

# スプリンクラー設備の作動時における火災 雰囲気の変化について

加 藤 尊 明\*  
小 島 正 臣\*\*  
北 坂 達 明\*\*\*

## 1. はじめに

スプリンクラー設備は、そのすぐれた初期消火性能や消防法令の改正によって近年設置する防火対象物が増加している。しかし、従来スプリンクラー設備が火災時において作動した場合に火災室などの火災雰囲気がどのように変化するか、特に放水により煙の発生量が一時増加し避難上障害になるなどといわれているが詳しくは研究されていなかった。

そこで、昭和52年12月6日、7日の両日にわたり埼玉県大里郡妻沼町にある能美防災妻沼工場において火災予防審議会、予防部及び研究所によりスプリンク

ラー設備が作動した場合に火災室の温度、水蒸気、ガス等の火災雰囲気がどのように変化するかを把握するための実験が行われ、その結果消防対策上の貴重な資料を得ることができたので、その概要を報告する。

## 2. 実験の概要

### (1) 実験建物

図1に示すように、耐火造1/6、建築面積330㎡、天井高4mの部分(床面積約150㎡、以下「A」という。)と8mの部分(床面積約180㎡、以下「B」という。)からなる建物のうち、Aを火災室として使用した。なお、AとBとは不燃材料で区画し、さらに区画の中央

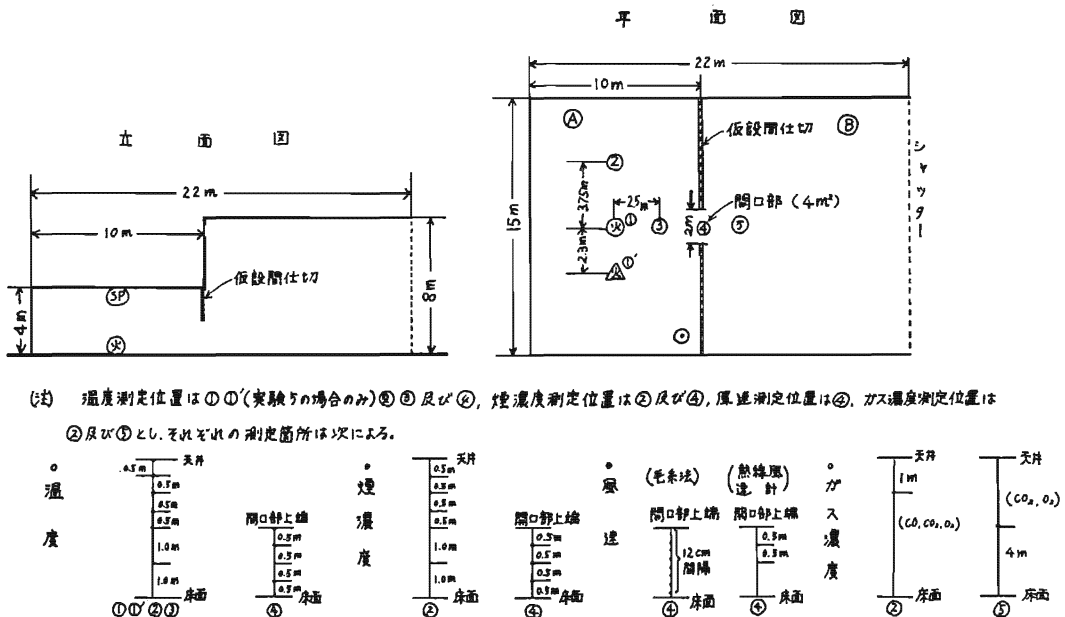


図1 実験建物

\* 鋼布消防署 \*\* 日本機消防署 \*\*\* 第一研究室

表1 実験内容等

目的	燃焼物	点火物	スプリンクラー		測定項目	摘要		
			位置	作動状況			作動時間及び放水	
実験1 消火を行わない場合の燃焼物の発熱量及び重量の変化を把握した。	平均含水率14%の杉クリブ(90×3.6×3.6cm)90本を使用し、位置は図1の⊙とした。	オイルパン(75×75cm)にメタノール1ℓを入れたものを燃焼物直下におき、メタノールに点火した。	図一の直上部分天井に設置	作動させず	点火後7分20秒から9分24秒までの2分4秒間放水し、その放水量は265.9ℓ。	○温度 ○煙濃度 ○燃焼物の重量変化 ○風速 ○放水時間 ○放水水量 ○ガス濃度	1 2 3 図一の開口部は常時開とした。 図二の残火処理は、五ではスプリンクラー停止後ホースで約十・六の位置にビデオカメラを設置して実験の状況を録	
実験2				燃焼物が30%燃焼した時点で手動で作動させ、消火した時点で停止させた。	点火後1分52秒から4分2秒までの2分10秒間放水し、その放水量は239.2ℓ。			
実験3 消火を行った場合に燃焼物の発熱量及び重量の変化並びに煙の流動状況を把握した。				自動的に作動させて、消火した時点で停止させた。	点火後1分57秒から4分30秒までの2分33秒間放水し、その放水量は304.7ℓ。			
実験4				ウール30kgをハンガーに吊し、位置は図1の⊙とした。	オイルパン(45×45cm)にメタノール0.2ℓを入れたものを燃焼物直下におきメタノールに点火した。			点火後3分39秒から5分0秒までの1分21秒間放水し、その放水量は158.3ℓ。
実験5				実験1～3と同じ。ただし、位置は図1の△とした。	実験1～3と同じ			

部分に高さ2m、幅2mの開口部を1箇所設けた。

(2) 実験内容等

ア 実験内容、測定項目は、表1のとおりである。

イ 測定位置、測定箇所は、図1に示すとおりである。

ウ 放水量の計測及び実験結果の解析をするうえで必要となる燃焼物の発熱量算定等については、次のような方法で行った。

(ア) 放水量の測定方法

スプリンクラーヘッド(以下「SP」という。)から放水された水量をQとし、床面に残った水量をQ'(Q'は、床面に採水マスを放射状に配置し、採水マ스에たまった水量をメスシリンダーで測定した。)として、直接消火についやされた水量Qを次式によって求めた。

$$Q = Q' - Q''$$

(イ) 発熱量の算定

i メタノール

メタノール発熱量は、気温、火源面の大きさなどにより異なり定式化されていないが、今回の実験の燃焼方法が「火災時の建物内煙流動に関する研究」(注1)に類似していることからこの文献のデータを参考にして表2のように求めた(注2)。

ii 杉クリブ

表2 メタノールの発熱量

実験	オイルパンの面積(S)	単位面積当りの発熱量(Q'/m)	単位時間当り発熱量(S×Q'/m)	燃焼継続時間(Tm)
1, 2, 3, 5	0.563m <sup>2</sup> (0.57m×0.75m)	71.5kcal/s·m <sup>2</sup>	40.2kcal/s	110s
4	0.203m <sup>2</sup> (0.45m×0.45m)	100kcal/s·m <sup>2</sup>	20.3kcal/s	60s

絶乾状態での杉材の単位重量当りの発熱量は、4400kcal/kgであるが、杉材に含まれている水の潜熱を考慮に入れると杉材の単位重量当りの発熱量qwは、次式で表わすことができる。今回の実験のように平均14%の含水率を有する杉クリブの場合は、3780kcal/kgとなる。

$$qw = (\text{絶乾状態の発熱量} \times \text{絶乾状態の重量}) - (\text{含水率} \times \text{潜熱})$$

このことから杉クリブの燃焼に伴う発熱量Qwは、qwに杉クリブの重量減少を乗ずることによって求めることができる。

(補記)

Qwを求める場合に、物質が完全燃焼するとしても、

- ① 燃焼した部分の重量の内約20%が灰として残ること、
- ② 物質が燃焼の途中で消火された場合に、非燃焼

部分の含水率が燃焼前と同様に考えられないこと、

などから物質の燃焼に伴う重量減少から正確な  $Q_w$  を求めることは困難であったが、今回の実験では他によりよい方法を見出すことができなかったため、この方法を用いて測定した。

iii 衣料 (ウール)

ウールの発熱量については、データーを見出すことができなかったため、次のような方法で発熱量を推定した。

実験4の場合において点火からSPの作動直前までの燃焼に伴うウールの重量減少率は一定と見なすこととする。次にウールの燃焼による④の温度上昇と類似しているものを実験1, 2, 3及び5から選び、その時の総発熱量からメタノールの総発熱量を差し引いたものをウールの総発熱量とする。その結果4218kcalという値を得ることができた。したがって単位時間当りの発熱量  $qr$  は

$$qr = 4218 \div (\text{SP作動時間 } 1\text{分}57\text{秒}) \\ = 4218 \div 1.95 = 2163\text{kcal/min}$$

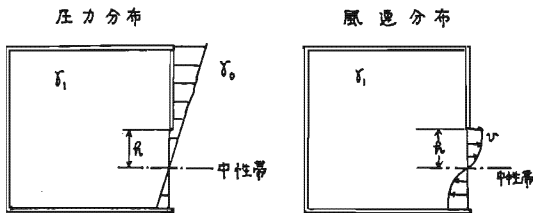
となる。

iv 水蒸気の体積

1ℓの水が1気圧100℃の条件で飽和水蒸気になれば、その容積は1.673m<sup>3</sup>となる。

v 開口部からの煙のもれ量

④と⑤の間に設けられた開口部の燃焼時の圧力分布及び風速分布は図2のように考えられることから、



- $\gamma_1$  : 室内空気の比重
- $\gamma_0$  : 外気の比重
- $r$  : 開口部上端から中性層までの高さ
- $v$  : 開口部上端の風速

図2 燃焼時の開口部における圧力分布と風速分布  
開口部からの煙のもれ量  $V$  は、次式で表わすことができる。

$$V = \frac{\alpha v^3 B \gamma_1}{3g(\gamma_0 - \gamma_1)}$$

$\alpha$  : 開口係数  
 $B$  : 開口部の幅  
 $g$  : 重力の加速度

vi 温度

(i) 室内平均温度

図1の②及び③の位置での温度測定から、図3-1に示すように②及び③の測定点平均温度を求め、これを算術平均して④の室内平均温度とした。

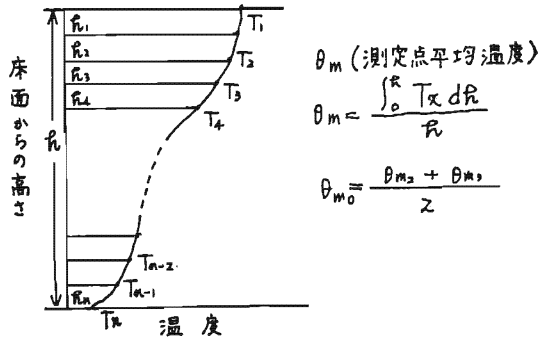


図3-1 室内平均温度 ( $\theta_{m0}$ ) の算出方法

(ii) 室内垂直温度

図1の②及び③の位置での温度測定から図3-2に示すように②及び③と同じ高さの温度を算術平均して

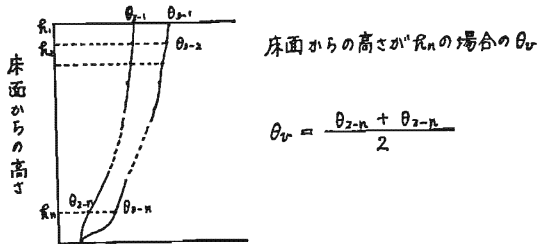


図3-2 室内垂直温度 ( $\theta_v$ ) の算出方法

④の室内垂直温度とした。

3. 実験結果

(1) 温度及びSPの作動状況

SPを作動させる直前と放水後の消火した時点の温度を表3に示したが、その概要は次のとおりである。なお、実験1は、表1に示したように消火を行わなかったことから実験2~5について記す。

ア SPを自動的に作動させた場合、点火後2分ないし3分前後で放水開始(その時の(SP)部分の温度は約120℃~約150℃)し、約2分間で消火に成功している(その時の(SP)部分の温度は約23℃、室内平均温度は16℃~23℃)。

イ 実験2の場合のようにSPの作動を人為的におくられたような場合(点火後7分20秒後にSPを作動)は、放水直前のSP温度は352℃、室内平均温度は55℃となり、実験3~5に比較して室内温度が高くなっているにもかかわらず、実験3~5と同様に約2分間で消火に成功している。このことは、SPがなんらかの原因で、ある程度作動時間が遅れても消火が有効に行える可能性のあることを示している。しかし、火源、室内の状況等により相異なることも考えられるので、一般論として断定することはできない。

ウ 開口部上部の放水直前と消火後の温度変化を見ると、実験2及び5の場合は消火後温度が低下(55℃

表3 放水直前及び消火後の各部分の温度

条件	実験 2		実験 3		実験 4		実験 5	
	放水直前 (7分0秒)	消火後 (10分0秒)	放水直前 (2分0秒)	消火後 (4分0秒)	放水直前 (1分40秒)	消火後 (3分0秒)	放水直前 (3分0秒)	消火後 (5分0秒)
過度測定								
S P部分の温度	352℃	69℃	158℃	22℃	130℃	23℃	120℃	23℃
天井面平均温度	130℃	38℃	45℃	21℃	27℃	23℃	72℃	32℃
床上1mの平均温度	25℃	28℃	12℃	18℃	13℃	16℃	14℃	20℃
室内平均温度	55℃	30℃	20℃	18℃	15℃	16℃	32℃	23℃
開口部上端温度	55℃	30℃	14℃	17℃	13℃	18℃	32℃	25℃

表4 消火水量と燃焼量

実験	燃焼物	放水量 放水時間	Q	放水直前の 燃焼物	実験後乾燥さ せたクリブ	放水中に燃焼 したクリブ (絶乾)
2	杉クリブ 44.8kg (含水率 14%)	265.9ℓ 2.07分	8.2ℓ	32.1kg	27.1kg (含水率10%)	3.52kg (含水率0%)
3	杉クリブ 43.7kg (含水率 14%)	239.2ℓ 2.17分	22.5ℓ	41.2kg	39.3kg (含水率10%)	0.41kg (含水率0%)
4	ウール 30.2kg (含水率 不明)	204.7ℓ 2.55分	18.2ℓ	18.2kg		
5	杉クリブ 44.2kg (含水率 14%)	158.3ℓ 1.33分	10.7ℓ	39.3kg	36.2kg (含水率9.8%)	1.5kg (含水率0%)

→30℃, 32℃→25℃) し, 実験3及び4の場合は消火後若干温度が上昇(14℃→17℃, 13℃→18℃)しているが, いずれの場合でも消火後は高温熱気が開口部から出ることはないと考える。

(2) 放水に伴い発生する水蒸気量

直接消火についてやされた水量Q, 杉クリブの燃焼量等との関係を表4に示したが, この表の数値から次の三つの方法で発生する水蒸気量を計算したものを表5に示す。

- a Qから発生水蒸気量を求める。
- b 放水中における杉クリブの発熱量を測定し, その発熱量から発生水蒸気量を求める。
- c 放水中における燃焼物(杉クリブ, メタノール, ウール)の発熱量を測定し, その発熱量から発生水蒸気量を求める。

表5 発生水蒸気量

aで計算した場合

実験	Q	Qに必要な 熱量	発生水 蒸気量	単位時間当 りの発生水 蒸気量
2	8.2ℓ	5,141kcal	13.7m <sup>3</sup>	6.0m <sup>3</sup> /min
3	22.5ℓ	14,108kcal	37.6m <sup>3</sup>	17.4m <sup>3</sup> /min
4	18.2ℓ	11,411kcal	30.4m <sup>3</sup>	11.9m <sup>3</sup> /min
5	10.7ℓ	6,708kcal	16.7m <sup>3</sup>	12.6m <sup>3</sup> /min

bで計算した場合

実験	発熱量	蒸気 発生量	発生水 蒸気量	単位時間当 りの発生水 蒸気量
2	15,168kcal	24.2ℓ	40.5m <sup>3</sup>	18.0m <sup>3</sup> /min
3	1,767kcal	2.8ℓ	4.7m <sup>3</sup>	2.4m <sup>3</sup> /min
5	6,464kcal	10.3ℓ	17.2m <sup>3</sup>	13.2m <sup>3</sup> /min

cで計算した場合

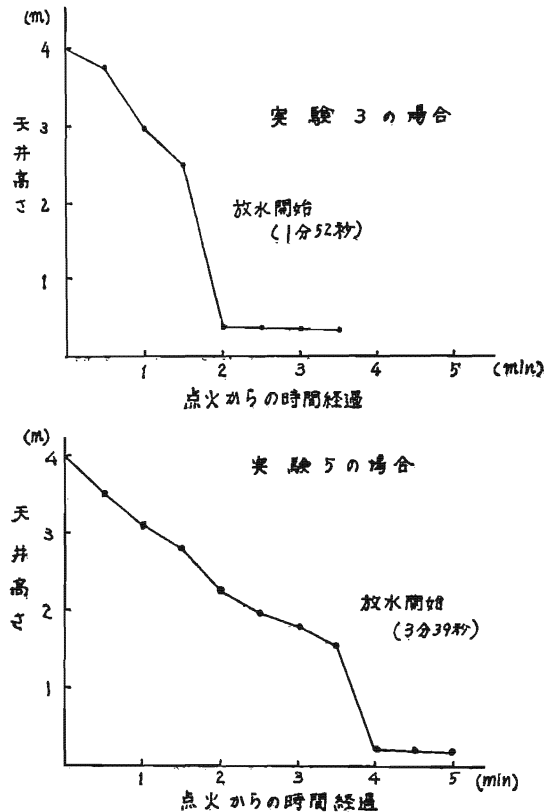
実験	発熱量	蒸気 発生量	発生水 蒸気量	単位時間当 りの発生水 蒸気量
2	10,887kcal	17.4ℓ	29.2m <sup>3</sup>	12.8m <sup>3</sup> /min
3	5,696kcal	9.1ℓ	15.2m <sup>3</sup>	7.0m <sup>3</sup> /min
4	5,523kcal	8.8ℓ	14.7m <sup>3</sup>	5.8m <sup>3</sup> /min
5	3,491kcal	5.6ℓ	9.3m <sup>3</sup>	7.0m <sup>3</sup> /min

実験3と実験5の場合の単位時間当りの水蒸気発生量を表5から見てみると, 実験3の場合aでは17.4m<sup>3</sup>/min, bでは2.4m<sup>3</sup>/min, cでは7.0m<sup>3</sup>/minとなりのばらつきがあるが, 実験5の場合aでは12.6m<sup>3</sup>/min, bでは13.2m<sup>3</sup>/min, cでは7.0m<sup>3</sup>/minとなり前者と比較して割合似かよった値を示している。この相異は, 測定上の誤差等によるものと思われるが, いずれにせよ今回の実験からは, 発生水蒸気量は平均すると約10m<sup>3</sup>/minになるものと思われる。

### (3) 発生ガス量

今回の実験では、メタノールと杉クリブ又はメタノールとウールというように異種の燃焼状況を呈するものを同時に燃焼させた（メタノールは一定の火源面で燃焼し、発煙はほとんどなく、杉クリブ及びウールは時間の関数で火面が拡大し発煙源となる）。このため燃焼に伴う発煙量の定式化が困難であった。しかし、煙層降下の目視観測結果から実験3と実験5の場合について発煙量を算定して見ると、実験3の場合は図4

図4 煙層降下の状況



に示すように放水直前の点火後1分時の煙層が天井面から1mであり、④の床面積が150m<sup>2</sup>であることから発煙量は約150m<sup>3</sup>/minとなる。また実験5の場合も図4から同様に計算すると約108m<sup>3</sup>/minとなる。一方表5から実験3の場合の発生水蒸気量は最大で17.4m<sup>3</sup>/min、実験5の場合には13.2m<sup>3</sup>/minであり発煙量に比較して約10%である。このことから図5に示すように放水直後に発生ガス量（発煙量と発生水蒸気量を加算した量）は若干増加し、以後減少するものと考えられる。

### (4) 開口部からの煙のもれ量

放水前後の開口部からの煙のもれ量は、表6に示すとおりである。すなわち放水後は放水前に比較して煙

図5 発生ガス量の概略

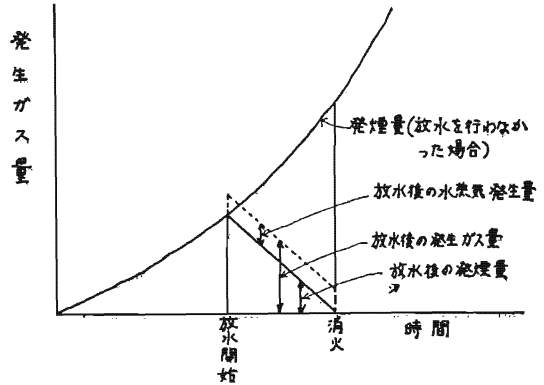


表6 開口部からの煙のもれ量

実験	2	3	4	5
放水前	78.6m <sup>3</sup> /min (7分00秒)	9.0m <sup>3</sup> /min (1分00秒)	22.2m <sup>3</sup> /min (1分00秒)	13.8m <sup>3</sup> /min (3分00秒)
放水後	7.8m <sup>3</sup> /min (8分00秒)	4.2m <sup>3</sup> /min (2分00秒)	0.6m <sup>3</sup> /min (2分00秒)	3.6m <sup>3</sup> /min (4分00秒)
	30m <sup>3</sup> /min (9分00秒)	6.6m <sup>3</sup> /min (3分00秒)	6m <sup>3</sup> /min (3分00秒)	5.4m <sup>3</sup> /min (5分00秒)

のもれ量はいずれも減少し、煙の温度も表3からわかるように低下するかあるいは上昇しても若干である。このことから放水開始後は、開口部からの多量の濃煙熱熱気が出ることはないと思われる。

### (5) 煙層の降下

放水後の発生ガス量は、前(3)に述べたように理論上減少するわけであるが、図4に示すように放水後煙層が急激に降下し、あたかも発生ガス量が増加したような印象を与える。これは次のような理由によるもので、発生ガス量が増加したものではないと考えられる。

a SPからの水の噴射によるための降下

M, L, Bullen の論文 (注3) によれば「スプリン

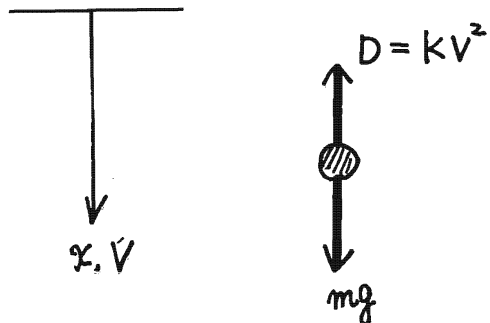


図6-1 重力による水滴の落下運動

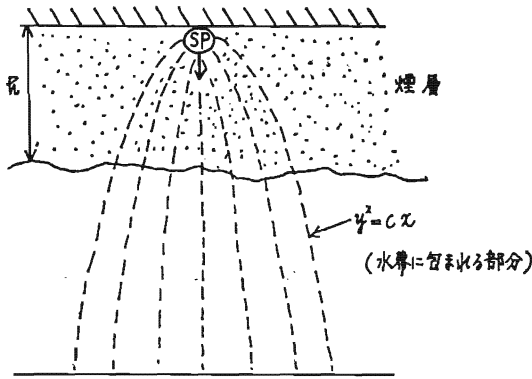


図6-2 高温煙層内での放水熱プルームの変化  
 クラールから落ちる水滴に働く力は、地球の引力と速度の2乗に比例する抗力であり、この抗力の反作用が煙層に与えられると考え、それが煙層内のスプリンクラーによる水幕に包まれる部分の持つ浮力より大きくなれば、煙層が降下する(図6参照)といわれ、このために発生ガス量が増加しないのに煙層が降下するものと思われる。この関係式は次式のように示される。

$$D = \dot{M} \left( \frac{m \cdot g}{K} \right)^{\frac{1}{2}} \left\{ \frac{1}{2} \ln \left[ \frac{1 + \left( 1 + \exp \left( -\frac{2kh}{m} \right) \right)^{\frac{1}{2}}}{1 - \left( 1 - \exp \left( -\frac{2kh}{m} \right) \right)^{\frac{1}{2}}} \right] - \left( 1 - \exp \left( -\frac{2kh}{m} \right) \right)^{\frac{1}{2}} \right\}$$

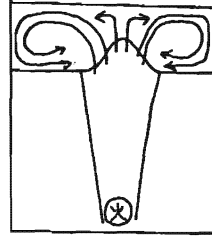
$$B = \frac{3}{2} \pi g \frac{P_0}{T} \theta h^2$$

D: 煙層に与える抗力 (N) B: 水幕に包まれた煙層の持つ浮力 (N) M: スプリンクラーからの流量 (kg/S) m: 水滴の重さ K: 形態に伴う抵抗係数 (kg/m) h: 煙の高さ(m) T: 煙の温度 (°k) θ: 煙と空気の温度差 (deg c) P<sub>0</sub>: 周辺空気の密度 (kg/m<sup>3</sup>)

なお、上式と今回の実験とを比較した場合、実験3及び4では煙層の降下状況についてよく一致していた。

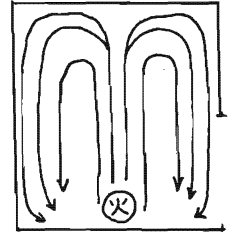
b 熱プルームの気流の変化による降下

放水後熱量、火源面等の変化により熱プルームが図7-1から図7-2のように変化することにより煙層が降下する。



放水前

図7-1



放水後

図7-2

4. おわりに

今回の実験は、SP 1個だけ作動させ、また燃焼物も杉クリブ、ウール等に限定したものであった。しかし実火災にあっては、SPの作動が1個のみでなく数個あるいは数十個作動する場合も考えられ、また燃焼物においても種々の物質が燃焼するわけである。このことから今回の実験のみで一般的な結論を導き出すことは困難であり、今後さらに実験を積み重ねることが必要であろう。

- (注1) 辻本誠「火災時の建物内煙流動に関する研究」(昭和51年東大建築学科修士論文)
- (注2) 平野敏右「液体と燃焼」(昭和51年10月 火災科学セミナー)
- (注3) M, L, Bullen「The effect of a sprinkler on the stability of a smoke layer beneath a ceiling」(July 1974 Fire Note No1016)