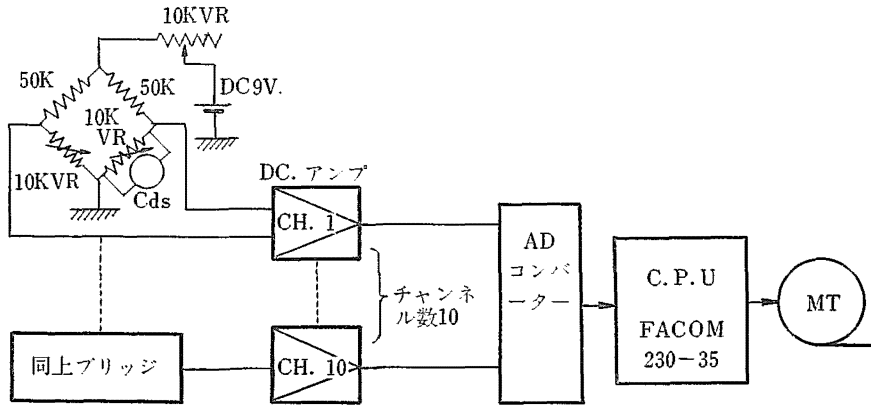


Fig.7 Cas セルによる光の透過度測定ブロックダイアグラム

に示すような簡単なブリッジを作製し、不平衡電圧を直流増幅器に通す。さらに AD 変換器を経由してデジタル計算機に接続し、演算処理した。

透過度と出力電圧の関係は透過度0.475, 0.29, 0.15 それに 0.0 の4枚の減光フィルターを用い、事前に十分な校正をし、両者の関係を2次関数の近似式で表しておく。なお模型Aでは Cds セルによる測定ヶ所は10ヶ所、模型Bの場合には5ヶ所とした。Cds セルの配置位置は Fig.4 に示す。

5) ヒーター管の圧力損失

ヒーター管の前後で静圧を測定しヒーター管の圧力損失を求めた。測定は 1/100mmAq の分解能を有するデジタル表示式微圧計を用いた。

6) 温度差による自然換気量の測定

流量計は一般には計測部で圧力損失が大きいのが普通であるので本実験では使用できない。よって携帯式熱線風速計を用い、その受感部を管路に挿し込み、その流速値から流量を測定した。そのため流速と流量との関係を前もって校正した。

6. 実験結果

6.1 煙道内の温度分布, 温度差による静圧および換気流入量

温度の測定結果を模型Aの場合には Fig.8に同Bの場合には Fig.9に示す。またこのデータをもとに煙道の中心軸上, 壁面より 10mm はなれた位置, 壁表面に分けて温度分布を示したものがそれぞれ Fig.10, 11である。さらに測定点数が少ないので精度はやや劣いが横断面の温度分布をそれぞれ Fig.12, 13に示す。

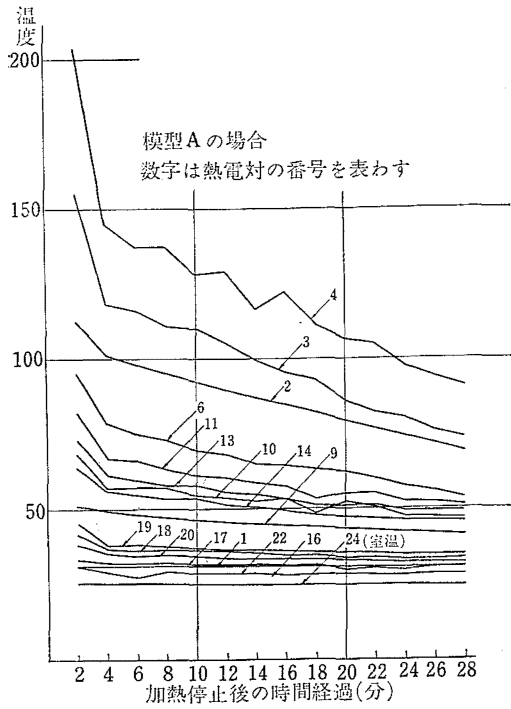


Fig. 8 各測定点における温度 (模型A)

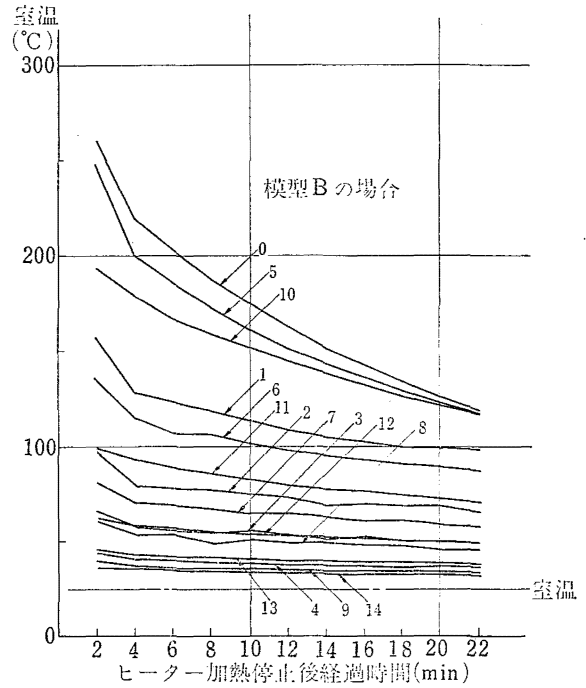


Fig. 9 各測定点における温度 (模型B)

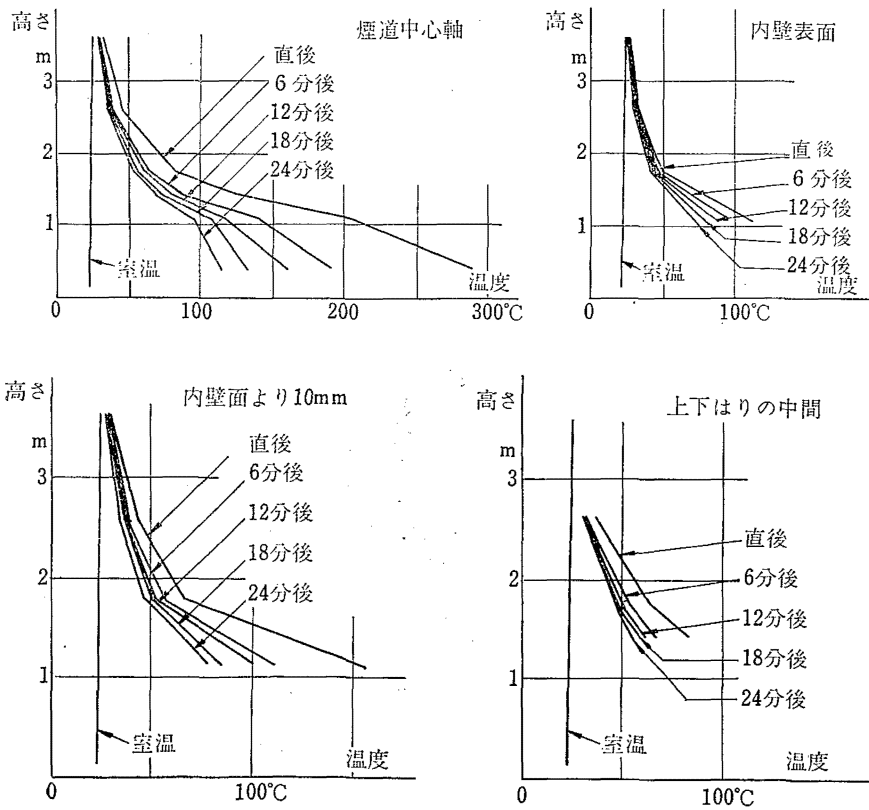


Fig. 10 鉛直方向温度分布図 (模型A)

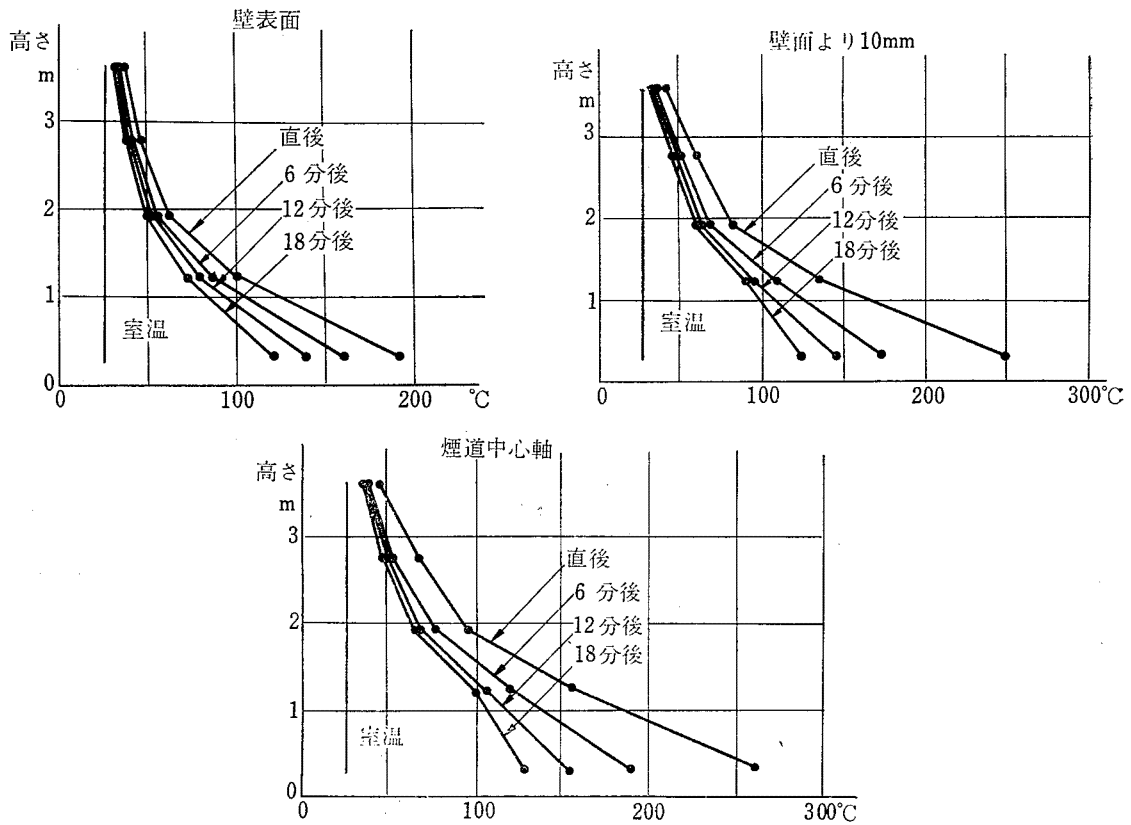


Fig.11 鉛直方向温度分布 (模型 B)

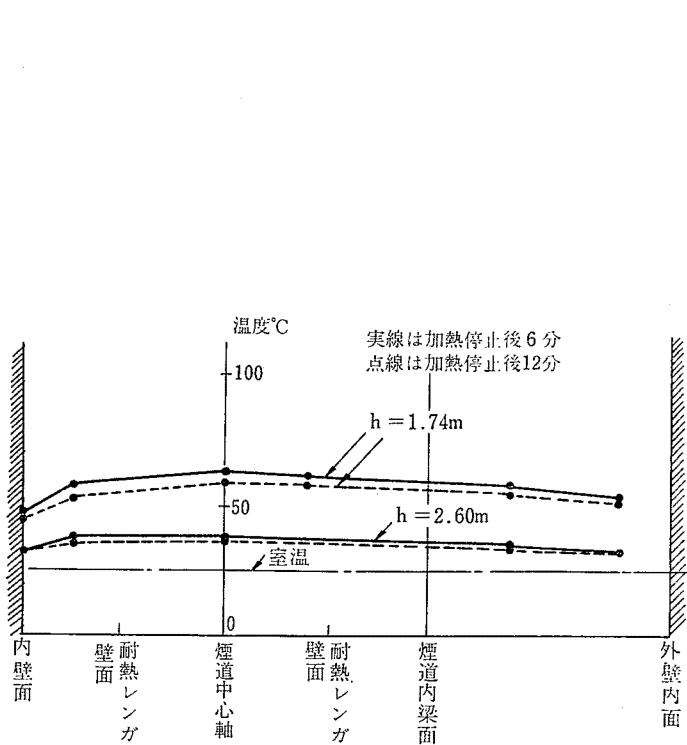


Fig.12 煙道横断面温度分布図 (模型 A)

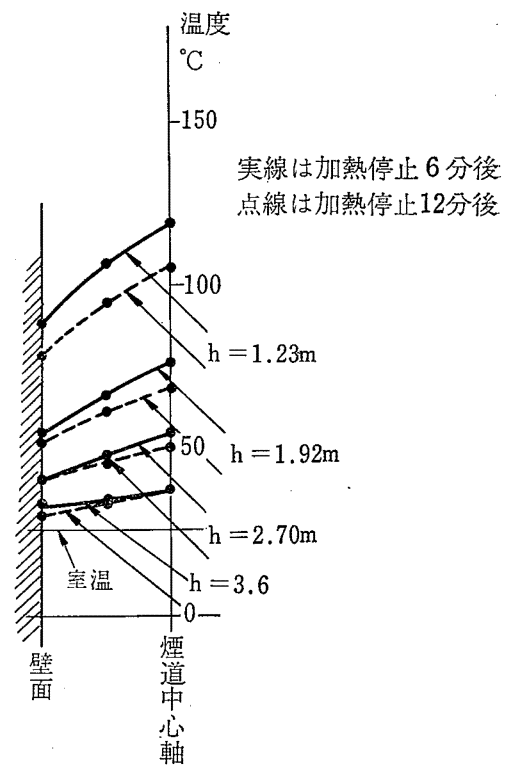


Fig.13 煙道横断面温度分布図 (模型 B)

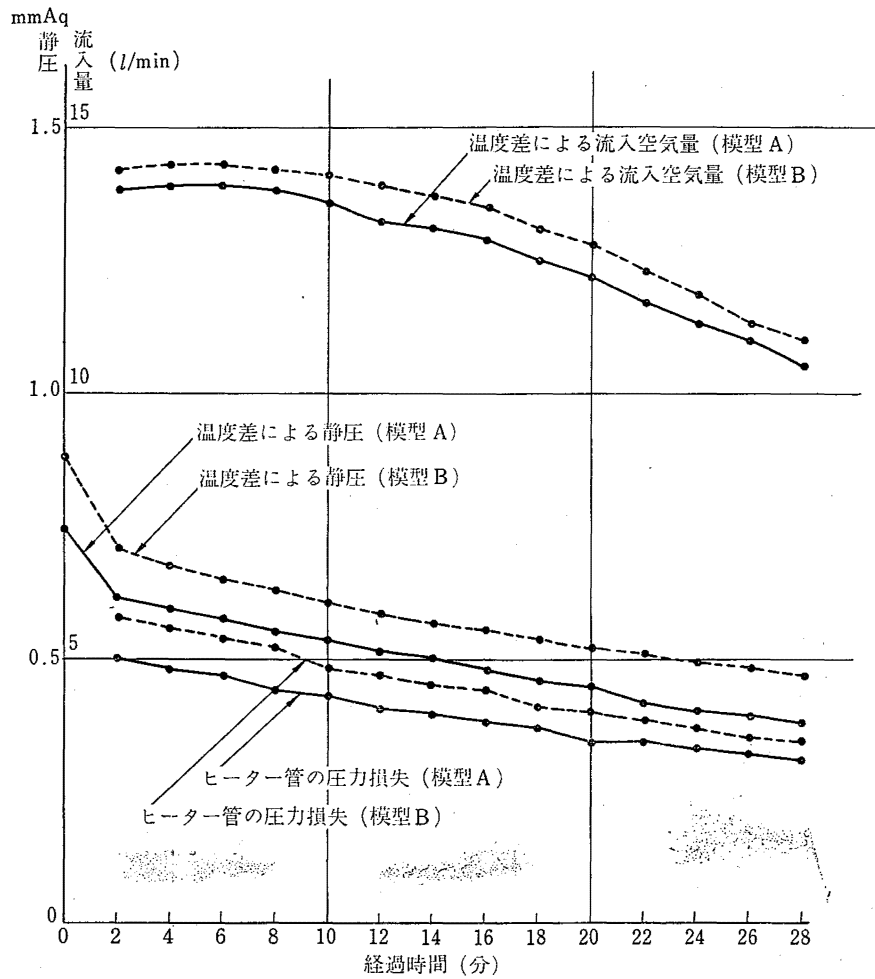


Fig. 14 温度差による静圧，流入空気量，及びヒーター管の圧力損失と加熱停止後の経過時間との関係

これらの図からボイラーから煙道への流入温度はほぼ同程度であるにも拘らず模型Aの方の頂部排気温度は26~27°Cで室温との差は2~3°C(加熱停止6分後)であるが、模型Bの方のそれは約40°Cで温度差は15°C程度となり模型Aは同Bに対し煙道内での温度低下が大きい。

ほぼ煙道の中心軸上の温度より煙道下部における温度差による大気圧との圧力差 Δp を

$$\Delta p = \rho_0 h - \int_{h_1}^{h_2} \rho dh \quad (h_1 = 0.4 \text{ m}, h_2 = 3.6 \text{ m}) \quad (16)$$

より時間経過毎に求めると Fig. 14 のようになった。これより模型Bは同Aよりも温度が高いため静圧も0.06~0.08mmAqほど大となる。しかしヒーター管の圧力損失がきわめて大きいので流入空気量はあまり変わらないようである。

ヒーター加熱停止6分後で流入空気量は13.9l/min 静圧は0.57mmAqである。実大煙道の場合に換算するとそれぞれ263.5m³/h, 5.7mmAqとなる。また実大の二次空気流入口の開口面積は0.0128m² (0.16m×0.08m)であるので、有効開口面積は0.009m²となり平均流入速度は8.13m/secとなる。

6.2 煙道内の流れについて

模型Aには観察窓A, B, Cの3ヶ所、同Bには観察窓D, Eが設けてある(Fig. 4)。この観察窓よりスモークワイヤーからの煙の流れを写真撮影した例を Phot. 2~5 に示す。

流れの状態はスモークワイヤーの煙の撮影結果から Fig. 15, 16 のようになっている。問題の模型Aの場合には上下の突出部(梁)の間で旋回する流れが生じ、大きく乱れている。この傾向は上階に行くに従って煙

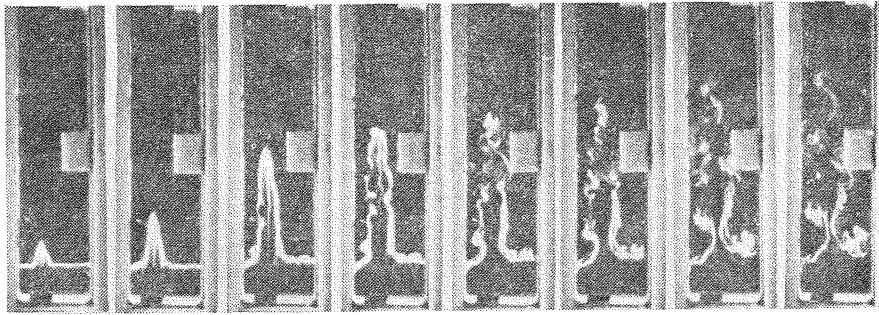


Photo. 2 観察窓Aにおけるスモークワイヤからの油煙の流れ (16mm
シネで撮影, 1コマ1/22秒)



Photo. 3 観察窓Bにお
ける油煙の流れ
(模型A)

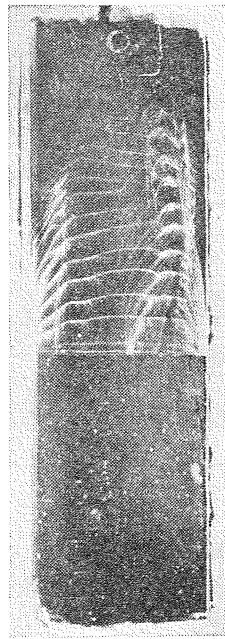


Photo. 4 観察窓Cにお
ける油煙の流れ
(模型A)

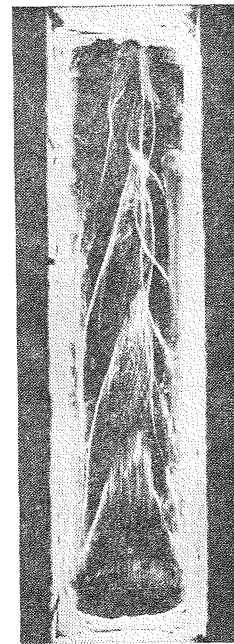


Photo. 5 観察窓Dにお
ける油煙の流れ
(模型B)

道内の流速が落ちるため大きくなり5階以上では攪拌状態になってゆっくり上昇していく。しかし最上階の急縮小部分では層流に近い流れとなる。

スモークワイヤからの白煙の写真からは明確に流速は求められないが、およその速度を推定してみると3～4階の中間(観察窓A)の断面で最大の速度は50～60 cm/sec, 7～8階の中間(観察窓B)では最大速度は25～35 cm/sec, また最上階(観察窓C)では最大速度は10～15 cm/secであった。模型Bについてみると流速分布は上下の観察窓ではほぼ同じであった。

6.3 煙道内の発煙筒の煙の濃度の測定結果について

1) 煙道内に白煙を1回だけ吹きこんだときの濃度の測定結果

まず蓄煙箱内で発煙筒をたき、その煙を7秒間1回だけ煙道内に吹きこむ。空気量は前記のようにボイラーの所要空気量に相当する量とする。このときの煙道内の各点の減光係数 μ を求めた。その結果を Cds No. 1の最大減光係数 μ_{3max} に対する比で表し、

$$\mu = at^m e^{-bt} \quad (17)$$

なる近似式を用いると、各測定位置におけるそれぞれ

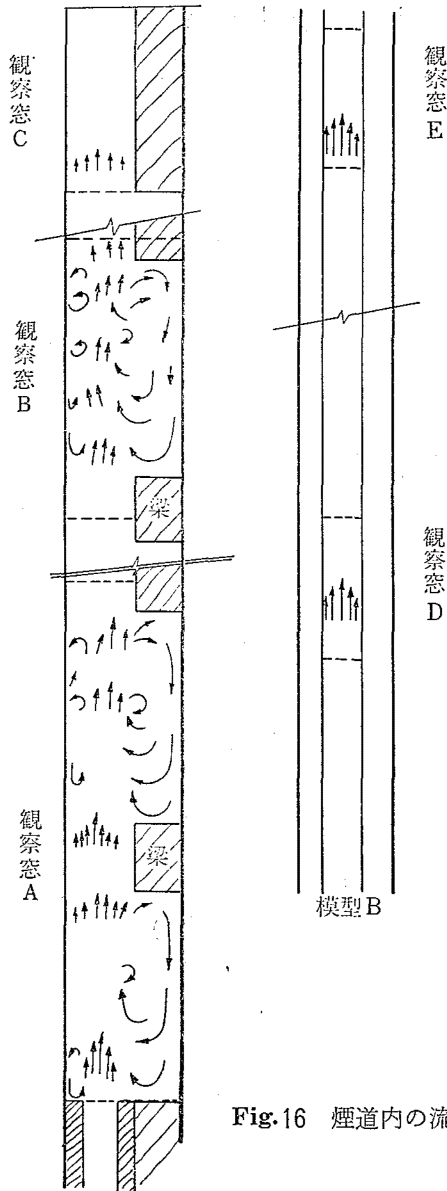


Fig. 16 煙道内の流れ(模型B)

Fig. 15 煙道内の流れ(模型A)

の係数および指数の値は Table 1 のような結果となった。

また濃度を単位体積の空気中に含まれる白煙の重量で表すものとして、濃度が極端に高くないとき、濃度と減光係数との間に概略比例関係にあるものとみなせば、(17)式はまた濃度比を表すことになる。

2) 間欠的に白煙を吹きこんだときの濃度の測定結果

Table 1 係数 a, b および指数 m の値

	Cds No.	a	m	b
模型 A	1	0.099	1.685	0.157
	2	—	—	—
	3	0.202	1.390	0.145
	4	0.134	1.409	0.135
	5	0.129	1.279	0.102
	6	0.244	0.791	0.064
	7	0.017	1.237	0.034
	8	0.119	0.725	0.320
	9	0.019	1.261	0.042
	10	0.015	1.325	0.045
模型 B	1	0.570	1.021	0.238
	2	0.229	1.349	0.200
	3	0.261	1.327	0.208
	4	0.340	1.038	0.147
	5	0.116	1.517	0.192

実験条件の項で示したような時間々隔で間欠的にバルブ B 及び B' を開閉したときの結果を Fig. 17, 18 に示す。同図は Cds No. 1 の最大減光係数 (模型 A の場合には波形が振動成分を含んでいるので上記のような関数で近似させ、その近似式の最大値をとる) で除し、全ての測定点の減光係数を比で表すことにしたものである。図からわかるように Cds No. 7 以上の位置では白煙の滞留が認められ、2回目の吹き込みの後で、ある濃度以上になっている。また Cds No. 5, 6 の濃度比をみれば同位置でも完全に煙が抜けきらないうちに次の高濃度の白煙が流れこんでくることわかる。よって5階以上の位置で未燃ガスの滞留があったのではないと思われる。

模型 B の場合には全断面においてほぼ同様な波形となり、模型 A の場合のような滞留するところはなく、未燃ガスは次の燃料の噴霧の前にはほぼ完全に外部に排出されることがわかる。

7. 煙道内の未燃ガス濃度の推定

7.1 3階急拡大面の煙道中心軸上の点 (Cds No. 1) の未燃ガス濃度の推定

これまでの実験結果をもとに煙道内の未燃ガスの濃度について考察してみた。

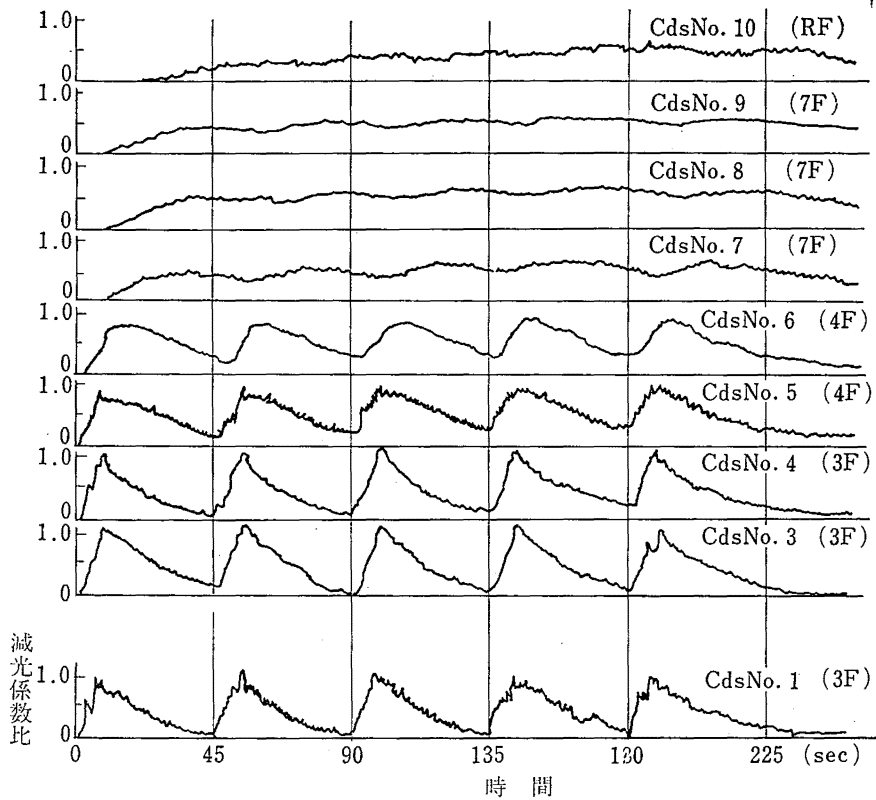


Fig.17 45秒間隔で白煙を吹き込んだときの各測定点の減光係数比 (模型A)

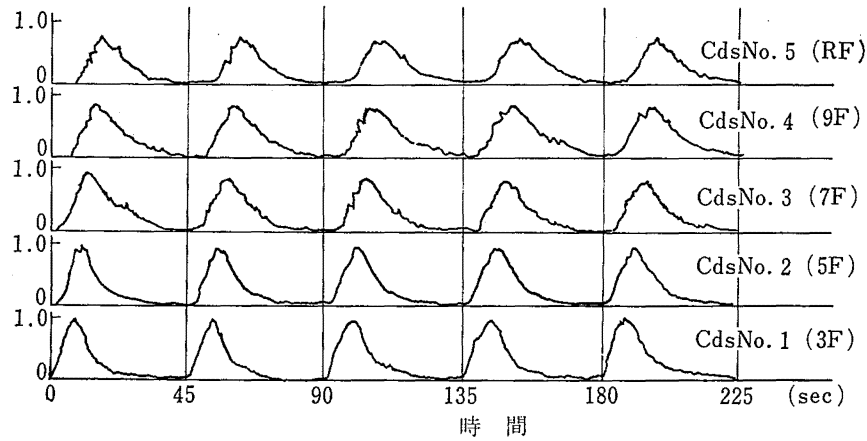


Fig.18 45秒間隔で白煙を吹き込んだときの各測定点の減光係数比 (模型B)

はじめに煙道各部の濃度を3階急拡大面の最大濃度に対する比で考えているので同位置における濃度を推定する。

まず発煙筒による煙道内濃度の実験結果と未燃ガス濃度との関係について次のような仮定をする。

i) 発煙筒の煙は時間の経過と共に粒子相互の付着による沈下や壁面への付着を生じ、減光係数は低下する。しかし畜煙箱より3階急拡大面までの経路におい

ては速度が早いのでその影響による減光係数の低下はないものとする。したがってこの経路間において白煙の重量の変化はないことになる。

ii) 上記と同様に未燃ガスについても同経路間において重量変化はないものとする。

iii) 吹き込まれる白煙の濃度は吹き込み中(の t_0 秒)においては一定値とする。

iv) 上記と同様に未燃ガスの濃度は噴霧中は定濃度

であると仮定する。

以上のような仮定によって、ボイラーより t_0 秒間、濃度 C_{f0} (単位体積当りの mol 数) の未燃ガスの矩形入力に対し 3 階急拡大部分において (17) 式のような応答があったものと考え、いま問題としている位置の最大濃度を C_{f3max} 、同位置の温度 T_3 (405°K)、ボイラー内に吹きこまれる未燃ガスの温度を T_0 (297°K) とすると仮定 i), ii) によって

$$C_{f0} \cdot t_0 = C_{f3max} \cdot \frac{T_3}{T_0} \int_0^\infty at^m e^{-bt} dt \quad (18)$$

なる関係式が得られる。

ここで被積分関数である濃度比の近似式は模型 A の Cds No. 1 の波形の近似式を用いず、模型 B のそれを用いるものとする。その理由は Cds No. 1 の取り付け位置が急拡大した面よりやや上部にはなれていたので、実験観察の結果によれば上下階の梁の間を旋回した 2 次流れを再度検出している (Photo. 2 参照)。このため (18) 式の計算にはこの近似式は不相当であり、模型 B の Cds No. 1 の近似式を用いる方が望ましいと考えた。しかし最大値は両者とも同程度の値と考えられる。

(18) 式中の積分を数値積分によって計算すると、

$$C_{f3max} = 0.553 \cdot C_{f0} \quad (19)$$

となった。

7.2 5階以上の煙道内の未燃ガス濃度の推定

白煙による濃度測定では明らかに前項の仮定 i) の現象があり、実験値をそのまま煙道内の濃度とすることはできない、よって以下計算によって推定した。実験を行ってみると 3, 4 階部分の煙道では断面の最大速度は速度の項で触れたようになりかなりあるが、5 階以上になると急速に低下し、攪拌状態となる。よって 5 階以上の煙道では各階ごとにほぼ様な濃度になるとみられ、未燃ガスにおいても同様な現象が生じているものと仮定し、その濃度を Cds No. 6 (4 階上部) の減光係数比をもとに推定してみた。

$\phi_n(\tau)$ を n 階への流入濃度比とし、時間 τ の関数で表すと、 n 階の濃度 $C_{fn}(t)$ は

$$C_{fn}(t) = C_{f3max} \int_0^t \phi_n(\tau) \frac{d}{dt} \varphi_n(t-\tau) d\tau \quad (20)$$

で表される。ただし

i) 計算を簡単にするため、ボイラーへの空気量は二次空気量だけとし、Fig. 14 より 13.6 l/min (加熱

Table 2 $Q_n(T_n/T_0) \cdot v_0$ の値

	Q_n	$\frac{T_n}{T_0} \cdot v_0$
4 階	2,652	258.3
5 階	2,652	247.7
6 階	2,652	242.4
7 階	2,652	241.3
8 階	2,554	240.3
9 階	2,554	239.4
R 階	1,697	233.2

注 $v_0 = 230 \text{ cm}^3/\text{sec}$, $T_0 = 297^\circ\text{K}$

停止後 6 分) の値をとる。 T_n も実験結果の値をとり、煙道内の空気流量 $v_n (= T_n v_0 / T_0)$ および n 階において下階と上階との間の梁の中心平面で区切られた煙道の容積 Q_n を Table 2 に示す。

ii) 計算は 5 階以上について行なうものとし、 ϕ_5 は Cds No. 6 の濃度比を与え、6 階以上については

$$\phi_{n+1}(\tau) = C_{fn}(\tau) / C_{f3max} \quad (21)$$

とにおいて、順次上階に向かって進むものとする。

よってステップ応答関数 $\varphi_n(t)$ は 5 階以上ではガスが一様に攪拌されるものとみなす仮定により、一次形の微分方程式の解として得られ、

$$\varphi_n(t) = \frac{v_{n-1}}{v_n} (1 - e^{-v_n t / Q_n}) \quad (22)$$

で表されるので、(20) 式は

$$C_{fn}(t) = C_{f3max} \cdot \frac{v_{n-1}}{Q_n} \int_0^t \phi_n(\tau) \cdot e^{-v_n / Q_n (t-\tau)} d\tau \quad (23)$$

となる。よって未燃ガスの濃度は上式を計算することによって求められることになる。よってこの計算結果を利用し、 $C_{fn}(t)$ を 45 秒づつずらして重ね合わせ、間けつ的にガスが送りこまれた場合を想定して濃度比を求めた結果 Fig. 19 に示すようになった。この図と実験で得た減光係数比 (Fig. 17) とを比較すると、実験の方が計算値よりも上階になるに従って小さくなる傾向がある。これは前にも触れたように粒子の沈下、壁面への付着などにより濃度が減少する影響と思われる。未燃ガスではこのように経路の途中で濃度の変化が少ないものとみれば 5 階以上の煙道内の濃度は計算で得た結果の方を採用する方が望ましいと思われる。ただし同図で間けつ的にガスが送りこまれたとき、3 回目以後のガス濃度は上階では一定値となり、下階の方では一定値に同一周期の振動が重畳した波形となっている。これはこの計算で T_n, v_n を一定として扱っ

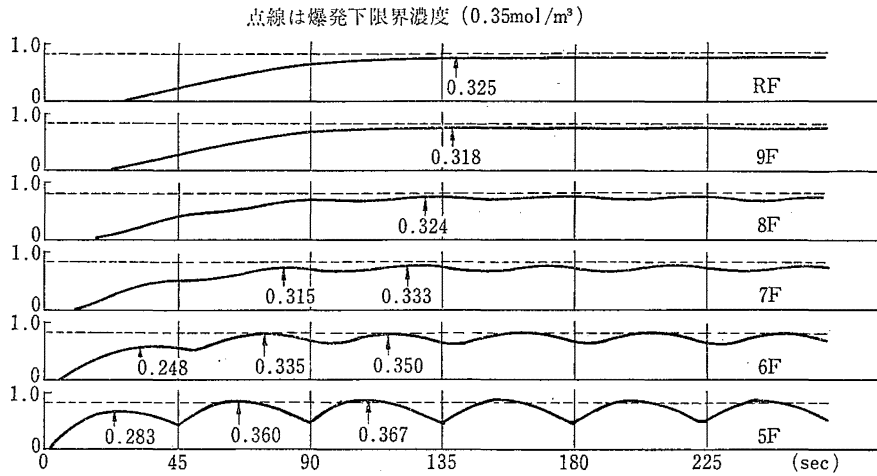


Fig. 19 45秒間隔で未燃ガスが煙道に流れたとき各階における濃度比および濃度と爆発限界(点線)との関係

ているためで実際には Fig. 9~14 にみられるように徐々に T_n, v_n は少なくなっていくので濃度は漸増するはずであるが、ここではヒーター加熱停止6分後から5分間程度(実大では約15分位に相当)の間を考えているので濃度の漸増分については考えないことにした。

Fig. 19 の図中で示した数値は、次節8で述べる方法で C_{f3max} を mol/m^3 単位で求めた結果をもとに得た濃度である。また同図中の点線は C_9H_{20} ガスの爆発下限界濃度を示すものである。

8. 爆発原因の考察

このボイラの燃焼装置においては、燃料重油を噴射させたときに不着火の場合は20秒間連続的に燃料の噴霧がボイラーに向かって行われる。このことはすでに3.2で述べたとおりである。そしてパーナーが自動停止して空気、燃料の噴霧が行われなまま約2~3分おいて、次の噴霧が行われるが、着火がうまくおこなわれないと、このようなことがくりかえされて、ボイラーから煙道へ徐々に未燃ガスまたはミストが押込まれてゆく結果となる。このような場合の未燃ガスの濃度は、重油消費量が 21.7l/h であったことから正常運転時の実燃焼時間は30分とみて20秒当りの消費量は 0.241l となり、重油の比重 0.85 とすると重量は 0.205kg となる。そしてこれは未燃ガスの組成を仮に C_9H_{20} とすると1分子当りの重量は 0.128kg であるので噴霧量は $0.205/0.128=1.60\text{mol}$ となる。

一方理論空気量は $373\text{m}^3/\text{h}$ であるから20秒あたりの流量は 2.07m^3 となり、従って均一にガスが空気中に拡散するものと仮定し、また模型によって得た煙道内の時間に対する濃度変化が実大にもほぼあてはまるものとするれば、未燃ガスの濃度 C_{f0} は 0.772mol/m^3 となる。よって C_{f3max} は19式より 0.428mol/m^3 となる。

一般に灯油、軽油、重油などの爆発範囲の濃度は体積百分率で、 $0.8\sim 5\%$ 、 mol/m^3 で表わせば $0.35\sim 2.2\text{mol/m}^3$ 程度とされているから C_{f3max} は十分に爆発をおこしうる濃度である。この爆発可能なガスが気団となって煙道上部に流れ、濃度は流れが攪拌状態となるため次第に均一化される。Fig. 17 (実験) と Fig. 19 は非常によく似ており7.2の計算の仮定条件は大きな誤りはないと思われ、この計算結果からみると、2回目の吹き込み後で5階では $0.210\sim 0.360\text{mol/m}^3$ 、7階では $0.284\sim 0.315\text{mol/m}^3$ 、9階では $0.292\sim 0.318\text{mol/m}^3$ となり最上階ではほぼ定濃度となる。6階までの濃度はいずれも爆発下限界付近または下限を超える濃度であるので他の条件さえ整えば爆発事故は起り得ると考えられる。ただしこれはある仮定のもとにおける推定で例えば上記 C_{f0} はパーナーの点火時間と消火している時間が同一であるとして実燃焼時間を出しているが実燃焼時間が短かければ C_{f0} はもっと高濃度になり、煙道内のガス濃度は高くなるはずである。またボイラーの供給空気の過剰率をいまは 1.4 としているが、もっと小さな値にとれば(例えば $1.1\sim 1.2$) 煙道内のガス濃度はさらに高くなるであろう。一方模

型Bの場合 (Fig. 18) では噴霧がくりかえされても、爆発限界内のガスは滞留せず時間の経過とともに急速に低下してしまうので、煙道内が爆発組成にある時間はきわめて短時間となって、事故となる機会は非常に少ないものと思われる。

次に燃料のガスがどのような点火源から着火したかということは、温度分布の実験結果から (Fig. 10)、消火直後では重油の発火温度 (250~260°C) 以上に達している部分もあるが、消火後再着火が行われないと、数分後には発火温度以下となることが明らかのため、数回の燃料の吹き込みによりボイラーから煙道上部にかけて爆発組成で滞留した未燃ガスが着火爆発するには、バーナーで点火が行なわれたとき以外、他の原因は考えられない。

9. むすび

以上を要約すると、次のようになる。

1) 爆発の原因は明白にはできないが、未燃ガスが煙道に流れたことから、先ずボイラーの制御機器に問題があったことが想像される。特に不着火のときにはプレパージを行ってから再点火するシステムとなっていなかったことに問題があるように思われる。

2) 実験結果から明らかなように煙道の中間に急拡大部分があったり、縮小部分があったりすると著しく流れが阻害され、未燃ガスの滞留が生ずるが、このように煙道の構造に問題があったことが指摘される。

3) 実験結果をもとに煙道内の未燃ガスの濃度を計算によって推定してみた結果、爆発下限界付近あるい

はこれを超える値となることがわかった。これより適当な着火源があれば爆発は起りうるであろうと思われる。

4) 以上のことから爆発事故原因を考えると、消火後2回以上不着火の燃料噴射がなされ、次の燃料噴射によってバーナーに点火され、生じた火炎がボイラーから煙道内の爆発限界内の未燃ガスに伝播し、爆発に至った公算が大きいと推定される。又、もし煙道が模型Bと同様な断面のものであれば同様な燃料の噴霧、不着火があったとしても爆発事故とはならなかったのであろうと思われる。結局この事故はいくつかの爆発するに適した条件が整ったために生じたものであろうと思われる。

10. 参 考 文 献

- 1) 火災 Vol.27, No.2 (107), p.1977
- 2) 江守一郎, D. J. シューリング, 模型実験の理論と応用 技報堂, 1975
- 3) 機械工学便覧 日本機械学会, p.12~19
- 4) 渡辺彰夫他 火災研究における煙濃度の測定, 安全工学 Vol.10, No.3, p.164, 1971

11. 付 記

本実験において ON-LINE によるデータ収録及び演算処理は労働省産業安全研究所電子計算機システム FACOM-230/35 によった。

(昭52.8.10受理)

産業安全研究所技術資料 RIIS-TN-77-2

昭和 52 年 10 月 1 日 発行

発行所 労働省産業安全研究所
東京都港区芝5丁目35番1号
電話 (03) 453-8441 (代)

印刷所 新日本印刷株式会社

郵便番号 108