

論 文

静電消煙器による密閉空間の消煙現象

上野 宰*, 清国 宣明**, 高橋 武男**

(1977年12月26日受理)

Smoke Extinguishing Phenomena in a Closed Chamber by
Electrostatic Smoke Extinguishers

T. UENO,* N. KIYOKUNI** and T. TAKAHASHI**

(Received December 26, 1977)

As a new fire fighting equipment, we have developed "Electrostatic Smoke Extinguisher." This equipment is brought to extinguish smoke near the fire source in the room by firemen. The smoke extinguishing rate in semi-closed chamber is dependent on construction and ratings of an extinguisher. In this paper, we describe experimental study of smoke extinguishing mechanism in semi-closed chamber. According to our experiment, it is recognized that the smoke in the chamber which has about 150 m³ of space volume is uniformly and simultaneously extinguished by the extinguisher and that space charge density in the chamber has very great role on the smoke extinguishing rate. Under the assumption that space charge density in the chamber is uniform, we calculated the smoke extinguishing rate from equation (4), (6) and (7) which considers the electrostatic dispersion effect caused by space charge giving electric charge and mobility of particles. The calculated results of smoke density and space charge density are good accordant with measured values as shown in Fig. 10 and it has been made clear that smoke extinguishing phenomena depend upon the behaviour of charged particles.

1. ま え が き

ビルや地下街で発生する火災で恐ろしいのは炎よりも煙である。ことに最近の建材からは多量の煙が発生するため、視界がさげざげされたり、避難口を見失なう等、煙に原因して大惨事になっている。また火災時に消防隊が現場に到着しても煙のため進入経路がわからなかったり、火元が確認できないため消火活動が妨げられることがある。これらの対策として建築基準法によって排煙装

置や防煙垂れ壁の設置などが義務づけられているが、筆者らは消防活動用に静電気を利用して煙を消す移動形消煙器の実用化に成功¹⁻³⁾したので以下に報告する。

静電気による煙処理は従来から電気集じん装置で行なわれているが、これらはダストの捕集を目的としており、風速も1~3 m/sと比較的遅いので装置が大形化し、取扱いに難点がある。われわれは火災時の消防活動を円滑にするにはダストの濃度低減よりも見通しの改善が得られれば第1の目的を達するため、この点に主眼を置いて消煙器の開発を進めた。

煙や霧のなかの光の透過は主として Mie の散乱によって説明され、光の減衰は Lambert-Beer の式

$$I = I_0 \exp(-\sigma L) \quad (1)$$

で示される⁴⁾。ここで I_0 は減衰のないときの光の強さ、 L は透過長さ、 σ は減衰係数で、粒子による光の吸収がない場合、

* 東京消防庁消防科学研究所 (151 東京都渋谷区幡ヶ谷 1-13-20)

Fire Science Laboratory, Tokyo Fire Department, 1-13-20, Hatagaya, Shibuya-ku, Tokyo 151, Japan

** 富士電機製造株式会社中央研究所 (240-01 横須賀市長坂 2-2-1)

Central Research Laboratory, Fuji Electric Co., Ltd., 2-2-1, Nagasaka, Yokosuka 240-01, Japan

$$\sigma = N \cdot K \cdot \pi a^2 \quad (2)$$

N : 単位体積中の粒子個数

K : 散乱効率

a : 粒子半径

となる。 K は光の波長, 粒径, 粒子の屈折率の関数であるが, これを定数としたとき, 粒子の重量濃度が一定であれば σ は粒径 a に反比例し, a が大きくなるにつれ光の減衰は少なくなる。

一方, 煙の濃度は一般に(3)式で定義される減光係数で表わされている⁵⁾。

$$C_s = \frac{1}{L} \ln \frac{I_0}{I} \quad [m^{-1}] \quad (3)$$

(1)式と(3)式を比較すれば,

$$C_s = \sigma = N \cdot K \cdot \pi a^2 \quad (4)$$

となり, 重量濃度一定のとき(3)式で定義される煙濃度は粒径によって変化することが知られる。

このようなことから静電気による見通しの改善には,

- a) 集じんによるダスト濃度(重量)の低下,
- b) 静電界内を粒子が通過するときに生ずる凝集, 肥大による減光係数の低下,
- c) 帯電粒子が空間に形成する電界によって拡散され, 壁面に付着する静電分散効果による濃度の低下,

などの寄与が考えられるが, 筆者らは2種の構造の異なる消煙器の実験結果から c) の静電分散効果を利用するのが有利であるとの判断を得, 小形, 軽量の消煙器を完成した。

この消煙器はその目的上, ほぼ密閉された空間で運転され, そこに滞留している煙を消去するものである。本論文では煙の基本的な性質の測定とともに, ある仮定のもとに密閉空間での消煙現象の解析を行ない, 実験結果とよく一致することが確かめられたので報告する。

2. 実験および実験装置

本実験に用いた実験室および使用機器, 測定装置は次のとおりである。

2.1 実験室および使用機器類の配置

消煙実験を行なった部屋はコンクリート製の容積約150 m³の実験室で図1に示すように消煙器はほぼ部屋の中央床面に設置した。煙濃度の測定は床面上1.5 mの位置に光路長1 mの煙濃度計(以下 C_s 計と略す)をとりつけ, 消煙器真上のほか, 実験室内の煙濃度の分布を測定するため図示する位置に合計6点設置し, 同時に測定, 記録した。煙は約20m離れた燃焼炉で木材, 塩ビ等を燃やし, ダクトを通して部屋の天井面に設けられた給煙口からファンで室内に供給した。実験は煙濃度が所

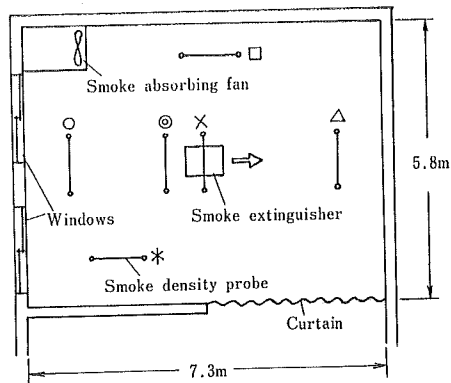


図1 実験室と機器の配置

Fig. 1 Experimental room and arrangement of apparatus used to measure smoke extinguishing phenomena.

表1 使用消煙器の種類と定格

Table 1 Smoke extinguishers used in this experiment and their ratings.

Type	A	B
Construction	Ionizer+Collector+Fan	Ionizer+Fan
Air flow rate [m ³ /min]	55	75
Collection efficiency [%]	40	10

定の値に達したのち, 給煙口を閉じてから開始した。室内の空間電荷密度は床面上0.5 mの位置に空気吸引口を置き, 壁ぎわで測定した。

2.2 供試消煙器

消煙器は表1に示す2種の構造, 定格のものを使用した。風量が異なるほか, A形とB形の違いは, A形がいわゆる2段式集じん装置で帯電部と集じん部を有しているのに対してB形は帯電部のみで集じん部が省略されている。図2, 図3はそれぞれA形, B形の消煙器の外観を示す。表1に示した集じん率は消煙器の入口と出口で煙濃度を測定して得られたもので, 構造的な差のほか風速条件の違いによってA形とB形で大きく異なっている。

2.3 測定装置

煙濃度は光路長1 mの C_s 計により測定し, ペン記録計に記録させた。光源には100 Wの白熱電球を使用し, 電源電圧変動の影響を防ぐため定電圧装置を通して点灯した。受光部にはCdSセルを用い, 光源および受光面が測定中に汚染され感度が変化するのを防ぐためおのには保護筒をかぶせ, さらに光源側は10 l/min程度のエアバージを行なった。

空間電荷密度の測定には図4に示すような装置を使用した。これはシールドケース内に絶縁された濾紙ケースを置き、ポンプで吸引した気流中のダストを濾紙に捕集

することによってダストに付着している電荷を電流としてエレクトロメータで測定し、吸引空気量から空間の電荷密度を計算した。本実験での空気吸引量は 20 l/min とした。

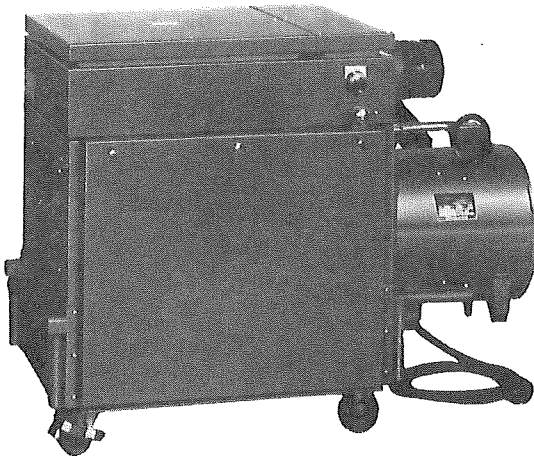


図2 A形消煙器の外観
Fig. 2 View of smoke extinguisher type A.

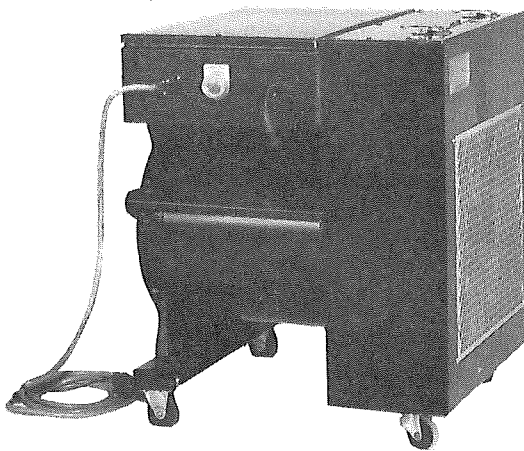


図3 B形消煙器の外観
Fig. 3 View of smoke extinguisher type B.

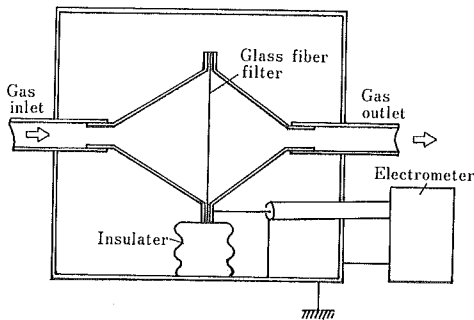


図4 空間電荷密度測定装置
Fig. 4 Apparatus for measurement of space charge density.

3. 結果と考察

3.1 煙の自然減衰

煙は発生後放置しておくだけでも自然に凝集、沈降により濃度は低下する。消煙実験に先立ち、この割合を把握するため測定した結果を図5に示す。ここで放置と記した直線は煙を静置状態にした場合、ファン運転は消煙器のファンのみ運転し、室内で煙を循環させた場合の煙濃度の減衰割合を示す。静置時に比し、ファン運転では減衰割合は約2倍となる。消煙器運転時とくらべると減衰は数分の一以下であるので今後の検討ではこの自然減衰効果は無視した。

3.2 消煙効果

本実験のように密閉空間において消煙器を運転した場合、集じん効果のみで煙が消えるものとすれば煙濃度 C_s は空間容積を V 、処理風量を Q 、集じん率を ζ として

$$C_s = C_{s0} \exp\left(-\frac{Q\zeta}{V} t\right) \quad (5)$$

で示される。ここで C_{s0} は $t=0$ における煙濃度である。(5)式から空間容積が大きいほど、また $Q \times \zeta$ が小さいほど煙の減衰割合は小さいことが想定される。同一空間でのA形とB形の消煙実験では表1から $Q\zeta/V$ に約3倍の差が予想されたが図6に示すようにA形とB形とで消煙の速さにはほとんど差がなく、むしろ $Q\zeta/V$ とは逆にB形のほうが速く消煙されており、(5)式の効果のみで煙が消えていくものではないことが示唆されている。図7は

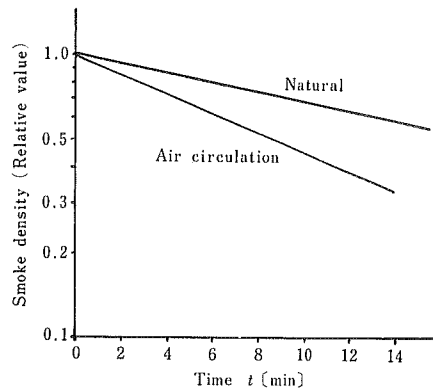


図5 煙の自然減衰特性
Fig. 5 Free attenuation characteristics of smoke density.

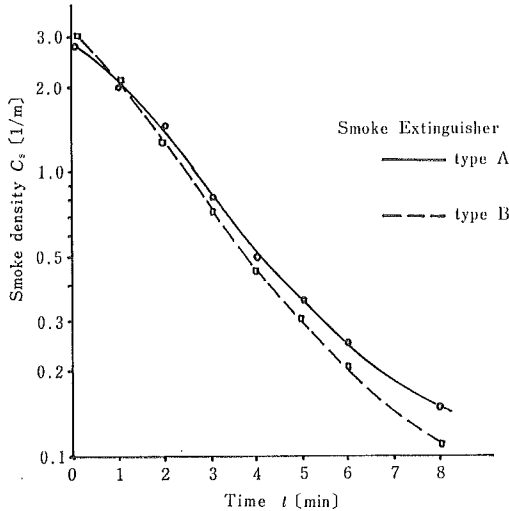


図 6 消煙器による消煙効果
Fig. 6 Attenuation characteristics of smoke density in the room.

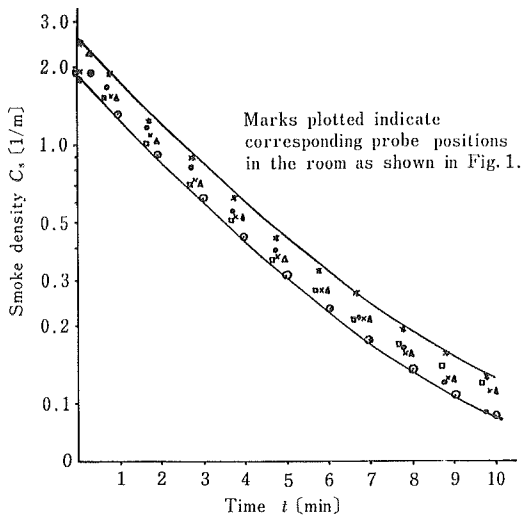


図 7 場所による消煙効果の差
Fig. 7 Attenuation characteristics of smoke density at various positions in the room.

B形消煙器を運転した際、図1に示されている実験室内の測定位置による煙濃度の変化割合を示す。この結果では室内のほとんどの点が全体的にはほぼ一様に消煙されていくことがわかり、消煙器の吹出し口の影響をあまり受けないことが判明した。これはまた消煙器の設置場所を部屋の中央ではなく壁近くにしても同様の消煙割合が得られていることでも確認されている。図8は消煙器AおよびBを運転したときに壁面近くで吸引した煙の空間電荷密度で、A形とB形ではピーク値に明らかな差があり、集じん率の小さい後者のほうが空間電荷密度が大きいことからこれが集じん率の差にかかわらず消煙の速さ

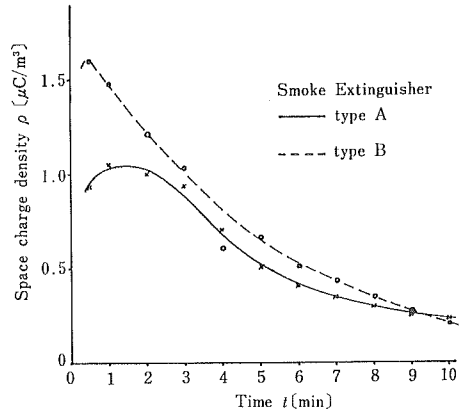


図 8 空間電荷密度の測定結果
Fig. 8 Experimental results of space charge density.

にほとんど差のない原因であろうと推定される。

3.3 空間電荷による消煙

消煙器を帯電装置とすれば消煙器を通過した煙粒子は帯電されて空間に放出される。これらの帯電粒子はほとんど時間遅れなく実験室内に拡散され、室内の電荷密度は均一であると仮定する。これらの帯電粒子による空間電界内に帯電および中性の煙粒子が存在すれば個々の粒子は次のような作用を受け、煙の濃度は低下する傾向を有する。

- a) 帯電粒子相互の電気力による静電分散効果⁶⁾…壁面への粒子の駆動および付着による空間からの除去
 - b) 電界による非帯電粒子の凝集⁷⁾…吸光係数の減少による煙濃度の低下
 - c) 帯電粒子と非帯電粒子の付着、凝集…同上の効果
- これらのうち b), c) は特定の部屋の形状以外の場合では空間の電位分布の正確な把握がむずかしく、定量的な解析が困難であるので、ここでは a) の分散効果による消煙について検討する。

いま簡単のため煙粒子の粒径はすべて等しく a とし、空間の帯電されていない煙の粒子の個数濃度を n 、帯電された粒子の個数濃度を n_0 とし、消煙器を通過した非帯電粒子はすべて電荷 q で帯電されると仮定すれば、帯電されていない煙粒子密度 n は初期値 n_0 から

$$n = n_0 \exp\left(-\frac{Q}{V} t\right) \quad (6)$$

で時間とともに減少する。一方、帯電した粒子の濃度 n_0 の時間的变化割合は

$$\frac{dn_0}{dt} = \frac{Q}{V} (1 - \zeta) n - \frac{Q}{V} \zeta n_0 - \frac{n_0^2 \cdot b \cdot q}{\epsilon_0} \quad (7)$$

で示される。右辺第1項は消煙器を通過した非帯電粒子がとだけ捕集され、残りの帯電されて空間に放出される

粒子数を, 第2項はすでに帯電されている粒子が再び消煙器を通過することによって ζ が捕集されることを, 第3項は帯電された粒子が静電分散効果によって壁面に駆動され, 空間から除去される割合を示している. ただしここで b は帯電された煙粒子のモビリティ, ϵ_0 は真空の誘電率である.

空間の煙粒子の個数濃度は $N=n+n_0$ で与えられ, (4)式から煙濃度 C_s は N に比例するので(6), (7)式から n, n_0 を計算することによって消煙の速さを計算できる.

3.4 煙の諸基本量

(6), (7)式から消煙の速さを計算で求めるには必要な諸量を把握しなければならない. このため次のような条件で測定を行ない, それで得られた量を計算に使用した.

消煙器の吹出し口の直後に空間電荷密度測定器の吸引口をおき, 吹出し部分での電荷密度を測定した. この場合の電荷密度の初期値を ρ_0 とすれば,

$$\rho_0 = q \cdot n_0 (1 - \zeta) \tag{8}$$

で示される. ここで煙粒子の見掛け密度を ω , 測定条件での煙粒子の重量濃度を C とすれば

$$n_0 = \frac{C}{(4/3)\pi a^3 \cdot \omega} \tag{9}$$

から

$$\rho_0 = \frac{q(1-\zeta) \cdot C}{(4/3)\pi a^3 \cdot \omega} \tag{10}$$

となる. 一方煙粒子のモビリティ b はカニンガムの補正係数を無視すれば

$$b = \frac{q}{6\pi\eta \cdot a} \tag{11}$$

η : 粘性係数

で示される. ρ_0 と b を測定することにより粒径 a は

$$a = \sqrt{\frac{9}{2} (1-\zeta) \cdot \frac{C b \eta}{\omega \rho_0}} \tag{12}$$

で求められ, (9), (11)式から n_0, q がおのおの求められる.

われわれの実験室における測定で消煙器Bを用いたとき, 煙濃度 $C_s = 2 \text{ m}^{-1}$ の状態で $C = 0.26 \times 10^{-3} \text{ kg/m}^3$, $\rho_0 = 9 \text{ } \mu\text{C/m}^3$ が, b はモビリティアナライザによる測定から $2.5 \sim 4 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{v}\cdot\text{s}$ なる値が得られている⁸⁾. モビリティ b はまた今回の実験からも次のようにして求められる. 図9(a)は消煙実験開始後8分経過したあと消煙器を off にしたときの電荷の自然減衰を記録したものである. この状態からは(7)式の右辺第3項のみで n_0 は減少し, この微分方程式を解くことによって

$$\frac{1}{\rho} = \frac{1}{\rho_0} + \frac{b}{\epsilon_0} t \tag{13}$$

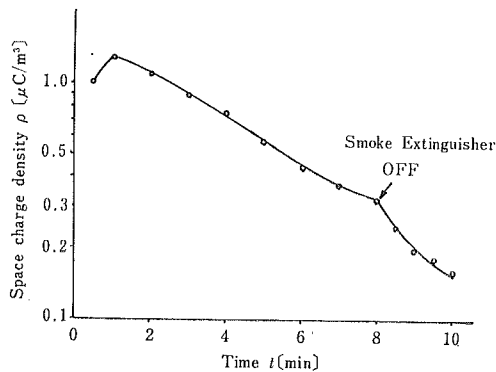
なる式が得られる. この式の ρ_0 は消煙器を off にした時刻での空間電荷密度である. 図9(b)は消煙器 off 後の空間電荷密度の逆数を時間に対してプロットしたもので(13)式から期待されるように直線関係となり, この傾きから b として $2.5 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{v}\cdot\text{s}$ が得られ, モビリティアナライザでの測定結果を再確認している.

煙粒子の見掛け密度をカーボンの真密度の約1/2の $1.0 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ をとれば, 以上の実測結果から a として $0.8 \text{ } \mu\text{m}$, q で $8.3 \times 10^{-17} \text{ C}$ が得られた.

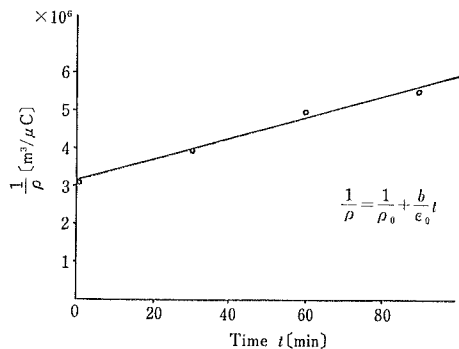
一方, 消煙器の放電空間を半径 a の粒子が通過する際に, イオン射突のメカニズムで荷電される帯電量 qc は(14)式で与えられる.

$$qc = 4\pi\epsilon_0 \frac{3\epsilon_s}{\epsilon_s + 2} \cdot a^2 \cdot E_C \cdot \left(\frac{t}{t + \tau} \right) \tag{14}$$

この消煙器の場合, 平均電界強度 E_C は, $6.6 \times 10^5 \text{ V/m}$, また, 帯電の時定数 τ をばいじんがイオンシャワー空間に滞留する時間 t で除した値 τ/t は 0.35 であるので, 半径 $0.8 \text{ } \mu\text{m}$ の粒子は消煙器を通過することによって $qc = 10 \times 10^{-17} \text{ C}$ の電荷を持つ計算になる. この値



(a) Attenuation characteristics of space charge density.



(b) Free attenuation characteristics of space charge density plotted with $1/\rho$.

図9 空間電荷密度の自然減衰とモビリティの関係

Fig. 9 Attenuation characteristics of space charge density arranged for estimating mobility of charged particles.

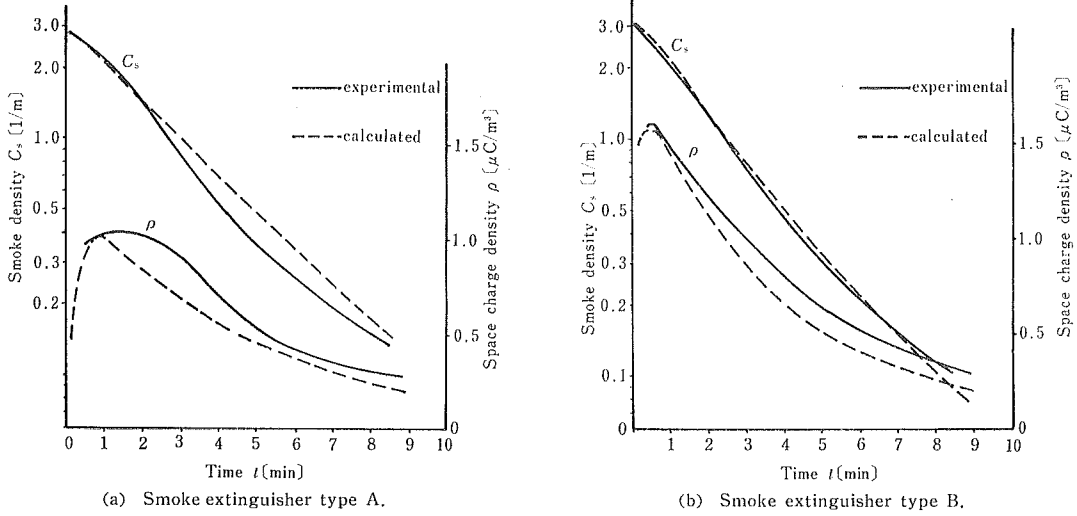


図 10 煙濃度 C_s および空間電荷密度 ρ の実測値と計算値の比較
 Fig. 10 Comparison of measured value to calculated value on the smoke density and space charge density.

は、実測データから算出した上述の値 $8.3 \times 10^{-17} \text{ C}$ によく合っている。

3.5 実験結果と計算結果の比較

前節で求められた煙の基本量を用いて(4), (6), (7)式から今回の実験条件での消煙の速さを計算し、実験値と比較すると図 10(a), (b)のごとくなり、煙濃度、空間電荷密度ともに比較的よく一致した結果が得られた。このことは本実験のような密閉空間での消煙現象には空間電荷の効果が無視できず、集じん装置自体の集じん率が低い場合でも空間電荷効果によってかなりの消煙効果(見掛け集じん率)が期待できることを示している。これらの成果をもとに消防隊用消煙器としては、大きさ、重量の点からB形消煙器のほうがより適当であろうとの結論に達した。

4. む す び

ほぼ密閉された空間で帯電部を有する消煙器を用いて行なった消煙実験とその解析から次のような結論が得られた。

- (1) 空間の消煙速さは消煙器単体の集じん率にはあまり影響されない。
- (2) 約 150 m^3 のような比較的大きい容積を有する室内でも消煙速さは場所によってあまり差はなく、ほぼ全体的に一樣に消煙される。このことから消煙器を通過した煙粒子がほとんど時間遅れなく部屋全体に拡散するとして検討を進めても大きな誤差はないと思われる。
- (3) 測定された空間電荷密度は 10^{-6} C/m^3 のオーダーで、集じん率が低いものほど電荷密度のピーク値が高

く、消煙器の運転時間とともにその値は減少していく。空間電荷密度は煙粒子が消煙器のイオン化空間を通過する際に与えられた帯電量と煙粒子の個数濃度の積で求められ、計算値とよく一致する。

(4) 空間の消煙速さは消煙器の集じん率と同時に空間電荷による静電分散をも考慮に入れた(6), (7)式によって計算でき、実験結果とよい一致を見た。とくに集じん率が低いものでは消煙はほとんど静電分散効果によるものであることが数値計算例から求められる。これらの計算に用いるモビリティなど煙の基本的な数値は同様の実験から求めることができる。

本報告に述べた実験はほぼ密閉された空間で行なわれたものであるが、筆者らはこれ以外にもたとえばトンネル内部のような両端開口のある細長い半密閉空間でも同じような結果を得ており、上記の現象が完全密閉空間に限られるものでなく、たとえば集じん装置内部においても相当の役割を果たしているのではないかと考えている。本検討においては煙の粒径、帯電量、モビリティなどを一定値としたが、現実にはこれらのおおきさには分布が存在しており、より正確にはこれを考慮しなければならないが今後の課題としたい。

最後に本実験に対して種々協力を賜った東京消防庁消防科学研究所第三研究室の島主査、斎藤主任ほかの諸氏、現象の解析にいろいろご指導をいただいた東京電機大学の井関教授に深く感謝する。

参 考 文 献

- 1) 上野 宰, 井関 昇: 昭和51年電気学会全国大会講演論

- 文集, No. 473 (1975).
- 2) 上野 宰, 島 光男, 齊藤正己: 昭和52年度火災学会研究発表会, No. 5 (1977).
 - 3) 清国宣明, 難波泰明: 富士時報, 49, 12 (1976), 704.
 - 4) 久保田広, 浮田祐吉, 会田軍太夫: 光学技術ハンドブック, p. 1112, 朝倉書店 (1968).
 - 5) 中田金吉: 火災, p. 605, 共立出版 (1969),
 - 6) 増田閃一: 第17回粉体工学研究講習会, p. 8, 粉体工学研究会 (1970).
 - 7) 増田閃一: 第17回粉体工学研究講習会, p. 38, 粉体工学研究会 (1970).
 - 8) 清国宣明, 高橋武男, 降矢正保, 宮坂恒司: 第1回静電気学会全国大会, 13p-B4 (1977).
 - 9) M. Pauthenier and M.M.-Hanot: J. Phys. Radium, 3 (1932), 590.