

20031391

平成15年度

厚生労働科学研究費補助金(がん予防等健康科学総合研究事業)

建築物における環境衛生管理に関する研究

報 告 書

平成16年3月

財団法人 ビル管理教育センター

建築物における環境衛生管理に関する研究報告書

目 次

I. 研究の背景と目的	1
II. 研究課題	1
III. 研究組織	2
IV. 研究成果	
1. 室内エアロゾルの性状とその評価方法に関する研究	
1. はじめに	3
1. 1 研究目的	3
1. 2 研究組織	4
1. 3 本年度の調査研究の概要	4
1. 4 建築物衛生法の現状について	6
2. 粒子状物質の測定方法	8
2. 1 粒子質量濃度	14
2. 2 粒子個数濃度	20
2. 3 粒子捕集方法	27
2. 4 粒子組成分析方法	33
3. VOC及びアルデヒド類の測定方法	37
3. 1 アクティブ法	38
3. 2 パッシブ法	42
3. 3 分析方法	75
4. ビル室内空気質の実測結果	79
4. 1 測定項目	79
4. 2 測定結果	80

5. まとめ	89
--------	----

2. 建築物の給水における水質管理の実態調査

1. 研究の背景と目的	92
2. アンケート調査	93
2. 1 給水用防錆剤仕様特定建築物に関する調査（行政）	93
2. 2 東京都における給水用防錆剤使用特定建築物詳細調査	108
2. 3 給水用防錆剤の取扱状況調査	118
3. 文献調査	119
3. 1 概要	119
3. 2 給水用防錆剤に関する文献の要約	119
3. 3 文献から抽出した成果と課題	120
3. 4 給水用防錆剤としてのリン酸塩の使用実態について	135
4. 考察	138

付録 アンケートに使用した調査票

I. 研究の背景と目的

室内空気質（IAQ）は影響を受ける建物の範囲が極めて広く、また、室内空気の汚染物質も粒子（生物・非生物）や揮発性有機化合物等多様である。昨今、経済的緊縮度の増大や省エネルギー化対応の強化等の社会的状況のなかで、建築物の換気量が抑制される傾向にあり、IAQの悪化が懸念されている。

平成14年度に取りまとめられた建築物衛生管理検討会報告書において、「室内の浮遊粉じんに関しては、形状、粒径、化学組成等の性状や挙動の把握を行った上で、その粉じんの有害性等について科学的知見を踏まえて、基準値や測定方法の再検討が必要である」と提言された。

そこで、本研究では、特定建築物における居室内のエアロゾルの発生要因及び性状等の実態を明確にし、健康影響等を考慮した上で、適正な評価及び規制方法のあり方等について検討を行う。

また、給水用防錆剤については、昭和57年に給水管等の腐食に起因とする赤水発生の抑止対策として布設更新までの応急的対策として使用が認められている。しかし、給水用防錆剤が長期的あるいは予防的に使用されている場合もあるため、使用現状とその安全性の徹底や販売管理基準の強化等を図る必要がある。

このため、特定建築物における給水用防錆剤の使用実態を明らかにするとともに、普及過程における監視指導の実態を把握した上で、安全性・管理の両面を意識したガイドライン等の検討を行う。

II. 研究課題

本研究の目的を遂行するにあたり、以下に挙げる項目を研究課題とした。

1. 室内エアロゾルの性状とその評価方法に関する研究

本研究では室内の検討すべき項目を粒子状物質と化学物質とし、粒子状物質については濃度とその粒径分布や形状、化学組成等を、化学物質については濃度とその種類等の把握を行った上で、適正な評価及び規制方法のあり方等について検討を行う。

なお、今年度は初年度研究とし、特定建築物の居室の粒子状物質および化学物質の測定・捕集方法の検討、実態調査方法の検討とその問題点の把握とする。

2. 建築物の給水における水質管理の実態調査

給水用防錆剤を用いた給水設備の維持管理状況について、給水用防錆剤を使用している特定建築物への聞き取り調査および給水用防錆剤に関する行政指導の実態等を調査した上で、給水用防錆剤を用いた適切な維持管理の方法を提言し、関係者の指導・啓発の発展のため、ガイドラインを作成する。

なお、今年度は初年度研究とし、給水用防錆剤に関する行政指導の実態調査と給水用防錆剤使用施設への聞き取り調査を実施し、給水用防錆剤の使用状況等の把握とする。

Ⅲ. 研究組織

本研究の目的を達成するために、財団法人ビル管理教育センターに「建築物の環境衛生管理に関する研究委員会」（主任研究者：目黒克己；（財）ビル管理教育センター理事長）を設置した。また、部会として、「室内エアロゾルの性状とその評価方法に関する研究部会」、「建築物の給水における水質管理の実態調査部会」を設置して研究方法等について具体的な方針を決定後、調査・研究を実施した。なお、委員会及び部会の構成は表1～3のとおりである。

表1 建築物の環境衛生管理に関する研究委員会

	氏名	所属及び役職
主任研究者	目黒 克己	(財)ビル管理教育センター理事長
分担研究者	池田 耕一	国立保健医療科学院建築衛生部部長
"	紀谷 文樹	神奈川大学工学部建築学科教授

表2 室内エアロゾルの性状とその評価方法に関する研究部会

	氏名	所属及び役職
分担研究者	池田 耕一	国立保健医療科学院建築衛生部部長
部会長	藤井 修二	東京工業大学大学院情報理工学研究所 情報環境学専攻教授
委員	鍵 直樹	東京工業大学大学院理工学研究所建築学専攻助手
"	小山 博巳	柴田科学(株)研究開発部部長
"	高貝 健治	東京都健康局地域保健部環境水道課主事
"	竹田 菊男	(株)住化分析センター千葉事業所所長
"	垂水 弘夫	金沢工業大学工学部居住環境学科教授
"	並木 則和	金沢大学工学部物質化学工学科助教授
"	本間 克典	東京ダイレック(株)技術顧問
"	明星 敏彦	(独)産業医学総合研究所人間工学特性研究部主任研究官
"	柳 宇	国立保健医療科学院建築衛生部主任研究官
"	横山 辰巳	日本カノマックス(株)環境計測事業ユニット アプリケーションエンジニア

表3 建築物の給水における水質管理の実態調査部会

	氏名	所属及び役職
部会長	紀谷 文樹	神奈川大学工学部建築学科教授
委員	鈴木 昭	日本農薬(株)化成品課大阪駐在課長
"	富田 広造	東京都健康局地域保健部環境水道課次席
"	那須 徹男	栗田工業(株)カスタマーサービス事業本部都市開発部部長
"	藤井 哲雄	(有)コロージョン・テック代表取締役
"	山田 賢次	(株)西原衛生工業所技術顧問

事務局 高柳 保、齋藤敬子、鎌倉良太、杉山順一

(財)ビル管理教育センター調査研究部

IV. 研究成果

1. 室内エアロゾルの性状とその評価方法に関する研究

分担研究者 池田 耕一（国立保健医療科学院建築衛生部）

部会長 藤井 修二（東京工業大学大学院情報理工学研究科）

1. はじめに

1.1 研究目的

居室内における粒子状物質について、建物における衛生的環境の確保に関する法律では、相対沈降径が概ね $10\mu\text{m}$ 以下の粒子を浮遊粉じんとして定義し、重量濃度により規制が行われている。また、特定建築物内における浮遊粉じん濃度の不適率は、建築物環境衛生管理者の適正な維持管理や、空気清浄技術の高度化及び分煙対策の普及等から昭和 52 年の全国平均 21.9% に比べ平成 12 年は 2.2% と低減している。

しかし、近年になり人体に影響のある粒子径は、 $2.5\mu\text{m}$ 程度の微粒子であるとの報告があり、大気環境では PM2.5 と呼ばれる $2.5\mu\text{m}$ 以下の微粒子を対象とした重量濃度による評価が行われている。さらに、アレルギー等の問題から居室内に浮遊する真菌やカビ等の影響、化学物質過敏症の観点からホルムアルデヒドや揮発性有機化合物(VOC)について問題視されてきている。このような背景にもかかわらず、ビル衛生管理法における空気清浄に関する項目は、 $10\mu\text{m}$ 以下の浮遊粉じんの重量濃度、二酸化炭素、一酸化炭素、ホルムアルデヒドの 4 項目に限られている。こゝで、今後更なる省エネルギー化対応強化の状況で換気量の抑制による室内空気質の悪化及び室内環境の高度な汚染制御に対応するために、空気環境の現状の把握が重要となる。

平成 13 14 年度の建築物衛生管理検討会報告書において、「室内粉じんに関しては、形状、粒径、化学組成等の性状や挙動の把握を行った上で、その粉じんの有害性等について化学的知見をふまえて基準値や測定方法の再検討が必要である」と提言されており、健康影響に関する微粒子の重量及び個数濃度分布並びに性状について、現状を把握する必要がある。また、ホルムアルデヒドや VOC 等の化学物質についても住宅における実態調査は進んでいるものの、特定建築物に関する調査は少ないのが現状である。

本調査研究では、このような背景を考慮し、特定建築物における居室内のエアロゾル及び化学物質の発生要因及び性状等の実態を明確にし、健康影響を考慮した上で、適正な評価及び規制方法のあり方等について検討することを目的としている。

本年度の研究は、本調査研究の初年度のものとして、特定建築物の居室のエアロゾルと VOC の計測方法の基本となる項目、実態調査の方法と問題点を把握することとした。具体的な調査内容としては、A)浮遊粉じん計測及び B)化学物質計測に関して、以下の内容を検討した。

- (1) 特定建築物内の空気質の文献調査
- (2) 測定方法の検討

(3) 室内環境中における粒子状物質の実態調査と課題

(4) 室内環境中における化学物質の実態調査と課題

次年度以降の研究テーマは、以下に挙げるとおりである。

(5) 簡易測定方法の検討 前年度の実態調査に基づき、多数の居室の調査を行うための粒子状物質の個数・重量濃度及び化学物質を対象とした簡易測定法による評価の可能性について検討を行う。

(6) 全国規模の測定調査 粒子状物質及び化学物質について、関東・北陸を中心に全国規模の実態調査を行い、基本的データの蓄積と共に、居室の用途・内装材料・空調設備の条件・地域等による違いについて検討を行う。

(7) 調査項目と方法のガイドラインの作成

1.2 研究組織

本研究の推進には、調査研究委員会をビル管理教育センターに設置して、調査研究を実施することとした。委員会メンバーは以下のとおりである。

分担研究者	池田耕一（国立保健医療科学院建築衛生学部部長）
部会長	藤井修二（東京工業大学大学院情報理工学研究科情報環境学専攻教授）
委員	鍵 直樹（東京工業大学大学院理工学研究科建築学専攻助手）
	高貝健治（東京都健康局）
	垂水弘夫（金沢工業大学工学部居住環境学科教授）
	並木則和（金沢大学工学部物質化学工学科助教授）
	明星敏彦（産業医学総合研究所人間工学特性研究部）
	柳 宇（国立保健医療科学院建築衛生学部主任研究員）
	本間克典（東京ダイレック(株)）
	竹田菊男（住化分析センター）
	小山博已（柴田科学(株)）
	横山辰巳（日本カノマックス(株)）

事務局及び調査 ビル管理教育センター

1.3 本年度の調査研究の概要

本年度調査研究としては、A)浮遊粉じん計測及び B)化学物質計測に関して、以下の内容を検討した。(1) 特定建築物内の空気質の文献調査、(2) 測定方法の検討、(3) 室内環境中における粒子状物質の実態調査、(4) 室内環境中における化学物質の実態調査について行った。

研究グループを、以下の3チームにし研究を推進した。

	研究組織	研究者	研究内容
Team 1 実態調査及び測定条件の検討	藤井修二 鍵 直樹	東京工業大学	アクティブ法による VOC の実測 PM・微粒子の計測
	池田耕一 柳 宇	国立保健医療科学院	パッシブ法による VOC の測定方法の適用
	垂水弘夫	金沢工業大学	北陸を中心とする PM, VOC の実測
	高貝健治	東京都	関東圏を中心とする PM, VOC の実測
	竹田菊男	住化分析センター	PM, VOC の組成分析
		ビル管理教育センタ	VOC の分析
Team 2 捕集・測定技術提供	本間克典 横山辰巳 小山博巳	東京ダイレック 日本カノマックス 柴田科学	PM, 超微粒子粒径別重量・個数濃度測定方法 PM, 超微粒子の組成分析の提案 パッシブ法の検討
Team 3 PM 測定手法の検討	並木則和 明星敏彦	金沢大学 産業医学総合研究所	室内の PM 及び微粒子の測定方法の検討 PM 及び微粒子の評価手法の提案

(1) 特定建築物内の空気質の文献調査

特定建築物内の粒子状物質及び化学物質の測定事例について、継続して各委員が調査を行うこととした。本年度は、VOC 関連の文献調査を中心に行った。

(2) 測定方法の検討

調査内容より、粒子状物質及び化学物質の測定方法について検討を行い、実態調査への適用について決定することとした。

粒子状物質については、特に粒径 2.5 μ m 以下の微粒子も対象となるため、粒径分布と組成の計測方法について、Team 2&3 を中心としてとりまとめた。実測調査では、従来の粉じん測定法（ローボリュームエアサンプラー、デジタル粉じん計、ピエゾバランス粉じん計）、粒径分布測定法（パーティクルカウンタ、SMPS）、組成測定法（SKC カスケードインパクタ、パーティクルアナライザー）を用いることとした。

化学物質については、VOC について、Team 1 を中心に、厚生労働省により提案されている精密法を対象に行うことを想定し、特定建築物に応用することを検討した。実測調査では、精密法、パッシブ法、光音響法について行うこととした。

(3) 室内環境中における粒子状物質の実態調査

本年度の実測調査は、測定手法の確認と現場測定の可能性など、問題点の抽出を主たる目的として、対象建物 1 件について行った。平成 16 年 3 月 8 日から 10 日、三田国際ビルで

行った。

(4) 室内環境中における化学物質の実態調査

本年度の実測調査は、測定手法の確認と現場測定の可能性、パッシブ法の有効性など、問題点の抽出を主たる目的として、粒子状物質の測定と併行して対象建物1件について行った。平成16年3月8日から10日、三田国際ビルで行った。

1.4 建築物衛生法の現状について（高貝）

昭和45年に制定された「建築物の衛生的環境の確保に関する法律（略称：建築物衛生法）」においては、良好な室内環境を維持するため建築物環境衛生管理基準が規定され、浮遊粉じん量をはじめとする6項目について基準が定められている。

近年、より衛生的で快適な生活環境への社会的ニーズの高まり、省エネルギー対応の環境配慮型の建築物への関心の高まり等、建築物衛生を取り巻く環境が大きく変化してきたことを受け、厚生労働省健康局は、平成13年に「建築物衛生管理検討会」を設置し、平成14年7月報告書を取りまとめ、平成14年10月に建築物環境衛生管理基準をはじめとする政令を改正した。空気環境の基準に関しては、従来の6項目にホルムアルデヒドに関する基準が新たに追加された。

「浮遊粉じん量」に関する基準は、建築物衛生法の政令により「1立方メートル中に0.15ミリグラム以下」と定められ、測定方法については省令により、「グラスファイバーろ紙（0.3マイクロメートルのステアリン酸粒子を99.9%以上捕集する性能を有するものに限る。）を装着して相対沈降径がおおむね10マイクロメートル以下の浮遊粉じんを重量法により測定する機器又は厚生労働大臣の指定した者による当該機器を標準として較正された機器」とされている。

特定建築物に該当し、空気調和設備を有する施設については、各階の適切なポイントにおいて、「2か月を超えないごとに1回空気環境測定を行わなければならない」こととなっている。また、「始業後から中間時、中間時から終業前までの適切な2時点」において測定することとなっている。このため、実際の環境測定にあたって、10ミクロン以下を対象にろ過捕集した粉じんを天秤により重量を求め、捕集時の吸引空気量で割算して重量濃度を算出する方法（重量法）は現実的ではないため、分粒装置付のろ過捕集装置を標準として較正された相対濃度計を使用することにより、室内の浮遊粉じん濃度の評価を行っている。浮遊粉じん濃度測定用の相対濃度計としては、光散乱式、光吸収式、圧電天秤式等が使用されており、年1回較正を行い特定建築物の環境測定が実施されている。

建築物内において、浮遊粉じんの発生源となるものとして、室内に堆積又は付着している粉じんが、人の活動により飛散したもの、室内での喫煙など物質の燃焼に起因するもの、外気の浮遊粉じんが室内に流入したものなどがある。

建築物衛生法が施行された昭和45年以降の特定建築物の浮遊粉じんに関する空気環境基準の適合状況は、例えば東京都平均では、昭和46年から52年にかけて毎年不適率は5

0%を超過していたが、その後経時的に低下している。また、全国的にも昭和52年に21.9%の不適率が平成12年には2.2%となっている。

これは、建築物衛生法の基準の浸透による空調設計時の考慮、空調フィルター等空気清浄に関する技術の向上、また、居室における浮遊粉じん量の発生に大きく寄与する喫煙に関する社会情勢の変化、分煙対策等が関与してきている。

平成15年5月より施行された健康増進法においても、受動喫煙を防止するために、施設管理者が必要な措置を講ずる努力義務が課せられたところである。

また、近年の大気環境の研究において、人体に影響のある粒子径が2.5マイクロメートル程度の微小粒子であるとの報告があり、米国においても1979年にPM10に関する環境基準が改定され、PM2.5と呼ばれる微小粒子の環境基準が追加されている。

以上の状況から、建築物衛生管理検討会報告書では建築物環境衛生管理基準の「浮遊粉じん量」について、「室内の浮遊粉じんの形状、粒径、化学組成等の性状や挙動の把握を行った上で、その粉じんの有害性について化学的知見を踏まえ、基準値や測定方法について再検討することが適当」と提言された。

室内の化学物質について、厚生労働省の室内空気化学物質の室内濃度指針値の設定、文部科学省の学校環境衛生基準の改定、国土交通省による建築基準法の改正による建築材料の制限及び換気設備設置の義務付けなど、化学物質による健康影響に対する対策が進められている。

ビル等の建築物において、地方公共団体等でこれまでに実施された調査結果によれば、室内に特殊な発生源が存在せず、かつ、十分な換気量が確保されている条件下では、ホルムアルデヒド等の化学物質の室内濃度は比較的低い状況にあり、建築物の竣工後、時間の経過に伴い化学物質の濃度は低減する傾向にあることが示されている。

特定建築物においては、室内の二酸化炭素濃度の基準である1,000ppm以下に維持管理するためには、換気量の確保が必要となる。このことにより、建築物内の空気環境における化学物質の濃度を比較的低い水準に抑えることが可能であるということ。また、室内空気汚染の原因となり得る多数の化学物質を定期的に測定するのは実務的ではないことから、平成14年10月の政令改正により室内化学物質対策として、建築物の使用時及び大規模な修繕・模様替を実施した場合のホルムアルデヒドに関する基準が新たに追加された。

測定方法については、2,4-ジニトロフェニルヒドラジン捕集・高速液体クロマトグラフィー法(DNPH-HPLC法)及び4-アミノ-3-ヒドラジン-5-カルボト-1,2,4-トリアゾール法(AHMT吸光光度法)により測定する機械又は厚生労働大臣が別に指定する測定器によるものとされており、厚生労働大臣が指定する測定器として10機種が告示されている。

しかしながらホルムアルデヒドやVOC等の化学物質について、特定建築物に関する調査は少ないのが現状であり、化学物質の発生要因及び性状等の実態を明確にし、適正な評価及び規制のあり方が求められている。

2. 粒子状物質の測定方法（並木）

(1) 測定方法の概要

浮遊粉じん（粒子状物質）は、広義には空気中に一定時間滞留できる 1nm 100 μ m 程度までの、おおむね 5 桁にわたる広範囲の固体ないし液体の粒子を指すが、狭義には一般大気環境に関する大気汚染防止法や室内環境に関する建築基準法で規制対象となる 10 μ m 以下の粒子状物質を指す。これから概略を述べる測定方法によっては、粉じんを化学的に安定な固体粒子および液滴中の固形残渣成分と定義した方がいい場合がある。

浮遊粒子状物質の測定は、粒子の大きさ、形、化学組成、帯電量、放射能、濃度など、静的物性に関するものと、それらの速度のような動的な挙動に関するもの、また個別の粒子を対象とするものと粒子群を対象としたものと言った分類をすることができる。その中でも、粒子状物質では、粒子濃度と粒度分布がその動力学的挙動の大半を支配していることから、この 2 つの項目が最も基礎的で重要である。そこで本節では、粒子濃度および粒度分布の実用的な測定方法の概要を紹介し、個別の測定方法の詳細は後節で説明する。

測定方法を大別すると、捕集測定法と浮遊測定法に分けられる。表 2.1 に比較的広く使用されている測定方法を示す。浮遊粉じんの測定方法に関する国内規格である JIS Z 8813「浮遊粉じん濃度測定方法通則」では、表に示すほとんどの測定方法が網羅されているが、それ以外にも近年普及して JIS に採用されていないものも挙げている。

1 つの方法の特性や適用範囲にはそれぞれ優劣や限界があり、実際にはこれらのうちいくつかを併用する場合も少なくない。測定方法の全般に当たって留意すべき点は、感度（下限濃度、粒径）、所要時間、粒子の性状と粒径への依存性などであるが、目的によってその留意すべき点が異なる。

表 2.0.1 濃度および粒度分布の実用的測定方法

分類 (捕集法○、 浮遊法□)	測定法	測定粒径範囲 (μ m)		測定下限 濃度	測定上限 濃度	測定原理	備考
		下限	上限				
	(濃度測定向き)						(JIS Z 8813)
○	フィルタ捕集・秤量法	~0	—	2 μ g/ m^3	—	ろ過一秤量	○
□	光散乱法	~0.1	~2	(空気散乱)	—	散乱光量	○
□	凝縮核測定法	0.003~0.01	~0.5	1個/ cm^3	10 ⁷ 個/ cm^3	過飽和凝縮一光散乱	○
○	任意天秤法	~0.01 (静電式)	~10	1 μ g/ m^3	100mg/ m^3	結晶の振動周波数変化	○
○	β 線吸収法	~0.3 (インテグ)	~10	2~5 μ g/ m^3	—	β 線吸収	○
	(粒度分布測定向き)						
○	カスケードインパクト	0 (ろ紙) ~0.3 0.03 (減圧)	15~30 10	1 μ g/ m^3 (各段) 5ng/ m^3 (最終段)	—	慣性衝突一秤量	○
○、□	パーティクルインパクト	0 (ろ紙) ~0.3	30	1 μ g/ m^3	—	荷電-慣性衝突-電荷	
○	飛行時間・光散乱法	0.5	20	0.001個/ cm^3	10 ³ 個/ cm^3	慣性分離 飛行時間一光散乱	
○	遠心分離法	~0.05	10	10 μ g/ m^3	—	遠心分離	
□	光散乱カウンタ	0.05~0.3	3~100	1個/ cm^3	10 ³ / cm^3	光散乱パルス	○
□	電気移動度法	~0.002	1	1 μ g/ m^3	10 ⁶ 個/ cm^3	荷電-移動度分離	
□	拡散バッテリー	0.001	0.2	1個/ cm^3	10 ⁷ 個/ cm^3	拡散沈着一凝縮核測定	
□	重力沈降セル	0.5	5	10 ⁵ / cm^3	10 ⁵ / cm^3	重力沈降一顕微鏡	

(2) 濃度測定

濃度測定には、質量濃度 (mg/m³) 測定と個数濃度 (個/m³, 個/cm³) 測定がある。表 2.0.1 に示す中で、代表的な捕集法であるフィルタ捕集・秤量法は、粒子測定で最も基本的な方法であるが、一般に長時間を有するため、濃度の時間変化を見ることはできない。また、ミストおよび、昇華性・潮解性の不安定な固体粒子には適用できない。一方、β線吸収法は、¹⁴C や ¹⁴⁷Pm から発するβ線の吸収量を測定することによって秤量法を半自動化したもので、ある程度の連続測定が可能である。圧電天秤法もほぼ同様の特徴を有している。

一方、浮遊法である光散乱法では、浮遊状態のまま粒子群の総散乱光量を測定することで、リアルタイムの測定が可能である。しかし、この出力値は粒子の屈折率や粒子濃度、粒度分布等により大きく変動するため、あくまでも相対濃度として求まるだけである。そのため、JIS Z 8813 で変換係数を求めることが規定されている。他の捕集法による質量濃度 C と、同時に測定した光散乱法で求めた相対濃度 R から以下の式で質量濃度変換係数 K を求める。

$$K = \frac{C}{R}$$

次に、浮遊法で個数濃度を測定する方法として、凝縮核測定法がある。これは、微小粒子を過飽和蒸気 (通常 n-ブタノール) 雰囲気中で凝縮成長させて、一定の均一な大きさに成長した液滴を前述の光散乱法により測定するものである。特に、サンプリングする空気の湿度が高いと粒子の凝縮成長が阻害されるため注意が必要である。また、凝縮成長させるのに時間が 1s 程度かかるため、前述の光散乱法に比べて応答性がやや劣る。

(3) 粒度分布関数および質量濃度と個数濃度との関係

個数濃度から質量濃度への変換は、総個数濃度と粒度分布関数がわかれば理論的には可能である。一般に浮遊粉じんは、対数正規分布に従うことがよく知られており、パラメータである幾何平均径 D_{pg} と幾何標準偏差 σ_g が求まれば変換は容易である。次式は、対数正規分布の篩上累積分布 R を示す。

$$\frac{R}{100} = \frac{1}{\log \sigma_g \sqrt{2\pi} \log D_p} \int_0^{\infty} \exp \left[-\frac{(\log D_p - D_{pg})^2}{2 \log^2 \sigma_g} \right] d(\log D_p)$$

質量基準の幾何標準偏差 σ_g' は σ_g と同じなので、質量基準の幾何平均径 D_{pg}' を以下の Hatch の式で求めれば、質量濃度を算出できる。

$$\log D_{pg}' = \log D_{pg} + 6.9081 \log^2 \sigma_g$$

実用上、 σ_g が小さい、つまり分布の狭い場合には、この変換式はある程度通用する。一方、 σ_g が広い上に、測定粒子総数が少なく大粒径の粒子の個数が正確に測定できていない場合には、質量は粒径の 3 乗に比例して寄与することから、大きな誤差を生む可能性がある。

対数正規分布以外で、浮遊粉じんの粒度分布を表す統計関数としては、次式で示される

Junge の指数分布式がある。この式は、 $0.1 \sim 10 \mu\text{m}$ の範囲で発生源が多数存在する一般大気中の浮遊粉じんを経験的に当てはまる式である。

$$\frac{R}{100} = C' D_p^{-\beta}$$

クリーンルームの空気清浄度規格 (JIS B 9920) でもこの分布が採用されており、 $\beta = 2.08$ である。また、この分布関数を用いて個数濃度から質量濃度に変換する場合、ディーゼル排ガスのように分布が $0.1 \mu\text{m}$ 以下に極端に偏っていないければ、比較的誤差は少ないとされる。

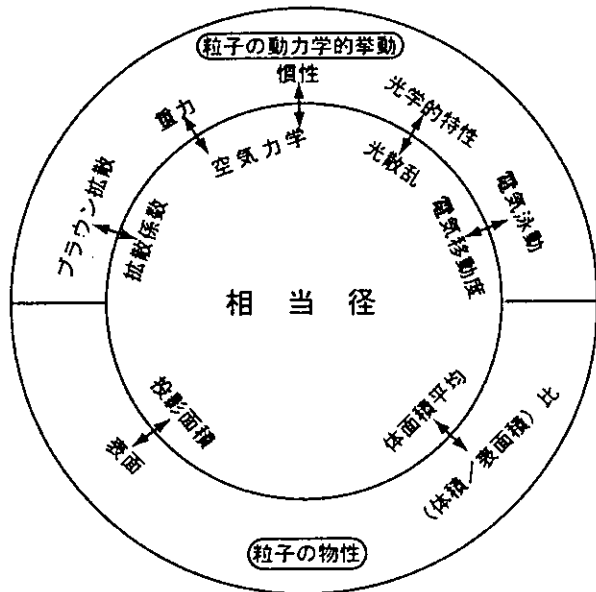


図 2.0.1 相当径

(4) 相当径による粒度分布測定

通常粒径測定で用いる粒径は、図 2.0.1 に示すように粒子の動力学的挙動を測定し、その測定値と同じ結果を示す理想的な球形粒子の直径である“相当径 (equivalent diameter)”を用いている。このため、各測定法で使用されている相当径について、よく理解しておくことが各測定方法の特徴を把握し、正確なデータの理解に繋がる。また、図 2.0.2 には粒子の移動速度および散乱光強度の粒径依存性を示す。また、図 2.0.3 には各測定方法の適用粒径範囲を示す。

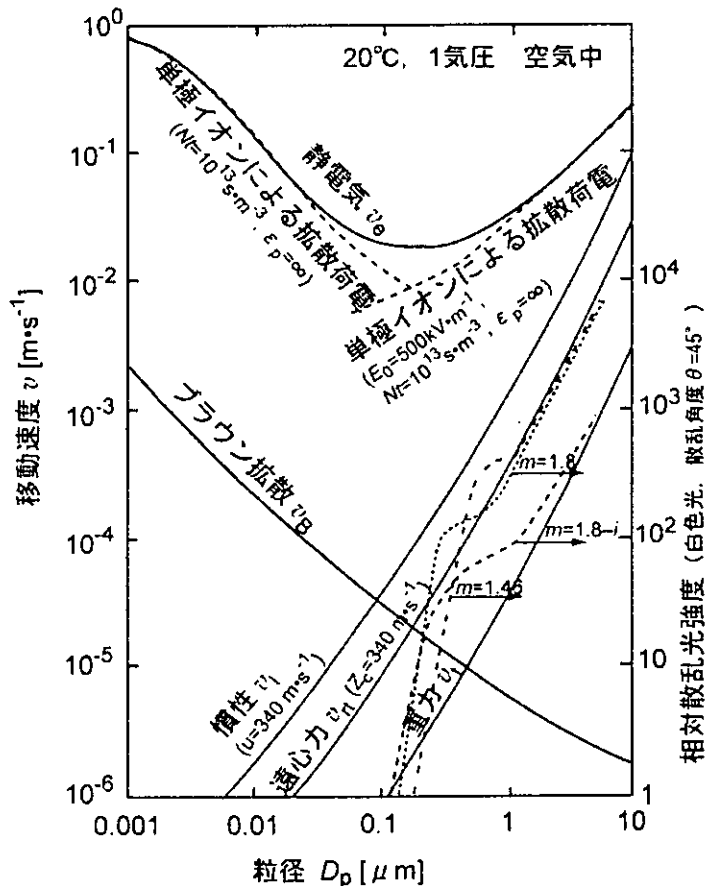


図 2.0.2 様々な移動速度および散乱光強度の粒径依存性

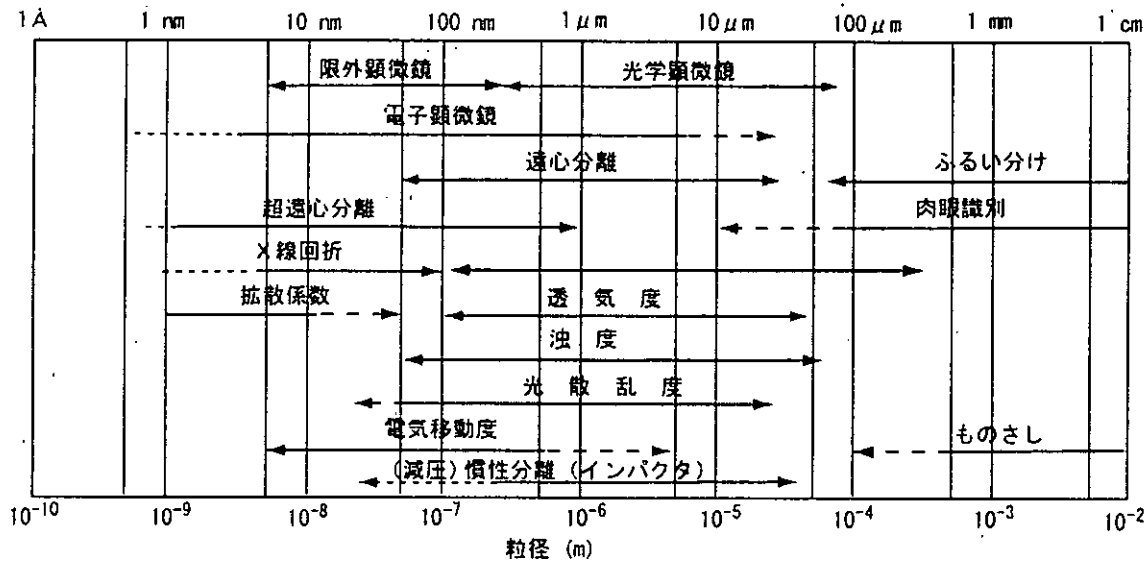


図 2.0.3 各種粒径測定方法の適用範囲

(1) Stokes 径, D_{pt}

Stokes 抵抗に基づく重力沈降速度から、球形粒子として求めた動力的等価径と定義される。重力沈降セルを用いた粒度分布測定に使用されるが、密度は予め既知として求める必要がある。図 2.0.2 に示すように、終末沈降速度 v_t は大粒径ではほぼ粒径の 2 乗に比例し、ブラウン拡散の自乗平均変位 v_B より大きくなる $0.5 \mu\text{m}$ 以上の粒子に有効である。

$$v_t = \frac{\rho_p C_c D_{pt}^2 g}{18\mu}, \quad D_{pt} = \sqrt{\frac{18\mu v_t}{\rho_p C_c g}}$$

ここで、 C_c は Cunningham のすべり補正係数、 ρ_p は粒子密度、 μ は流体の粘度である。

(2) 空気力学相当径, D_{pa} (aerodynamic diameter)

特に空気中での動力学運動方程式を用い、密度 1g/cm^3 の球形粒子に換算した径。上の Stokes 径との関係は、

$$\rho_p C_c(D_{pt}) D_{pt}^2 = 1 \times C_c(D_{pa}) D_{pa}^2, \quad D_{pa} = \sqrt{\frac{C_c(D_{pt})}{C_c(D_{pa})}} \sqrt{\rho_p} D_{pt}$$

$1 \mu\text{m}$ 以上を対象とする場合には $C_c \approx 1$ となり、もっと簡便になる。

$$D_{pa} = \sqrt{\rho_p} D_{pt}$$

カスケードインパクトのカットオフサイズも、通常空気動力学径で評価される。

$$D_{pa50} = \sqrt{\frac{9\mu W}{C_c U}} \sqrt{Stk_{50}}$$

ここで、 Stk_{50} は各段のカットオフサイズの Stokes 数 ($=\rho_p C_c D_p^2 U / 9 \mu W$)、 W はノズル径、 U はノズル断面の平均流速である。インパクトも、慣性による単位時間による移動距離 v_l に基づいているので、大気圧では $0.3 \mu\text{m}$ 以上が対象となる。通常大気エアロゾルは密度が 1g/cm^3 程度の粒子が多くを占めるが、密度が大きい鉱物粒子が混入している場合、インパクトの捕集板に捕集された粒子の径がカットオフサイズ D_{p50} とかなり異なることがある。

また、インパクト内を減圧にすることで C_c が大きくなるため、同じ Stk でより小さい粒子が分級できる。 0.1 気圧で D_{p50} が 30nm であり、さらに粒子を帯電させることにより、質量ではなく電荷量を測定することで、時間分解能の高く高感度な測定が可能である。本測定方法は、ELPI (Electrical low pressure impactor) という名称の機器として市販されている。装置内が減圧となるため、化学的に不安定な粒子は蒸発・揮散する可能性があるが、その点を除けば、 nm 領域から μm 領域までの空気力学相当径 D_{pa} に基づいた個数濃度、質量濃度および粒度分布を同時に測定できる最も汎用性のある測定器と言える。

さらに、 D_{pa} に基づいたサブミクロンから数十 μm の粒子を高い粒径分解能で測定できる手法として、飛行時間・光散乱法があり、APS (Aerodynamic particle sizer) という名称の機器として市販されている。この方法は、粒子を加速ノズルで加速して減圧場に導入することで、その時の粒子の飛行時間を、行路上の 2 つのレーザーにより散乱光信号として測定している。市販器では、 $1 \mu\text{m}$ で $0.02 \mu\text{m}$ 、 $10 \mu\text{m}$ で $0.03 \mu\text{m}$ と他の方法にはない卓越した粒径分解能を有している。

(3) 拡散係数相当径, D_{pm}

以下の式で示される拡散係数 D を有する球形粒子の径。拡散バッテリーを用いて、サブミクロン以下の粒子の粒度分布を測定する際に適用される径である。

$$D = \frac{\kappa T C_c}{3\pi\mu D_{pm}} = \kappa T B, \quad D_{pm} = \frac{\kappa T C_c}{3\pi\mu D}$$

ここで、 κ は Boltzmann 定数、 T は絶対温度である。この拡散係数は、動力的移動度 B ($=C_c / 3\pi\mu D_p$) と関連づけられ、 D_{pm} は移動度相当径とも言える。特に、塊状の固体粒子では、この D_{pm} と電子顕微鏡で撮影した実測の径とほぼ一致する。拡散バッテリーは、CNC (凝縮核計数器) と組み合わせて使用するが、一般に応答が遅く、粒径分解能が低いため、正確な粒度分布を得ることは困難である。このため、サブミクロン以下の粒子については、次に述べる電気移動度相当径で粒度分布を測定するのが一般的である。

(4) 電気移動度相当径, D_{pe}

下記の式で表される電気移動度 Z_p を有する球形粒子の径。電気移動度は、電気泳動速度 v_e から求められる。また、 Z_p は前述の動力的移動度 B と関連づけられる。

$$v_e = \frac{neC_c E}{3\pi\mu D_{pc}} = Z_p E = neBE, \quad D_{pc} = \frac{neC_c E}{3\pi\mu v_e} = \frac{neC_c}{3\pi\mu Z_p}$$

電気移動度相当径を用いた粒度分布測定は、DMA（微分型静電分級器）とCNCを組み合わせたSMPS（走査型粒度分布測定器）を用いて行い、主として数nmサブミクロンの粒子を測定対象とする。この方式は、粒子を帯電させることが必要であり、粒径が小さくなるほど粒子の荷電効率は低下するため、通常放射線源を用いた両極荷電装置によって平衡帯電状態にした場合、特に20nm以下の粒子が過大に評価されることがある。また、0.5 μ m以上では2個以上の電荷を有する多重荷電粒子の影響が出るため、インパクトで事前にそれより大きい粒子の混入を防止している。

(5) 光散乱相当径, D_{pl}

等価な散乱光強度を有する球形粒子の径。実用的には、同じ散乱光強度を有するPSL粒子（屈折率 $m=1.60-0i$ ）の粒子径である。図2.0.3に示すように、Mie理論による散乱光強度は、0.3 μ m以上ではほぼ粒径の2乗に比例するが、粒子の屈折率により散乱光強度の絶対値は変わる。吸収項（ $m=n-ki$ 中の k ）を有する金属やすすの粒子などは、強度の絶対値および粒径依存性も全く異なってくる。特に、ディーゼル排ガスのようなすすを多く含む粒子を本方式で測定する場合には、本来の大きさの1/2 1/3程度の粒径に誤認してしまうので注意が必要である。

また、粒度分布を測定するには、光学センサー部で粒子を1つずつ測定する必要があり、それから想定される上限濃度は10³個/cm³程度であるため、高濃度の浮遊粉じんには希釈器で上限濃度以下にする必要がある。

引用文献

- ・日本規格協会：JIS Z 8813「浮遊粉じん濃度測定方法通則」
- ・日本規格協会：JIS B 9921「光散乱式自動計数器」
- ・高橋幹二：エアロゾル学の基礎，森北出版，p.221（2003）
- ・K. Willeke and P. A. Baron ed.: Aerosol Measurement, Van Norstand Reinhold, p.876（1993）

2.1 粒子質量濃度 (小山, 横山)

(1) デジタル粉じん計 (小山)

1) 測定原理

粒子に光を照射すると粒子は光のエネルギーを受けて散乱光を発 (Mie 散乱) し、散乱光の強度は粒子径と屈折率に支配されるが、室内環境中に浮遊している粒子の性状は、比較的安定しているため粒子数に比例した散乱光強度が得られる。

散乱光強度を測定することで粒子個数が推定でき、粒子個数は粉じん濃度に比例する。

散乱光を PIN ホトダイオードで電気信号に変換し、電気信号の強度計測をする事で粉じん濃度を測定する。

2) 装置の構成

大気中に浮遊している粉じんによる散乱光量は非常に微弱で、外乱光の影響をまともに受ける。粉じんに起因する散乱光だけを取り出すには、暗箱の中で散乱光だけを効率良くセンサーに導く事が不可欠になる。

粉じん計を構成するには暗箱に光源とセンサーを設置しで対応するが、粉じんの測定感度を高めるには、照射光量の単位面積あたりのエネルギー密度を上げ、粉じんから発した散乱光をいかに多くセンサーに導くかに掛かる。

光源の照射光のエネルギー密度を上げるのに光束を絞りやすいレーザー光源を用いてφ0.8mm程度にビームを収束し対応し、この結果暗箱内の反射を減少させバックグランドを減らす効果が得られた。

粉じんによる散乱光を効率良く集光するように粉じんの流路とレーザービームが交差する点にレンズの焦点を合わせて、センサーに導く。

図 2.1.1 に実際の構成している様子を示す。

大気をファンで吸引して、検出器内部に取りこみ、レーザー照射光を横切る際に気中の粉じんが発した散乱光を非球面レンズで平行光にし、平行光を更に別のレンズでセンサー上に集光して電気信号に変換する。

大気を吸引した空気の一部をフィルターで清浄空気にして光学系内部を陽圧に保ち光学系の汚染を防止している。

図 2.1.1 の構成を参照センサーで受け

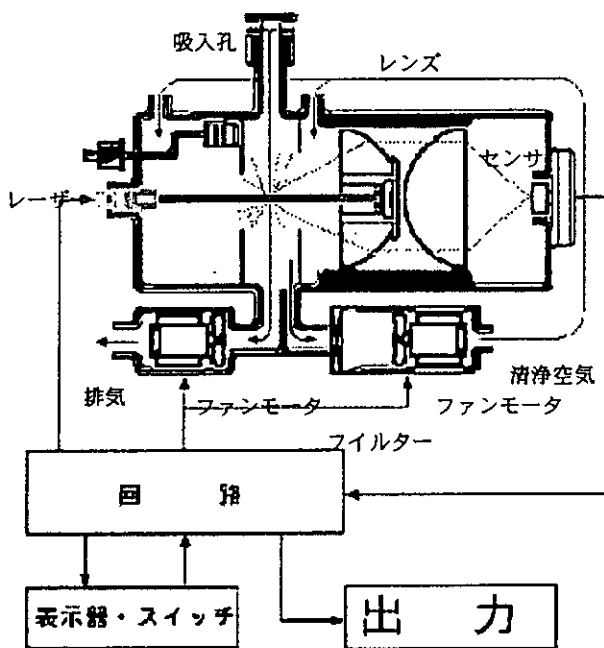


図 2.1.1 デジタル粉じん計の構成

取った散乱光は電気信号に変換した後、回路部分でデジタル量に変換し、清浄空気を導入した時のベースの値を差し引きCPUで演算して濃度値として表示する。測定時間の管理をすると共に、測定した濃度値をロギングして数値を記録する事が出来る。

香水香を使用した濃度直線性のデータを図 2.1.2 に示す。横軸に校正用基準器の測定値を1分間のカウント数 (CPM 値) で示し、縦軸に8台の被検デジタル粉じん計をプロットしている。回帰直線は NO. 3 についての結果だけを図に記載している。

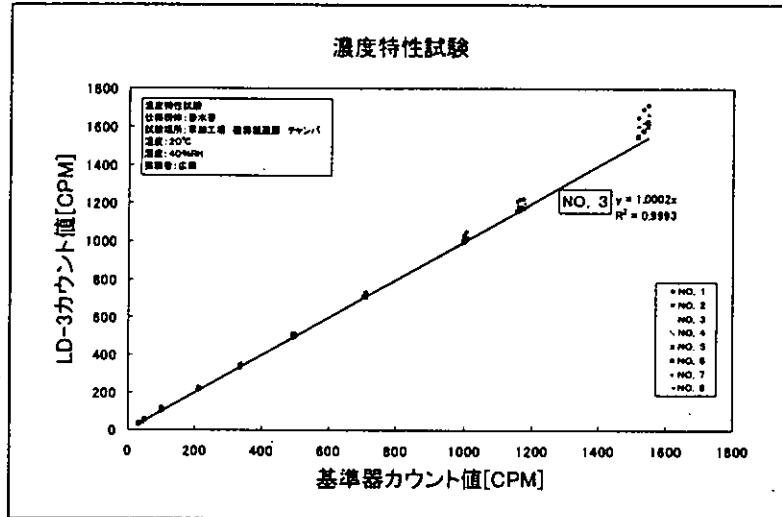


図 2.1.2 濃度特性試験結果

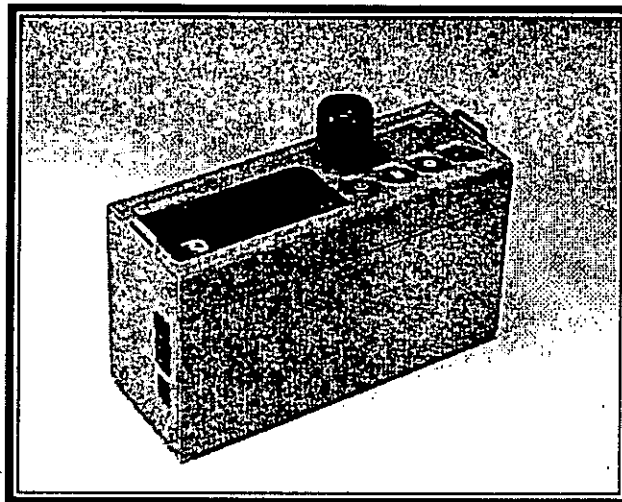


図 2.1.3 デジタル粉じん計LD-3型外観

(2) ピエゾバランス粉じん計 (横山)

1) 動作原理

圧電結晶素子上の粉塵質量付着量と、その振動周波数変化の量が比例的な関係にあることを応用したものである。

測定対象とするエアロゾルはインパクタ入口より本器内に入り、エアロゾル中の $10\mu\text{m}$ 以上の空気力学的粒子径を有する粒子はインパクタ内の衝突板上に衝突し除かれ、 $10\mu\text{m}$ 以下の粒子はインパクタを通過し、静電捕集器内に入る。そこではエアロゾルは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。



図 2.1.4 ピエゾバランス粉じん計 3511 外観

コロナ放電電極の先から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、その電界により結晶素子電極上に静電的に捕集される。結晶素子の両電極は発振器、周波数混合器及び指示回路に接続されている。外観を図 2.1.4 に、ブロック図を図 2.1.5 に示す。

コロナ電流は常に数 μA 程度の一定値に制御されている。

質量と周波数の比例関係は $0.005\mu\text{g}/\text{Hz}$ となっている。

本器は $1\text{L}/\text{min}$ でエアロゾルを吸引し、結晶素子上に堆積した質量による固有振動周波数からのずれは、2 分間の周波数偏差としてカウンターで測定され演算回路によって mg/m^3 の単位に変換し表示されるようになっている。結晶素子に堆積した粉じんの質量が感度の比例範囲 (約 2000Hz) を越えた場合、素子上の粉じんを除去し得るようなクリーニング機構を持っている。

2) 特長

ピエゾバランス法は粒子径や色等による感度差がなく、光散乱方式に比べれば、標準法とされているフィルタ秤量法との差が少なく、大気中の浮遊粒子状物質の濃度に対しては常に 1 : 1 で測定できる。1 回の測定時間は 24 秒または 2 分間の測定により粉じん質量濃度が直接デジタル表示される。