

クリーンルーム内の浮遊微粒子計測法に関する研究 ——エアロゾル濃度制御供給装置の開発を中心として——

Study on Measuring Method for Airborne Particles in Clean Room

村上 周三*・加藤 信介*・田中 幸彦**・宗像 康光*
Shuzo MURAKAMI Shinsuke KATO Yukihiko TANAKA Yasumitsu MUNAKATA

1. はじめに

空気中の浮遊微粒子(主に粒径 $0.1 \mu\text{m}$ 以上)を極力除去したクリーンルームにおいては、高清浄度の空間を効率よく維持する必要がある。このため作業等に伴い空間内で発生する浮遊微粒子の拡散性状を予測し、制御することが重要である。本研究はこうした浮遊微粒子の拡散性状に関する研究において基礎となる空気中の浮遊微粒子計測法について検討する。

2. エアロゾルの計測の問題点 (室内浮遊微粒子分布計測のための)

粒径 $0.1 \mu\text{m}$ 以上の浮遊微粒子の空間分布を調べる方法にはさまざまなものがある。その1つとして、室内にレーザー光を照射し、浮遊微粒子の散乱光を利用して可視化し直接その全体的な様相を知る手法も開発されてい

る。^{1,2)} 一般には、室内の計測点よりサンプリング管を用いて連続的にサンプル空気を粒子計数器に導き、その粒径、粒子数を計測する方法が広く用いられている。この場合サンプリング管内で粒子が凝集、沈着しその粒径分布、粒子数が変化する可能性のあることが問題となる。こうした計測方法の検討には、粒径と粒子数濃度が既知のエアロゾルが用意されることが望ましい。本研究では、こうしたエアロゾルを容易に得ることを目的としたエアロゾル濃度制御供給装置を開発し、またこの装置を用いて、サンプリング管内の粒子数損失に関する実験および理論的な検討を行う。

3. エアロゾル濃度制御供給装置

3.1 エアロゾル濃度制御供給装置の概要

記 号

d	: チューブ内径	(m)
F_c	: 遠心力	(N)
g	: 重力加速度	(m/s^2)
K	: 凝集定数	(m^3/s)
K_B	: ブラウン凝集定数	(〃)
K_T	: 乱流凝集定数	(〃)
K_{T1}	: $\epsilon_0=1$ のときの乱流凝集定数	(m^3/s)
L	: チューブ長さ	(m)
m	: 粒子の質量	(kg)
n	: 粒子数濃度	($\text{個}/\text{m}^3$)
n_0	: 初期粒子数濃度	($\text{個}/\text{m}^3$)
Q	: 送风量	(m^3/min)
r	: 半径	(m)
t	: 時刻	(s)
\bar{u}	: チューブ内平均流速	(m/s)
V_c	: 遠心沈降速度	(〃)
V_g	: 重力沈降速度	(〃)
V_t	: 終末沈降速度	(〃)
ϵ_0	: 単位体積当たりのエネルギー逸散	(m^2/s^3)

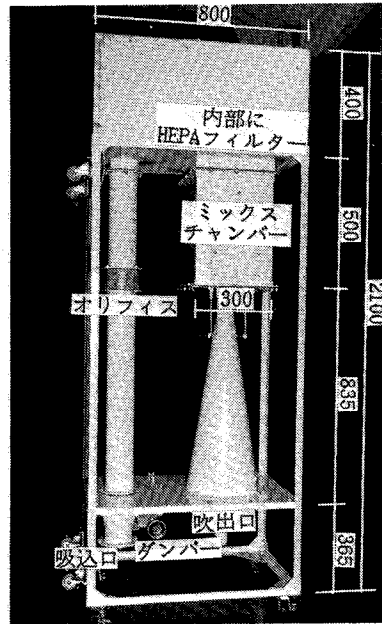


写真1 エアロゾル濃度制御供給装置
(粒子発生部を除く) (単位 mm)

* 東京大学生産技術研究所 付属計測技術開発センター
** 東京大学 共同研究員

研究速報

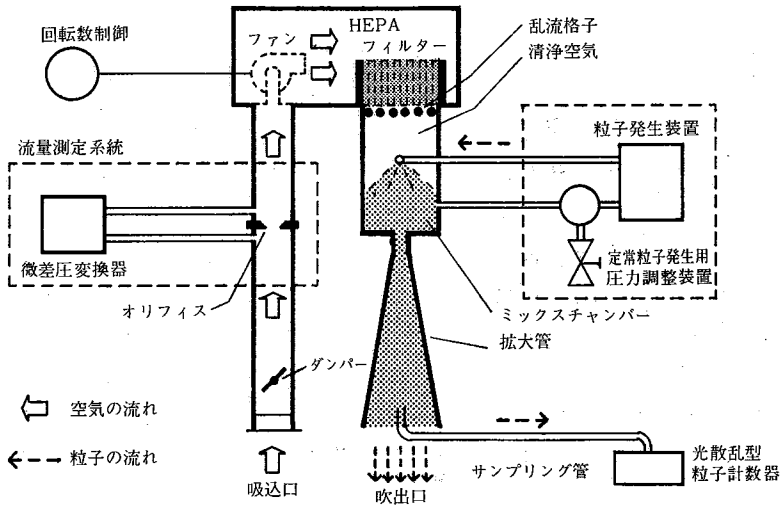


図1 エアロゾル濃度制御供給装置

エアロゾル中では、粒子がブラウン運動、乱流、重力等により運動、衝突し常に凝集、沈着現象が生じている。したがって粒径、粒子数濃度が既知のエアロゾルを較正用に長期保存しておくことは不可能であり、較正等に当たっては必要に応じて望ましい性状のエアロゾルを作製することになる。しかし粒子発生量を制御して定められた粒子数濃度 (3.5×10^9 個/ m^3 (1×10^8 個/ ft^3) \sim 35個/ m^3 (1個/ ft^3)) のエアロゾルを作製することは非常に困難である。そのため次善の方法として、既知粒径の粒子をその発生量を細かく制御することなく大量に発生させ、これを必要な濃度が得られるまで希釈して較正用エアロゾルを作製することを考える。今回試作したエアロゾル濃度制御供給装置(以下供給装置と略す。)の外観を写真1に示す。この供給装置は、①定期的にかつ粒径分布の安定したエアロゾルを供給する。②エアロゾルを任意の倍率で希釈することができる。③粒子数濃度零の清浄空気も供給可能とする等の特徴を持つ。

図1に供給装置のシステム図を示す。送風機のファンの回転数制御とダンパー制御により、任意の量の清浄空気をミックスチャンバー内に導く。ここで一定量の粒子を粒子発生装置より導き、清浄空気と均一に混合して任意の希釈倍率のエアロゾルを供給する。このとき、発生粒子を定常に導くには、ミックスチャンバー内の静圧と粒子発生装置の粒子乾燥部にあるドレン(大気開放)との差圧を零にする必要がある。そのために圧力調整装置を設けている。なお粒子は、既知粒径の単分散ポリスチレン標準粒子の懸濁液をアトマイザー内で噴霧し、乾燥させて定常発生させている。またミックスチャンバーは

表1 凝集定数

粒径 (μm)	ブラウン凝集定数 (K_B) (m^3/s 個)	乱流凝集定数 (K_T) (m^3/s 個)
0.3	4.5×10^{-16}	5.3×10^{-19}
1.0	3.3×10^{-16}	2.0×10^{-17}
5.0	3.0×10^{-16}	2.5×10^{-15}

ただし、 $K_T = K_{T1} \cdot \epsilon_0^{1/2}$ において $\epsilon_0 = 3.3 \times 10^{-3} (m^2/s^3)$ と仮定した場合。

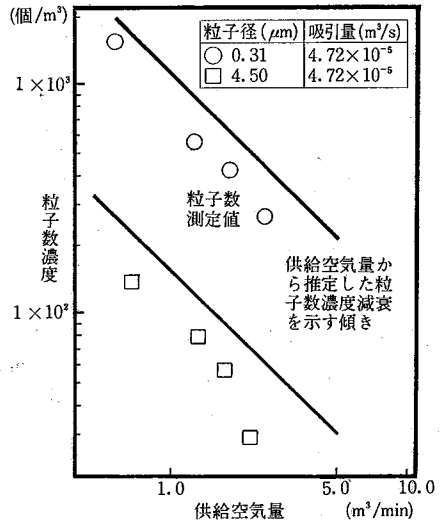


図2 供給空気量を制御した場合の希釈結果

図1に示すように、粒子の沈着により供給装置内壁面への沈着を少なくするため鉛直になるような設定してい

表 2 サンプリング管内の粒子数損失に関する実験種類

	CASE No.	材 質	長さ (m)	発生粒子径 (μm)	備 考
材質の 違い	1-1	タイロン	3	0.31	チューブ は水平に 設置
	1-2	ステンレス	3	0.31	
	1-3	塩化ビニール	3	0.31	
	1-4	ゴ ム	3	0.31	
	1-5	テフロン	3	0.31	
	1-6	ポリエチレン(軟)	3	0.31	
	1-7	ポリエチレン(硬)	3	0.31	
長さの 違い	2-1	タイロン	1	0.31	チューブ は水平に 設置
	2-2	タイロン	3	0.31	
	2-3	タイロン	5	0.31	
	2-4	タイロン	1	1.00	
	2-5	タイロン	3	1.00	
	2-6	タイロン	5	1.00	
	2-7	タイロン	1	4.50	
	2-8	タイロン	3	4.50	
	2-9	タイロン	5	4.50	
鉛 直	3-1	タイロン	3	0.31	チューブ は鉛直に 設置
	3-2	タイロン	3	1.00	
	3-3	タイロン	3	4.50	
螺 旋	4-1	タイロン	3	4.50	チューブ は水平な 螺旋状に 設置
	4-2	タイロン	3	4.50	
	4-3	タイロン	3	4.50	

注) チューブは全て内径 6 φ

る。供給装置の帯電による粒子の沈着防止のため、内部に静電防止処理を施している。

3.2 エアロゾル濃度制御供給装置内での粒子数損失

供給装置内では、凝集および沈着等による粒子数損失が考えられる。以下供給装置内で問題となる凝集について検討する。

凝集は、粒子の粒径分布、粒子数濃度から大きな影響を受ける。ここでは凝集の程度を大まかに見積るため、単一粒径の凝集モデルを考える。凝集による粒子数濃度の時間変化は次式で与えられている。³⁾

$$dn/dt = -K \cdot n^2 \quad (1)$$

K: 凝集定数

表 1 に今回の供給装置内で検討した粒径のブラウン凝集定数 K_B (粒径が小さい程大きい値となる。), および乱流凝集定数 K_T (粒径が大きい程大きい値となる。) を示す。³⁾ ブラウン凝集のみを考えると $K = K_B$ となり、粒径 0.3 μm の初期粒子数濃度を 3.5×10^9 個/m³ とすると粒子数濃度が 1/2 になる時間(半減期)は、 6.3×10^5 秒となる。また乱流凝集のみの場合では $K = K_T$ となり粒径 5 μm, 初期粒子数濃度を 3.5×10^9 個/m³ とすると、半減期は 1.1×10^5 秒となる。粒子が供給装置内を通過する時間(最大で約 15 秒)に比べ両者ともその値は十分大きい。

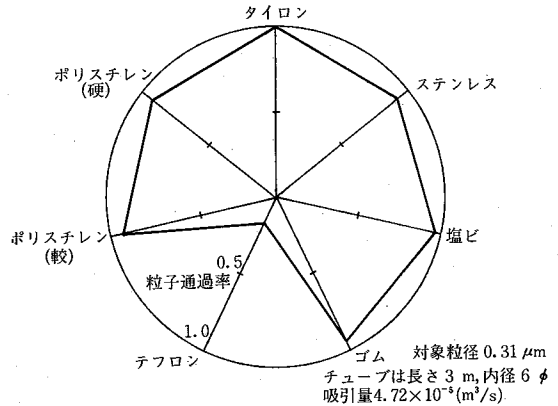


図 3 チューブ材質の違いによる粒子通過率

よって、供給装置内での凝集による粒子数損失は問題ないと考えられる。また供給装置内壁面への沈着による粒子数損失はさらに少ない。³⁾

図 2 に供給装置によるエアロゾルの希釈の例を示す。この測定は光散乱型粒子計数器 (HIAC/ROYCO Model 4102: 光源はハロゲン, 吸引流量 4.72×10^{-5} m³/sec (0.1 ft³/min) および 4.72×10^{-6} m³/sec (0.01 ft³/min)) を使用している。供給装置内で希釈が正しく行われているならば、 $n \propto Q^{-1}$ の関係 (図中に実線で示す) が成り立つ。粒径 0.31 μm, 4.5 μm の場合とも、この関係を良く満たした結果を示しており凝集、沈着による粒子数損失の影響は少ないものと考えられる。

4. サンプリング管内の粒子数損失に関する実験

4.1 実験種類

サンプリング管内での粒子数損失を管の材質・長さ・形状 (鉛直・螺旋状) について実験的に検討する。表 2 に実験種類を示す。

4.2 実験方法

粒子発生装置より粒径 0.31 μm, 1.0 μm, 4.5 μm の単分散ポリスチレン標準粒子を定常発生させ、供給装置に送り込む。このとき、供給装置の風量は一定とし、約 3.5×10^9 個/m³ (1×10^9 個/ft³) のエアロゾル場を作成する。このエアロゾル場 (供給装置の吹出口部) から粒子を吸引するようにサンプリング管 (6 φ) の先端を設置している。粒子の計数は、光散乱型粒子計数器を使用し、そのサンプリング時間は 1 分としている。

4.3 実験結果および考察

4.3.1 サンプリング管材質が粒子数損失に及ぼす影響

内径 6 mm のサンプリング管の材質を変えた場合の粒子数損失に関する実験結果を図 3 に示す。6 材質 7 種類のサンプリング管のうち、テフロン管が特に粒子数損

研究速報

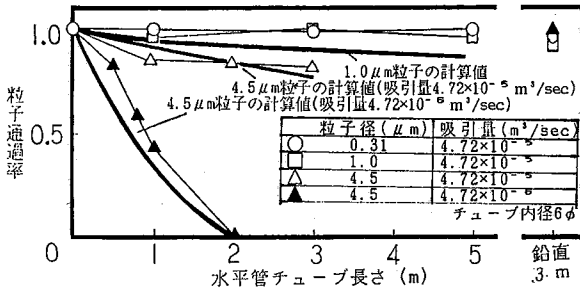


図4 水平管・鉛直管における粒子通過率 (重力による沈着の検討)

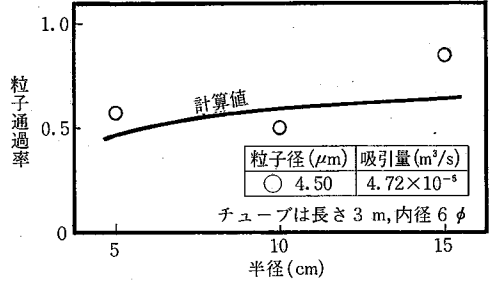


図5 チューブの曲がりの影響による粒子通過率 (遠心力と重力による沈着の検討)

失が多い。同様の結果はすでに今福らの実験⁹⁾においても得られている。原因の1つには、粒子と材質間の静電気による沈着等とも考えられるが現在検討中である。他の材質は、粒子通過率が0.9以上と良い値を示している。なお粒子通過率とは、サンプリングされた粒子数に対する計数された粒子数の割合を示し、サンプリング管の出口と入口のエアロゾル濃度比となる。以下の実験では、サンプリング管には、今回の実験範囲で粒子数損失の最も少ないタイロン管を使用している。

4.3.2 サンプリング管長さが粒子数損失に及ぼす影響

サンプリング管の長さを変えた場合の粒子数損失に関する実験結果を図4に示す。水平管内においては、重力沈降によって生じる管壁への沈着により粒子数の損失が支配的と考えられる。重力沈降による粒子数の損失に関し層流管内流に対し、次式が与えられている。³⁾

$$n/n_0 = 2(-2\alpha\beta + \alpha^{1/3}\beta + \sin^{-1}\beta)/\pi \quad (2)$$

$$\text{ただし、} \alpha = 3V_s \cdot L / 4d \cdot \bar{u}, \beta = (1 - \alpha^{2/3})^{1/2}$$

(2)式による粒子数損失を実線で図4中に示す。実験値と計算値は良く一致している。また、図4の右端に、長さ3m、内径6mmのサンプリング管を鉛直にした場合の粒子通過率を示す。この場合、粒径に関係なく粒子通過率はほぼ1.0である。したがって、粒径が大きい程、吸引流量が少ない程、重力沈降の影響が大きい。

4.3.3 サンプリング管の曲がりと粒子数損失の関係

水平面内で、半径rの螺旋状に設置されたサンプリング管の管内平均流速を \bar{u} としたとき、その中で粒子に作用する遠心力 F_c は次式で与えられる。³⁾

$$F_c = m \cdot \bar{u}^2 / r \quad (3)$$

このときの遠心沈降速度 V_c は次式で与えられる。³⁾

$$V_c = \bar{u}^2 \cdot V_s / g \cdot r \quad (4)$$

今回の実験では、遠心力は水平方向に働くので粒子の終末沈降速度は次の V_i で表される。

$$V_i = \sqrt{V_c^2 + V_s^2} = V_s \sqrt{(\bar{u}^2 / g \cdot r)^2 + 1} \quad (5)$$

サンプリング管の螺旋の半径を変化させた場合の粒子数

損失に関する実験結果を図5に示す。図中の実線は(5)式によって求めた V_i を(2)式の重力沈降速度 V_s の代わりに代入して得られた粒子通過率の計算値である。半径5cm、15cmの実験結果が計算値より大きい値を示すが、おおむね半径が小さくなると、粒子通過率は小さくなる傾向がある。

おわりに

①安定したエアロゾル場を供給するために試作したエアロゾル濃度制御供給装置は十分その性能と条件を満足している。②サンプリング管内での重力沈降および管の曲がりによる粒子数損失は、粒径0.31 μmおよび1.0 μmの粒子については、今回の実験の範囲では実用上無視し得る。③しかし、4.5 μmの粒子では、重力沈降や管の曲がりの影響を大きく受ける。特に、吸引流量の少ない場合の重力沈降の影響が大きい。したがって、粒径4.5 μm以上の粒子を対象とする計測では、管の水平部分を短く、曲率の大きい曲がりを少なくする必要がある。

(1985年1月31日受理)

参考文献

- 村上周三ほか「レーザー光を用いた室内乱流現象の可視化」生産研究 昭和59年10月
- 早川一也ほか「レーザー計測技術による粒子挙動および付着の測定」日本建築学会大会学術講演梗概集 昭和59年10月
- 高橋幹二「基礎エアロゾル工学」養賢堂 昭和57年
- 今福正幸ほか「クリーンルームの性能評価に関する研究」第3回空気清浄とコンタミネーションコントロールに関する技術大会 昭和59年2月
- 砂川達也ほか「室内空間における浮遊微粒子挙動計測」日本建築学会大会学術講演梗概集 昭和59年10月
- 呂俊民「クリーンルームにおけるサブミクロン粒子の計測」空気清浄 昭和59年21巻4号