XXVIII. 煙 霧 体

編集にあたって 煙霧体に関する特集はここ数年とりあげられていないように思うが、公害問題などが真剣に論ぜられている最近の状況に対応し、煙霧体に関する研究も活発に行われており、そのレビューを行なうことは時期的にも当を得たものに思われる。ここでは主として基礎的なもの、すなわち煙霧体の発生、挙動、測定、化学反応などについて、最近の研究の進歩を各分野で活動している方々に執筆していただいた。なお、煙霧体の除去については集塵の特集、また凝集した粒子に関しては粉体の特集などを参照すれば、相互に関連した所もあり、一層理解を深め得るものと思われる。

(編 集 高島洋一*・三神 尚**)

XXVIII-1. 煙 霧 体 の 発 生**

本 間 克 典***

1. は し が き

大気汚染で問題にされている大気中に浮遊する粒子状物質をはじめとし、局所的には火災で発生する煙、労働環境内に発生して職業病をひきおこす有害粉じんなど、煙霧体 (Aerosol) についての関心の度は、ますます強くなっている。

そこで、Aerosol の性質を調べるに当って、また Aerosol 測定器の性能、あるいは集じん装置の捕集効率などを調べるに当って必要となる標準 Aerosol を人工的に発生させる方法について述べる。

Aerosol の発生法を分類してみると次の三通りに大別することができる。

- (i) 分散機構による方法
- (ii) 化学反応による方法
- (iii) 凝縮機構による方法

ところで、蒸気の凝縮機構による Aerosol の発生については、木谷らのレビュー²⁰⁾があるので、本稿においては (i) の分散機構による発生法に重点をおく。

2. 分散機構による Aerosol の発生法

2.1 粉体の分散による方法

粉体を乾燥状態のまま大気中に散布して Aerosol とする方法には、単純に流動している空気中へ粉体を落下させるとか、フラスコ中に粉体を入れておき、そこへ加圧空気を送って粉体粒子をフラスコ内に舞上げると同時に外へ送り出す方法、粉体貯蔵器より定量づつ供給したのを分散させながら分級によって粒度を均一にして系外へ放出する仕組みを備えたもので、この種の発生装置 (Dust feeder, Powder dispenser, Powder disseminator などと呼ばれる) は極めて多種多様である。

ところで、労働衛生の分野で粉じんの有害性を調べるのに動物へ粉じんを吸入させて行なう方法が 1940 年代にさかんと進められた。その実験には、微細粉じんを発生し吸入装置へ供給することが必要となり、粉体の分散による Aerosol の発生装置が次々に考案され、この時代に一応の形態がまとまったと云える。

即ち初期には U. S. Bureau of Mines²¹⁾ で開発された Ejector 方式をもとにし、粉体の供給に振動式すべり台²²⁾や回転板²³⁾を組合せて、ホッパに蓄えられた粉体を間断なく流動空気中へ送り出す方式とか、極めて低濃度

* 東京工業大学原子炉工学研究所

** 昭和 43 年 10 月 2 日 受理

*** Katsunori Homma 労働省労働衛生研究所労働環境部

① 粉体充填室 ② スクリューフィーダー ③ 分散 Jet nozzle ④ 分散沈降分級室 ⑤⑥⑦ 気送管 ⑧ Ejector ⑨ Baffle plate

図1 興式 Dust feeder の主要部 (内部構造図)

space	suction velocity	liner velocity
—	28 l/min	1.3 cm/sec
8 mm	27	1.74
6	33	2.54
3	28	2.47

図2 重力沈降式分級器の1例

で有害作用を示す粉じんを小動物に吸入させて調べるには、少量の粉体を連続して供給する機構を備えた発生装置^{3,52)}、更に Ejector での負圧のみを利用して吸引散布したのでは吸入実験上で不必要な 10μ 以上の大きな粒子までも供給することになるので、前もって分級するための装置が組入れたものへと発展した。分級方法としては、篩を用いる方法^{5,43)}、重力沈降を利用する方法³²⁾、またその両者の組合わせ⁵²⁾などがとられた。

ところで粉じんの供給においては、任意に選定した一定の Aerosol 濃度を長時間にわたって保たねばならない場合が多い。その条件に合せて粉体より Aerosol を発生させるには単純な Ejector 方式のみでは困難なところから、Wright が任意の一定濃度の Aerosol を長時間発生させることのできる新しい形の装置⁵⁴⁾を作った。この

図3 重力沈降式分級器による塵粒の状態

Feeder は粉体をあらかじめ円筒内に一定の充填状態で詰めておき、その充填された粉体の表面を回転式のキャッターで連続して削り、その削り離された一定量の粉体を加圧空気流へ供給する仕組みになっている。なお、含じん気流を途中で Jet nozzle で絞り、同時に Nozzle 出口に設けられた Baffle plate に衝突させるような構造を有する。従って Wright の Feeder では単離した一定濃度の Aerosol を発生し続けるというのであるが、実際に使用してみると、キャッターで削られた一定量の粉体を加圧空気流へ乗せる機構に難があり、長時間使用していると発生量が次第に低下するという困った問題を生ずる。

この欠陥を解決するために考案されたのが興によって作られた Dust feeder である。図1はその主要部の構造を表したものである。この発生方法は円筒①に均一な圧力で充填された粉体をスクリーパー②で一定量づつ削ると同時に分散 Nozzle ③からの Jet 気流で粉体を分散室④に舞上げる。分散室内で重力沈降により分級された微細粒子は Ejector ⑦により吸引されると同時に Baffle plate ⑨に衝突され、そこで 90° 方向からの加圧空気流⑩に乗せられ系外へ放出される。

前述の発生装置によれば、ほぼ一定濃度の Aerosol を発生させることはできるが、一般に強く凝集している粉体を単離した Aerosol として発生させることは容易でない。そればかりか、Ejector や Baffle plate との作用によって逆に凝集を促進させることがある。即ち摩擦や衝突作用で静電気を生じ、これが粒子に帯電して、粒子同

志を凝集させてしまう。Kunkel²⁷⁾によれば、粉体の散布に当って噴射 Nozzle, 送気管, あるいは Baffle plate などと粉体との間での相互作用により発生する静電気は、それぞれの物質によって大きな差が認められることを報告している。一般に装置の材料が電気抵抗の大きな物質で作られている場合、および粉体との間の帯電列で大きな電位差をもつ物質で作られている場合などで、その効果が大きい。従って、Feeder によって粒度分布の小さな Aerosol を得るには慣性効果⁵³⁾とか重力沈降を利用した分級操作による必要があると云われている。そこで 325 mesh 以下に篩った石英粉体を興式 Dust feeder にて散布し、発生した Aerosol を図 2 に示すような重力沈降式整粒器を通過させた場合の粒度分布を調べてみると図 3 のごとくで、分級操作を加えても粒度分布を大きく変えることは困難である。

このように分散方式では微細な単離した Aerosol を作ることが困難なところから、Druett⁷⁾などは塊状または粒状の物質を回転する Drum 内で互いの接触によって破碎させ、その破碎によって Drum 空間に舞上った微細粒子を空気によって運び出す方式の Aerosol 発生装置を作った。この装置から発生された Aerosol は大部分が 1μ 以下の単離した粒子で、その粒度分布の小さいことを報じている。

また、あらかじめ粉体粒子を単分散粒径までに分級しておく²⁾とか、天然の孢子^{11, 47)}や花粉²¹⁾, また人工的に作られたガラスビーズ, ポリ塩化ビニル粉末¹⁹⁾, カーボンブラック (例えば三池井 20, 白石ガストン) など、極めてよくそろった粒子からなる粉体を Dust feeder で散布すれば、単分散に近い Aerosol を得ることができる。

なお、同質のもので任意の粒径の Aerosol をとると、粉体分散法では不可能で、他の発生法によらなければならない。

2・2 液体の分散による方法

加圧気体によって液体を分散し Aerosol を発生させる方法についての研究は、液体燃料の燃焼に関する基礎的研究として、抜山などの系統だった一連の報告⁴¹⁾がある。それによれば、加圧空気によって噴霧されて生成する液滴の平均粒径 $\bar{d}$ は、噴霧される液量 (Q_L) に対する加圧空気量 (Q_a) との比、および噴射 Nozzle を通過する液体の流速 (v_L) と空気の流速 (v_a) との間の相対速度 ($v: v_a - v_L$) とによって定まり、Nozzle の形状や大きさによって左右されないことを見出し、平均粒径は (1) 式より算出できるとした。

$$\bar{d} = 585 \frac{\sqrt{\sigma}}{v \sqrt{\rho}} + 597 \left(\frac{\mu}{\sqrt{\sigma \rho}} \right)^{0.45} \cdot \left(1000 \frac{Q_L}{Q_a} \right)^{1.5} \quad (1)$$

尚 (1) において σ は液体の界面張力, ρ は液体の密度, μ は液体の粘性係数である。更に、その粒度分布は (2)

図4 液膜通過機構を表す模倣図⁴⁾

の実験式によって一般化することができた。

$$\frac{dn}{dx} = ax^p \exp(-bx^q) \quad (2)$$

(2) において、 a, b, p, q はそれぞれ実験的に求められる常数で、 $Q_a/Q_L > 5000$ なら $p=2, q=1$ となる。

a は $x=0$ での $(1/x^p)(dn/dx)$ の値で、計測した粒子数 (n) が変れば変る値であって粒度分布に直接関係がない。従って問題は b にあり、これは液体の密度、表面張力それに相対速度によって左右される。尚、実験結果では水、アルコール、グリセリンなどのいずれからでも多分散状態の Mist を生成した。また本間は市販の医療用 Nebulizer にて不揮発性の油から Mist を発生し、光散乱を利用した粒度分布測定器 (例えば ROYCO Particle counter) にて粒径を測定し、偏位係数 (α) を求めてみると 40~70% の値を得た²⁰⁾。同様な結果は Greenough¹⁵⁾ の Wax の分散からも得られている。

そこで、液体の分散から単分散の Mist を発生させるには、ただ単純に Jet 気流にて吹き千切るだけでは不可能で、次にあげるような方法に従わねばならない。

- (i) 発生した Mist を分級によって整粒する方法
- (ii) 液体を Capillary より少量づつ一定量を供給しながら分散させる方法
- (iii) 高速で回転する円板の中心部に液体を少量づつ一定量を注ぎ、遠心力を利用して分散させる方法。

第1番目の方法を用いた発生装置としては、Dautrebande の Atomizer D-30⁴²⁾, Lauterbach の Nebulizer³⁰⁾ などがある。これらの分級方式は図4に示すような液膜による戸過による。即ち、先ず噴霧によって生成した Mist の Filtering screen に捕集されると液膜となって Screen が目を覆う。ところが、この Screen を通過しなければ

a) Spinning desk sprayer b) Spinning top sprayer
図5 回転円板式 Aerosol generator⁶⁰⁾

空気は外に出られないところから、液膜を破って通過することになる。その際、液膜は自己の粘性、界面張力と、空気の流速などにもずいて平衡状態での孔径をもつ⁵⁹⁾。そこで、この液膜孔が分級作用を行ない、粘度分布の小さな Aerosol を発生させる。

第2番目の方法は、まず Lane⁵⁸⁾ によって行なわれた。Lane は細い Capillary (内径 0.45mm 注射針) より液体を少量づつ滴下させるとともに、空気を Capillary の側面より強く吹いてやり、均一な Mist を発生させた。なお Mist の粒径は液体の流出量と空気の流速とによって定まり、粒径の大きな Mist 程粒度分布は小さくなり均一な Aerosol を発生する。

この発生法で Capillary を機械的に振動^{15, 34, 35, 49)}させると、更によくそろった Mist を能率よく発生させることができることを Dimmock⁶⁾ が認めた。

しかし Capillary 法は Aerosol として気中に安定な状態で浮遊するような微細な Mist を発生させることが出来ない点で、利用範囲が極めて狭い。

第3番目の方法を用いた発生装置は、近年特に注目を浴び、単分散 Aerosol を必要とする分野で使用されている^{57, 61)}。原法は Walton と Prewett⁶⁰⁾ によって紹介された Spinning desk sprayer および Spinning top sprayer の2種類で、後者はすぐさま May⁵⁹⁾ によって改良形が作られた。2つの Sprayer の相違は前者が Motor drive 式、後者が Air drive 式である。この発生法の仕組みは、回転している Rotor の中心部に液体を注ぐと、その液体は遠心力を受けて、rotor の縁より均一な Mist となって飛散するのである。発生する Mist の粒径 (d) は Rotor の径 (D)、Rotor の回転速度 (ω)、それに液体の密度 (ρ) と界面張力 (σ) などによって定まり、(3) 式の関係をもつ

$$d\omega(D\rho/\sigma)^{1/2}=C \quad (3)$$

但し、Motor drive 式の低速回転の場合と Air drive 式の高速回転の場合とで若干の差が認められる。実験結果から C の平均値として 3.8⁶⁰⁾ (最大値: 6.55, 最小値:

2.67) を得ている。

この発生装置によると、極めてよくそろった主粒子と、それに付随する副粒子 (Satellite と呼ばれる) とが発生する。

主粒子の粒度分布については May が水と D. B. P. とについて発生した Mist を、酸化マグネシウム粉末で覆われたガラス板上に捕集し、光学顕微鏡で観察して求めた結果があるが、D. B. P. では $\alpha=0.014$ 、水では $\alpha=0.031$ を得ている。副粒子は Rotor に

供給される流量が多くなる程多量に発生するとともに粒径も大きくなるので、単分散 Mist を得るには液量を 1 ml/min 以下にする必要がある。

ところで、この回転円板式では回転数が高い程微細な Aerosol を発生させるところから、初期にはもっぱら Air drive 方式 (Air motor⁵²⁾ 式とも呼ぶ) が用いられたが、この加圧空気を Rotor に吹きつけて高速回転¹⁾させると、図 5-b からわかるように Rotor が固定されていないため、回転が不安定になることがあり、長時間使用では一定状態 (粒径、濃度とも) の Aerosol を発生続けることができない。そこで、Motor drive 方式での高速回転化の問題が生じ、Ryley⁴⁸⁾ が D. C. motor/Inductor alternator の組合せで発生した高周波を特種な Induction motor に供給し、90000 rpm もの回転を円板に与えることに成功し解決を見た。

その後、Lippmann³¹⁾ などは発生装置の小形化をはかるために、Synchronous motor を採用し、AC 1000 cycle を供給することによって 60000 rpm を出せる小形の発生装置を完成した。

尚、近年 May は更に Air drive 方式の改良を重ね⁶²⁾、Rotor を半固定することにより、超高速回転で長時間使用しても一定の Aerosol を発生し続ける発生装置を作り、Air-drive 法の持ち味を、一段と発揮させた。

2・3 溶液または懸濁液の分散による方法

この発生法は、2・2の方法に液体の蒸発操作を加えることにより、主として固体の Aerosol を発生させる場合に用いられている。

溶液から Aerosol が作られた場合、その粒径は (4) 式で

$$D_p=D_0\left(\frac{V_p}{V_0}\right)^{1/3} \quad (4)$$

で表わされるごとく、主として溶質の濃度と Mist の粒径 (D_0) に依存し、粒度分布は Mist の分布がそのまま継承される。従って単分散の Submicron aerosol を発生させるためには、前記単分散 Mist 発生法によるととも

図6 懸濁液分散式での Mist 中に存在する固体粒子の確率³³⁾

に、溶質濃度を低くしなければならないことは当然である。一般によく用いられる溶質としては NaCl ^{17, 38, 44, 56, 59)} を代表とする塩類¹⁸⁾, Methylene blue を代表とする染料^{10, 50, 62)} などがあ

る。懸濁液から Mist を発生し、その液体分を蒸発させて固体の単分散 Aerosol とする方法は、Dow Chemical Co. の Polystyrene latex の出現によって頻繁に行なわれるようになった^{29, 33, 46, 54)}。

その他、均一な Hydrosol をあらかじめ作って^{8, 22, 55)}、これを分散させる方法、また先に記した均一粒径をもった粉体粒子を液体中に懸濁させた後で分散させる方法などをとれば、単分散 Aerosol を発生させることはできる。

しかしそれには、Hydrosol の状態で完全に単離していることが必要条件であり、また散布された各々の Mist の中には 1 ケの固体粒子しか存在することがゆるされない。その場合、1 ケの Mist の中に固体粒子が存在する確率は Poisson 分布に従うところから、次のように表わされる。

$$p(n) = \frac{(\bar{n})^n}{n!} \exp(-\bar{n}) \quad (5)$$

ところで

$$\bar{n} = x \left(\frac{d_0}{d_p} \right)^3 \quad (6)$$

なる関係がある。

そこで、懸濁液中の固体粒子濃度 (x) が 40% と 1% との場合について、Mist 中に存在する固体粒子の確率を計算してみると図 6³³⁾ のようになる。

従って、単離した固体の Aerosol を得るためには、Mist の粒径が大きい場合程、懸濁粒子濃度を低くしなければならないことが明らかである。

① キャリヤーガス流入口	⑩ フューム発生口
② ガラス繊維炉紙	⑪ 石英ガラス板
③ シリコンゴム製パッキング	⑫ サーモ・カップル挿入口
④ 磁製管	⑬ 冷却水入口
⑤ 溶解金属	⑭ 冷却水出口
⑥ グラファイト炉ツボの側口	⑮ 加熱用コイル
⑦ グラファイト炉ツボ	⑯ 高周波出力端子
⑧ 磁製管	⑰ 冷却水
⑨ 石英管	

図7 単分散 Fume generator の構造¹⁹⁾

また発生した Mist は直ちに液体が蒸発されるように処置されないと、Mist 同志の衝突による会合により単離性を悪くする。

3. 化学反応による Aerosol の発生

Fuchs¹³⁾ などが述べているように、化学反応を利用して単分散の Aerosol を発生する方法は少ない。

その中で、 NH_3 と HCl との反応による NH_4Cl aerosol の生成、また SO_3 と H_2O とから H_2SO_4 aerosol の発生などは、古くからよく知られてはいるが、ただ単に両者を反応槽内で混合しただけでは多分散の Aerosol しか得られない。ところで、Fuchs と Oschman¹²⁾ が H_2SO_4 aerosol を発生させるに用いた Jet-gas 混合法によれば単分散のものを作ることができる。

また化学反応を紫外線照射下において行わせて Aerosol を生成させる方法に、Carbonyl iron の蒸気より Fe_2O_3 の Aerosol の発生¹⁷⁾、Methylacrylate monomer より Polymer particle の生成などがある。これらの反応では、蒸気の濃度と紫外線が照射されている反応管内を通過する速度が主成する Aerosol の粒径を支配する。

4. 凝縮機構による Aerosol の発生

Sinclair-LaMer 法は単分散の Submicron aerosol を発生させるための有効な方法として、現状においても極めて広く使用されている^{24, 37, 57, 58)}。

ところで凝縮機構を用いて NaCl より単分散の Aerosol を発生させる場合の問題点についてふれている二、三の論文を紹介する。Espenscheid などは一段加熱自己凝縮法³⁶⁾では、 $\sigma_0=0.24$ ($\bar{d}=0.54\mu$) と多分散 Aerosol しか得られなかったので、LaMer などの他核挿入、再加熱方式にて行ったところ、 $\sigma_0=0.115^{9)}$ ($\bar{d}=0.54\mu$) と均一な球形粒子の発生を見た。つぎに、Kitani などの実験結果であるが、彼らは自己凝縮、再加熱方式で NaCl の Aerosol を発生させたところ、 $\sigma_0=0.10\sim0.12$ ($\bar{d}=0.45\sim1.20\mu$) を得て他核挿入法との間に差がないことを認めた。

同様なことは、Homma¹⁸⁾ が図 7 の発生装置を用いて金属鉛から Aerosol を発生させた場合に、自己凝縮法でも HOTS の見られる単分散 Aerosol を生成したことによって認めた。但し、Carrier gas の流量を多くして、鉛蒸気がルツボ内を通過する時間が短くなると、発生した鉛の Aerosol の α は大きくなり、HOTS の見られない多分散状態となってしまう。

以上の結果から、 NaCl 、 Pb など、室温より極めて高い温度で蒸気圧を示すような物質は、均一な蒸気濃度にした後徐冷することによって、他からの核がなくとも自己凝縮法によって単分散 Aerosol を生成することがわかる。

文 献

- 1) Beams, J.W.: *J. Appl. Phys.*, **8**, 795 (1937)
- 2) Boetjer, A.M. and Vintinner, F.J.: *J. Ind. Hyg. Tox.*, **26**, 101 (1944)
- 3) Church, F.W. and Ingram, F.R.: *J. Ind. Hyg. Tox.*, **30**, 246 (1948)
- 4) Dautrebande, L.: "Microaerosol" (1962) Academic Press, New York.
- 5) Deichman, W.B.: *J. Ind. Hyg. Tox.*, **26**, 334 (1944)
- 6) Dimmock, N.A.: *Nature*, **188**, 686 (1950)
- 7) Druett, H.A. and Sowerby, J.M.: *Brit. J. Ind. Med.*, **3**, 187 (1946)
- 8) Edwards, G.R., Evans, L.F. and LaMer, V.K.: *J. Colloid Sci.*, **17**, 749 (1962)
- 9) Espenscheid, W.F., Matijević, E. and Kerker, M.: *J. Phys. Chem.*, **68**, 2831 (1964)
- 10) Flesch, J.P., Norris, C.H. and Nugent, A.E.: *Amer. Ind. Hyg. Assoc. J.*, **28**, 507 (1967)
- 11) Friedlander, S.K. and Johnston, H.F.: *Ind. Eng. Chem.*, **49**, 1151 (1957)
- 12) Fuchs, N.A. and Oschman, N.: *Acta Phys.-chim. U.S.S.R.*, **3**, 61 (1935)
- 13) Fuchs, N.A. and Sutugin, A.G.: "Aerosol Science" (edited by Davies, C.N.) (1966) Academic Press, London and New York.
- 14) Green, H.L. and Lane, W.R.: "Particulate Clouds: Dusts, Spokes and Mists" (1964) Spon Ltd. London.
- 15) Greenough, G.K.: *J. Sci. Instrum.*, **37**, 123 (1960)
- 16) Harris, W.J.: *J. Sci. Instrum.*, **41**, 636 (1964)
- 17) Homma, K., Koishi, S. and Sakabe, H.: *Bull. Nat. Inst. Ind. Health*, No. 2, 57 (1959)
- 18) Homma, K.: *Ind. Health*, **4**, 129 (1966)
- 19) 本間克典: 労働衛生工学, **3**, 19 (昭和 39 年)
- 20) 本間克典: 労働衛生工学, **8**, 23 (昭和 43 年)
- 21) 井伊谷 綱一: 粉体工学研究会資料, No. 18 (1962)
- 22) Jander, G. and Winkel, A.: *Kolloidzshr.*, **83**, 5 (1933)
- 23) Kelly, J.L., Kleinstaub, A. T., Clinton, S. A. and Dean, O. C.: *Ind. Eng. Chem. Proc. Des. Dev.*, **4**, 213 (1965)
- 24) Kerker, M., Matijević, E., Espenscheid, W.F., Farone, W.A. and Kitani, S.: *J. Colloid Sci.*, **19**, 213 (1964)
- 25) Kitani, S. and Ouchi, S.: *J. Colloid Interface Sci.*, **23**, 200 (1967)
- 26) 木谷 進, 三神 尚: 化学工学, **25**, 206 (1961)
- 27) Kunkel, W.B.: *J. Appl. Phys.*, **21**, 820 (1950)
- 28) Lane, W.R.: *J. Sci. Instrum.*, **24**, 98 (1947)
- 29) Langer, G. and Lieberman, A.: *J. Colloid Sci.*, **15**, 357 (1960)
- 30) Lauterbach, K.E., Hayes, A.D. and Coelho, M.A.: *A.M.A. Arch. Ind. Health*, **13**, 156 (1956)
- 31) Lippmann, M. and Albert, R.E.: *Amer. Ind. Hyg. Assoc. J.*, **28**, 501 (1967)
- 32) Lloyd Davies, T.A.: *Brit. J. Ind. Med.*, **3**, 111 (1946)
- 33) Madelaine, G. and Morel, C.: *Ann. Occup. Hyg.*, **8**, 135 (1966)
- 34) Mason, B.J., Jayaratne, O.W. and Wood, J.D.: *J. Sci. Instrum.*, **40**, 247 (1963)
- 35) Mason, B.J. and Brownscombe, J.L.: *J. Sci. Instrum.*, **41**, 258 (1964)
- 36) Matijević, E., Espenscheid, W.F. and Kerker, M.: *J. Colloid Sci.*, **18**, 91 (1963)
- 37) Matijević, E., Kitani, S. and Kerker, M.: *J. Colloid Sci.*, **19**, 223 (1964)
- 38) Matteson, M.J. and Stöber, W.: *J. Colloid Interface Sci.*, **23**, 203 (1967)
- 39) May, K.R.: *J. Appl. Phys.*, **20**, 932 (1949)

- 40) May, K. R.: *J. Sci. Instrum.*, **43**, 841 (1966)
- 41) 抜山四郎, 棚沢泰: 日本機械学会論文集, **4**, 86 (昭和13年), *Ibid.*, **4**, 138 (昭和13年), *Ibid.*, **5**, 131 (昭和14年), *Ibid.*, **5**, 136 (昭和14年)
- 42) Pearson, R. and Langer, G.: *Nature*, **187**, 235 (1960)
- 43) Perkins, W. A., Leighton, P. A., Grinnell, S. W. and Webster, F. X.: *Proc. 2nd Nat. Air Pollution Symp. U.S.A.* (1962)
- 44) Preining, O., Sheesley, D. and Djordjevic, N.: *J. Colloid Interface Sci.*, **21**, 458 (1967)
- 45) Princi, F., Church, F. and McGilvray, W.: *J. Ind. Hyg. Tox.*, **31**, 106 (1949)
- 46) Reist, P. C. and Burgess, W. A.: *J. Colloid Interface Sci.*, **24**, 271 (1967)
- 47) Röker, R.: *Staub*, **48**, 273 (1967)
- 48) Ryley, D. J.: *J. Sci. Instrum.*, **35**, 237 (1958)
- 49) Ryley, D. J. and Wood, M. R.: *J. Sci. Instrum.*, **40**, 303 (1963)
- 50) Schwendiman, L. C., Postma, A. K. and Coleman, L. F.: *Health Phys.*, **10**, 947 (1964)
- 51) Sihrenk, H. H.: U.S. Bureau of Mines I.C. 7086 (1939)
- 52) Sonkin, L. S., Lipton, M. A. and Van Hoesen, D.: *J. Ind. Hyg. Tox.*, **28**, 273 (1946)
- 53) Stead, F. M., Dernehl, C. U. and Nav, C. A.: *J. Ind. Hyg. Tox.*, **26**, 90 (1944)
- 54) Stern, S.: *J. Appl. Phys.*, **30**, 952 (1952)
- 55) Stöber, W. and Fink, A.: *J. Colloid Interface Sci.*, **28**, 62 (1968)
- 56) 鈴木間左支, 渡辺征紀, 木郷昭三, 大畑勉: 材料, **17**, 564 (昭和43年)
- 57) Swift, D. L.: *Ann Occup. Hyg.*, **10**, 337 (1967)
- 58) Takahashi, K. and Iwai, S.: *J. Colloid Interface Sci.*, **23**, 113 (1967)
- 59) Walkenhorst, W. and Dautrebande, L.: *Staub*, **24**, 505 (1964)
- 60) Walton, W. H. and Prewett, W. C.: *Proc. Phys. Soc.*, **B62**, 341 (1949)
- 61) Watson, H. H.: *Brit. J. Appl. Phys.*, **9**, 78 (1958)
- 62) Whitby, K. T., Lundgren, D. A. and Peterson, C. M.: *Int. J. Air Wat. Pollu.*, **9**, 263 (1965)
- 63) Williams, C. E. and Battista, W. P.: *J. Ind. Hyg. Tox.*, **22**, 152 (1940)
- 64) Wright, B. M.: *J. Sci. Instrum.*, **27**, 12 (1950)

XXVIII-2. 煙霧体の粒度分布則*

高 橋 幹 二**

1. ま え が き

煙霧体は、元来、物質の存在状態としては、不安定な、いわば過渡的なものであって、その性状はいどの差こそあれ、時間的に変化しているものとみるのが普通である。このことは、煙霧体粒子の一つ一つについてもそうであるし、系全体についても同様である。しかし、その変化は全く無秩序に行なわれているわけではなく、それ自身の、あるいはその環境の条件に応じた、種々の物理的、化学的法則性にもとづいており、全体的にみても、その変化の過程には、やはりある種の統計的法則性が存在しうる。

煙霧体の性質は、形、大きさ、比重、化学組成、濃度など、粒子の性状と、温度、圧力など、媒質気体の性状とによって決まるが、通常の存在状態において、とくに微小粒子の場合には、その動力学的性質は、主として、粒子の大きさと濃度によって左右される。すなわち、粒度分布と粒子数濃度とは、煙霧体の物理的性質を表わす最も支配的な因子であり、換言すれば、粒度分布における法則性は、煙霧体粒子の動力学的性質が集約的に表現されたものであるといえる。

しかしながら、煙霧体粒子の粒度分布が、その普遍的法則性という観点から問題とされてきたのはごく最近のことであって、その研究成果はまだ多くはない。したがって、ここでは、煙霧体以外の分散粒子の粒度分布に関するかなり古くからの研究成果についても、随時これを参照しながら、主として微小煙霧体粒子の粒度分布における法則性について概説する。

2. 実測例からみた分散粒子の粒度分布

煙霧体粒子の粒度分布については、これまで、気象学、コロイド学、化学工学、衛生工学、産業医学などの各分野で問題にされ、粉体粒子の場合と同様に、数多くの測定が行なわれてきた。粒度分布式としても、よく知られているように、対数正規分布や Rosin-Rammler の式などが広く用いられてきた²⁶⁾。

気象学の分野では、雨滴の生成核としての煙霧体粒子についてかなり古くからの研究^{27-31, 44, 64, 67)}がある。粒径測定には、電子顕微鏡法、荷電量測定法、光散乱法などが用いられてきたが、これらの場合、問題とされる粒子が $r=10^{-2}\mu\sim 10\mu$ ていどの微小粒子であって、全粒子を効果的に測定するにはかなりの困難があった。しかし、Junge¹¹⁾ は、数多くの実測にもとづき、 $r>0.1\mu$ の

* 昭和43年7月25日 受理

** Kanji Takahashi 京都大学 工学研究所