

粒子計測に関する技術と計測機器の紹介

The principle of particle measurements and the measurement instruments that apply the principles

日本カノマックス株式会社

KANOMAX JAPAN INC.

西田 直基

Naoki NISHIDA

キーワード: 粒子計測 (Particle Measurement), 光散乱 (Light Scattering), ピエゾバランス (Piezobalance),
室内空気質 (Indoor Air Quality), 清浄度管理 (Cleanliness Control)

1. はじめに

室内に漂うタバコの煙や工場に漂うオイルミスト, クリーンルーム内に浮遊する微粒子など, 各種エアロゾル粒子 (浮遊粉じん) の測定は, その計測環境の特徴や計測目的によって, 物理的原理の異なる様々な方法を用いて行なわれている. 測定目的に応じ, 原理的に最も適するものを選択することが必要である. 本稿では, 代表的な粒子計測原理と計測器の種類, および機器の使用例などについて紹介する.

2. 代表的な粒子計測原理と計測器

粒子を観察するための手法は様々あるが, 代表的な計測原理および計測器を以下に示す.

■ 顕微鏡法

浮遊粉じんを捕集した後に標体化し, 顕微鏡で粒子の形状や大きさを, 長さの次元で直接的に測定し得る唯一の方法である. 粒子の形状や表面状態を同時に測定できるという大きな特長を持つが, 測定に多大な労力が必要となる.

代表的な計測器: ローボリウムエアサンプラー・サンプリングポンプ+捕集用フィルター

■ 重量法 (フィルター秤量法)

ろ紙などに浮遊粉じんを完全捕集し, その質量を天秤でひょう量する方法である. 粉じんの質量 (重量) 濃度の計測法としては最も直接的で標準的な方法とされている.

フィルターに捕集された粉じんの質量 (捕集前後でのフィルターの質量変化) ΔM (mg) と, そのフィルターを通過する空気流量 Q (m^3/s), および捕集時間 t (s) から粉じん濃度 C を求める.

$$C = \Delta M / (Q \times t) \quad (\text{mg}/\text{m}^3)$$

天秤の感度 (下限計量値) とろ材質量によって決まる可測濃度の下限値が比較的高い, つまり粉じんの捕集量が少ないと計測ができない. したがって, 低濃度環境では評価できる量の粉じんを捕集するまでに長い時間を要する. また, 粉じん捕集にかかる吸引時間は数時間にわたることが多く, リアルタイムに粉じんの濃度を知ることはできない.

代表的な計測器: ローボリウムエアサンプラー・サンプリングポンプ+捕集用フィルター

■ 光散乱式

サンプリングした空気中の粉じんレーザー光を照射した際に生じる総散乱光量（光の強弱）が質量濃度と一定の関係にあることを利用するもので、散乱光量を電気信号に変換し、積算することにより粉じん質量濃度を測定する。

ろ過補集法による直接重量測定法に対し、相対濃度測定法とよばれる手法で、直接重量法による標準測定法との校正が必要となるが、同一粒子径では抜群の再現性と安定性を持つ。ごく少量のサンプリングで測定できるため、リアルタイムで環境中の粉じん濃度が求められ、ビル管理、作業環境で要求される粉じん濃度の時間的変化、空間的変化の測定にきわめて有効である。

しかし、この方式の計測器が与える相対濃度は、粉じんの光学的性質や形状などの粒子の諸特性、計測器の感度および精度によって異なる。例えばデジタル粉じん計の場合、1分間当たりのカウント値（CPM 値）という相対濃度が一定の質量濃度（例えば 0.01 mg/m^3 ）を与えるわけではなく、粉じんの特性が類似している室内の浮遊粉じんにおいても、質量濃度変換係数は必ずしも一定ではない。同じ量の粉じんでも、その色（黒色か白色か）の違いで散乱光の強度に差が生じるため、重量法による並行測定によってあらかじめ質量濃度変換係数（K 値）を求めておく必要がある。

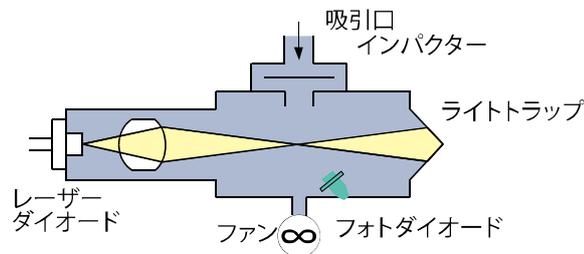


図1 光散乱式粉じん計の計測ブロック図

光散乱原理を利用した粉じん計は、様々な用途で最も使用されている。

粒子の大きさや個数を計測するパーティクルカウンターも光散乱式を利用した計測器である。粉じん計とパーティクルカウンターとは信号処理部に原理的な違いがある。粉じん計の場合、1個1個の粒子の散乱光測定ではなく、検出部に複数存在する全ての粒子からの散乱光の総和を測定しており、個々の粒子の信号は検出できず、検出信号の相対的なレベル変化をとらえている。パーティクルカウンターの場合は粒子個々の信号を検出するため、粒径基準でクラス分類された粒子信号をクラスごとに個数カウントできる。

PM_{2.5}に含まれるおよそ 300 nm 以下の微小粒子は、散乱光が微弱で検出困難な上に大気中の PM_{2.5} の組成や粒径分布が季節や地域により大きく変動するため、正確な換算係数の算出が困難である。

代表的な計測器：光散乱式デジタル粉じん計、パーティクルカウンター、花粉センサー

■ β線方式

ろ紙上に捕集した堆積粒子が吸収するβ線吸収量から質量濃度を計測する方式である。β線透過吸収量から Lambert Beer の法則に基づいて粉じん濃度を求めることができる。現在屋外の PM_{2.5} について各方面で関心が高まっているが、この方法は屋外用自動測定器の主流となっている。ただし装置は大型でかつ高価であり、室内の粉じん濃度の測定には適さない。また、微弱ではあるが放射線源を使用する必要がある。

代表的な計測器：大気粉じん計

■ ピエゾバランス式

ピエゾバランスとは、「ピエゾ（電圧効果・逆電圧効果）」と「バランス（天秤）」を合わせた言葉で、天秤の上に粉じんを静電捕集して粉じん濃度を求めるものである。

エアロゾルはインパクター部のエアロゾル入口より計測器に取り込まれる。エアロゾル中の一定粒径以上の空気動学的粒子径を有する粒子はインパクター内の衝突板上に衝突し、そこに重力や再飛散がなければその衝突板上に残る。

インパクターを通過した粒子は、静電捕集器内に入った後、コロナ放電電極に沿って流れ、ノズルを通りコロナ放電の強い電界中に入る。

コロナ放電電極の先から圧電結晶素子（クリスタル・結晶素子）表面の電極に向かって流れるコロナ電流によりエアロゾル中の粒子が荷電され、その電界により圧電結晶素子電極上に静電的に捕集される。コロナ電流は常に数 μA 程度の一定値に制御されている。

圧電結晶素子は両電極を発振器、周波数混合器および指示回路に接続されており、一定の電圧を加えることにより固有の振動を発生する。圧電結晶素子上に捕集された粉じん質量による固有振動数からのズレ、すなわち周波数の変化量（Hz）と捕集粉じん量の比例関係から圧電結晶素子上に捕集された粉じん質量が求められ、吸引空気量と圧電結晶素子上に捕集された粉じん質量（ μg ）からエアロゾル中の粉じん濃度（ mg/m^3 ）を求めることができる。

ピエゾバランス方式の最大の特長は、短時間で測定が行なえるため、サンプリング時間の長いローボリュームエアサンプラーでは対応不可能であった粉じん濃度の変動にも正確に追従し、リアルタイムに定量化できる点、さらに粉じんの物性に影響されないため、事前に粉じんの性質が了知しなくてもただちに正確な測定が行え、粉じんの質量濃度が直接測定できることである。

本原理を利用した携帯型粉じん計は、長年当社のみが取り扱ってきている。

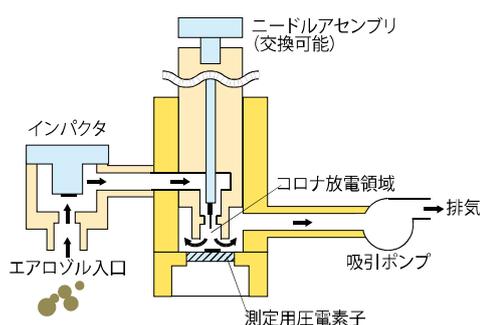


図2 ピエゾバランスの原理



図3 ピエゾバランス式粉じん計 MODEL 3521

ピエゾバランス方式では、粒子の径や色などによる影響は受けないため、光散乱方式に比べれば標準測定法との差が少なく、大気中の浮遊粒子状物質では常に1:1の関係で測定することができる。

水晶面上に粉じんが均一に捕集された場合、蒸着膜の膜厚測定の場合に認められるような周波数変化量と粉じん量とが1:1の対応を示すが、均一に捕集されない場合は1:1の対応を示さないことがある。均一に粉じんを水晶板上へ付着させるために電気集じん法が用いられているが、粒径の大きな粉じん粒子は慣性効果によって水晶板中央部に捕集されるため、水晶面上に捕集された粉じ

んの質量に対する周波数の変化量が大きくなり、質量濃度が高めに評価される。また、綿のような空隙の多い状態で捕集された場合は、逆に水晶面上に捕集された粉じんの質量が多いにも関わらず周波数の変化量が少なく、質量濃度は低く評価される傾向がある。

現状のピエゾバランス式粉じん計は、国際基準の代表的フィルター秤量法である米国環境庁の連邦標準測定法（Federal Register Method）との相関は良いが、PM2.5を測定するにあたっては下記3つの欠点がある。

1. 測定分解能の不足

一般的な光散乱式粉じん計に比べて分解能が一桁低く、PM2.5の濃度が低い日本国内ではサンプリング時間を長く取る必要がある。

2. 連続測定時間が短い

PM2.5の測定は8時間から24時間の連続測定が望ましいが、センサー表面に堆積した粒子を数時間毎にクリーニングする必要がある、将来的に自動洗浄機構が必要とされる。

3. 湿度制御機能がない

PM2.5質量濃度の正確な測定には、サンプルエアーの湿度を30%RHから40%RHの範囲に保つことが望ましいが、これを可能にする湿度制御機能を搭載していないので、何らかの前処理装置を必要とする。

代表的な計測器：ピエゾバランス式粉じん計

■ PAMS（ポータブル・エアロゾル・モビリティ・スペクトロメータ：ポータブル粒度分布測定器）

ポータブル粒度分布測定器「PAMS」は、気中に浮遊するエアロゾルの携帯型エアロゾル粒度分布測定器である。世界最小・最軽量（約5kg）でPC不要、バッテリー駆動のため、測定場所は室内外問わず肩にかけてどこにでも持ち運びできることが特長である。米国労働安全衛生研究所（NIOSH）にて開発された小型の静電分級装置（DMA）と両極荷電方式による中和器を採用しており、コンパクトかつ放射性物質を使用しない粒度分布測定器である。

光散乱の技術だけでは検出できない小さな粒子を計測するため、粒子に電荷を与え（Charger）、荷電粒子の電場での移動度（小さな粒子ほど電場内を早く移動する）の違いに応じて微粒子を分級（DMA）し、分級された主に10nm～数百nmの粒子をCPC（微粒子の周りを過飽和の状態にして冷却することで粒子を凝縮成長させ、粒子を計数する）で計測する。DMA内の電界強度を変化させることによって粒径分布を求めることができる。

測定モードとしてシングルモードとスキャンニングモードを備えており、測定粒径レンジは10～863nmであるが、プリセットされている2通りのシース流量を使用することにより、高分解能で測定できる10～433nm、そしてワイドレンジ対応の14.5～863nmの測定レンジを実現している。

3. 粒子の捕集・分粒について

計測対象の粒子を捕集するためには、粗大粒子をあらかじめ除去する必要がある。粉じんを粒径に応じて分ける装置を分粒装置（分級装置）という。

分粒装置には、重力沈降を利用した多段型分粒装置、遠心力を利用したサイクロン式分粒装置、慣性力を利用した慣性衝突式分粒装置（インパクター）等がある。重量法において、国内で多く使用されているのが多段式分粒装置であるが、装置吸入口にインパクターやサイクロンなどの小型分

粒装置が取り付けられている場合の多くは、インパクターやサイクロンである。

これら分粒装置の分粒特性（カット径）は「10 μm 100%cut」や「4 μm 50%cut」と表される。また、透過率で表すと「10%cut」は「透過率 0.9」, 「100%cut」は「透過率 0」となる。これ以外に、「10 μm 50%cut」を表す「PM10」や、「2.5 μm 50%cut」を表す「PM2.5」という表記もある。例えば「10 μm 50%cut または PM10」とは、「空気中に含まれる粉じんが、比重 1 で粒径が 10 μm だけであるとした場合、これらの粉じんのうち半分の粒子がフィルターに捕集され、半分の粒子が分粒装置で除外される」ことになる。現在、国内で使用されている分粒装置の特性は、7.07 μm 50%cut, 5 μm 50%cut, 4 μm 50%cut, 2.5 μm 50%cut などがある。

当社は大気圧で 0.1 μm を分粒・捕集できる捕集器ナノサンプラーMODEL 3180 を用意している。一般的に、PM0.1 の分粒サンプリングには LPI（Low Pressure Impactor）が用いられるが、LPI では装置内を真空近くまで減圧しなければならず、捕集時の粒径や組成の変化が懸念される。当社製ナノサンプラーMODEL 3180 では、微細なステンレスメッシュを捕集体とすることで、PM0.1 のステージでは減圧することなく、低圧力損失で一度に大量のサンプリングすることが可能である。

この繊維層フィルターによるエアロゾルの捕集では、主に慣性捕集機構が作用し、100 nm 以下の微粒子を効率よく捕集することができ、捕集された微粒子は秤量または化学分析を行うことによってエアロゾル粒子成分の特定に利用することができる。

4. 各粒子計測器のアプリケーション

粒子計測器は様々な場所で使用されている。主な用途を紹介する。

■ 室内空気環境測定

不特定多数が利用するビルなどの建築物では、室内の空気環境の安全性を確保するため、法令で様々な基準が定められている。代表的なアプリケーションを以下に記載する。

特定建築物における室内空気環境測定

オフィスビルや公共施設などの特定建築物では、建築物衛生法により 2 カ月以内に 1 回の頻度で空気環境を測定する義務がある。粉じん測定も義務付けられており、光散乱式の粉じん計が広く用いられている。後述するが、タバコの分煙効率測定には光散乱式の粉じん計の他、ピエゾバランス式粉じん計も使用されている。

また、労働安全衛生法では「事務所則」があり、事務所部分の粉じん測定においても光散乱式の粉じん計が用いられている。

作業場の測定

労働安全衛生法で義務付けられている「作業環境測定」では、土石や岩石、鉱物、金属または炭素の粉じんを著しく発散する屋内作業場において、6 カ月に 1 度の定期測定が義務付けられている。

金属・鉄鋼関連をはじめとした多くのメーカーはこの法律に基づき、光散乱式の粉じん計を用いた計測を行っている。

また、自動車メーカーやミストコレクターメーカーなどオイルミスト（不水溶性の切削液）測定を行う際はピエゾバランス式粉じん計が用いられている。研磨工程などでは、新しいオイルと繰り返し使用して黒ずんだオイルとが飛散する。光散乱式と異なり、粉じんの色の違いによる計測値に差

がないため、オイルミストなど常時 K 値が変化するような現場ではピエゾバランス式が多く採用されている。

タバコの煙もオイルミストの一種で、タールやニコチンなど油状の液体を多量に含んでいるため、より正確な測定を必要とする場合はピエゾバランス式が用いられる。

解体現場の測定

建築物の解体現場など粉じんの発生する場所では、周囲に粉じんが飛散しないように対策を講じるため、粉じん計を用いたモニタリング測定も行われている。

表 1 各法令における規定粉じん濃度と粒子径

エアロゾル（粉じん）に対する基準 （人体影響を対象とした粉じん濃度基準）	粉じん濃度	粒子径
建築物における衛生的環境の確保に関する法律 （建築物衛生法）	0.15 mg/m ³	ほぼ 10 μm 以下
事務所衛生基準規則	0.15 mg/m ³	ほぼ 10 μm 以下
作業環境評価基準 ※遊離ケイ酸 0%として	2.9 mg/m ³	4 μm, 50%cut
公害対策基本法 ※1 日の平均値として	0.1 mg/m ³	10 μm 以下

■ 清浄度管理

クリーンルーム清浄度管理

製薬業界や精密機器製造業界、病院や食品工業など、粒子や菌の存在を嫌う生産工程の環境衛生管理に使用されるクリーンルームの洗浄度測定や環境モニタリングにおいて、ハンディタイプあるいは据え置き型のパーティクルカウンターが利用されている。

また、クリーンルーム環境の常時モニタリングニーズに対し、当社はクリーンルームモニタリングシステムという多点常時管理システムを用意している。粒子の計測のみならず、オプションでクリーンルーム環境管理に必要なパラメータである風速・温度・湿度・差圧も計測することができる。

フィルターメディア試験

クリーンルームやクリーンブースなどに使用されるフィルター・防じん防毒マスク、それらの材料になるろ材などの性能評価、漏れ試験などにはパーティクルカウンターの他、フィルター試験装置や安定した粒子を発生させるエアロゾルジェネレーターが使用されている。

■ 健康影響

CPC

最少粒径 15 nm からの粒子を検出する携帯型、ハンドヘルドの凝縮粒子カウンターである。計測データを本体に保存できる他、専用ソフトウェアによる計測制御も可能で、エンジン排ガス、大気環境、室内環境の測定だけでなく、クリーンルーム内の超微粒子計測にも利用できる。

PAMS

米国労働安全衛生研究所（NIOSH）と共同開発されたポータブル粒度分布測定器「PAMS」は、気中に

浮遊するエアロゾルの粒度分布測定器である。

例えば、自動車の排気ガス中のディーゼル粒子、プリンターから排出されるトナーの粒子などは健康への影響が懸念されており、その他、作業環境においても、発生する様々な粒子の挙動や動態解明が必要とされている。また、室内で浮遊する粒子、例えば外気由来の浮遊粒子、調理時に発生する油煙の粒子、あるいは VOC (Volatile Organic Compounds) から生成される有機エアロゾルなど、人々の生活環境において健康に影響を及ぼすであろうさまざまな粒子の測定が必要とされている。これらの測定にも利用可能である。

■ ナノテクノロジー・バイオテクノロジー分野

さらなる精密質量による構造解析を必要とする場合、GCMS や LCMS が用いられる。

当社が提供する高分解能小型マルチターン飛行時間型質量分析計「infiTOF」は、装置の大きさと分解能が相関するという従来の常識にとらわれない、超小型ながらきわめて高分解能のデータを取得できることが特長である。水素やヘリウムなどの低分子量域のガスや、ガス中に含まれる数十 ppb の微量成分の測定など、従来の装置では分析が困難であった領域での同位体分析を含む精密質量分析に対応できる。分解能を得るために、GC にてある程度サンプルを分離し、質量分析装置にサンプルを導入して分解能を上げる工夫をすることが一般的であるが、infiTOF は GC を介さず直接サンプルを導入しても、質量分析側で高分解能のデータを取得できる。ガス関係の設備およびガス製造ラインにおける微量不純物の分析や、さまざまなプラントで生成される水素やヘリウムの成分、同位体分析、不安定ガスのモニタリング等に用いられる。

また、infiTOF の可搬性を生かし、医療分野の臨床現場ではオンサイト分析に使用する研究もなされている。

5. おわりに

以上、代表的な粒子計測に関する技術と計測機器を紹介した。微粒子・エアロゾル研究において、適切な機器で計測しているのか、計測した値が妥当なのか、それらの判断の一助になれば幸いである。