

煙およびガスの流動拡散性状に関する研究

長谷川 浩 治*
 小島 正 臣*
 松橋 哲*

はじめに

大震災火災によって発生する燃焼生成ガスの拡散は熱気流や輻射熱と併せて避難する住民にどのように影響するか、従来から種々の問題を取り上げ、その解決に多くの検討を加えてきたところである。しかし熱気流の拡散等については流体力学の乱流理論を、この種研究に導入し、数多くの実験が行なわれ、熱源風下の温度分布式等が確立されているが、ここに提起する煙、ガスの拡散等については未だ未解拓の分野が多く、何んら提供しうる資料がないのが現状である。

本研究はこれらの問題を解決するため火災によって発生する煙、ガスの流動拡散性状を把握する第一段階として、昨年より煙、ガスを搬送する熱気流の拡散性状を風洞模型実験装置を使用して実施したが、実大火災を推定するには無理があり期待する成果は得られなかった。そこで本年度は実大野外実験を計画中であったが、折しも当研究所で、科学技術庁の委託を受けて市街地自動車火災実験を実施することになったので、この実験の風下で、燃焼生成ガスの濃度測定をすることとした。以下その内容を報告する。

火災によって発生する燃焼生成ガスの拡散実験 (於、市街地自動車火災実験, S48.12)

1. 実験概要

(1) 実験日時および場所

昭和48年12月12日、江東区新木場地先14号埋立地その3

(2) 火災規模

本実験において使用した模擬市街地火災(火災規模)は市街地自動車火災実験のときに形成した市街地モデルであり、その規模は490.68m²(28.2m×17.4m)の敷地面積に木造プレハブ2階建住宅、外壁トタン板張り(建築面積20m², 延べ面積40m²)5棟と市街地代替用集積木材(木材:36,000kg, 繊維屑:300kg)を設定させたものである。建物内には収容物として50kg/

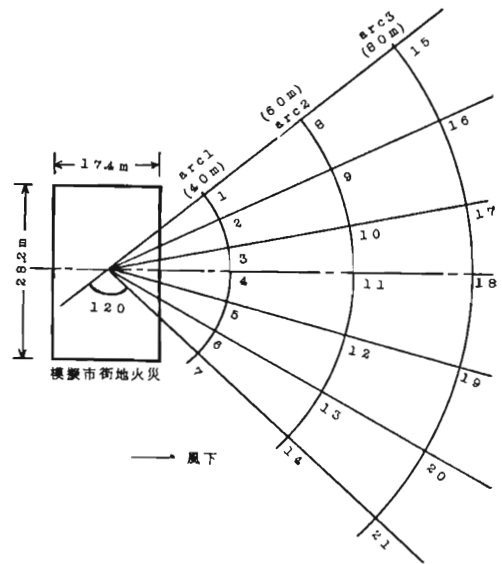
m²(1棟当り2,000kg)の木材と700kgのビニール屑を収納した。

(3) 燃焼生成ガスの濃度測定

市街地火災(前2参照)によって発生するガスを風下円弧線上の各位置(図1参照)でサンプリングし、濃度分布を規定する最とも重要な要因である軸濃度(風下)と風横方向の拡散幅(σ_y), 垂直方向の拡散幅(σ_z)の風下距離に伴う変化を明らかにするため下記により一酸化炭素, 二酸化炭素の濃度を測定した。

第1図

燃焼生成ガス(CO, CO₂)捕集網(21点)



〔測定方法〕

燃焼生成ガスを風下円弧線上の位置により採集し、後に赤外線ガス分析計によりガス濃度(CO, CO₂)を分析した。一赤外線ガス分析計, 三鷹工業製6643型—

(4) 温度の測定

火災温度を測定し、燃焼条件や発生するガス浮力効果等から上昇するガスの有効高さを推定した。

(5) 風向風速の測定

* 第一研究室

約5 m 高度の位置で、風向風速を連続自記記録した。

2. 実験結果

(1) 各捕集アークにおける二酸化炭素濃度

表1 二酸化炭素濃度測定値 (単位 ppm)

arc	測点	測定時間				
		点火5分後	10分後	15分後	20分後	30分後
arc 1	1	440	380	410	380	410
	2	410	380	380	1,200	380
	3	380	410	410	380	380
	4	600	380	600	650	600
	5	380	380	410	350	380
	6	750	500	750	440	440
	7	410	440	480	440	440
arc 2	8	410	410	440	480	520
	9	480	440	440	410	380
	10	380	380	350	330	350
	11	600	550	520	550	550
	12	600	410	410	440	410
	13	480	380	440	380	350
	14	440	380	410	410	410
arc 3	15	500	520	520	480	580
	16	700	480	750	650	550
	17	—	440	440	410	410
	18	380	410	440	500	380
	19	550	500	550	410	550
	20	500	500	380	380	500
	21	850	410	410	350	410

(2) 各捕集アークにおける一酸化炭素濃度

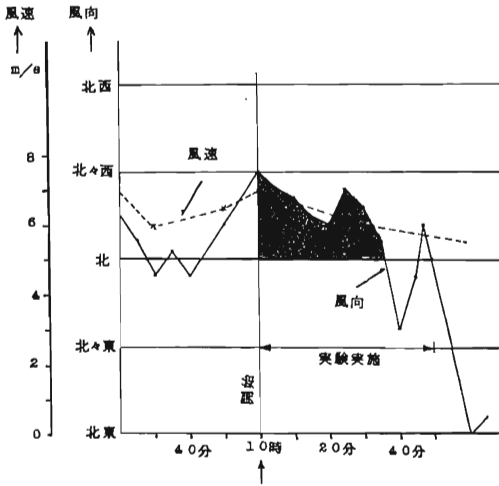
表2 一酸化炭素濃度測定値 (単位 ppm)

arc	測点	測定時間				
		点火5分後	10分後	15分後	20分後	30分後
arc 1	1	2	2	2	2	2
	2	2	2	2	2	2
	3	2	2	2	2	2
	4	2	2	2	2	2
	5	2	2	2	2	2
	6	2	2	2	2	2
	7	2	2	2	2	2
arc 2	8	3	3	3	3	3
	9	3	2	3	2	3
	10	2	2	2	2	2
	11	2	2	2	2	2
	12	3	3	2	3	3
	13	2	2	2	2	2
	14	2	2	2	2	2

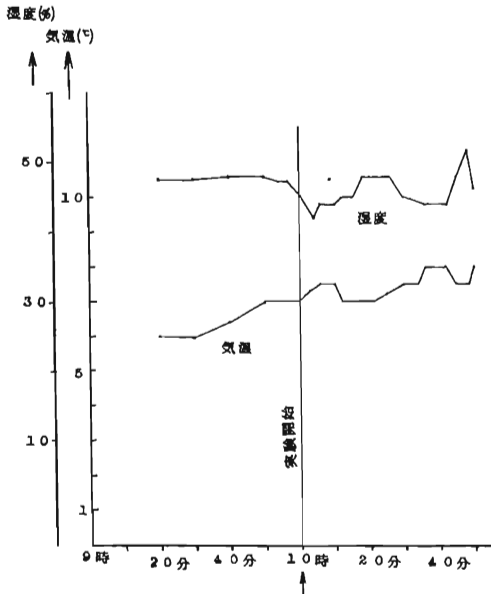
	15	2	2	2	2	2
	16	2	2	2	2	2
	17	—	2	2	2	2
arc 3	18	2	2	2	2	2
	19	2	2	2	3	2
	20	2	3	2	3	2
	21	3	2	2	2	2

(3) 気象観測結果

第2-1図



第2-2図



3. 実験結果の解析

解析は濃度分布を規定する最つとも重要な要因である風横方向および垂直方向の拡散幅 (σ_y, σ_z) の風下距離にともなう変化を明らかにすることを中心に行なった。 σ_z の解析は以下に記す推定値である火災の発生ガス上昇速度および発生ガス量をもとにし、拡散式より求めたものである。従って解析より得た本実験の風下ガス濃度分布式による解は実測値と相当な誤差が生ずることとなる。しかし拡散機構の解析としては正論と思うのでここに記した。

(1) 拡散方程式

乱流拡散の数学的取扱いで出発点となる微分方程式は固体中の熱伝導の古典的な方程式を一般化したもので、点 x, y, z における拡散物質の濃度を c とすれば次のように表わすことができる。

$$\begin{aligned} & \frac{dc}{dt} + U \frac{dc}{dx} + V \frac{dc}{dy} + W \frac{dc}{dz} \\ &= \frac{d}{dx} \left(K_x \frac{dc}{dx} \right) + \frac{d}{dy} \left(K_y \frac{dc}{dy} \right) \\ &+ \frac{d}{dz} \left(K_z \frac{dc}{dz} \right) \dots\dots\dots(1) \end{aligned}$$

固定点から連続的に放出する源については $dc/dt=0$ $V=W=0$ とおくことができ、また

$$\begin{aligned} U \frac{dc}{dx} &\gg -\frac{d}{dx} \left(K_y \frac{dc}{dx} \right) \text{ であるから(1)式は} \\ U \frac{dc}{dx} &= \frac{d}{dy} \left(K_y \frac{dc}{dy} \right) + \frac{d}{dz} \left(K_z \frac{dc}{dz} \right) \dots\dots(2) \end{aligned}$$

となる。これはよく知られているいわゆる放物型拡散方程式であり、濃度分布を求めるための多くの実用公式は、この式の解として求められる。これらのうち最つとも良く知られ、かつ使われているのは次の式である。

$$\begin{aligned} C(x \cdot y \cdot z \cdot H) &= \frac{Q}{2\pi\sigma_y\sigma_zU} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{y}{\sigma_y} \right)^2 \right] \\ &\left\{ \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{Z-H}{\sigma_z} \right)^2 \right] + \exp \right. \\ &\left. \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{Z+H}{\sigma_z} \right)^2 \right] \right\} \dots\dots\dots(3) \end{aligned}$$

ここで $C(x, y, z, H)$, 放出源直下を原点とする直交

座標軸系における点 (x, y, z) における濃度、 H ：放出源の高さ、 σ_y, σ_z ：拡散物質濃度の水平および鉛直分布の標準偏差である。

この式を導くに当っては(1)拡散物質の濃度は水平および鉛直方向へ正規分布しており、その標準偏差は σ_y, σ_z で表わされる。(2)放出強度 Q は一定である。(3)地表面での吸着あるいは反応はなく完全に反射されるという仮定がなされている。

拡散実験において測定されることの多い地上濃度 $C(x, y, O, H)$ は(3)式において $Z = 0$ とおくことによって得られる。すなわち、

$$C(x, y, O, H) = \frac{Q}{\pi\sigma_y\sigma_zU} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{y}{\sigma_y}\right)^2\right] \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{H}{\sigma_z}\right)^2\right] \dots\dots\dots(4)$$

全く同様にして軸上濃度 $C_0 = C(x, O, O, H)$ は次のように表わすことができる。

$$C_0 = C(x, O, O, H) = \frac{Q}{\pi\sigma_y\sigma_zU} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{H}{\sigma_z}\right)^2\right] \dots\dots\dots(5)$$

また煙の有効上昇のない地上源 ($H = 0$) からの濃度は一層簡略し、

$$C(x, O, O, O) = \frac{Q}{\pi\sigma_y\sigma_zU} \dots\dots\dots(6)$$

となる。従って火災から発生する燃焼生成ガスの風下地上濃度は(4)(5)式によって求めることができる。

(2) 火災による上昇熱気流速度 (= ガス発生速度)

この種の理論式等は未だ直接実用に供せられる部分は少ないが、横井の上昇熱気流に関する従来の研究成果によれば、熱源が面源である場合 $Z/r_0 < 2.5$ (Z ：熱源からの高さ、 r_0 ：熱源の円相当半径) の領域での熱気流上昇速度は次のように表わすことができるとされている。

$$W(\text{無次元風速}) = \frac{W r_0^{1/3}}{\left(\frac{gQ}{\rho_0 C_0 T_0}\right)^{1/3}} = \frac{1.696}{\sqrt[3]{n}}$$

$$W = 1.696 \left(\frac{gQ}{\rho_0 C_0 T_0}\right)^{1/3} r_0^{-1/3} \dots\dots\dots(7)$$

- ここで W ：中心軸の上昇速度 (cm/sec)
- n ：面熱源の短形比
- T_0 ：上昇熱気外の空気の絶対温度 (°K)
- Q ：熱源から単位時間に与えられる熱量 (cal/sec)
- C_0, ρ_0 ：熱気流の定圧比熱および密度
- g ：重力の加速度

ここでは本実験に使用した模擬市街地火災からの上昇熱気流速度を(7)式を用いて求めるのが筋論であると

うが、それよりの発生熱量の算出は不可能であるので、建面積25 m^2 (軒高4 m) の木造家屋が無風時に火災になった場合を想定し、熱気流上昇速度を求め、その解を模擬市街地火災からの熱気流上昇速度の推定値とすることとした。

一般に木造家屋の発生熱量は床1 m^2 当りの可燃物量等によって異なるが、住宅では可燃物量は165 kg/m^2 程度であり、火災1時間で、その80%が焼失するものとして、その間の発熱量は木材の発熱量を3,500 $Kcal/kg$ とすれば約4.7 $\times 10^5 Kcal/m^2$ となる。従って本計算の対象とする建物も、この程度の可燃物量を持つものとして床面積は25 m^2 であるから、建物全体からの1時間の発熱量は11.75 $\times 10^6 Kcal$ となる。今火災最盛時間を木造家屋火災の屋内温度曲線の6分~18分までの12分間とし、その間に発生する熱量は同曲線から推定すると1時間の発熱量の約1/3位になるから最盛時の毎秒の発熱量は5.44 $\times 10^3 Kcal/sec$ となる。次にこの中で輻射熱として失われるものを計算する。この建物の土台から棟までの総立面積は80 m^2 であり、火災最盛時の火災面積をこの立面積と等しいとし、またそのときの火災輻射能を114 $\times 10^3 Kcal/m^2 h$ とすると輻射で火災から放出する熱量は約2.53 $\times 10^3 Kcal/sec$ となる。従って両者の差引き (5.44 $\times 10^3 Kcal/sec - 2.53 \times 10^3 Kcal/sec$) の2.91 $\times 10^3 Kcal/sec$ が上昇気流に与えられる熱量ということになる。

したがって上昇熱気流速度は、この上昇気流に与えられる熱量 (2.91 $\times 10^3 Kcal/sec$) を推定値として(7)式を用いて計算することができ下記のようになる。

$$W = 1.696 \left(\frac{gQ}{\rho_0 C_0 T_0}\right)^{1/3} r_0^{-1/3} \doteq 11.5 \text{ m/sec}$$

- ただし Q ：2.91 $\times 10^3 Kcal/sec$
- T_0 ：293°k
- C_0 ：0.24cal/deg (773°k)
- ρ_0 ：0.456 kg/m^3 (")

以上により本実験に使用した模擬市街地火災の熱気流速度を11.5 m/sec に仮定することとする。

(3) 火災 (模擬市街地火災) によって発生する燃焼生成ガス量

木造家屋の構造材料の重量は130 kg/m^2 とされ、また可燃物の多い事務室を例にとると、その収容物は木質材31 kg/m^2 、塩ビ類3.0 kg/m^2 、塩ビ以外のプラスチックや布地2.1 kg/m^2 とされている。そこでこれらを総合してみると木造家屋の燃焼物量は次のように仮定することができる。

家屋構造材重量 (木質材)	130 kg/m^2
収容物	
木質材	31 kg/m^2

塩ビ類 3kg/m²
 塩ビ以外のプラスチックや布地 2.1kg/m²
 上記燃焼物量を空気率1で完全燃焼させ燃焼ガス体

積(理論計算値)を求め、そして実験値(充分な空気中での自由燃焼)である有害ガス体積を併せ示すと表のようになる。

表3 床1m²当りの燃焼ガス体積およびその中の有害ガス体積

可燃物	種類	木質材		塩ビ		塩ビ以外のプラスチック		計
	量 kg/m ²	161.0		3.0		2.1		
		ℓ/kg	m ³	ℓ/kg	m ³	ℓ/kg	m ³	m ³
有害ガス	CO	216	348	183	0.5	416	0.9	36.2
	CO ₂	826	133	220	0.7	557	1.2	134.9
	HCl	0	0	253	0.8	0	0	0.8
	NH ₃	0	0	0	0	51	0.053	0.053
	HCN	0	0	0	0	25	0.053	0.053
燃焼ガス体積		4,700	756.7	4,900	14.7	7,500	15.8	787.2

表3ならびに前(2)の火災による上昇熱気流速度(ガス発生速度)をもとに今回のガス発生源たる模擬市街地火災の15°Cにおける排ガス量(Q₀)を求めると、

$$Q_0 = V \times A \times \frac{288}{T} [\text{at } 15^\circ\text{C}, \text{ m}^3/\text{sec}] \dots \dots \dots (8)$$

(8)式より 2,102m³/sec ということになる。

ここでV: 熱気流の上昇速度 11.5m/sec

A: 模擬市街地火災面積 490.68m²

また炭酸ガス(CO₂)量を求めると、燃焼ガス総体積中に占める炭酸ガスの割合は表3により17%をなす。従って模擬市街地火災により発生する炭酸ガス量(Q)は次のようにして仮定値が得られる。

$$Q (\text{炭酸ガス量}) = Q_0 (\text{ガス発生総量}) \times 0.17$$

$$(\text{ガス発生総量中に占める炭酸ガスの割合})$$

$$= 357 \text{ m}^3/\text{sec} (701, 250 \text{ g/sec})$$

同様にして一酸化炭素(CO)量も求めることができる。

(4) 火災から発生するガスの上昇高さ

煙、ガスが火災から排出される場合には必ず流速を伴っており、煙、ガスは高いところまで上昇する。また煙、ガスは大気温度より高いために、その温度差によっても上昇する。

拡散式に見られる発生源の高さは、すべて流速および温度勾配による上昇高さを加えたガス発生源の高さを意味している。したがって拡散式を計算するには、まずガス発生高さを求めなければならない。この理論計算は次のように考えられる。

$$H_e = H_m + H_t \dots \dots \dots (9)$$

ここで H_e: 有効ガス発生高さ(m)

H_m: 排出速度による上昇高さ(m)

H_t: 温度勾配による上昇高さ(m)

発生源の高さを計算する式としては Bosanquet の式, Sutton の式, Holland の式などがあるが、実験値と比較的よく合う Bosanquet の式が最っともよく用いられている。

Bosaquet によれば H_m, H_t は次式で示される。

$$H_m = \frac{4.77}{1 + 0.43 \frac{U}{V}} \cdot \frac{\sqrt{QV}}{U} \dots \dots \dots (10)$$

$$H_t = 6.39g \frac{Q(T - T_1)}{U^3 T_1} (\log e J^2 + \frac{2}{J} - 2) \dots \dots (11)$$

ただし

$$J = \frac{U^3}{\sqrt{QV}} \left(0.43 \sqrt{\frac{T_1}{gG}} - 0.28 \frac{V}{g} \frac{T_1}{T - T_1} \right) + 1 \dots \dots (12)$$

ここでV: 排ガスの排出速度(m/sec)

Q: 温度 T₁ における排ガス量(m³/sec)

T: 排ガス温度(°k)

U: 風速(m/sec)

T₁: 排ガス密度が大気密度に等しくなる温度(°k)

G: 大気温度勾配(°C/m)

g: 重力の加速度(m/sec²)

この Bosanquet の式(10~12式)を利用する場合、定数項の取り方が問題になるが、次のように定めて本実験の模擬市街地火災から発生する燃焼生成ガス上昇高さを求めてみる。

$T_1: 288^\circ\text{k}$ (15°C), $U: 6.5\text{m/sec}$ (実測値), $G: 0.0033^\circ\text{C/m}$ (100mについては 33°C), $g: 9.8\text{m/sec}^2$, $T: 773^\circ\text{k}$, $Q: 2102\text{m}^3/\text{sec}$ [前(3)理論計算による燃焼生成ガス発生量], $V: 11.5\text{m/sec}$ [前(2)理論計算による上昇熱気流速度 (排出ガス速度)]

(9)(10)(11)式により

$$He = Hm + Ht = 91.8\text{m} + 5317.3\text{m} = 5409\text{m}$$

これが本実験におけるガス上昇高さとして仮定することができる。

(5) σ_y, σ_x の算出

任意の地点における拡散物質を与える式(3)(4)(5)(6)によって濃度を予測する場合には、その中に含まれている σ_y と σ_x との関数形を決定しなければならない。拡散に関する実験の主要目的には、これらの関数形決定のための資料を得ることにあるわけである。

本実験においては濃度の鉛直分布を与える資料は得なかつたので、測定資料をもとに算出した σ_y より σ_x を算出してみることにする。

σ_y を求める方法としては種々あるが $C\sigma_y = 0.607C_0$ と仮定し、各捕集アーク上の濃度測定値の平滑曲線上で $0.607C_0$ の濃度値に対応する y 方向の距離を σ_y とみなす方法をとった。

[算出方法]

ア、図1、発生源中心より風下各円弧線の捕集地点(21点)までの distance および angle を求める。

(表4、省略)

イ、表1のガス濃度(対数)と表3の angle の関係グラフを作成(図3~図17、省略)

ウ、図3~図17のグラフより61%部分の angle を読みとる。

何故61%部分を読みとるかは拡散式より次のように説明できる。

拡散式より濃度 $C(x, y, O, H)$ は

$$C(x, y, O, H) = \frac{Q}{\pi\sigma_y\sigma_x U} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{y-y_0}{\sigma_y}\right)^2\right] \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{H}{\sigma_x}\right)^2\right]$$

で表わされる。

中心濃度 ($\sigma_y = 0$) を $C(x, O, O, H)$ で示すと

$$C(x, O, O, H) = \frac{Q}{\pi\sigma_x U} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{H}{\sigma_x}\right)^2\right]$$

である。

$$\therefore \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{y-y_0}{\sigma_y}\right)^2\right] = 0$$

ここで $\frac{C(x, y, O, H)}{C(x, O, O, H)}$ を考えると

$$\frac{C(x, y, O, H)}{C(x, O, O, H)} = \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{y-y_0}{\sigma_y}\right)^2\right] = \exp\left(-\frac{1}{2}\right) = 0.6086 = 61\%$$

$$\therefore y_{61\%} - y_0 = \sigma_y \quad \frac{y_{61\%} - y_0}{\sigma_y} = 1$$

$$\therefore \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{y-y_0}{\sigma_y}\right)^2\right] = -\frac{1}{2}$$

以上により拡散式の σ_y は61%分を示していることが理解できよう。

エ、 σ_y を求める。(表5)

表5 σ_y , 計算結果

arc	測定時分	angle	distance	σ_y
1	5分後	30	40	10.5
	10分 "	58	40	20.2
	15分 "	35	40	12.2
	20分 "	20	40	7.0
	30分 "	38	40	13.3
2	5分 "	56	60	29.3
	10分 "	41	60	21.5
	15分 "	68	60	35.6
	20分 "	38	60	19.9
	30分 "	43	60	22.5
3	5分 "	42	80	29.3
	10分 "	35	80	24.4
	15分 "	41	80	28.6
	20分 "	38	80	26.5
	30分 "	51	80	35.6

$$\text{distance} \times \frac{\pi}{360} \times \theta = \sigma_y$$

ここで θ : 図3~図17の61%部分の angle

オ、distance と σ_y との関係グラフを作成(両対数グラフ、図18)

第18図

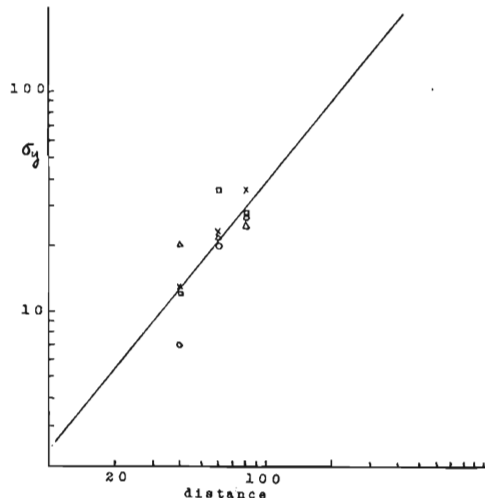
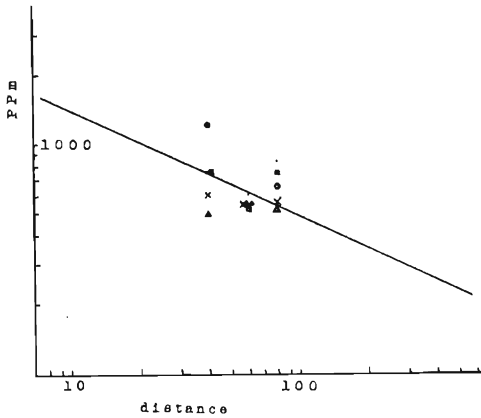


表6 σ_x 計算結果

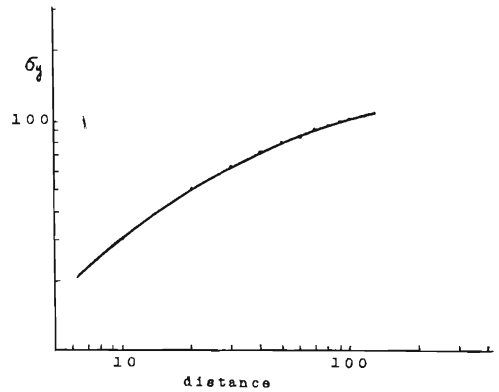
distance	ppm	Co	σ_y	$\pi\sigma_y C_0 U H / Q = \exp\left(-\frac{P}{2}\right)^2$	P	$\sigma_x = \frac{H}{P}$
10	1,400	2.75×10^{-6}	2.4	$1,039 \times 10^{-6}$	5.25	1,030
20	1,000	1.96 "	5.6	1,728 "	5.15	1,050
30	850	1.67 "	9.2	2,419 "	5.09	1,063
40	750	1.47 "	13.0	3,008 "	5.04	1,073
50	660	1.30 "	17.0	3,479 "	5.01	1,080
60	620	1.22 "	21.0	4,033 "	4.99	1,084
70	580	1.14 "	26.0	4,666 "	4.96	1,091
80	540	1.06 "	30.0	5,006 "	4.94	1,095
90	510	1.00 "	35.0	5,510 "	4.92	1,099
100	490	0.96 "	40.0	6,045 "	4.9	1,106

(H : 5409m, Q : 701,250g/sec, \bar{U} : 6.5m, π : 3.14)

第19図



第20図



カ、表1の各 arc 上の最高濃度 N を抜き出して $\log N$ と $\log \text{distance}$ の関係グラフを作成 (両対数グラフ, 図19)

キ、図19より風下距離10m, 20m, 30m, 40m, 50m, 60m, 70m, 80m, 90m, 100m, の各地点の N を読む (表6の PPM, C_0)

ク、 $\pi \cdot \sigma_y \cdot C_0 \cdot \bar{U} \cdot H / Q$ を計算し, σ_x を求める。(表6)

ここで H, Q, \bar{U} は前に述べたとおり H : 5409m, Q : 701,250 g/sec, \bar{U} : 6.5m/sec である。

[算出方法]

拡散方程式の項, 式(5)軸上濃度分布式を変形して求めることができる。

$$C_0(x, 0, 0, H) = \frac{Q}{\pi \sigma_y \sigma_x U} \exp\left[-\frac{1}{2} \left(\frac{H}{\sigma_x}\right)^2\right]$$

$$\pi \cdot \sigma_y \cdot C_0 \cdot U \cdot H / Q = \exp\left(-\frac{(H/\sigma_x)^2}{2}\right)$$

(H/σ_x)² = P とおくと

$$\pi \cdot \sigma_y \cdot C_0 \cdot U \cdot H / Q = \exp\left(-\frac{P^2}{2}\right)$$

これよりを求めて σ_x を導くことができる。

σ_x と distance の関係グラフを作成 (両対数グラフ, 図20)

(6) 面積をもった発生源からの σ_y, σ_x

前(5)の解析データ σ_y, σ_x は模擬市街地火災から放出する二酸化炭素ガスをすべて合算し, 放出源を点とした場合の拡散パラメータであるので, これを面積をもった発生源のものに換算しなければならない。

この概算は次のようにして求められ, その結果は表7に示す。

表7 風下距離に対する風横方向および垂直方向のガス拡散幅 (σ_y, σ_z)

$x(m)$	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
$\sigma_y(m)$	8.4	12	16	20	25	29	34	38	44	48
$\sigma_z(m)$	1,081	1,082	1,086	1,091	1,095	1,099	1,104	1,106	1,111	1,113

表8 濃度予測実験式による風下軸上濃度 (二酸化炭素)

$x(m)$	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
計算値 (ppm)	7,177	5,288	4,152	3,820	3,220	3,045	2,861	2,679	2,523	2,420
実測値 (ppm)	1,400	1,000	850	750	660	620	580	540	510	490

ア、面積をもった発生源を正規分布を持った横方向の線源として扱い、発生源に対する初期の標準偏差 (風横方向の標準偏差) σ_{y0} を $\sigma_{y0} \doteq S/4.3$ (ここで S は正方形発生源の長さ) と近似し、図18より σ_{y0} に対する実質的な距離 x_y を求める。

イ、面積発生源の中心から求める位置までの距離 x と実質的な距離 x_y の合計距離 ($x+x_y$) に対する σ_y を図18より求める。これが補正された σ_y である。

ウ、 σ_x は前イによって求められた σ_y を基にして前(5) σ_y, σ_x 算出の項ク、ケにより求める。

(7) 濃度分布式 (実験式)

前(1)~(6)に示す理論値および解析値を(4)(5)式に代入し、地上濃度分布式を整備すると次のようになる。

$$C(x, y, O, H) = \frac{Q}{\pi\sigma_y\sigma_x U} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{y}{\sigma_y}\right)^2\right] \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{H}{\sigma_x}\right)^2\right]$$

$$= 34,358 \frac{1}{\sigma_y\sigma_x} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{y}{\sigma_y}\right)^2\right] \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{5409}{\sigma_x}\right)^2\right] \dots\dots\dots(13)$$

$$C(x, O, O, H) = \frac{Q}{\pi\sigma_y\sigma_x U} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{H}{\sigma_x}\right)^2\right]$$

$$= 34,358 \frac{1}{\sigma_y\sigma_x} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{5409}{\sigma_x}\right)^2\right] \dots\dots\dots(14)$$

(13)(14)式を使って地上濃度を推定する場合には前(6)に従って補正した σ_y, σ_x (表7) を代入すれば良い。計算した地上面軸上濃度を表に示す。

[模擬市街地火災の初期の水平標準偏差 σ_{y0} は模擬市街地火災の形態が長方形(28.2m×17.4m=490.68m²)であるが、490.68m²の面積を有する正方形発生源とみなし $\sigma_{y0} \doteq S/4.3$ より、5mとして計算した。]

表7を見ると地上濃度分布式 (解析より得た) による計算値は風下距離が変化しても常に5倍量であることから(13)(14)は次のように補正することができる。

$$C(x, y, O, H) = 6,871 \frac{1}{\sigma_y\sigma_x} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{y}{\sigma_y}\right)^2\right] \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{5409}{\sigma_x}\right)^2\right] \dots\dots\dots(15)$$

$$C(x, O, O, H) = 6,871 \frac{1}{\sigma_y\sigma_x} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{5409}{\sigma_x}\right)^2\right] \dots\dots\dots(16)$$

この(15)(16)式が本実験より得た風下地上濃度を予測する炭酸ガス濃度分布の実験式である。(σ_y, σ_x は表7参照)

4. 実験結果の考察

(1) 火災によって発生する燃焼生成ガスの拡散プロフィール

火災から発生した煙、ガスは大気中に放出されると風向、風速、大気安定度などによって影響を受け、地上に到達する。このような大気の乱流下における拡散現象は多くの人々によって理論的に研究されている。

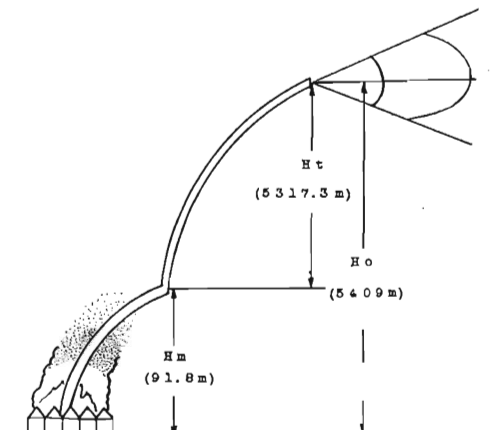
ここでは Sutton (1947) によって提示された濃度予測式によって拡散プロフィールをえがいてみることにする。

火災から排出された煙、ガスは必ず流速を伴っており [前3(2)参照]、煙、ガスは火災建物実高さより相当高いところまで上昇する。また煙、ガスは大気温度より高いために、その温度差によっても上昇する (前3, (4)参照)。したがって火災から発生する煙、ガスは流速および温度勾配による上昇高さまで拡散希釈されながら到達し、そして煙ガスのひろがり水平および垂直の両面においてガウス分布をなし水平、垂直方向に煙、ガスの標準偏差 σ_y, σ_z をそれぞれもっており、そのプロフィールは図21のようになるものと考えられる。

Ho : 火災発生ガス上昇高さ (Hm+Hi)

Hm : 排出速度による上昇高さ

第21図



H_t : 温度勾配による上昇高さ

(2) ガス濃度について

測定結果は表1~3のとおりであり、かなりのバラツキが認められる。このことの最大の原因は測定技法にもよるが、現場の風下円弧線上の各点で、焼焼生成ガスをサンプリングしたものをバッグに収め、後に分析(三鷹工業製KK, 赤外線ガス分析計)する手法をとったために水分等の影響を受けて起ったものと思われる。

図19は表4による風下各円弧線上(arc1:40m, arc2:60m, arc3:80m), の炭酸ガス最大濃度を模擬市街地中心からの風下距離(distance)に対しプロットしたもので、その濃度は採取時間によって相当変化するが、風下距離によって比例的に増減するものと見なせば540~750PPmの範囲である。また風下距離10mの位置での炭酸ガス最大濃度は1,400PPm程度であり、公衆衛生上の許容濃度1,500PPm(0.15%)に達していない。このことは火災による燃焼生成ガスの危険性を論ずる場合、各種ガス等の相乗効果を考慮せずして述べるのは危険と思われるが、炭酸ガスだけに限定するならば火災によって発生するガスは大半が上昇拡散し、地上面周囲に居る人間の生命に影響を及ぼすことは考えられないものと思われる。

(3) 火災発生ガス(大気拡散)の危険性について

前3, 解析の項で述べたとおり、火災による上昇熱気流速度11.5m/sec, そして発生した煙, ガスは排出速度および温度勾配により上昇し, 540PPmの高度のところまでも到達するものと推定できるなら, それが舞い降りて地上面に着手するまでには相当希釈され, 実験結果および解析値に見られる炭酸ガス濃度に代表されるように微濃度となり人命に危険を及ぼすことは考えられない。しかし, 強風時には危険である。何故

かという煙, ガスの上昇速度より, 風速が大きくなるため, 煙, ガスは風によって押しおされ高濃度のものが地上に到達するからである。このことを浜田の理論式を用い考察してみることとする。

彼の研究は風による炎の流れ角に関する研究であるが, 煙, ガスが炎(熱気流)によって搬送されるものと仮定できるなら風速 V_w (m/sec) と煙, ガス流の水平傾向 α 度の関係は次式となる。

$$\tan \alpha = \frac{g(1-P)}{K} \frac{D}{V_w^2} = 5.15(1-P) \frac{D}{V_w^2} \dots\dots\dots(17)$$

ここで D : 火災視模の風方向の長さ(m)

P : 気温と炎温度で定める数値

(大気温度/炎絶対温度)

g : 重力の加速度(m/sec²)

(17)式に本実験結果を代入すると模擬市街地火災から発生する煙, ガスの流れ角 ($\tan \alpha$) は490となり観測値(平均値39°)となる。

[例]

$$\tan \alpha = 5.15(1-P) \frac{D}{V_w^2} = 5.15(1-0.247) \frac{17.4}{6.5^2} = 1.597$$

$$\therefore \alpha \doteq 49^\circ$$

P : 0.247 (炎温度900°C, 気温17°C)

V_w : 6.5m/sec (平均値)

D : 17.4m

前例に従い, 火災によって発生するガスが地上面に居る人間に最っとも危険である流れ角 ($\tan \alpha = 0$) を概算すると風速200m/sec以上の条件下のときである。したがって火災によって発生したガスが上昇せずして地表面を拡散することは先ずもってないと言明できよう。

あ と が き

市街地自動車火災実験の風下で測定した炭酸ガスの人命危険について論じた。この問題については火災による煙, ガスの上昇速度, ガス発生量, 気象条件等, 解明できないものが余りにも多く, 本実験の結果についても言明できるものはないが, ただ火災によって発生する煙, ガスは排出速度および温度勾配によりすべてが上昇することは確かであるので, 仮りに地上面に舞い降りたととしても, それは相当, 拡散希釈された後であり, 人命に影響を及ぼすようなことはなからうかと思われる。このことは本実験の結果においても小規模(木造プレハブ2階建5棟, 廃材25t, 自動車25台, 風速6.5m/sec)な火災ではあるけれど風下

地上面のガス濃度は許容値以下であったことから肯定できるものと思われる。

震災時の合流火災から発生する火災風を受けたおよび火面に囲まれた場合等についての燃焼生成ガスの危険性は解明することができなかった。

参 考 文 献

1. 科学技術庁研究調整局，昭和46年3月，大気汚染管の拡散に関する総合研究報告書。
2. 浜田稔，ビル内の可燃物と火災危険性，日本損害保険協会（社団法人）発行。
3. 浜田稔，風による点の流れに関する研究
4. 横井鎮男，熱上昇気流の火災延焼と防止に関する研究報告書，別刷（48年12月，火災時の上昇気流）