

気中パーティクルカウンタ

リオン株式会社 松田 朋信

1 はじめに

粒子という言葉の意味はとても曖昧である。科学的には物質を構成している細かな粒であり、原子・分子も粒子に分類される。更に原子の構成要素も粒子とみなされる。また、気体から凝縮して生成したものや、液体及び固体の物理的な破碎過程で生じた粒は、粒子の集合体であるがこれも粒子と称される。時に粒子は汚染のもととなる。産業分野では粒子を汚染の分類として、浮遊粉じん汚染、微粒子汚染、原子・分子状汚染、微生物汚染などに分けることがある。本稿では主に微粒子汚染と微生物汚染の原因となる凡そナノメートルからマイクロメートルの大きさの微粒子を測定対象とする。

微粒子汚染が歩留りに影響する半導体や精密機器など微細加工技術が急速に進む先端産業や、食品、医療、製薬、宇宙、原子力など、安全や健康影響上で環境管理が重要な分野において、微粒子の発生や汚染の制御と共に、微粒子の計測の必要性はとても高い。浮遊微粒子の性質は、組成などの化学的性質と、粒子濃度、粒径、形状、密度などの物理的性質で表される。この中で粒子濃度と粒径は粒子による影響を知る上で重要な情報である。粒子濃度と粒径の計測方法には、顕微鏡法、重量法、沈降法、電気移動度法、光散乱法、凝縮核法、慣性法、拡散法などがある¹⁾。その中で個数濃度が測定可能な光散乱式の粒子計数器（以下「パーティクルカウンタ」という）は、測定の簡便性などから多く利用されている。パーティクルカウンタには、気中の浮遊微粒子を検出するものと、液中のそれがある。本稿では気中パーティクルカウンタについて、基本原理と仕様、規格、測定及び取扱上の注意、保守管理などを説明する。

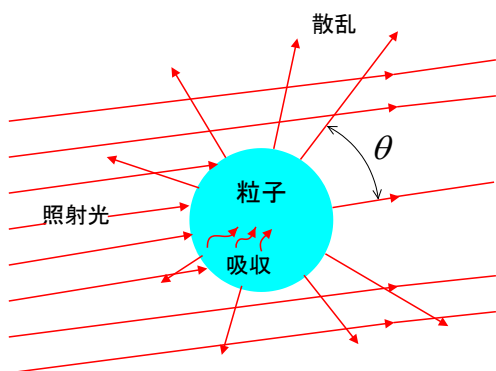


図 2-1 粒子と光の相互作用

2 原理と仕様

2.1 粒子による光散乱

図 2-1 に示す光と粒子の相互作用の内、パーティクルカウンタは散乱を捉えることによって粒子を検出する。光の散乱理論は、1871 年 Rayleigh によって波長より十分小さい粒子による光散乱を表す式が発表され、その後 1908 年 Mie²⁾ によって球形粒子による光散乱の厳密な理論式が導かれた³⁾。散乱光強度は、入射光強度に比例し、散乱方向、粒径、粒子の屈折率と空気など媒質の屈折率の比、及び媒質中の光の波長の関数として求められる。粒径が光の波長より十分小さい範囲において、散乱光強度は粒径の 6 乗に比例し、光の波長の 4 乗に逆比例する。

パーティクルカウンタによる測定では、透過型電子顕微鏡法や計数ミリカン法⁴⁾にて粒径が値付けされた球状の標準粒子⁵⁾の散乱光強度と比較することによって、相対的な大きさが求められる。

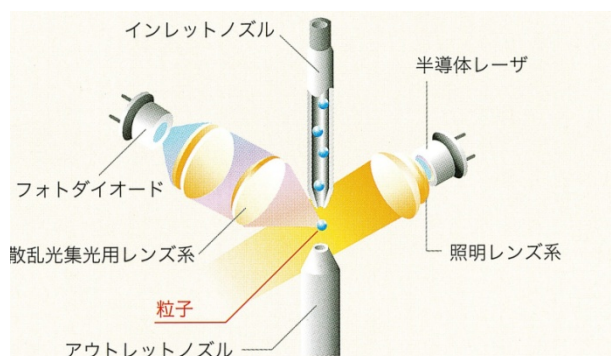


図 2-2 センサ部の概略図

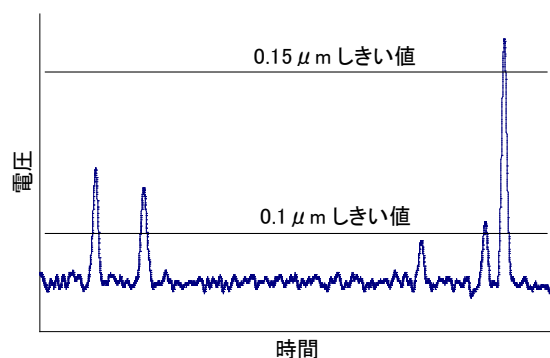


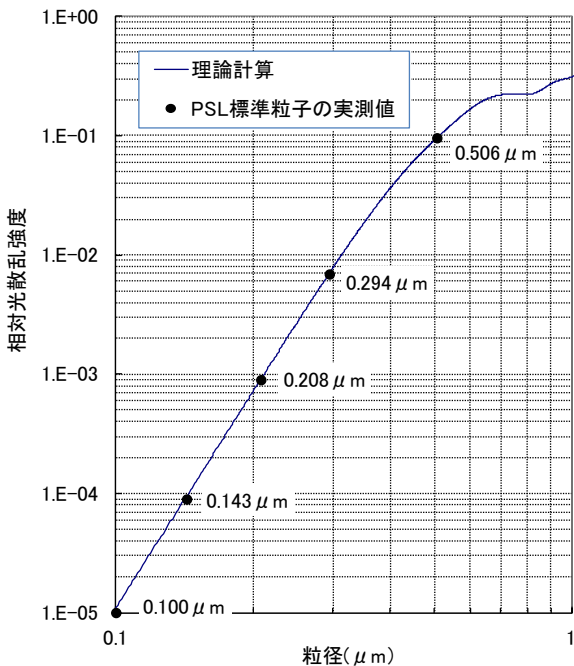
図 2-3 粒子信号の例

2.2 光学系

空気中の浮遊微粒子を検出するセンサ構造の例を図 2-2 に示す。試料空気は一定流量でインレットノズルに吸引さ

れ、センサ内のレーザが照射されている空間に導かれる。液体用のパーティクルカウンタの場合は、空間ではなく透明なフローセル内を試料液が流れる。試料中の粒子がレーザを通過する際に光を散乱し、その散乱光をレンズ等によってフォトダイオードへ集光して電気信号に変換する。その結果、図2-3のようなパルス状の信号を得る。パルスの波高値は散乱光強度に比例し、これから粒子の大きさの情報が得られる。また、パルス数から粒子の数を知ることができる。このようにパーティクルカウンタは1個1個の粒子を計数するため、他の計測方法と比較して低濃度の試料を測定することが可能である。反面、可測粒径の微小化には技術的な困難が伴う。粒子1個からの散乱光を検知しなければならないことと、波長より十分小さい粒子による散乱光強度は粒径の6乗に比例するからである。例えば、0.2 μmの粒子に対して0.1 μmの粒子の散乱光強度は凡そ60分の1に減少する。粒径と相対散乱光強度の関係について、Mieの理論式から求めた曲線と、センサを用いて校正用の標準粒子を実測した結果を図2-4に示す。

光源には半導体レーザ、ガスレーザ、固体レーザ等を用い、波長も様々な物がある。0.1 μm以下のような微小粒子が検出可能なセンサには、エネルギー密度を高めるため高出力で高品質空間モードのレーザを用いる。散乱光の集光にはレンズやミラーを用いる。光電変換素子にはフォトダイオードやイメージセンサを用いる。



(レーザ波長 1064 nm、光軸交角 90°、集光角 80°)

図 2-4 粒径に対する相対散乱強度の例

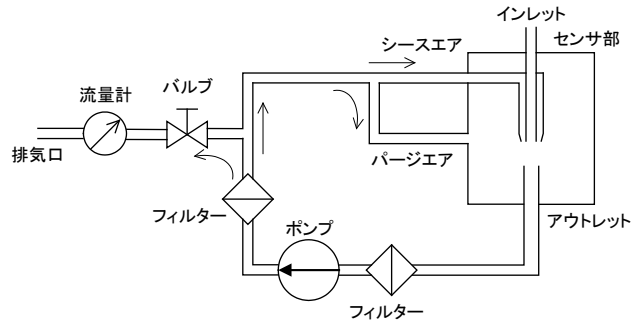


図2-5 流体回路の例

2.3 流体系

流体回路の例を図2-5に示す。ポンプによってセンサ内を減圧し、インレットより試料空気を吸引する。試料空気はセンサ内の空間（インレット管とアウトレット管の間）を流れる。この図中では光学系を省略しているが、図2-2に示すように照明レーザと散乱光集光用レンズ系の視野が交わる空間を検出領域と呼ぶ。検出領域を試料空気が整って流れることが望ましい。流れが乱れると、検出領域を試料空気中の粒子が通過しないことがある。また、粒子がセンサのアウトレットに入らずにセンサ内を舞って検出領域を複数回通過することがある。前者の場合は粒子を数え落すことになり、後者は重複計数することになる。この防止策として、試料空気を同軸のさや状に包む清浄空気流（図2-5のシースイエア）を設けて試料の流れを整えたり、センサ内を清浄に保つパーズエアを設けたパーティクルカウンタがある。ポンプからの排出空気はフィルターでろ過された後に排気口から排出される。シースイエア、パーズエアを持つ方式ではろ過した一部が循環する。

インレットと排気口の他に外部との開口が無いものは、試料空気の吸引流量と排気口の吐き出し流量が一致する。よって、排気口付近に流量計を備えるものが多い。流量調整は、排気口付近のバルブによって行うもの、または、ポンプの回転数等を可変して行うもの等がある。

測定時間または試料空気量

Measurement time / Sample volume: 60s		
μm	CUMU.	DIFF. Counts
0.3	3816	2497
0.5	1319	1007
1	312	239
2	73	62
5	11	11

↑ 粒径 ↑ 計数值(累積) ↑ 計数值(差分)

図 2-6 測定結果の表示・印字の例

2.4 表示及び出力端子

検出した粒子信号は、粒径毎の粒子数へ変換処理される。結果は、表示やプリンタ、コンピュータへのインタ

フェース等へ出力される。一般的なパーティクルカウンタでは、粒子を1個検出する度、測定中にリアルタイムで計数表示がカウントアップする。プリンタとインタフェースは1回の測定が終了する度に出力する。

測定結果の表示またはプリンタ印字の例を図 2-6 に示す。この例の 0.3 μm レンジの累積の計数値 3816 個は、60 秒間試料を吸引して測定したときの 0.3 μm 以上全粒径の累積個数であり、5 μm 以上の個数までを含む。差分の計数値は該当する粒径区間の個数であり、例えば 0.5 μm レンジの 1007 個は 0.5 μm から 1 μm の間の個数となる。濃度に換算する場合は、測定時間（この場合は 60 秒間）に吸引した体積で割る。機器によっては「個/リットル」や「個/立方メートル」の単位に換算して表示する機能を持つ。

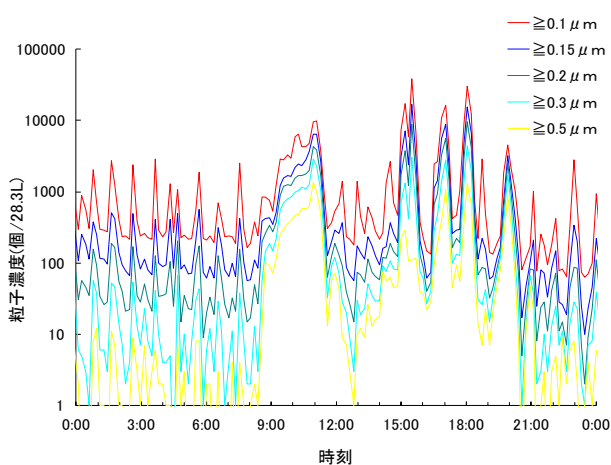


図 2-7 常時モニタリング（リオン(株)クリーンルームの測定例)

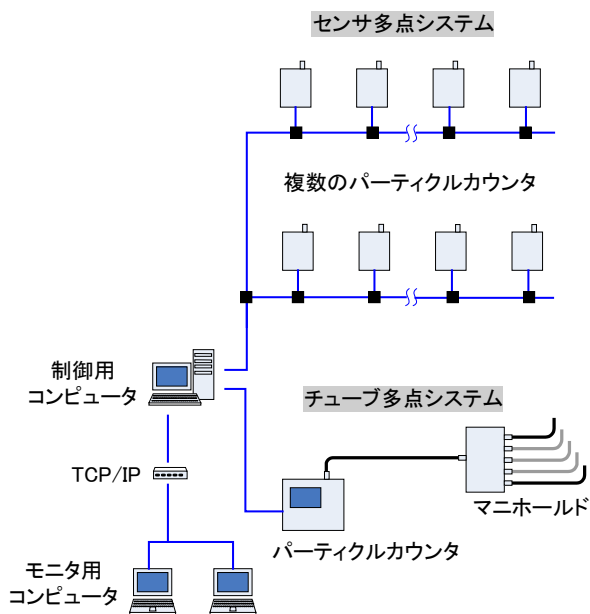


図 2-8 多点モニタリングシステムの構成例

2.4.1 常時モニタリング

コンピュータとのインタフェースは、測定回毎に計数を出力する。また、コンピュータによって、パーティクルカウンタの制御と自動運転や、表示、警報出力、ファイリングなどが可能になる。図 2-7 にコンピュータで連続してモニタリングした例を示す。夜間・昼休みの作業が無い時間と稼働時間の大きな変動や、空調による細かな変動など、粒径毎の時間的な変化が読み取れる。短時間の異常を見逃さないために常時モニタリングがとても有効である。

2.4.2 多点モニタリングシステム

複数台のパーティクルカウンタを同時に制御・管理可能なインタフェースを持つものもある（図 2-8 参照）。この多点モニタリングシステムの利点は、集中監視によって広範囲を一括管理し、粒子汚染による異常を早期発見できることである。また、測定点の傾向分析や、過去の傾向分析が可能なこと。更に、他の測定器（温度・湿度計、圧力計など）と一括測定や分析が可能など、利点が格段に広がる。

表 2-1 主な性能仕様と代表的な範囲

項目	代表的な仕様範囲
粒径	0.08 μm ~ 100 μm
試料空気流量	0.3 L/min ~ 100 L/min
最大粒子個数濃度	10^7 個/ m^3 ~ 10^9 個/ m^3
偽計数	2 個/ m^3 ~ 100 個/ m^3

2.5 性能仕様

現在市販されているパーティクルカウンタの性能仕様の代表的な範囲を表 2-1 に示す。粒径の下限を最小可測粒径といい、測定対象に合わせてパーティクルカウンタを選択する上で最も重要な仕様である。測定対象となる粒径より最小可測粒径が過剰に小さいパーティクルカウンタを採用すると、一般的な粒径分布の空气中浮遊粒子では最小可測粒径の計数が多くなり過ぎ、場合によっては同時通過損失（4.1.2 項参照）の影響が大きくなる。パーティクルカウンタの最小可測粒径は測定対象の粒径の 1/2 から同等程度が適当であろう。次に、対象粒径の濃度（清浄度）によって、試料空気流量、最大粒子個数濃度、偽計数の仕様を選択する。試料の濃度が低い（清浄度が高い）場合は計数値過少による誤差（4.2.3 項参照）の影響を小さくするため、試料空気流量は多いものが適当である。また、偽計数は試料濃度より十分に少ない必要がある。

3 規格

3.1 パーティクルカウンタの規格

計測器の性能及び測定結果の信頼性を確保する上で、規格は重要な役割を果たす。パーティクルカウンタに関わる規格として、ISO21501-4⁶⁾ と JIS B 9921 : 2010「光散乱式気中粒子計数器—校正方法及び検証方法」があり、両者はほぼ整合が図られている。ここでは JIS B 9921 の代表的な

項目について解説する。尚、利用にあたっては規格原本を確認いただきたい。

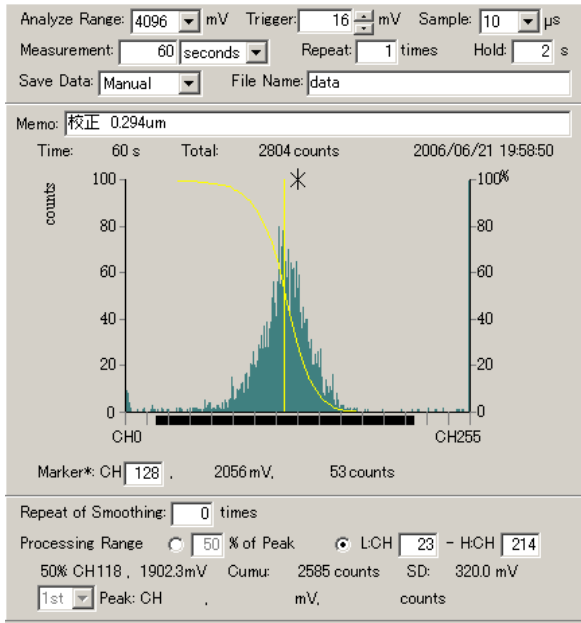


図 3-1 校正用粒子の信号の波高値分布

3.1.1 粒径区分のしきい値設定方法

ここでは粒径区分の校正について示されている。使用する校正用粒子は、粒径が国際単位系にトレーサビリティがあり標準不確かさは 2.5%以下、屈折率は 1.59 付近と定められており、通常はポリスチレンラテックス (PSL) 標準粒子を用いる。校正用粒子を含んだ試験用空気をパーティクルカウンタで吸引し、得られたパルス信号の波高値を分析する。図 3-1 に波高値を分析した例を示す。メジアン電圧がこの粒径に対する応答値となる。パーティクルカウンタの粒径区分に対応するしきい値電圧は、製造業者が定める応答曲線または Mie の理論式から求める。

粒径区分値のしきい値の誤差は、パーティクルカウンタに設定されているしきい値と、試験で求めた応答電圧から、応答曲線を用いて粒径の誤差として求める。相対的な粒径の誤差は±10%以内と規定されている。

3.1.2 計数効率

計数効率は、最小可測粒径に近い校正用粒子と、最小可測粒径の 1.5 倍から 2 倍の大きさの校正用粒子、2 種類を用いて試験する。被試験器の最小可測粒径に近い校正用粒子において全て計数する凝縮粒子計数器 (CPC)、またはパーティクルカウンタを参照器とする。校正用粒子を含む試験用空気を被試験器と参照器で同時に粒子個数濃度を測定する。計数効率 η は次式により求める。

$$\eta = \frac{C_1}{C_0} \quad (3-1)$$

ここで、 C_0 は参照器によって得られた粒子個数濃度、 C_1 は被試験器によって得られた粒子個数濃度。

最小可測粒径付近の校正用粒子においては (50 ±

20) %、最小可測粒径の 1.5 倍から 2 倍の校正用粒子においては (100 ± 10) %と規定されている。

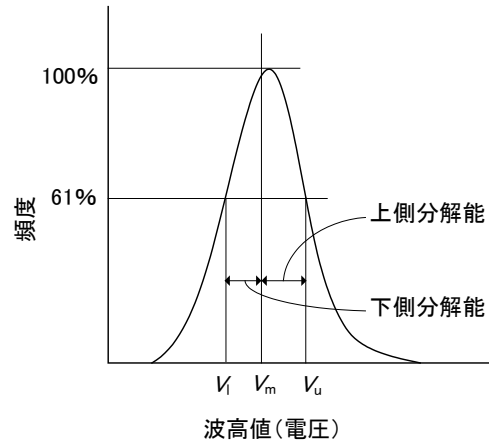


図 3-2 粒径分解能を求める際の波高値分布

3.1.3 粒径分解能

図 3-2 に示すように、校正用粒子の信号の波高値分布からメジアン電圧 V_m と、頻度が最大値に対して 61% になる下側電圧 V_l 及び上側電圧 V_u を求める。応答曲線を用いて V_l 及び V_u に対応する粒径を決定し、校正用粒子の粒径との差の絶対値を算出する。このうち大きい方の値を標準偏差 σ とする。粒径分解能 R は次式により求める。

$$R = \frac{\sqrt{\sigma^2 - \sigma_p^2}}{x_p} \quad (3-2)$$

ここで、 σ_p は校正用粒子の標準偏差、 x_p は校正用粒子の粒径である。

メーカーが定めた粒径において、粒径分解能は 15% 以下と規定されている。

3.1.4 偽計数

偽計数とは、清浄空気を測定したとき、その空気中に可測粒径範囲の粒子が存在しないにもかかわらず、計数する値と定義されている。偽計数の出現確率をポアソン分布に従うと仮定し、上限信頼限界が 95% となる値を求めて、 1 m^3 当りに換算する。

メーカーは最小可測粒径におけるこの値を仕様書等に記載しなければならない。

3.1.5 最大粒子個数濃度

最大粒子個数濃度における同時通過損失 L は次式で計算する。同時通過損失の説明は 4.1.2 項に記す。

$$L = 1 - \exp(-q \times t \times c) \quad (3-3)$$

ここで、 q は試料空気流量、 t は粒子が検出領域を通過する時間 + 信号処理時間、 c は試料粒子濃度である。

最大粒子個数濃度における同時通過損失は 10% 以内でなければならない。

3.1.6 試料空気流量

流量は圧力損失の少ない流量計で測定する。質量流量計を用いた場合は体積流量に換算する。

規定流量からのずれは±5%の範囲内であることが規定されている。

3.1.7 測定時間

測定時間は設定された値に対して±1%の範囲内であることが規定されている。

3.1.8 応答性

粒子は最小可測粒径に近い校正用粒子を用いて試験する。最大粒子個数濃度に近い試験用空気を 10 分間測定する。引き続き T 秒間測定した後、清浄空気に切り替える。切替え 10 秒後から再び T 秒間測定する。測定時間 T は 60 秒以下とし、切替え前 T 秒間の計数が 1000 個以上となる時間にする。

応答性 (= 切替え後の計数 ÷ 切替え前の計数) は 0.5%以下であることが規定されている。

表 3-1 清浄度クラス

清浄度 クラス(N)	上限濃度(個/m ³) 測定粒径					
	0.1 μm	0.2 μm	0.3 μm	0.5 μm	1 μm	5 μm
クラス1	10	2				
クラス2	100	24	10	4		
クラス3	1000	237	102	35	8	
クラス4	10000	2370	1020	352	83	
クラス5	100000	23700	10200	3520	832	29
クラス6		237000	102000	35200	8320	293
クラス7				352000	83200	2930
クラス8				3520000	832000	29300
クラス9				35200000	8320000	293000

3.2 クリーンルームの規格

JIS B 9920:2002 「クリーンルームの空気清浄度の評価方法」を簡単に紹介する。この規格は、クリーンルームにおける空気清浄度の浮遊微粒子濃度によるクラス分類及びその評価方法について規定されていて、ISO14644-1⁷⁾とほぼ整合が図られている。

クラスは1~9の等級で表し、対象となる粒径に対する上限濃度(空気 1 m³当りの粒子数)を示す。表 3-1 に清浄度クラスと測定粒径毎の上限濃度を示す。

原則として JIS B 9921 に規定する光散乱式気中粒子計数器を用いると記されている。測定点の数と位置、最小サンプリング空気量、サンプリング手順等の試験方法が規定されている。

また、測定結果から 95%上側信頼限界を算出する統計的処理や、対象粒径範囲外にある粒子濃度の表示法、クラス 4 より清浄なクラスに適用できる逐次サンプリングによる評価法が示されている。詳細は JIS B 9920 を参照されたい。

4 測定及び取扱上の注意

パーティクルカウンタによる測定は、試料の採取や計算処理など面倒な作業が不要な点や結果が簡単に得られる点から、誤差要因を見過ごされることが多々ある。また、結

果を扱う上で一般的な測定器と異なり難しい点がある。例えば、パーティクルカウンタの光学条件の違いや測定対象の違い等により、校正結果と実際の試料の測定結果において、単純な関係が成り立たないことがある。

次に主な誤差要因の項目を記す。

◆測定器に起因する要因

□原理的に不可避なもの

- ・ 粒子形状の影響
- ・ 粒子の持つ光学的性質の影響
- ・ 同時通過損失の発生

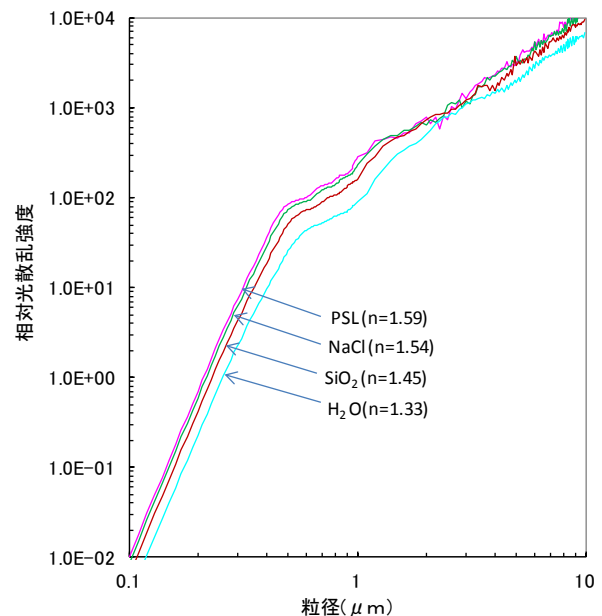
□設計・調整によるもの

- ・ 粒径分解能の影響
- ・ 迷走粒子による重複計数の発生
- ・ 光ノイズや電気回路ノイズによる偽計数の発生
- ・ 校正の不備

◆使用方法による要因

- ・ サンプリング管内の粒子沈着
- ・ サンプリング量の計量ミス
- ・ 等速吸引を行わないことによる影響
- ・ 計数値過少による統計的な誤差

上記の内、パーティクルカウンタ特有の要因や見過ごされやすい点について以下に解説する。



(レーザ波長 780nm、光軸交角 70°、集光角 54°)

図 4-1 種々物質の相対散乱強度の例

4.1 原理上の誤差要因

4.1.1 粒子の持つ光学的性質の影響

パーティクルカウンタは、粒子の形状や光学的性質の違いが測定に影響することがある。図 4-1 は種々の物質の球

形粒子における相対散乱光強度を Mie の理論式から求めたものである。粒子の幾何学的直径（図 4-1 の横軸）が等しくても粒子の屈折率の違いにより散乱光量は異なり、パーティクルカウンタでは異なった粒径と判別される。パーティクルカウンタは屈折率が約 1.6 の PSL 標準粒子を用いて粒径校正を行っているので、試料粒子の粒径判別は PSL 標準粒子の光散乱相当径となる。

図 4-1 の応答曲線はセンサの光学条件（光源波長、光軸交角、集光角）によって異なる。パーティクルカウンタの機種によって光学条件は様々である。このことから、PSL 標準粒子の計数差は比較的少ないが、他の粒子を測定した場合に機種間の計数差は大きくなることもある。

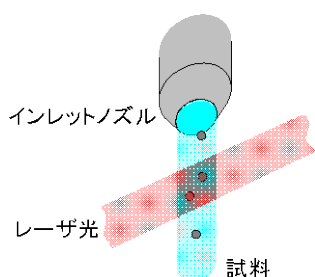
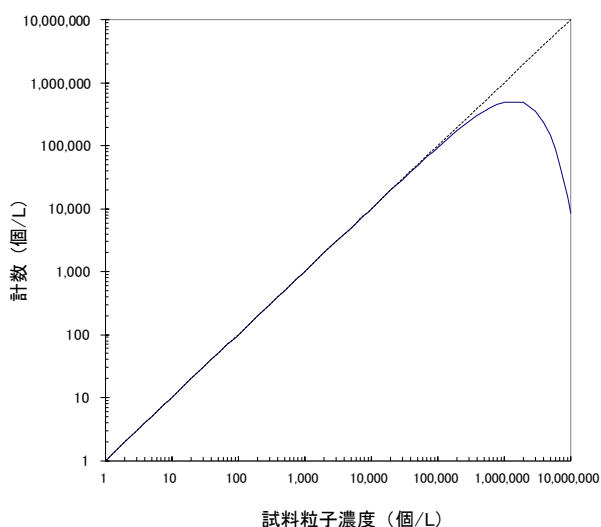


図 4-2 同時通過損失のイメージ



(試料流量 2.83L/min, 検出時間 15μsec)

図 4-3 同時通過損失の計算例

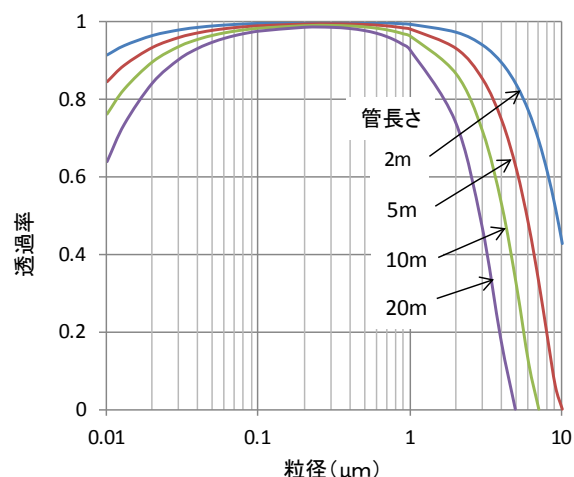
4.1.2 同時通過損失

パーティクルカウンタでは、センサの検出領域（図 4-2 では試料の流れとレーザーが交わる領域）に在る粒子 1 個の信号を検知できるように設計されている。これにより個数濃度を測定することが可能である。しかし、検出領域に複数個の粒子が同時に流れてきた場合、信号が重なって 1 つのパルスとなり、1 個の粒子として計数することがある。

このときの数え落しを同時通過損失と呼んでいる。

一般に浮遊微粒子の空間分布はランダムであり、サンプリング確率はポアソン分布に従うのが自然である。その場合、同時通過損失は式 (3-3) により求まる。

図 4-3 の例のように、試料粒子濃度が高くなると同時通過損失は徐々に増し、ある計数以上は示さなくなる。それを超えると計数値が減少することがある。高濃度を測定する場合は、清浄空気を試料を希釈する等して上記のようなことが起きていないか確認が必要である。



(試料流量 2.83L/min、管内径 5mm の場合)

図 4-4 サンプル管内の粒子損失
拡散沈着と重力沈降による粒子損失の計算例

4.2 使用方法による要因

4.2.1 サンプル管の粒子沈着

サンプリング管を用いて試料空気を吸引する場合、管内の粒子損失を把握する必要がある。図 4-4 に拡散沈着と重力沈降による粒子損失の計算例を示す。サンプリング管は重力に対して水平に配置した場合で、静電気沈着と慣性衝突の影響は無視した。小さい粒径では拡散により管壁へ衝突する割合が高くなる。大粒径では重力沈降により管壁に着く割合が高くなる。パーティクルカウンタの試料流量、及びサンプリング管の径と長さにより、サンプリング管内の滞在時間が変わるが、滞在時間が短いほど粒子損失は軽減する。

粒子の荷電が影響する場合がある。特にテフロン系チューブなど樹脂製のチューブには静電気沈着による損失の大きいものがあるので注意が必要。サンプリング管には帯電し難い物、または導電性の物を用いるのが好ましい。

また、サンプリング管の途中に継手やバルブなどを挿入すると、流れが乱れて粒子損失や付着した粒子の剥離、可動部からの発塵などが発生する恐れがある。できるだけサンプリング管の途中に配管部品を入れない方が良い。

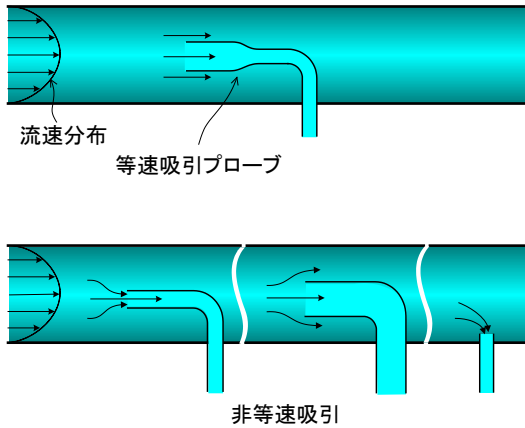


図 4-5 等速吸引と非等速吸引の例

4.2.2 等速吸引の必要性

ダクト内などの流れの場から試料をサンプリングするとき、場の速度に合わせたサンプリングが必要な場合がある。図 4-5（下）に示すように場の流れに対して等速ではないサンプリングを行ったとき、サンプリング口付近の流れの方向と速さが不均一となり、粒子は慣性の影響の度合いによって流れ方が変わってしまう。つまり、サンプリング前の試料濃度とサンプリングした濃度が異なってしまう可能性がある。流線の曲がりの影響を受けないような大粒径で重い（Stokes数の大きい）粒子を測定する場合は、図 4-5（上）のような等速吸引をする必要がある⁸⁾。

4.2.3 計数值過少による誤差

高浄度（低個数濃度）を測定する場合の注意として統計的誤差について説明する。

図 4-6 に示すような粒子濃度が 2 個/L の試料があったとして、異なる 2 通りの観測値について検討する。一方の観測値はサンプル体積が 0.1 L で粒子計数は 0 個であったとする。もう一方の観測値はサンプル体積が 1 L で粒子計数は 2 個であったとする。試料中の粒子の空間分布はランダムであり、サンプリング確率はポアソン分布に従うとし、其々の確率を求める。0.1 L をサンプリングしたとき 0 個が発生する確率は 82% となる。一方、1 L をサンプリングしたとき 0 個が発生する確率は 13% であり最も発生確率が高い個数は 2 個で 27% となる。

逆に母集団を推定する展開について図 4-7 を用いて説明する。サンプル体積 0.1 L で粒子計数が 0 個の観測値から信頼確率 90% における推定濃度区間を求めると 0~30 個/L となる。一方、サンプル体積 1 L で粒子計数が 2 個の観測値から信頼確率 90% における推定濃度区間を求めると 0.4~6.4 個/L となる。このようにサンプル体積及び計数值が過少であると推定区間が広くなることに注意が必要である。

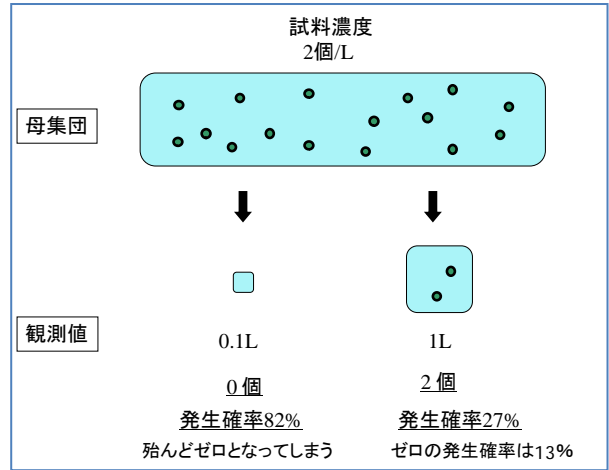


図 4-6 観測値に表れる差異

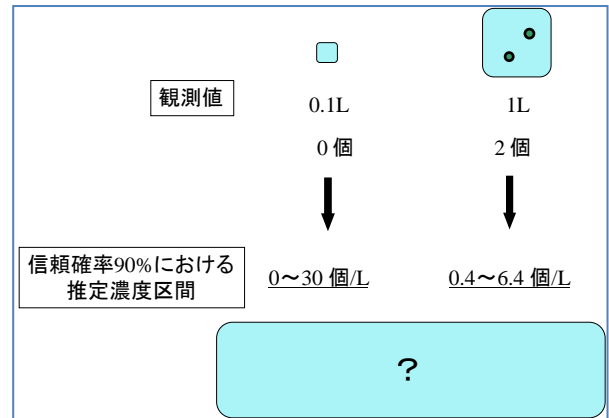


図 4-7 （逆展開）観測値から母集団を推定

表 5-1 主な消耗品

消耗品	主な劣化内容
光源	光出力低下
フィルター	目詰まり、リーク
ポンプ	流量低下
チューブ	硬化、ひび割れ、添加物析出
Oリング等のシール部品	硬化、ひび割れ、添加物析出

5 保守管理

パーティクルカウンタの校正周期はメーカーが定めて仕様書等に表している。3.1 項で解説した JIS B 9921 では、校正周期は 1 年以内が良いと書かれている。また、校正には少なくとも粒径区分のしきい値、粒径分解能、計数効率及び試料空気流量の誤差を含むと定められている。3 節及び 4 節を理解いただいた上、使用上必要な校正項目を選択され、実施可能な機関に依頼されたい。

表 5-1 に一般的なパーティクルカウンタの消耗品について示す。定期的な点検及び交換を勧める。

6 おわりに

パーティクルカウンタは取扱が簡便で測定結果が容易に得られることから、誤差要因を見過ごされることが多々ある。何らかのエラーを結果だけから判断できることは少ない。基本原理と特徴を理解し、設定や測定手順を正しく行うことが重要である。本稿では、原理と仕様、規格、測定及び取扱上の注意、保守管理に渡って気中パーティクルカウンタの一通りの解説をさせていただいた。微粒子計測の信頼性向上に役立てば幸いである。

参考文献

- 1) 日本空気清浄協会（編）：コンタミネーションコントロール便覧、p.62（1996）
- 2) G. Mie, Ann. der Phys. 25, 377(1908)
- 3) 高橋幹二：エアロゾル学の基礎、pp.147-164、森北出版（2003）
- 4) 榎原研正：粒径値づけ技術と測定器校正用、空気清浄、40巻5号（2003）
- 5) JIS Z 8901 : 2006 試験用粉体及び試験用粒子
- 6) ISO 21501-4:2007 Determination of particle size distribution -- Single particle light interaction methods -- Part 4: Light scattering airborne particle counter for clean spaces
- 7) ISO14644-1:1999 Cleanrooms and associated controlled environments -- Part 1: Classification of air cleanliness
- 8) 早川一也（監訳）：エアロゾルテクノロジー、井上書院、p.182（1985）