

## 煙, ガス流動性状に関する研究について

## Study on the Movement of Smoke and Gas

高 本 清 紀\*  
鳥 井 四 郎\*\*  
佐々木 孝 一\*  
千 葉 博\*

A study was conducted on the possibility of using sulfur hexa-fluoride ( $\text{SF}_6$ ) gas as a tracer to investigate the movement of smoke and natural air in buildings.

The experiment was carried out by releasing pure  $\text{SF}_6$  gas and a gas mixture of He and  $\text{SF}_6$  in the stairwells and buildings of both model and real size.

## 1. はじめに

都市構造の変化に伴い、最近の建物は増々高層化、深層化の傾向を示している。このため、火災発生時には煙による避難行動上の障害となりやすく、建物利用者の人命危険が増大する傾向にあるといわれている。

火災時の人命安全対策を図るためには、建物内部の煙流動状況の把握は不可欠であり、すでに小規模模型の実験、実大建物の火災実験、火災事例の分析研究などが実施されている。

しかしながら、市井に林立する建物は各々様相を異にしているため、模型実験や一部の実大火災実験結果を適用するだけでは十分な把握ができないのが現状である。特に室内汚染上の問題などがあり、現に使用状態にある建物で火災実験を行うことは現実に不可能である。

このため、従来のオイルパン、発煙筒の代替できる調査方法が必要とされる。

そこで、本研究はトレーサーガス(追跡用ガス)として公害調査部門で使用されている六フッ化硫黄( $\text{SF}_6$ )を中心にそれらと代替できるかどうかについての基礎実験を行ったので報告する。

## 2. トレーサーガス

## (1) 必要要件

ア. 自然界に存在しないガスであることが望

ましい。

イ. 分析が容易であること。

ウ. 流動性に富んでいること。

エ. 極微量でも検知可能であること。

(2) 六フッ化硫黄( $\text{SF}_6$ )の物性等

ア. 非常に安定した化学的に不活性な物質で、無色、無臭、無毒で分子量は約146で空気約5倍の密度を有し、合成された物質である。アメリカ、西ドイツの労働時間内での許容濃度は1,000ppmである。六フッ化硫黄雰囲気での直火の使用は有毒な酸性ガスの発生のおそれがある。

イ. ヘリウム(He)による希釈

六フッ化硫黄( $\text{SF}_6$ )をヘリウム(He)で希釈した場合、空気に対する比重量は表1の値となる。

ウ. 分析方法

各測定点で採集したガスは炎光光度検出器(F.P.D)付ガスクロマトグラフィーにより定量できる。

## 3. 火災初期時のガスとの相似性について

トレーサーガスを上昇させ煙と同様な挙動を示すかどうかを検討するため、トレーサーガスの比重を火災によって発生するガスの比重と同程度の値を持たせる目的で、次のような計算を行った。

## (1) 火災時の燃焼ガスの比重

火災時に発生するガスの比重を算出するにあたり、昭和37年3月に行われた「赤羽台公

表1 SF<sub>6</sub>のヘリウム希釈時の比重

希釈割合 (%)	空気に対する比重(空気=1)	密度 (g/l)
SF <sub>6</sub> 0	0.1381	0.1781
0.1	0.1430	0.1850
0.5	0.1627	0.2103
1.0	0.1872	0.2421
1.5	0.2117	0.2738
2.0	0.2362	0.3055
2.5	0.2608	0.3372
3.0	0.2853	0.3689
3.5	0.3098	0.4006
4.0	0.3343	0.4323
5.0	0.3834	0.4958
10.0	0.6286	0.8129
20.0	1.1191	1.4471
50.0	2.5905	3.3498
70.0	3.5714	4.6182
100.0	5.0429	6.5209

団住宅アパート火災実験」の測定結果を参考にした。実験結果によると、火災最盛期となった点火後25分時の燃焼ガスの組成は、次のようになっている。

N <sub>2</sub>	70.5%	(28)
O <sub>2</sub>	2.3%	(32)
CO	5.6%	(28)
CO <sub>2</sub>	15.4%	(44)
H <sub>2</sub>	3.7%	(2)
CH <sub>4</sub>	1.9%	(16)
エタン+エチレン	0.6%	(58)

注：( )内はそれぞれのガスの分子量を示す。

また25分時における火災室内温度は約900℃となっている。これらより燃焼ガスの平均分子量( $\bar{m}$ )を求めると次のようになる。

$$\bar{m} = \frac{70.5 \times 28 + 2.3 \times 32 + 5.6 \times 28 + 15.4 \times 44 + 3.7 \times 2 + 1.9 \times 16 + 0.6 \times 58}{100} = 29.5$$

高温の場合、理想気体の法則で比重 $\gamma$ は単純に次のように求められる。

$$\gamma = \frac{\bar{m} \times 273}{22.4 \times 10^3 \times (273 + T)}$$

ここで燃焼ガス温度を900℃とすれば

$$\gamma_{900} = \frac{29.5 \times 273}{22.4 \times 10^3 \times (273 + 900)} = 3.07 \times 10^{-4} \text{ (g/cm}^3\text{)}$$

## (2) 混合ガスの混合割合

HeとSF<sub>6</sub>の体積比によって比重を900℃の燃焼ガスと同じにするのであるから

$$\gamma' = \frac{\{146.07 \cdot x + 4.003(1-x)\} \times 273}{22.4 \times 10^3 \times (273 + 20)} = 3.07 \times 10^{-4}$$

$$142.1x = 3.38 \quad x = 0.02$$

以上から

SF<sub>6</sub>を2% Heを98%とすれば良い事がわかる。

## 4. 実験に使用するガスについて

実験では、3で計算した結果に基づいて次の3種類のガスを使用した。

A	SF <sub>6</sub> 100%の純ガス
B	He + SF <sub>6</sub> の混合ガスでSF <sub>6</sub> の濃度を2%にした。
C	He + SF <sub>6</sub> の混合ガスでSF <sub>6</sub> の濃度を0.105% (1050ppm)にした。

以下、使用ガスの表示については略称のA, B, Cを用いる。

## 5. 模型実験

### (1) 目的

六フッ化硫黄のトレーサーガスとしての性質を把握する。

### (2) 実験装置及び実験内容

ア. 実験装置及び分析

#### (ア) 実験装置

図1, 写真1, 2のとおり

#### (イ) 分析

炎光光度検出器(F.P.D)付ガスクロマトグラフィーで分析を行う。(写真3)

イ. 実験内容

表2のとおり

### (3) 模型内温度上昇

模型実験で使用した熱源は300W(電気ヒーター), 500W(写真用散光電球)である。こ

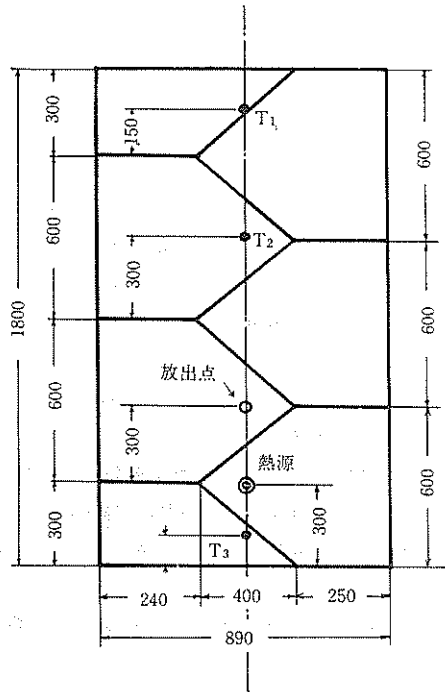


図1 階段室模型



の熱源の違いによる温度の上昇は、図2において熱源に最も近い位置(No.10)で開始から4分経過時に1.8℃500Wの方が高い温度であった。熱

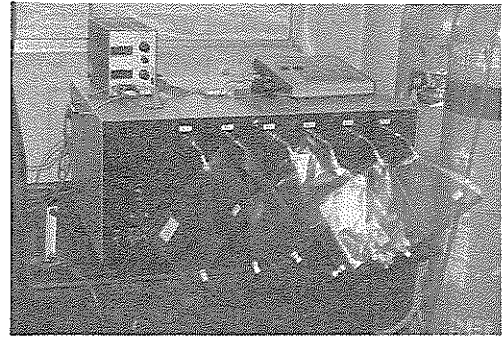


写真2 ガス採集装置

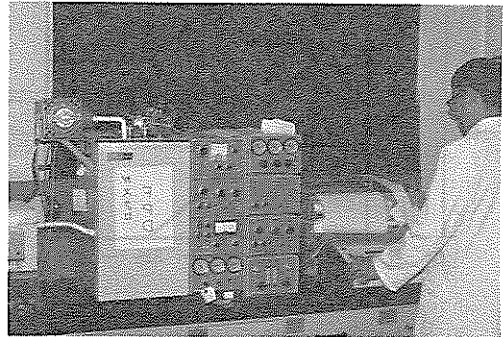


写真3 ガスクロマトグラフィー

表2 模型実験内容

ガス種別	加熱種別	加熱時間	流量	ガス放出時間
A ガス	—	—	1 ℓ/min	2 min
A ガス	加熱 500W	4 min	1	2
A ガス	加熱 300W	4	1	2
B ガス	—	—	1	2
B ガス	—	—	0.5	4
C ガス	—	—	1	2
C ガス	加熱 500W	4	1	2
C ガス	加熱 300W	4	1	2

源の上方の各点においてはほとんど温度差はないが、0.1~0.2℃程度500Wの方が高い。

#### (4) 実験結果

各実験における測定結果を図3、4、5に示す。

##### ア. Aガス(SF<sub>6</sub> 100%純ガスの場合)

非加熱で上部点T<sub>1</sub>の濃度は、下部点T<sub>3</sub>の $\frac{1}{100} \sim \frac{1}{200}$ の濃度であり、300W加熱の場合、開始から4分経過時においてT<sub>1</sub>点の

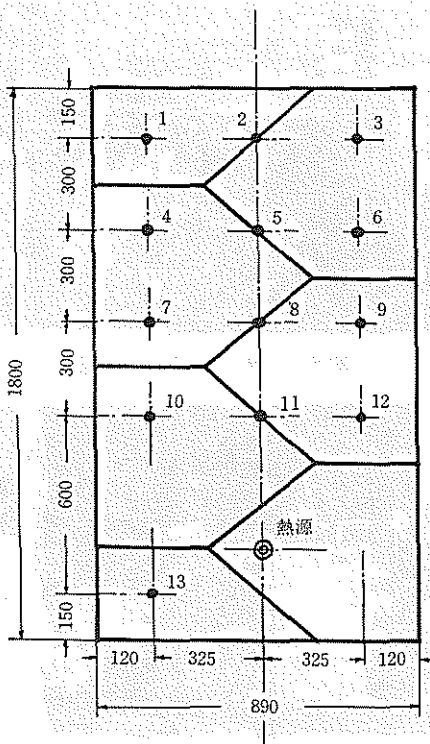


図2 模型内温度測定点

濃度は、非加熱の場合の18倍の濃度を示している。このことから、加熱の効果が現われていると考えられる。

T<sub>3</sub>点において非加熱の場合、濃度は750~1500ppm程度であり、平均濃度約1300ppm (SF<sub>6</sub>全放出量2ℓと模型の容積から求めた量)と同程度の濃度であることから、空気の約5倍の比重を持つAガスも放出点より下方に極端に滞留していないことを示している。

イ. Bガス (He+SF<sub>6</sub> 2%の希釈ガス) で非加熱の場合。

放出点の上方には平均濃度に近い値かそれ以上の濃度がでており、下部では上方の半程度の濃度になっている。これから希釈の効果が見られていると考えられる。

ウ. Cガス (He+SF<sub>6</sub>, 1050ppmの希釈ガス) の場合

加熱、非加熱による差はあまり出ていない。放出点上方のT<sub>1</sub>, T<sub>2</sub>点では、非加熱の場合の方が大きい濃度を示している。このCガスの場合、平均濃度は1.4ppmである

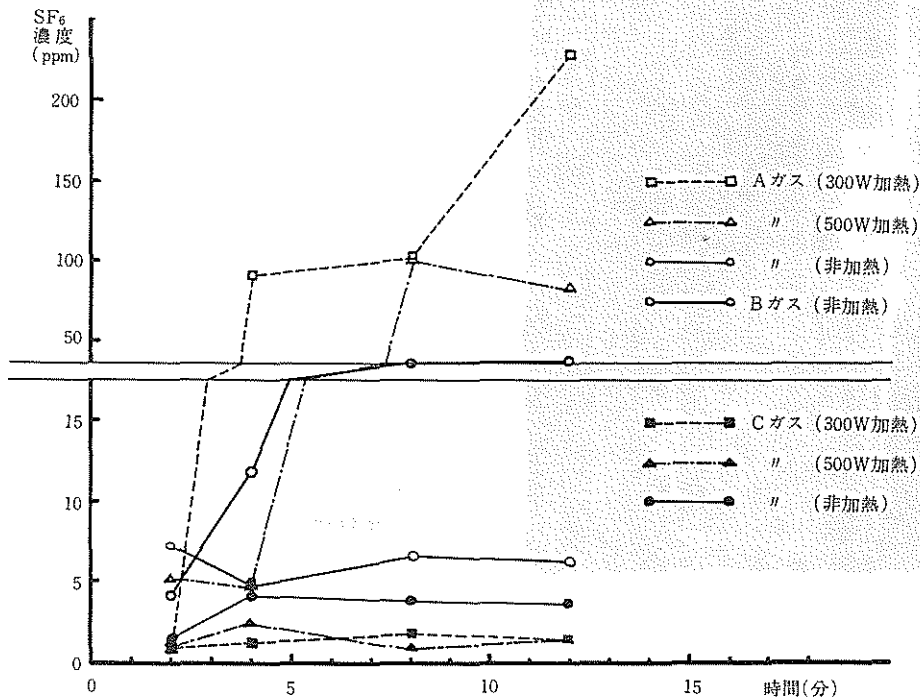


図3 T<sub>1</sub>点(上部)の測定結果

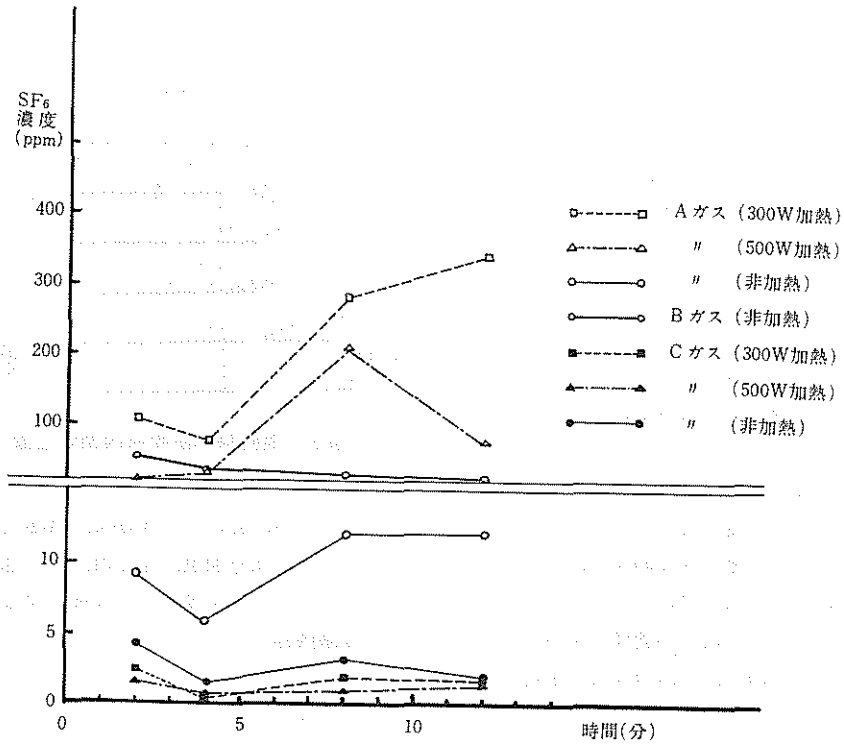


図4 T<sub>2</sub>点(中央部)の測定結果

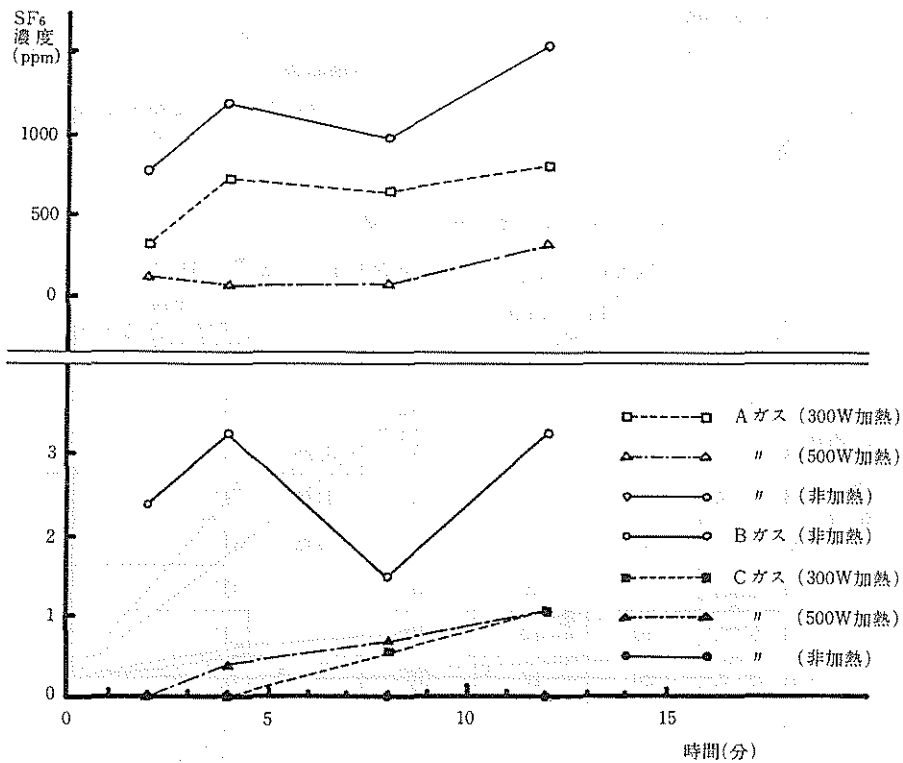


図5 T<sub>3</sub>点(下部)の測定結果

から、放出点から上方では同程度の値か2～3倍の濃度になっている。T<sub>1</sub>、T<sub>2</sub>点において加熱した場合には、いずれも非加熱より小さい濃度を示していることから、加熱により空気の0.14倍の比重を有するこの希釈ガスは、乱流、拡散の影響が顕著に現われたと考えられる。

(5) 考察

ア. 空気の約5倍の比重を有するSF<sub>6</sub>を熱源により上昇気流を起こさせて放出した場合に、上方の濃度は時間経過とともに高くなるが、途中の濃度変化は熱源の種類により一様でない。

イ. 空気より軽い希釈ガスの場合、非加熱の条件では、上方で高い濃度になっているが、加熱すると拡散が促進され非加熱に比べて濃度は低い傾向を示している。

ウ. 希釈したガスの上部での濃度、及び空気より重い純ガスの下部での濃度は、それぞれ模型内に放出したガスの総量から計算した平均濃度に近い値であり、極端な濃度勾配を示していない。

6. 実大建物実験 - I

(1) 場所

渋谷区幡ヶ谷一丁目13番20号  
東京消防庁消防科学研究所階段室

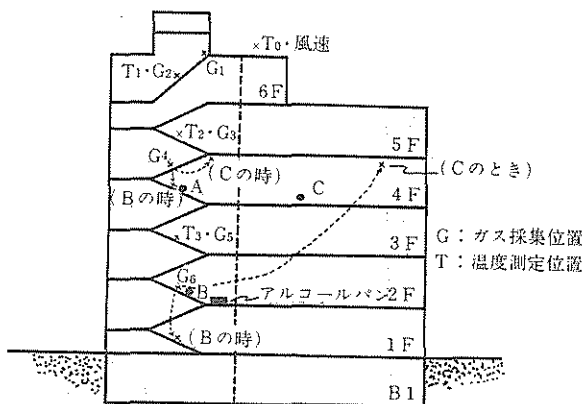


図6 消防科学研究所内測定位置

(2) 目的

実大建物において、Aガス、Bガス及びCガスの3種類を加熱、非加熱、開口部、放出位置などの条件を与えて比較検討する。

(3) 実施内容

ア 概略図

図6のとおり。

イ 採集、分析

模型実験に準ずる。

ウ 実験内容

表3のとおり。

(4) 実験結果

各実験における測定結果を図6、7、8、9、10に示す。

表3 実大建物実験 - I

	ガス種別	ガス放出量	ガス放出時間	放出位置	加熱	開口部
比重の差による影響	Aガス	0.2ℓ/min	20min	Ⓐ	—	①〔階段のダンパー全て閉、階段出入戸も閉じる。〕
	Bガス	5	20	Ⓐ	—	①
	Cガス	50	20	Ⓐ	—	①
比重の差及び加温の場合	Aガス	0.2	20	Ⓐ	加熱	①
	Bガス	5	20	Ⓐ	加熱	①
	Cガス	50	20	Ⓐ	加熱	①
放出位置と流量の差による影響	Bガス	5	10	Ⓑ	—	①
	Bガス	10	10	Ⓑ	—	①
	Bガス	20	10	Ⓑ	—	①
開口条件の差による影響	Bガス	10	10	Ⓐ	—	①
	Bガス	10	10	Ⓑ	—	②〔①の条件で4F階段ダンパーのみ開放する。〕

注) 放出位置については図6参照

表4 濃度と流量の比較

	ガス別	SF <sub>6</sub> 濃度	ガス流量	グラフの読み
	A	100% (1,000,000 ppm)	0.2 ℓ/min	1/5倍
	—	↑ 50倍	↑ 1/5倍	—
基準	B	2% (20,000 ppm)	5 ℓ/min	基準
	—	↓ 1/50倍	↓ 10倍	—
	C	0.105% (1,050 ppm)	50 ℓ/min	2倍

ア 図7の場合

流量と各希釈割合を考慮すると、表4のようになり、Aガスのグラフの読みを1/5に、Cガスのグラフの読みを2倍にすると、3種類の各濃度のガスのグラフは同じレベルで比較できる。図7の較正グラフである図8のグラフでは、非加熱の場合、希釈度が高い割合のガスほど5階では高い濃度にな

っている。加熱の場合、5階ではAガスが高い濃度になっており、B、Cの希釈ガスは加熱すると拡散が速まるために、5階では非加熱の場合より低い濃度になっている。これは6階においても同様の傾向を示している。

イ 図9の場合

階段室の各階段のダンパーを全て開放すると、どの程度の気流が生じるのかを具体的に測定はしていないが、グラフでは開口してBガスを放出した場合に、放出点の上方では開口しない場合より低い濃度になっている。また放出点の下方では上方より高い濃度になっているが、開口すると時間の経過とともに濃度が低くなっている。

ウ 図10の場合

2階と4階で放出し、ほぼ同じ高さの上方で濃度測定した場合、予想通り、流量を多くするほど上方で濃度が高くなり、放出位置を変えても同じ傾向を示している。

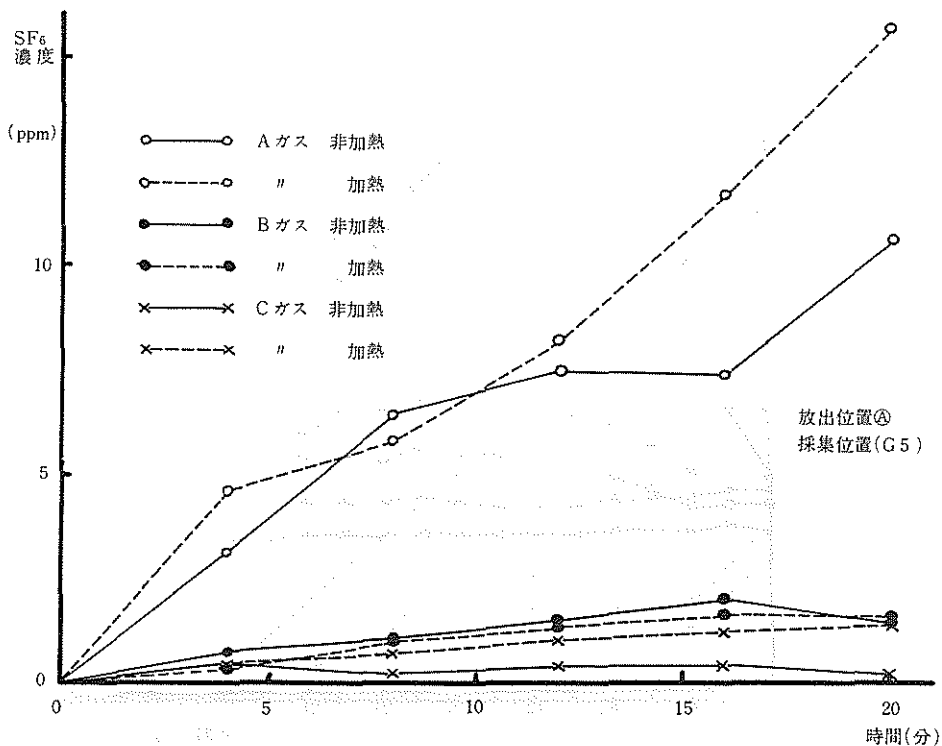


図7 各希釈割合における加熱の影響

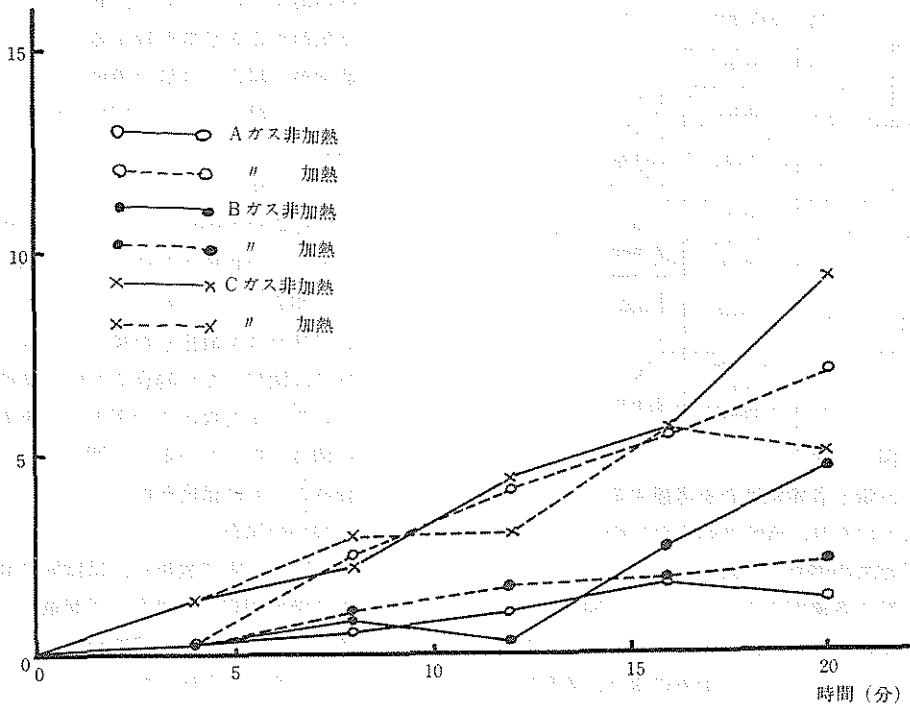


図8 各希釈度合いにおける加熱の影響 (較正グラフ)

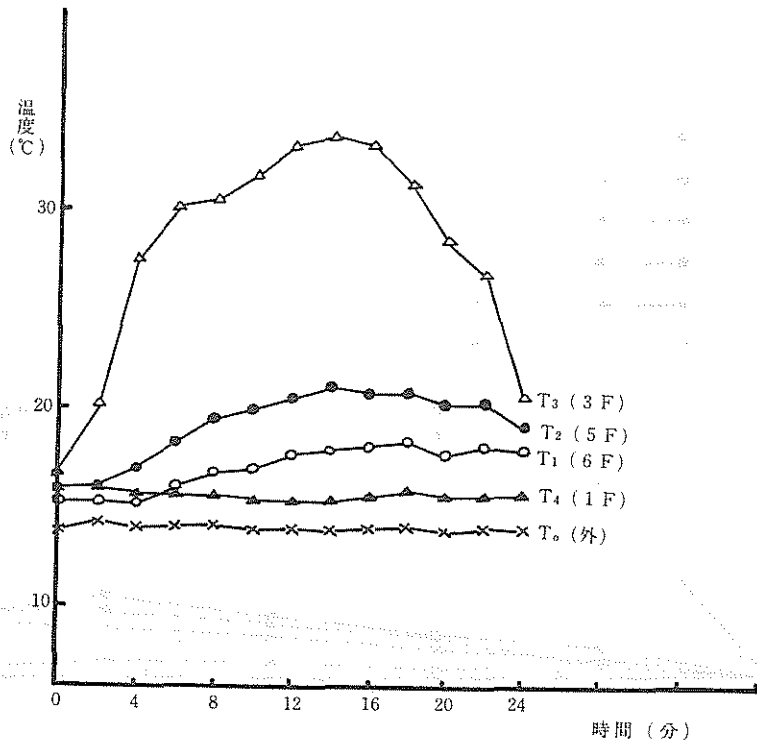


図9 実大実験 - I (加温による室内の温度上昇)



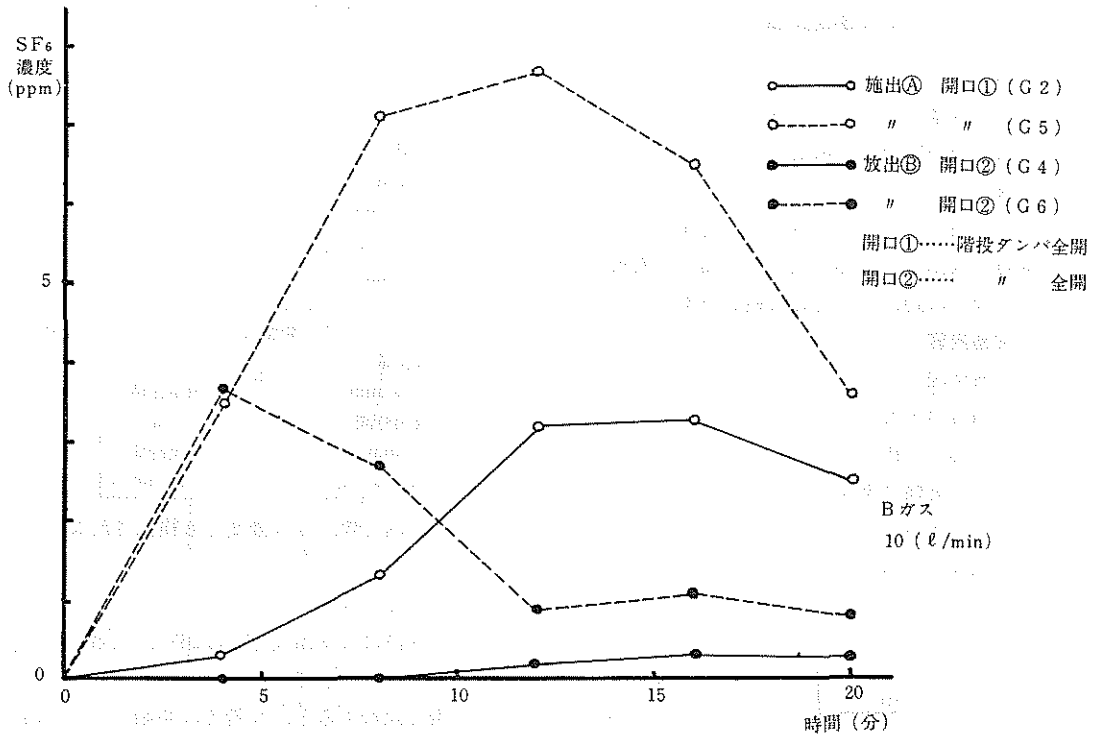


図10 開口条件の差による影響

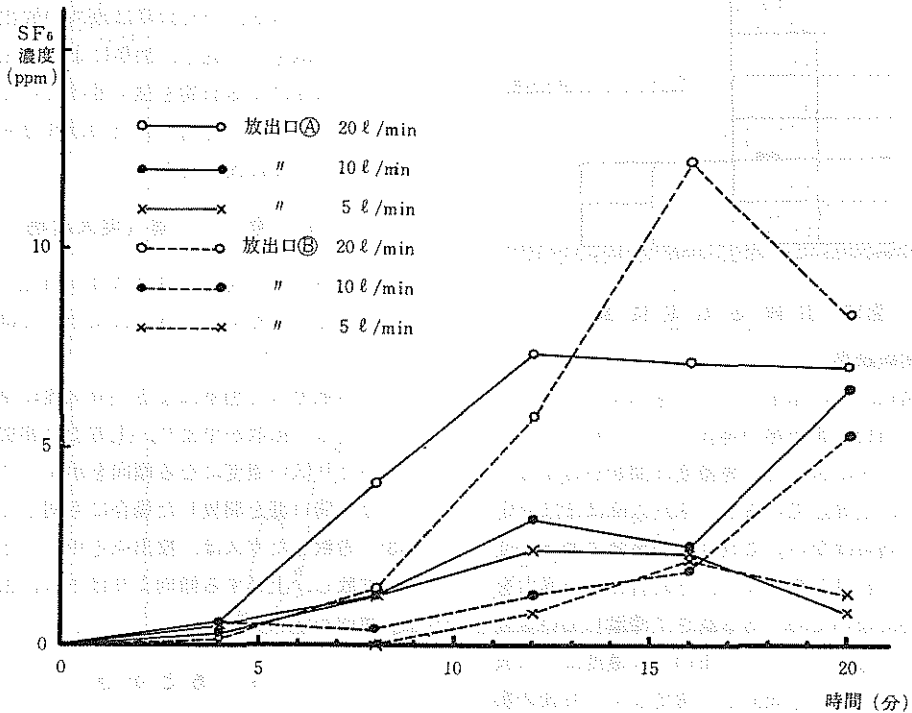


図11 放出口の位置および流量による相違 (Bガス)

## 7. 実大建物実験-II

### (1) 場所

渋谷区幡ヶ谷一丁目13番20号  
東京消防庁消防訓練塔

### (2) 目的

実大建物において、Bガスと発煙筒の煙を同時に放出し、加熱の条件を付加して希釈ガスと煙の流動について比較検討をする。

### (3) 実施内容

#### ア 概略図

図11のとおり。

#### イ 採集、分析

模型実験に準ずる。

#### ウ 実験内容

表5のとおり。

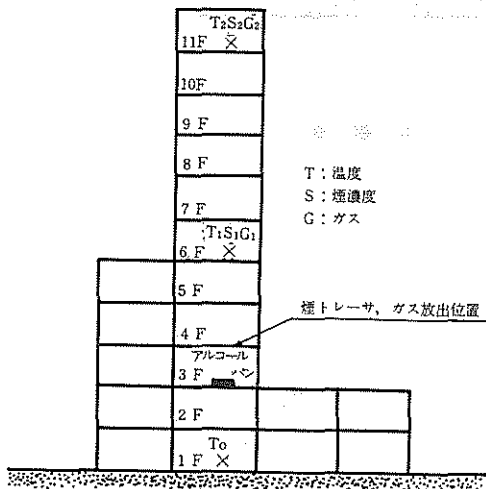


図12 訓練塔測定位置

### (4) 実験結果

図12, 13に結果のグラフを示す。

#### ア 図12, 非加熱の場合

6Fにおいて、煙濃度は開始から4分までは上昇しているが、それ以降はほぼ一定で増減はない。これは、発煙筒の煙は温度がそれほど高くなく、それ自体は上昇力を持たないため、ある高さで滞留しているものと考えられる。6階のガス濃度はガス放出時間内でも傾向が一様でなく、乱流の影響が強くでている。11階では測定時間の20

表5 実大建物実験-II

条件 実験 No	ガス	煙	加熱	開口部
I	Bガス 放出量 50ℓ/min 放出時間 10min	発煙筒 一本	非加熱	全閉
II	Bガス 放出量 50ℓ/min 放出時間 10min	発煙筒 一本	メタノール 20ℓ 燃焼面積 1m <sup>2</sup> 燃焼時間 20min	全閉

分以内で煙、ガス濃度とも検出されなかった。

#### イ 加熱の場合

加熱による温度上昇は26°C、11階ではほとんど変化していない。煙濃度を6階と11階で比較すると、6階では開始から7分まで増加し、それ以降は減少している。11階では、6階で減少を始めると増加する傾向を示し、ある値で一定になっている。Bガスは、6階で開始から3分までは増加しているが、それ以降はガスの放出時間内で増減をくり返し、加熱によって生じた上昇気流による影響を強く受けている。11階でガス濃度が定量できたのは6分30秒後であり、煙に比べて遅い。

## 8. 考察 (実大建物)

- (1) 加熱しない場合、Bガスは9m上方で検出されるが(図8)、高さが27m上方では検出できなかった。
- (2) 希釈ガスを加熱による上昇気流に乗せて放出すると拡散が早まり、上方では非加熱の場合より低い濃度になる傾向を示す。この傾向は、開口部を開放した場合にも同じである。
- (3) 希釈したガスは、放出点を中心に上、下に拡散し、上昇する傾向よりは下方に拡散する傾向が強い。

## 9. あとがき

今回の実験は実験機器の使用上の制約から多面

的にとらえることが出来なかったが、なお一層消 防的応用について検討していきたい。

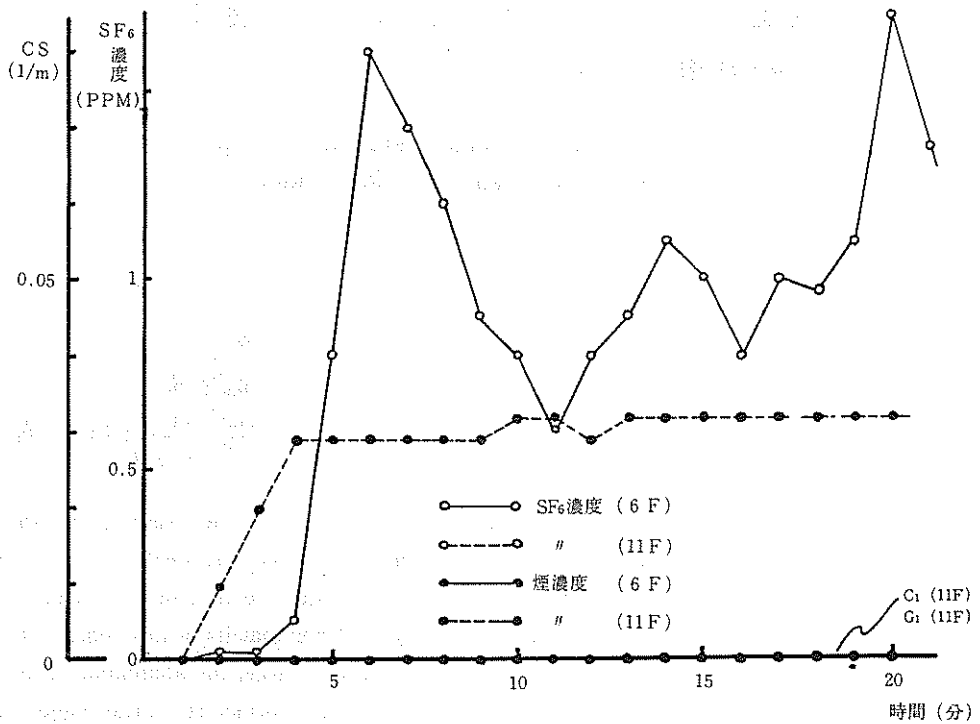


図13 実大実験 - II (非加熱)

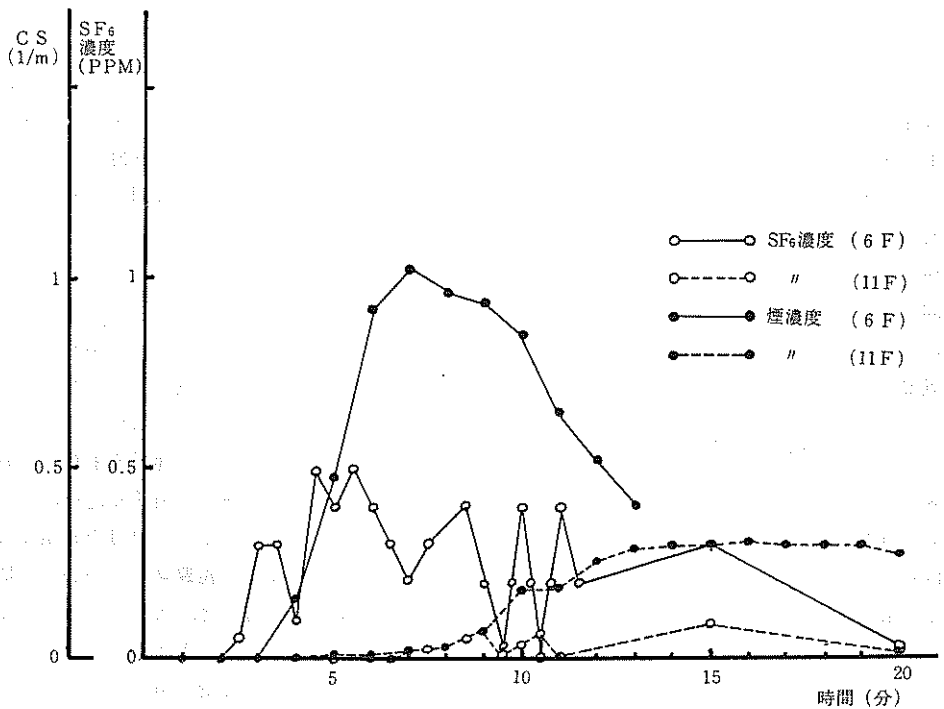


図14 実大実験 - II (加熱)