

# 炭素性煙霧体に関するコロイド化学的研究——線香の煙

応用化学科 佐野 慥 環境工学研究所 太田 洋

## Colloid-chemical Studies of Carbonaceous Aerosols

### ——the Smoke of Incense Stick

Isamu SANO Hiroshi Ohta

**要旨：**燃焼・凝集法によって得られる線香の煙を攪拌下に放置，経過時間による粒子直径および個数濃度の推移を実験的に追究したところ，30分の間に粒子直径は1.0から2.3 $\mu$ に成長し，個数濃度は $3.1 \times 10^5$ から $2.3 \times 10^5$ 個/cm<sup>3</sup>に低下することが観察された。その他，粒子の沈降速度や煙の重量濃度などを測定し，これらの結果から線香の煙粒子の密度が0.3g/cm<sup>3</sup>程度であることを推定し，また粒子のブラウン運動による凝結定数を算出して理論値と比較した。

筆者は以前に，コロイド化学の見地から，たばこの煙中の粒子の粒度（大きさ）や粒子の帯電量などを測定したことがあるが，最近，同じく炭素性煙霧体である線香の煙について，二の測定を行なったのでその結果の一端を以下に報告する。

#### 線香の煙の発生と測定の方法

線香は昔から経過時間の尺度に使われていたし，今日でも使われることがあるらしいが，事実，燃焼量は，図1の如く，時間に比例する。図は湿度が低く，隙間風の

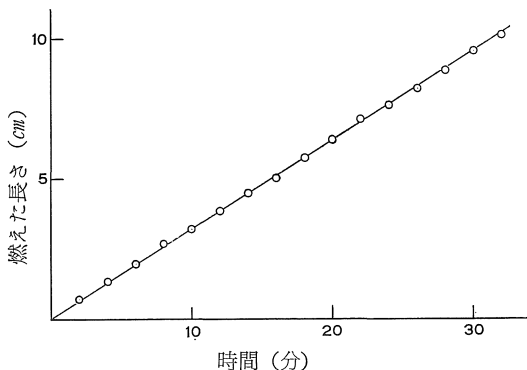


図1 線香の燃焼速度

通らない室内で線香を垂直に立て上端に点火した場合であるが，湿度が高いと燃焼速度は遅くなるであろうし，風があると速くなるであろう。

測定用の線香の煙の製法は次の通りであるが，燃焼速度が定常的であるために濃い煙でも薄い煙でも線香の本数や燃焼の時間を調節することにより簡単に造ることができ，便利であった。

まず，図2のようなアクリル樹脂板製，円筒形のスモークチャンバー（直径58cm，高さ80cm）を用意する。チ

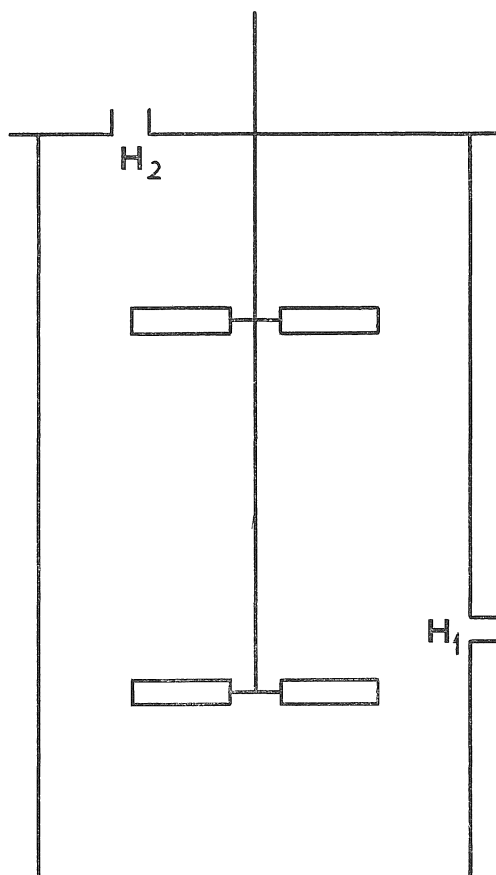


図2 実験装置

チャンパーには攪拌用のスターラー（回転数：80回/分）が取り付けられている。線香を10本束にして点火し、これをチャンパーの孔  $H_1$ （直径 1.5cm）から挿し込み煙の漏れるのを防ぐためチャンパーをゴムテープで密閉した後、スターラーで攪拌しながら3分間線香を燃焼、チャンパー内に煙を充満させる。燃焼3分間の後、線香を取り出してチャンパーを密閉し\*1、引きつづき攪拌しながら煙を老化させ\*2、時々、チャンパーの孔  $H_2$ （直径3.8 cm）から、その都度、新しい注射器（容量100 $cm^3$ ）を使ってその内に煙を吸引、採取する。これらの、煙を採

取、充満させた注射器を、それぞれ、ピストンを抜き去ってから顕微鏡用カバーガラス上に垂直に立てて2時間\*3放置すると、煙粒子がカバーガラス上に沈降し、附着するのでこれを光学顕微鏡で観察し、粒度を測定\*4するとともに個数を計数\*5する。カバーガラス上の面積  $a$  ( $cm^2$ ) 内の個数を  $n$  とし、注射器の高さを  $d$  ( $cm$ ) とすると煙 1 $cm^3$ 中の個数濃度  $x$  (個/ $cm^3$ ) は次式

$$x = \frac{n}{a \cdot d}$$

によって与えられる\*6。

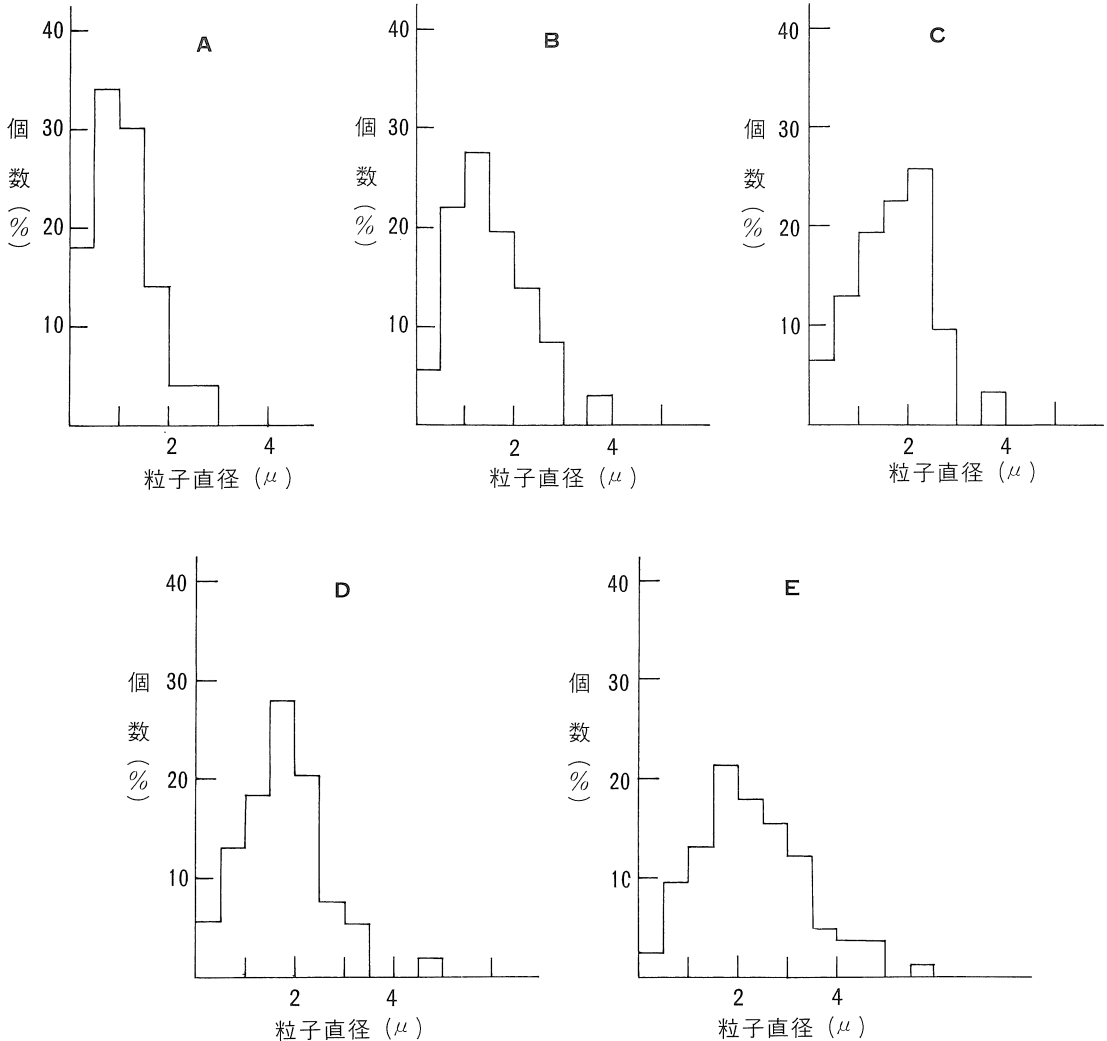


図3 老化による粒度分布の変化——老化時間(分)：A 0, B 3, C 9, D 15, E 30

\*1 この時点を中心として老化時間の原点とする。

\*2 チャンパー内は温度20°C、湿度50%前後でそれぞれ一定に保っている。

\*3 直径0.5 $\mu$ の粒子が注射器の高さ（18cm）を落ち切るのに要する時間は、計算上、5000秒程度である。

\*4 倍率 15×100

\*5 倍率 15×40

\*6  $d=18cm$

表1 老化時間による粒度分布の変化

老化時間(分)	0	3	9	15	30
粒度( $\mu$ )*1					
~ 0.5	17.9	5.6	6.5	5.6	2.4
0.5 ~ 1.0	34.0	22.2	12.9	13.0	9.5
1.0 ~ 1.5	30.0	27.8	19.4	18.5	13.1
1.5 ~ 2.0	14.0	19.4	22.6	27.8	21.4
2.0 ~ 2.5	2.2	13.9	25.8	20.4	17.9
2.5 ~ 3.0	2.0	8.3	9.7	7.5	15.5
3.0 ~ 3.5	—	—	—	5.4	7.1
3.5 ~ 4.0	—	2.8	3.2	—	4.8
4.0 ~ 4.5	—	—	—	—	3.6
4.5 ~ 5.0	—	—	—	1.9	3.6
5.0 ~ 5.5	—	—	—	—	—
5.5 ~ 6.0	—	—	—	—	1.2
6.0 ~	—	—	—	—	—

\*1 粒子直径 \*2 頻度 (個数%)

表2 老化時間と平均粒度

老化時間(分)	粒度範囲( $\mu$ )	平均粒度( $\mu$ )
0	0.5 ~ 3.0	1.0 <sub>0</sub>
3	0.5 ~ 4.0	1.5 <sub>1</sub>
9	0.5 ~ 4.0	1.7 <sub>2</sub>
15	0.5 ~ 5.0	1.7 <sub>7</sub>
30	0.5 ~ 6.0	2.2 <sub>6</sub>

## 測定結果とその考察

結果の一例は表1の如くで、これを図示すると図3が得られる。表1から平均粒度を計算すると表2の通りになる。これらの結果から線香の煙は粒度1~数 $\mu$ 程度の多分散系で、老化とともに粒度の成長して行くことが知られる。

表3中に表1と同時に測定した粒子の沈降速度が示し

表3 老化時間と煙の物性

老化時間(分)	粒子粒度( $\mu$ )		沈降速度*2 ( $\times 10^{-4} \text{ cm/秒}$ )	粒子密度( $\text{g/cm}^3$ )		個数濃度 ( $\times 10^6 \text{ 個/cm}^3$ )	重量濃度 ( $\times 10^{-7} \text{ g/cm}^3$ )
	測定値*1	計算値		計算値1	計算値2		
0	1.0 <sub>0</sub>	(0.5 <sub>5</sub> )	9.3	0.30 <sub>7</sub>	—	3.0 <sub>6</sub>	—
3	1.5 <sub>1</sub>	(0.7 <sub>5</sub> )	17.1	0.24 <sub>8</sub>	0.36 <sub>7</sub>	2.7 <sub>7</sub>	1.8 <sub>6</sub>
9	1.7 <sub>2</sub>	(1.0 <sub>7</sub> )	34.8	0.38 <sub>8</sub>	0.25 <sub>5</sub>	2.6 <sub>7</sub>	1.8 <sub>1</sub>
15	1.7 <sub>7</sub>	(1.3 <sub>4</sub> )	54.8	0.57 <sub>8</sub>	0.26 <sub>0</sub>	2.3 <sub>1</sub>	1.7 <sub>5</sub>
30	2.2 <sub>6</sub>	(1.4 <sub>5</sub> )	64.1	0.41 <sub>4</sub>	0.15 <sub>1</sub>	2.2 <sub>7</sub>	2.0 <sub>8</sub>

\*1 表2参照

\*2 粒子若干個に係る平均値

であるが、これは各老化時間毎にスモークチャンバーから注射器で煙を採取し、暗視野コンデンサー型限外顕微鏡(倍率 $7 \times 10$ )のセル内に注入して粒子が一定距離(325 $\mu$ )を沈降し去るに要する時間を測定することによって求めたものである。粒子の密度を1と仮定して次式(Stokes-Cunninghamの式)

$$v = \frac{(\rho_p - \rho_m) g}{18\eta} \cdot d_p^2 \left(1 + K \frac{1}{d_p}\right) \quad (1)$$

$$\doteq \frac{\rho_p g}{18\eta} \cdot d_p^2 \quad (2)$$

v: 沈降速度

 $\rho_p$ : 粒子の密度  $\rho_m$ : 媒体(空気)の密度g: 重力の加速度  $d_p$ : 粒子の直径(粒度)

K: Cunninghamの係数

l: 媒体(空気)分子の平均自由行路

から粒度を計算すると(20°C)、表の(計算値)が得られる。

一方、粒子粒度と沈降速度の各測定値を Stokes-Cunningham の式(2)に代入して計算すると表3の如く粒子密度の欄の(計算値1)が得られる。同じ欄中の(計算値2)は表3中の個数濃度と重量濃度から粒子を、やはり、球状と仮定して勘定した値であるが、一般に煙霧体に関する測定には障害が多く、従って再現性に乏しいことを考慮すると、これらの計算値1および2は期待以上に良い一致を示しているといつてよい。

煙霧体の粒子は、構造が多孔性で緻密でないためであろうといわれているが、一般にその密度の小さいことが知られている。例えば酸化カドミウム(密度6.95)、酸化マグネシウム(3.65)、水銀(13.6)などの煙霧体の場合、粒子の密度はそれぞれ0.51、0.35、1.70などと報告されているし、筆者もたばこの煙や硫酸ナトリウム(密度2.68)<sup>3)</sup>などの煙霧体について粒子の密度がそれぞれ0.74および0.62であることを観察している。たばこの煙や線香の煙の粒子が炭素の緻密な粒子であるなら

ばその密度は炭素の密度2.26に等しいであろうと思われる。

なお、表中の重量濃度はスモークチャンバーの孔(H<sub>2</sub>)からサンプラー\*によって煙を吸引し、サンプラー中の濾紙の重量増と煙の吸引量から算出した値で、表の如く、測定時間中(30分間)ほとんど一定にとどまっているようである。

ブラウン運動のために粒子は相互に衝突し、従って凝結、成長することが知られている。これに関し、次式

$$-\frac{dn}{dt} = kn^2, \quad k = \frac{1}{t} \left( \frac{1}{n} - \frac{1}{n_0} \right) \quad (3)$$

t : 経過時間  
n : 個数濃度 (t=t)  
n<sub>0</sub> : 個数濃度 (t=0)  
k : 凝結速度定数

が成立するが、式中のkについては Smoluchowski (1917) により、次式

$$k = \frac{4RT}{3N\eta} \quad (4)$$

R : 気体定数 (8.3×10<sup>7</sup>エルグ/°K・モル)  
T : 温度 (°K)  
N : アボガドロ定数 (6.0×10<sup>23</sup>)

が誘導されている。(4)式によると凝結速度定数は粒度に関係なく、さらに Smoluchowski は粒子が球状の単分散系を仮定しているので(4)従って(3)式は単分散の球状粒子から成る煙霧体でしかも凝結過程開始後の短かい時間内において成立することが想像される。

図4に表3中の測定値(個数濃度nと経過時間t)が目盛ってあるが、大体において直線関係が存在しているのでその勾配を求めると、すなわち  $k = 6.29 \times 10^{-8}$  (cm<sup>3</sup>/分) が得られる。これに対し、理論値は、20°Cの

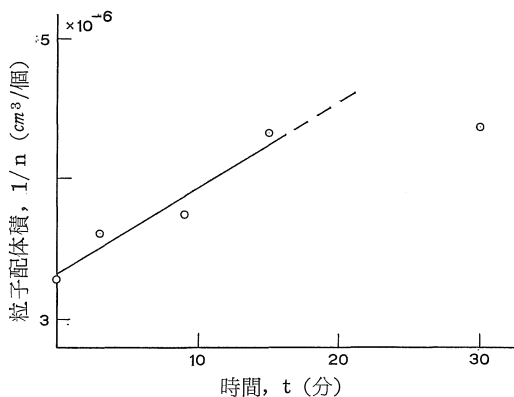


図4 凝結速度式の検討

場合、 $k = 1.75 \times 10^{-8}$  (cm<sup>3</sup>/分) であるから両値は数倍の開きで一致していることが見られる。開きの原因は煙が多分散性でしかも粒子が縋じて球状でないなどの点にあるかと思われる。

終りにのぞみ、装置の製作、測定の実施などが学部学生荻谷陽一、井置善彦および佐藤弘樹の3君によって行なわれた旨を記し、3君に謝意を表する。

#### 引用文献

- 1) 佐野 櫻, 藤谷義保, 阪田貞弘: 日化, **74** (1953), 664; 佐野 櫻: 化学と工業 **10** (1957), 272.
- 2) H. S. Patterson, R. Whytlaw-Gray: Proc. Roy. Soc. (London), **A 113** (1927), 302.
- 3) Y. Ueno, I. Sano: Bull. Chem. Soc. Japan, **45** (1972), 975.

\* 大気汚染測定用ローボリウム・エア・サンプラー