

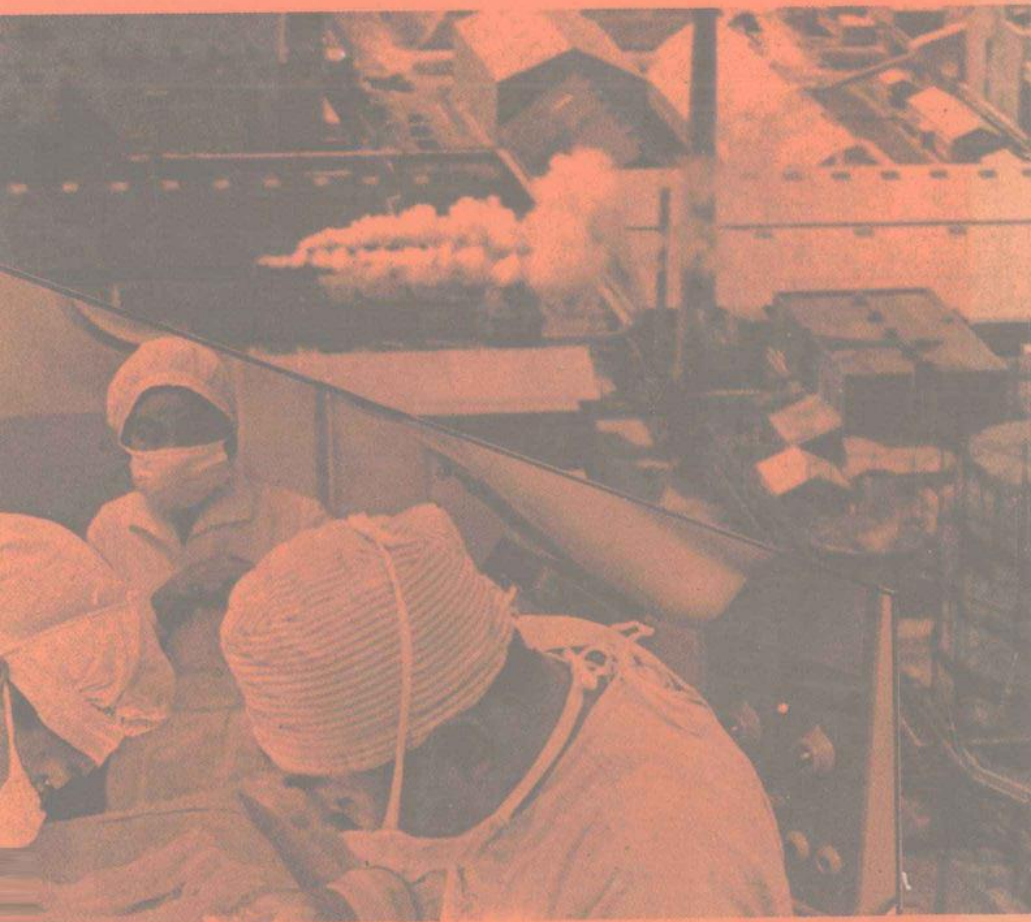
空氣淨化技術用書

氣溶膠工學基礎

Principles of Aerosol Science

一、空氣污染與防治

二、空氣淨化無塵菌



高正雄譯著

高橋幹二編著

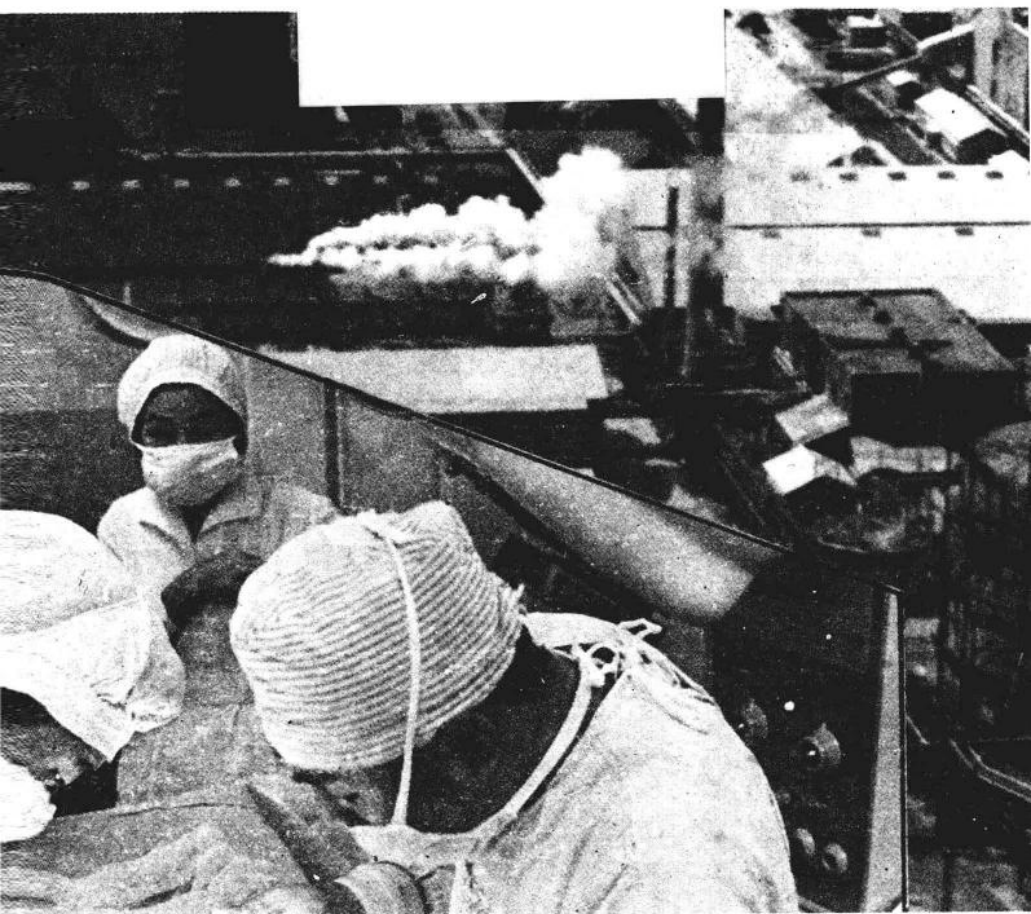
空氣淨化技術用書

氣溶膠工學基礎

Principles of Aerosol Science

一、空氣污染與防治

二、空氣淨化無塵菌



高正雄譯著

高橋幹二編著

中華民國七十四年三月一日出版

氣溶膠工學基礎

原著者：高 橋 幹 二

譯著者：高 正 雄

出版者：復 漢 出 版 社

地址：台南市德光街六五一號
郵政劃撥三一五九一號

發行人：沈 岳 林

印刷者：國 發 印 刷 廠

版權所有
翻印必究

B 平裝 二四〇元
精裝 二八〇元

本社業經行政院新聞局核准登記局版台業字第〇四〇二號

序

氣溶膠的研究基礎大別分爲物理或力學方面與化學或物理化學方面，本書以「微小氣溶膠粒子的物性與舉動」爲中心，除了化學領域外，盡量在廣範圍研討基礎事項。實用事項另詳應用篇的「氣溶膠工學應用」。

氣溶膠學是「究明各種環境的氣溶膠粒子之性狀和舉動，也着眼於與其他相的相互作用，評價或控制之的科學技術領域」，已大致建立相稱的體系和內容，不過，仍屬新興的科學技術，進步也迅速。

最近的大氣污染問題日趨嚴重，人類生存環境的維護日趨急切，更痛感此項分野研究和技術發展的重要性。

但願本書的出版，能對有志研究此學科的人士提供適當的方便。

編者

1985年元月

記 號 表

【本書使用的主要記號】

A	: Cunningham 的補正常數	$K(\bar{K}, K_{nv}), K_R$	: 動力學的形狀係數; 阻力形狀係數
a	: 粒子半徑		
B	: 粒子的移動度	K_A, K_B, K_L, K_T	: 音響凝集常數, 布朗——, 速度斜度——, 亂流——
C	: 蒸氣(粒子)的質量濃度		
C_e	: Cunningham 的補正項		
C_D	: 阻力係數		
D	: 擴散係數(布朗運動的)	$K_{abs}, K_{ext}, K_{scat}$	: 光散射的吸收係數; ——衰減係數; ——散射係數
d_p	: 粒子直徑(在 d 附加各種腳字)		
E	: 粒子捕集效率; 電場強度		
e	: 電氣素量	K_n	: Knudsen 數
e	: 自然對數之底	k	: Boltzmann 常數
F	: 外力	L	: 凝結(蒸發)潛熱
F_D	: 抗力	l, l_B, l_i	: 氣體分子的平均自由行程; 粒子的——, 離子的——
f	: Fanning 的摩擦係數; 周波數		
f_D	: Doppler 周波數變位	M	: 氣體的分量
G	: 氣體分子的熱運動速度	m	: 運動量
g	: 重力加速度; 分子數	m	: 分子或粒子的質量; 光的折射率
I	: 音波強度; 核形成率; 光散亂強度	N	: 粒子數濃度
Im	: 複素數的虛數部	n	: 分子或粒子的個數濃度; 折射率的實數部; 物質的模耳數
i	: 虛數單位, van't Hoff 因子		
i_1, i_2	: 光散亂強度的偏光成分	n'	: 折射率的虛數部

P	: 壓力; 光的偏光比	α_c	: 凝結機率或附着機率
p	: 蒸氣壓; 帶電數; 衝撞頻度	α_i	: 離子對的再結合係數
Q	: 流量; 熱量	α_m, α_t	: 氣體分子的運動量輸送 accommodation factor, ——能量輸送——
$Q_{abs}, Q_{ext}, Q_{scat}$	: 光的吸收斷面積; 衰減——; 散射——	α_s, α_v	: 粒子的表面積形狀係數, ——體積形狀係數
q	: 帶電量 ($= pe$)	β	: 旋轉橢圓體的長短徑比; 分子的凝結速度; 粒子的沈着常數
R	: 曲率半徑; 容器半徑; 圓管半徑; 衝撞半徑	β_D, β_E	: 擴散凝集常數補正因子; 帶電粒子凝集常數補正因子
R	: 氣體常數	γ	: 表面張力; 模耳分率
Re, Re_s	: Reynolds 數 ($2va/\nu$), ($2ux/\nu$)	δ	: 微小量記號; 微小層厚度; 式(2.6)的因子
Re	: 複素數的實數部	ϵ	: 電介質常數; 亂流能量消費; 亂流擴散係數
S	: 粒子表面積; 蒸氣壓飽和度或過飽和度	η	: 離子與粒子的結合係數
S_c	: Schmidt 數 ($= \nu / D$)	κ	: 不整形粒子的動力學補正因子; Kármán 常數
s	: 粒子飛程	λ	: 熱傳導率; 亂流尺度; 光的波長; 離子的電導度
T	: 溫度	μ	: 粘性係數; 導磁係數
t	: 時間	ν	: 動粘性係數
U, u	: 速度 (媒質氣體的)	ρ	: 密度; 散射光的偏光比
u_*	: 摩擦速度	σ	: 電導度; 標準偏差
V, v	: 速度 (粒子的); 體積 (粒子的)	τ	: 粒子的緩和時間 ($= mB$)
V_g, v_g	: 粒子的沈着速度	τ_s	: 剪斷力
v_m	: 氣體的分子容	τ_T	: 濁度
v_s	: 粒子的重力沈降速度	Φ, ϕ	: 輸送通量; 粒子的體積濃
Z	: 散射光的非對稱度		
α	: 凝集效率; 分子的蒸發速度; 光散射粒徑參數 ($= 2\pi a/\lambda$)		

度

φ : 流動的函數

ψ : 平衡粒度分布函數

ω : 角速度；角周波數

(脚字)

ae : 空氣力學的

B : 布朗運動

D : 擴散

E : 有效

f : 媒質氣體 (流體)

g : 氣體

I : 慣性力

i : 離子

p : 粒子

T, t : 亂流, 熱

x, y, z : 直角座標的各方向

$+$, $-$: 正, 負電荷

(肩字)

$+$: 無次元化量

$*$: 平衡狀態量

目次

第1章 導論	1
1.1 氣溶膠的定義與分類	1
1.2 氣溶膠粒子的基本性質	2
1.3 大氣的氣溶膠粒子	5
1.4 氣溶膠粒子對人體的害處	6
1.5 有用的氣溶膠	6
第2章 氣溶膠粒子的動力學	9
2.1 阻力與運動方程式	9
2.1.1 阻力與移動度	9
2.1.2 運動方程式	12
2.2 重力場的運動	12
2.2.1 重力場的一般運動	12
2.2.2 水平運動	13
2.2.3 鉛直運動	15
2.2.4 終端沈降速度	16
2.3 不整形粒子的動力學性質	17
2.3.1 旋轉橢圓體的動力學性質	17
2.3.2 動力學形狀係數	21
2.4 慣性力所致的運動	24
2.4.1 圓運動	24
2.4.2 慣性衝撞	25

2.5	振動場的粒子運動	27
2.6	布朗運動	31
2.6.1	布朗運動模型	31
2.6.2	粒子的平均自由行程	33
2.6.3	有關粒子熱運動的數值	34
2.7	熱泳動與擴散泳動	34
2.7.1	熱泳動	34
2.7.2	擴散泳動	38
第3章	氣溶膠的擴散與沈着	41
3.1	擴散方程式	41
3.2	粒子的擴散沈着	43
3.2.1	沈着速度與邊界條件	43
3.2.2	擴散沈着之例	44
3.3	層流中的沈着	49
3.3.1	層流邊界層內的擴散沈着	49
3.3.2	往流路內面的擴散沈着	52
3.3.3	流路內的重力沈降與擴散沈着	56
3.4	亂流中的沈着	59
3.4.1	亂流中的粒子輸送	59
3.4.2	粒子的慣性小時	59
3.4.3	考慮粒子的慣性時	65
3.5	容器內氣溶膠粒子的變化	69
3.5.1	在靜場的凝集與沈着	69
3.5.2	在亂流場的沈降與擴散沈着	70
第4章	粒子的凝集與蒸氣的凝結	73
4.1	粒子的凝集	73
4.1.1	布朗運動所致的凝集	73
4.1.2	速度斜度所致的凝集	80
4.1.3	在亂流場的凝集	81

4.1.4 振動場的凝集.....	86
4.2 蒸氣、氣溶膠粒子的混合物.....	87
4.2.1 蒸氣往粒子的輸送速度.....	87
4.2.2 粒子的凝結成長與蒸發消滅.....	90
4.2.3 粒子的成長與粒度分佈的變化.....	93
第5章 帶電粒子.....	94
5.1 氣溶膠粒子的帶電.....	94
5.1.1 大氣中的離子.....	94
5.1.2 單極離子所致粒子的帶電.....	96
5.1.3 正負兩離子所致粒子的帶電與平衡帶電分佈.....	102
5.2 帶電粒子的運動.....	106
5.2.1 電場內的粒子運動.....	106
5.2.2 在帶電氣溶膠內的粒子運動.....	107
5.2.3 帶電粒子的凝集.....	109
5.3 帶電裝置與移動度分析器.....	110
5.3.1 帶電裝置.....	110
5.3.2 移動度分析器.....	112
5.3.3 帶電粒子的粒徑測定.....	113
第6章 氣溶膠粒子的粒度分佈.....	117
6.1 粒子的大小.....	117
6.1.1 不整形粒子的大小.....	117
6.1.2 有關粒子大小的統計值.....	118
6.2 粒度分佈函數.....	120
6.2.1 粒度分佈函數與矩.....	120
6.2.2 各種粒度分佈函數.....	121
6.2.3 對數正規分佈時的統計值.....	127
6.3 粒度分佈變化.....	129
6.3.1 粒子的生成機構與粒度分佈.....	129
6.3.2 粒度分佈的時間性變化.....	132

6.4 平衡粒度分佈	136
6.4.1 以次元解析檢討	137
6.4.2 Self-Preserving Distribution Function	139
第7章 氣溶膠粒子所致的光散射	148
7.1 膠體粒子的光散射	148
7.2 光散射的理論	149
7.2.1 散射光的角度分佈	149
7.2.2 光的散射和衰减	153
7.2.3 活動粒子的光散射	155
7.3 把光散射應用於粒子測定	156
7.3.1 單分散粒子的粒徑測定	156
7.3.2 多分散粒子的粒度分佈測定	161
7.3.3 粒子數濃度的測定	165
第8章 氣溶膠的生成	167
8.1 液滴的蒸氣壓	167
8.1.1 單成分液滴	167
8.1.2 溶液滴的蒸氣壓	168
8.2 蒸氣的凝結與粒子的生成	169
8.2.1 均質相核形成	169
8.2.2 不均質相核形成	174
8.3 氣溶膠發生法	175
8.3.1 蒸發凝結型mist發生裝置	176
8.3.2 蒸發凝結型fume發生裝置	183
8.3.3 噴霧型噴霧器	184
8.3.4 超音波噴霧器	188
8.3.5 離心分離型分散裝置	189
8.3.6 振動孔口型分散裝置	190
8.3.7 以直接加熱法發生fume	191
8.3.8 利用流動層發生粉塵	192

8.3.9 試驗用標準粒子的發生法	192
-------------------	-----

8.3.10 放射性粒子的形成	194
-----------------	-----

第9章 氣溶膠粒子的測定 195

9.1 各種測定法的特色和適用範圍	195
-------------------	-----

9.2 粒子的抽樣捕集	196
-------------	-----

9.2.1 用濾紙捕集	196
-------------	-----

9.2.2 用熱泳動捕集	199
--------------	-----

9.2.3 用靜電集塵方式捕集	199
-----------------	-----

9.2.4 其他方法	200
------------	-----

9.3 粒子的顯微鏡觀察與測定	200
-----------------	-----

9.3.1 顯微鏡觀察	200
-------------	-----

9.3.2 粒徑測定法	203
-------------	-----

9.4 粒子濃度與粒度分佈的測定	204
------------------	-----

9.4.1 質量濃度的連續測定	204
-----------------	-----

9.4.2 串列衝撞器	205
-------------	-----

9.4.3 離心型分級捕集裝置	208
-----------------	-----

9.4.4 光散射計數器	209
--------------	-----

9.4.5 凝結核測定器 (CNC)	212
----------------------	-----

9.4.6 靜電式粒度分佈測定器 (EAA)	213
--------------------------	-----

9.5 測定值的誤差與可靠性	213
----------------	-----

附 錄	217
-----	-----

第 1 章 導論

1-1 氣溶膠的定義與分類

氣溶膠 (aerosol) 可定義為“分散相由固體或液體粒子組成，分散媒為氣體組成的膠體 (colloid) 系”。工學上所謂的煙霧質或煙霧體等也大致與此相同。此種物質又可稱為“空中分散粒子系 (aerodisperse system)”，不是物質的安定存在狀態。特別稱為氣溶膠時，專指粒徑相當小，全體持續該狀態達相當時間。

氣溶膠與吾人日常生活、生產活動有密切的關係，依其形態、性質而有各種通俗的稱呼，先着眼於發生過程或性狀而分類如下：

①粉塵 (dust)：固形物不改變化學組成，只形狀、大小改變，成為粒狀分散於空氣中者。主要因粉碎、研磨、穿孔、爆破等物理破碎過程而發生。常是球狀、針狀、薄片狀等形狀、大小都不均勻，大小大都 $1\text{ }\mu\text{m}$ 以上。

②蒸煙 (fume)：固體蒸發而凝結成粒子者，發生於金屬加熱熔融、熔接、熔斷、火花等情形，在此種粒子生成過程，常是物理作用加上化學作用，在空氣中常成氧化物，呈球狀或結晶狀，粒徑極小，常為 $1\text{ }\mu\text{m}$ 以下。

③煙 (smoke)：燃燒時發生的煙類，常是含有有機物不完全燃燒物、灰分、水分等的有色性粒子，各粒子接近球形，常凝集成絨毛狀。

④液霧 (mist)：一般總稱微小的液體粒子，包括液體蒸發凝結者、因液面破碎或噴霧等而分散者，形狀為球形，粒徑因生成過程的差異而頗有幅度。

此外，在氣象學上，依大小分類大氣中的粒子，分別稱為 Aitken 粒子 (Aitken particle : $0.001 \sim 0.1 \mu\text{m}$)、大粒子 (large particle : $0.1 \sim 1 \mu\text{m}$)、巨大粒子 (giant particle : $1 \sim 100 \mu\text{m}$)。地表附近的氣象、塵象主要依視程、色等而用下示術語。

(a) 霧 (fog) : 極小水滴浮於大氣中的現象，水平視程未滿 1 km 者。

(b) 霧 (mist) : 與霧同樣，水平視程 1 km 以上者。

(c) 煙霧 (haze) : 極小的乾粒子浮於大氣中的現象，在稍黑的背影中呈藍紫色，在明亮背影中呈黃褐色。雖是同樣的現象，污染源明亮時為煙，否則為煙霧。

大氣污染物的氣溶膠粒子大都為它們的混合物，smog 為其代表，這是 smoke 與 fog 的合成語，內容無明確的定義，指被煤煙污染的霧。Los Angels 型 smog 是石油系燃料煙霧與煙組成的大氣污染現象，有人認為應稱為 smaze (= smoke + haze)。煤炭系燃料所致的煤煙與霧生成者另稱 London 型 smog，日本的 smog 大都為兩者的合成現象。

日本的大氣污染術語如下：

① 煤煙：硫氧化物、煤塵及其他有害物質。

② 粉塵：隨物體的破碎、選別等機械性處理或堆積而發生或飛散的物質，又稱 dust，浮游於氣體中者稱為浮游粉塵。

③ 浮游粒子狀物質：浮游於大氣中的粒子狀物質，粒徑 $10 \mu\text{m}$ 以下者。

以上主要敘述無生物粒子，但在地表附近的大氣或生活環境中，尚有花粉、孢子等很多生物系粒子也成為氣溶膠。

1-2 氣溶膠粒子的基本性質

膠體的性質取決於其分散相、分散媒的種類與其組合。水溶膠 (hydrosol) 與氣溶膠的物理性質差異在於其分散媒的物理性質，例如在空氣與水有表 1.1 的差異，空氣中的粒子運動比水中活潑，物理性狀不安定。

分散相的粒子性質取決於粒子的形狀、大小、密度、粒子數濃度等

表 1-1 空氣與水的主要物理性質 (1 氣壓)

	空 氣		水	
	0°C	20°C	0°C	20°C
密度 ¹ (g/cm ³)	0.001293	0.001205	0.9999	0.9982
粘性係數 (g/cm·sec)	1.710×10^{-4}	1.809×10^{-4}	0.01794	0.01009
動粘性係數 (cm ² /sec)	0.1322	0.1501	0.01794	0.01011
分子的平均自由行程 ² (cm)	5.89×10^{-8}	6.45×10^{-8}		

物理因子與其化學組成，影響其物理舉動的是粒徑（或粒度分佈）和粒子數濃度，特別是在微小氣溶膠粒子，除了重視凝集粒子問題的特別場合之外，起因於形狀的特性不成問題，通常可當成球形。

粒徑如圖 1.1 所示，接近分子或離子的大小，從 $0.001\mu\text{m}$ 到 $100\mu\text{m}$ ，遍及 10^5 。大小約 $0.1\mu\text{m}$ 者與分散媒氣體分子的平均自由行程、可視光線的波長大致同等，因而，以 $0.1\mu\text{m}$ 程度為分界，在其以下的粒子與其以上的粒子，其動力學研討或物理現象會頗有差異。

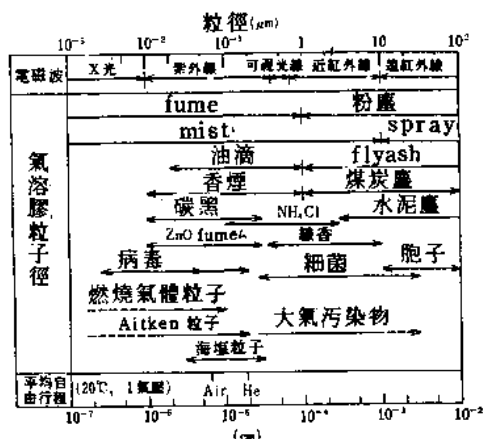


圖 1-1 粒子狀物質的粒徑範圍

密度常在 $0.1 \sim 10\text{g/cm}^3$ 的範圍內，在討論重力或慣性力之類有關粒子質量的問題時，為相當重要的因子。甚大於分散媒空氣的密度，在此意義下，密度的差異也不成大問題。氣溶膠粒子的表觀密度在凝集粒子固不待言，就是在單粒子也頗異於發生母體物質的值，須加注意。表 1.2 是大氣中一般氣溶膠物質的密度，如表 1.3 所示，實驗室內發生

的粒子也常頗異於母體物質的密度。

表 1-2 氣溶膠粒子母材的密度

密度 (g / cm^3)	物 質
0 ~ 1	木材粉, 燃燒灰等
1 ~ 1.6	樹脂類, 橡膠類, 有機物, 水和塩類
1.6 ~ 2.6	砂土粉, 玻璃纖維, 塩類, 塗料等
2.6 ~ 3.3	岩石粉, 滑石等
> 3.3	石棉, 金屬粉, 塩類等

表 1-3 氣溶膠粒子密度

物質	密度 (g/cm^3)		發生方法
	母材	粒子 (表觀)	
Au	19.3	0.2 ~ 8.0	放電
Ag	10.5	0.64 ~ 4.22	放電
Hg	13.6	0.07 ~ 0.8	加熱熔融
MgO	3.6	0.24 ~ 3.48	燃燒金屬
MgCl ₂	5.4	0.62 ~ 4.3	加熱熔融
CdO	6.5	0.17 ~ 2.8	放電

在各種環境大氣或生產現場的氣溶膠粒子質量濃度如圖 1.2 所示，個數濃度從一般清淨空氣的 $10 \sim 10^2$ 個 / cm^3 到發生源附近的 $10^6 \sim 10^{10}$ 個，特別是無塵室把空氣清淨化到 $0.5 \mu\text{m}$ 以上的粒子為 1 個 / l

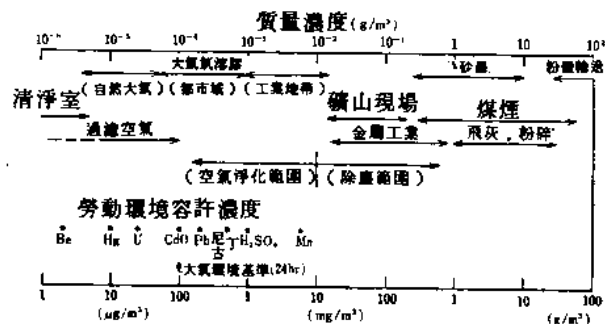


圖 1-2 粒子狀物質的濃度範圍

以下，粒子濃度是指單位體積中的粒子平均量（質量或個數），就微小體積及微小時間間隔而言，此值常變動。體積、時間間隔愈微小時，其變動愈顯著。

1-3 大氣的氣溶膠粒子

大氣中有很多自然狀態發生的氣溶膠粒子，固形粒子的總量約 10^7 ton，全大氣重量約 6×10^{15} ton，其平均濃度為 ppb 程度，大都含於地表約 2 km 的大氣層（混合層），Aitken 粒子的平均濃度 $10^2 \sim 10^3$ 個 / cm^3 。在地表附近，很受自然或人工發生源的影響，地域、時間的變動大，其濃度在地表附近為 $10^3 \sim 10^5$ 個，圖 1.3 是這些大氣中粒子的角色，在物理化學上，其表面吸着氣體物質，或成為這些氣體對化學反應的觸媒。

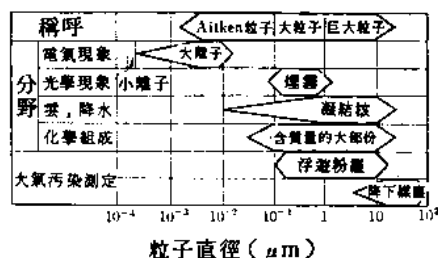


圖 1-3 大氣中的氣溶膠粒子功用

此種粒子大都從海洋和陸地供給，此外，宇宙塵供給大氣中者也不可漠視。海面的波浪或泡使海水滴分散於空中，乾燥成微細的塩類粒子——亦即海塩粒子。海岸附近有很多此種粒子，但地表面全體 $0.1 \mu\text{m}$ 以上的海洋性粒子最多 $1 \sim 10$ 個 / cm^3 。

內陸性粒子是火山灰、地表砂塵、花粉等生物系粉體藉蒸發或風分散於大氣中，包括 Na，K，C，Mg， SO_4^{2-} ， NH_4^{2-} 等各種成分，Aitken 粒子大部份為內陸性。

此種粒子最終藉大氣的自淨作用——亦即重力沈降或降水（雨、雪）的洗淨效果，還原於地表或海面。以大氣自淨速度除大氣中全粒子所得的「平均滯留時間」約 2 週，但詳情不明。