

4 . 実験室における性能評価

4 - 1 測定装置

測定装置について以下のように検討した。

4 - 1 - 1 粉じん濃度測定装置 柴田科学 LD - 5

光散乱方式の粉じん計で作業環境測定に使用されている。今回は除じん装置の入口・出口に取り付け濃度測定に使用した。粉じん計を守るためオプションのPM2.5サイクロンを取り付けた。吸引流量が1.7 L/minに固定されている。(図4 - 1)

平成30年度は除じん装置内の粉じん濃度も測定を行うため、PM2.5サイクロンを取り付けた旧型の粉じん計(柴田科学LD-3K)2台を加えて多点で測定を行った。LD-3Kは十分な吸引能力がないので粉じん計排気口にサンプリングポンプ(柴田科学300)を接続し、吸引流量1.7 L/minを維持した。

4 - 1 - 2 柴田科学 PM2.5サイクロン(新規作成)

吸引流量が1.7 L/minにおいて50%カット径が2.5 μm となる。特に図4 - 3の中央に示すサイクロンは本研究のために試作したもので、除じん装置入口出口の濃度を測定するためインラインで使用できる構造とした。(図4 - 2、図4 - 3)必ずしも添付の分離性能(PM2.5サイクロン、図4 - 4)ではないが大粒子をカットできることを確認した。

4 - 1 - 3 柴田科学 PM4サイクロン(新規作成)

吸引流量が1.7 L/minにおいて50%カット径が4 μm となる構造とした。図4 - 5の左側のサイクロンは本研究のために試作したもので、除じん装置入口出口の濃度を測定するためインラインで使用できる構造とした。図4 - 7に実測したサイクロンの分級特性を示した。今回標準粒子(ポリスチレンラテックス粒子)を用いて既報(明星ほか、エアロゾル研究2017)と同様の方法で確認した。



図4 - 1 PM2.5 サイクロンを取り付けた2台のLD - 5

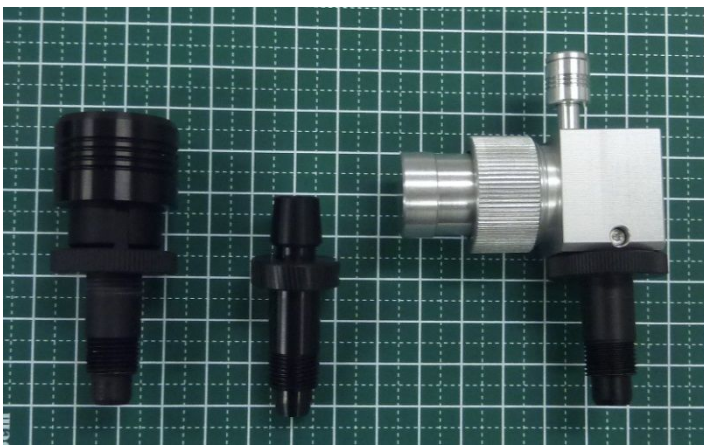


図4 - 2 本体から外したLD - 5 入口(左)とPM2.5 サイクロン(右) 中央はインライン吸入口

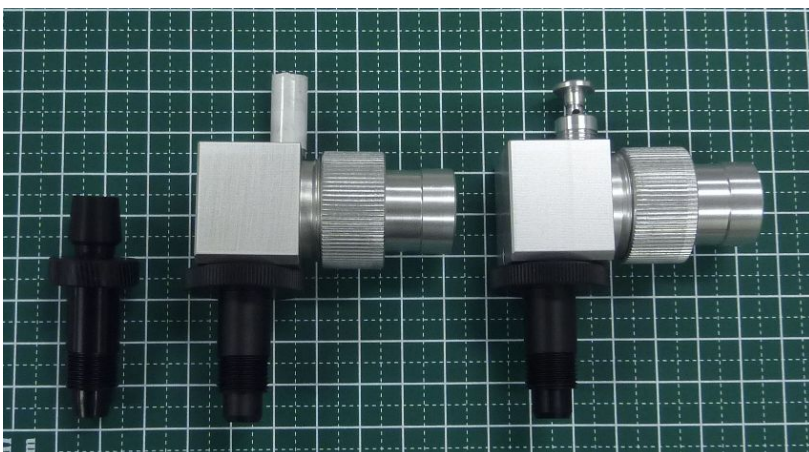


図4 - 3 本体から外したPM2.5 サイクロン(右)と集塵装置装着用PM2.5 サイクロン(中)

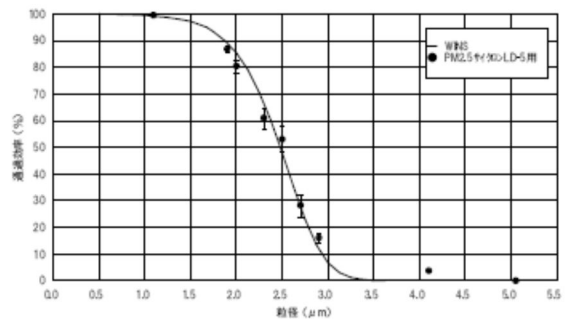
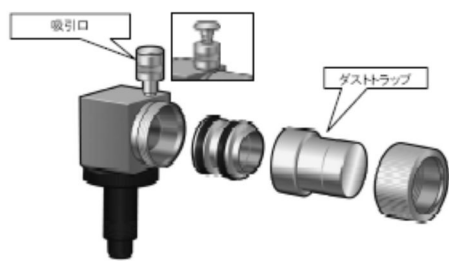


図4 - 4 PM2.5サイクロンの構造(左)と1.7 L/min吸引時の分離特性(右)
 元々のPM2.5サイクロンは吸引口を閉塞できる構造となっていてインラインで使用できないので図2 - 5のように入口部をストレートにした形態で別に作成した。

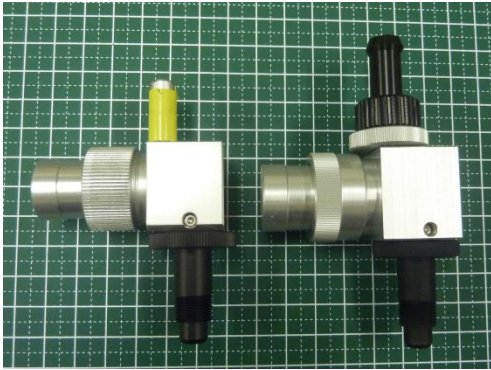


図 4 - 5 PM2.5 サイクロン (左) と PM4 サイクロン (右)
PM4 サイクロンの方が胴の径が少し大きい。

2017/11/2

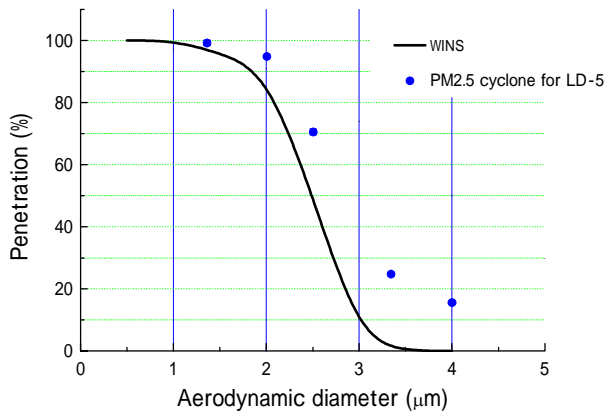


図 4 - 6 PM2.5 サイクロンの粒径別の 1.7 L/min 吸引時の分離性能
図中の青のキーが本研究で測定した結果、実線は PM2.5 の分離の定義 (WINS)。

2017/10/27

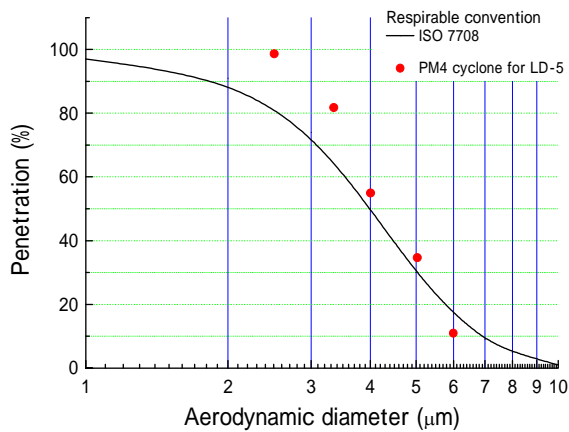


図 4 - 7 PM4 サイクロン (下) の粒径別の 1.7 L/min 吸引時の分離性能
図中の赤のキーが本研究で測定した結果、実線は吸入性粉じんの定義の線。

4 - 1 - 4 粒径別粉じん濃度測定装置（電氣的減圧インパクト、ELPI）

電氣的低圧インパクト（以下 ELPI, DEKATI 東京ダイレック株）は本体に収納されているコロナチャージャ、12段のカスケードインパクト、各インパクトに接続されたエレクトロメーター、吸引用外付けのエアポンプ、制御・計測用 PC で構成されている。運転・停止、運転パラメータ設定、データ表示・集録等は専用ソフトで行うことができる。吸引空気量 10 L/min で吸引された粒子は、コロナチャージャで荷電された後に 12 段のインパクトに入り、各段でミクロンサイズの大きな粒子からナノ粒子まで順に衝突板に捕集される。また各インパクトのノズル径とノズル数は、後段になるほど流速を大きく、減圧にすることで微小な粒子を捕集できるように設計されている。衝突板に捕集した荷電粒子はエレクトロメーターによりその電荷量（電流量）を測定され、粒子個数ないし粒子質量が計算により求められる。本体重量は 20kg 以上で付属ポンプも同程度の重量があり、見た目ほど移動が容易とはいえない。

除じん装置の入口と出口に各々サンプリング口を LD-5 と同じ場所に取り付け、ELPI は 1 台であるので交互に濃度を測定した（図 4 - 8 参照）。このため測定時間は 10 分間ほど必要で濃度変動に影響される。除じん装置の通過率は ELPI の入口と出口の電流量の比を取ることによって求めた。ここで使用した ELPI の 12 段の各衝突板の平均分離径は以下のとおりである。

- Stage 1) 0.039 μm
- Stage 2) 0.070 μm
- Stage 3) 0.118 μm
- Stage 4) 0.199 μm
- Stage 5) 0.314 μm
- Stage 6) 0.481 μm
- Stage 7) 0.758 μm
- Stage 8) 1.224 μm
- Stage 9) 1.945 μm
- Stage 10) 3.07 μm
- Stage 11) 5.15 μm
- Stage 12) 8.10 μm



図 4 - 8 電氣的低圧インパクト（ELPI）の分離粒径と外観（手前の台車上）

4 - 2 除じん装置

4 - 2 - 1 除じん装置を含む実験装置

図4 - 9に実験に使用した装置の構成を示す。小型集じん装置（アマノ株式会社 VNA15 型 0.75 kW 200V 3相）にインバータ（三菱電機株式会社 FR-D720, 0.75 kW 200V 3相）を接続し、60Hz を上限にモータの周波数を制御してファン風量を調節した。小型集じん装置は前年度の作業環境で使用されていた除じん装置に比べ風量は4分の1であるが同種の構造である。ろ布の圧力損失はデジタル微差圧計（株式会社クローネ、KS2700、0 - 1000 Pa、1 Pa 単位）を用いて連続測定をした。その他の圧力はマノスターゲージにより測定した。吸引空気量は塩ビ製のベルマウスを用い、ISO5801 で使用されている壁の静圧が速度圧を示すという方法を採用した。

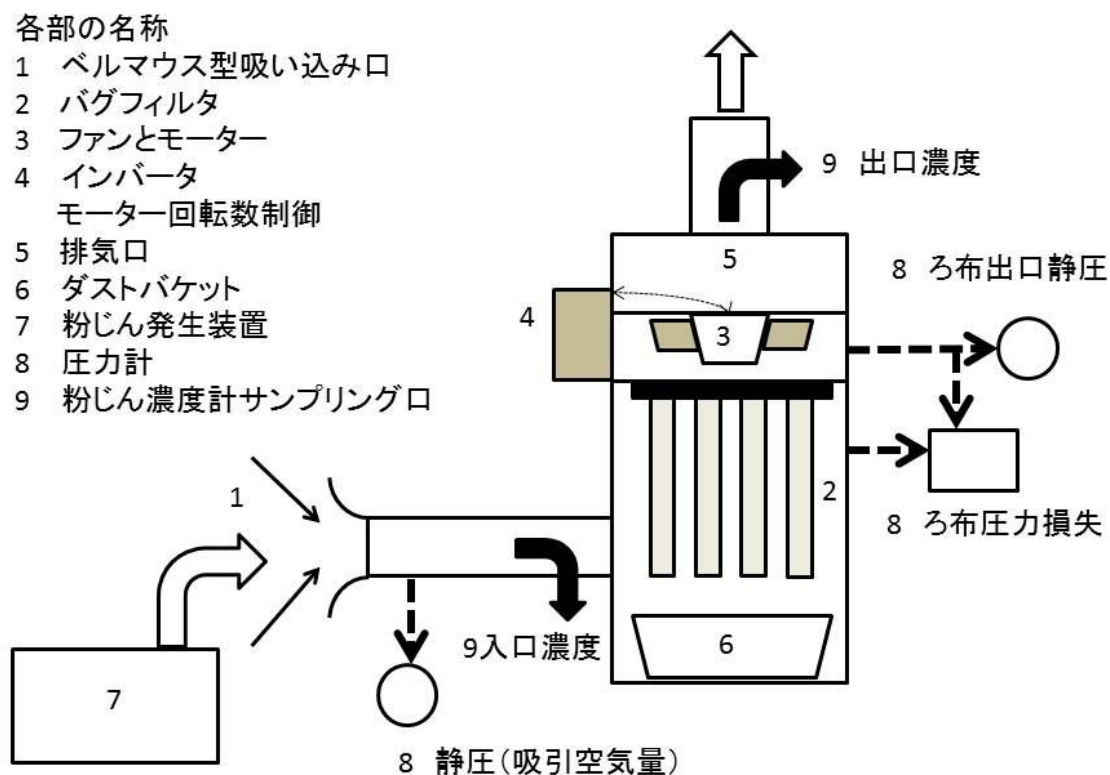


図4 - 9 実験装置の構成

ろ布はこの集じん装置純正の2種類のろ布、帆布フィルタとファインフィル（FF）フィルタを使用した。吸引口の内径は125mmで排気口の内径は200mmであり、粉じん計の入口側のサンプリング管（銅管）は内径4mm、出口側のサンプリング管（銅管）は内径8mmにして粉じん計（LD-5 PM2.5 サイクロン付）に接続した。吸引口はベルマウス管を

取り付け、排気口は屋外に出した。

試験用粉じんの発生は種々検討して、最終的にテーブルフィーダー・エジェクター（柴田科学(株)DF-3）を採用した。（図4 - 10参照）DF-3 のホッパー（写真左の黒い蓋の内部）に石灰粉（アトマイト）を供給して、回転テーブルの溝に入った粉体を左のエジェクター機構で吸引分散した。最終的にホッパー底部に粗い金網を置き、粉体の塊を壊すようにした。

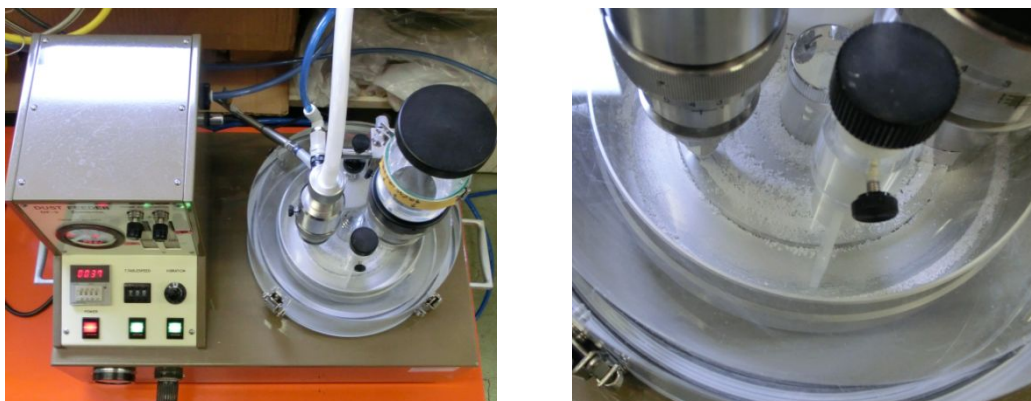


図4 - 10 テーブルフィーダ（柴田科学(株)DF-3）と溝を改造した回転テーブル（右）

4 - 2 - 2 除じん装置の吸引風量の計測

入口の風量計測にはベルマウスを用いた。ISO5801 Industrial fans - Performance testing using standardized airways で示されているベルマウスを図4 - 11に示す。

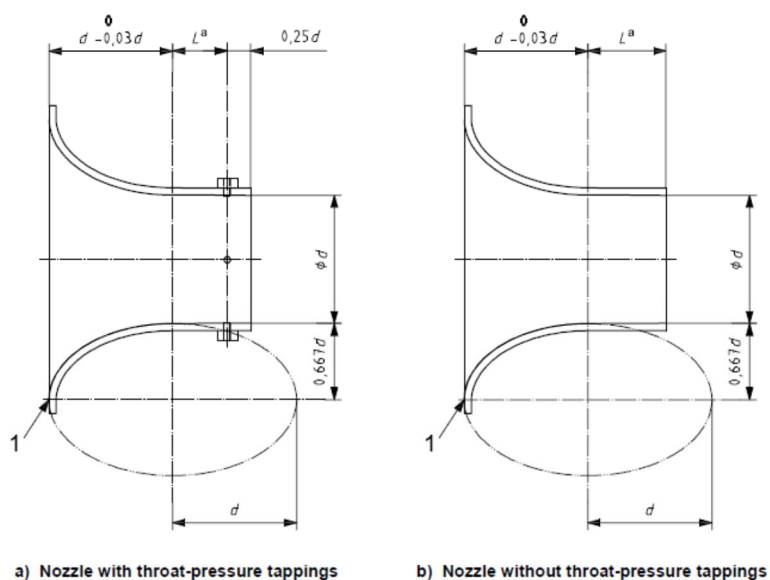


図4 - 11 ベルマウスと圧カタップの位置 $L_a=0.6 d$

ベルマウスは入口部の圧力損失がほとんどないため、静圧 (= 速度圧 + 圧力損失) が速度圧となる。ここで測定された圧力 P (Pa) を速度圧として体積流量 Q (m^3/s) は以下の式で求められる。

$$Q = 0.25 \pi d^2 \sqrt{2 P / \rho}$$

ここで ρ は空気の密度 ($1.2 \text{ kg}/\text{m}^3$) である。吸引口の内径 d は 125 mm であり、これを基準に圧力タップ (入口から 117 mm) を設置したが、一カ所のみである。測定結果を図 4 - 1 2 に示す。ベルマウス下流での速度圧はダクト中心の風速から計算された速度圧と近い結果を示した。

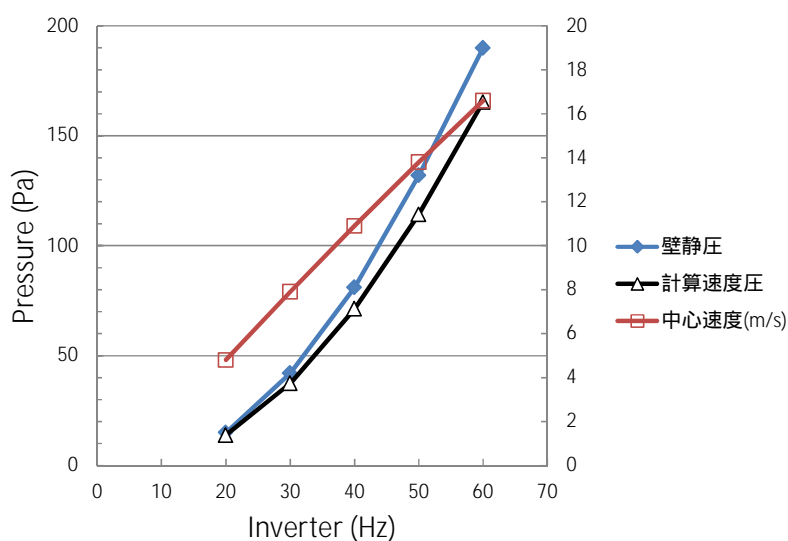


図 4 - 1 2 インバータ周波数とベルマウス下流静圧と熱線風速計によるダクト中心風速およびそれから計算される速度圧



図 4 - 1 3 入口のベルマウスと圧力タップ

4 - 2 - 3 除じん装置のろ布の構造

ろ布はこの集じん装置純正の2種類のろ布、帆布フィルタとファインフィルフィルタ(FF)を使用した。ろ布は封筒型で10枚が一つの枠に固定されている(図4-14参照)。ろ布の面積としては0.42m x 0.48mが10枚の前後で2倍で総計4.03m²となる。風量が10m³/minでは平均面速度は4cm/sとなる。図4-14の黒い部分が気密をとるためのパッキンで厚みが約8mmの軟質ゴムである。

帆布フィルタとファインフィルフィルタ(FF)の表面の顕微鏡写真を図4-15に示す。帆布フィルタは木綿の布であり、ファインフィルフィルタは木綿の布にフッ素樹脂多孔質膜をラミネート加工したものである。カタログ仕様では帆布フィルタは10μm程度の乾いた粉体を対象とし、ファインフィルフィルタは10μm以下の乾いた粉体を対象としている。

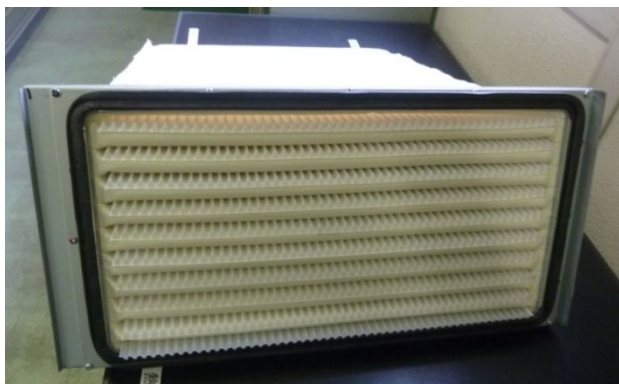


図4-14 ろ布の構造 下流側からの写真
波状の板はスペーサーで黒い部分がパッキン



図4-15 ろ布の表面 左 帆布フィルタ 右 ファインフィル(FF)フィルタ
写真のサイズは最小0.2mm(線の幅)

4 - 2 - 4 除じん装置のろ布取り付け

試験粉体を用いた集じんにおいては、この2種類のろ布を指示通り除じん装置に装着して使用した。しかし、取り付け部の漏れについて検討するため、**図4 - 16**に示すようにろ布に隙間を作って風量と圧力損失を計測した。スペーサーは磁石棒で厚みが6.3mm、8.0mmと後半10.3mmも使用した。パッキンのゴムの厚みは約8mmであり、ゴム表面に圧着時にできる凹みはあるが8.0mmスペーサーとほぼ同じである。

各部の名称

- 1 ベルマウス型吸い込み口
- 2 バグフィルタ
- 3 ファンとモーター
- 4 インバータ
モーター回転数制御
- 5 排気口
- 6 ダストバケット
- 7 粉じん発生装置
- 8 圧力計
- 9 粉じん濃度計サンプリングロ

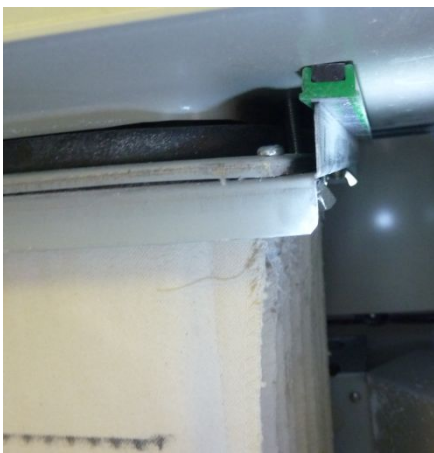
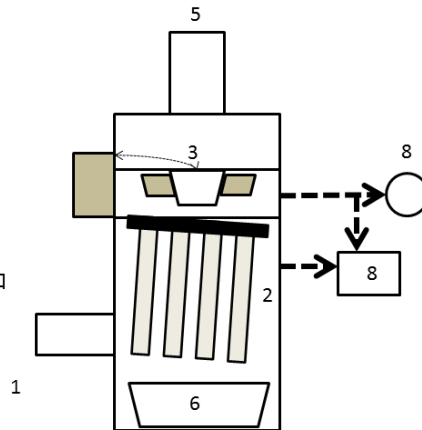


図4 - 16 ろ布の取り付け状態の検討

右の写真は8mmのスペーサーを入れて隙間を作った状態。

4 - 2 - 5 粉じん計の取り付けとサンプリング管の径の比較

試験粉体を分散し、ダクトに内径4 mmと8 mmの2本のサンプリング管を近接して挿入して濃度をサイクロン付粉じん計 LD-5 で計測した結果を図4 - 17に示す。LD-5の吸引空気量は1.7 L/minであり、内径4 mmでは吸引速度は2.25 m/s、内径8 mmでは0.56 m/sである。除じん装置はインバータを40Hzで運転し、ダクト内の平均風速は11.5 m/sであった。平均すると両者の濃度比は96%であり、ほぼ同じであることがわかった。ダクト内の風速の方が大きいのでサンプリング管に流入する粒子の濃度はダクト内に比べ増加することが予想される。除じん装置出口の平均風速は4.5 m/sであるので、除じん装置の入口濃度測定には内径4 mmの管、出口には内径8 mmの管を使用した。サンプリング管内外の速度比は入口で0.2、出口で0.12となる。上流下流とも同程度の速度比であり、両者の比をとる通過率測定でのサンプリング流量の影響は少ないと思われる。

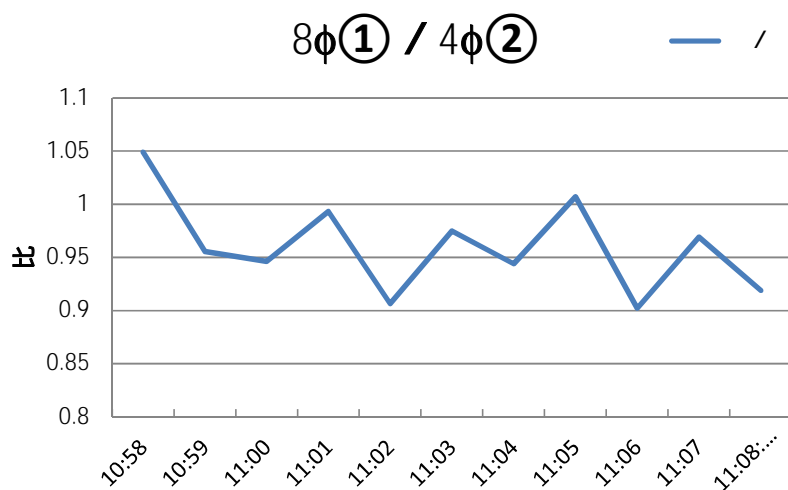


図4 - 17 サンプリング管の径と濃度の比

4 - 2 - 6 粉じんサンプリング管の除じん装置へ取り付け

平成 30 年度は、除じん装置に孔をあけ、内径 4.5 mm の 4 本のサンプリング用銅管をろ布の前後に 130mm 挿入し、サイクロン付粉じん計 LD-3K で濃度を計測する構成とした。設計図と写真を図 4 - 18 に示す。除じん装置内部は負圧であり、1.7 L/min を確保するため LD-3K の吸引補助にミニポンプ (MP 300NII) を用いた。

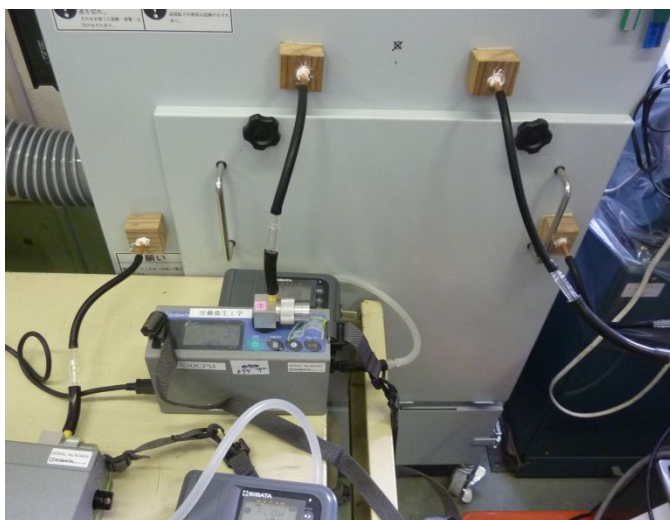
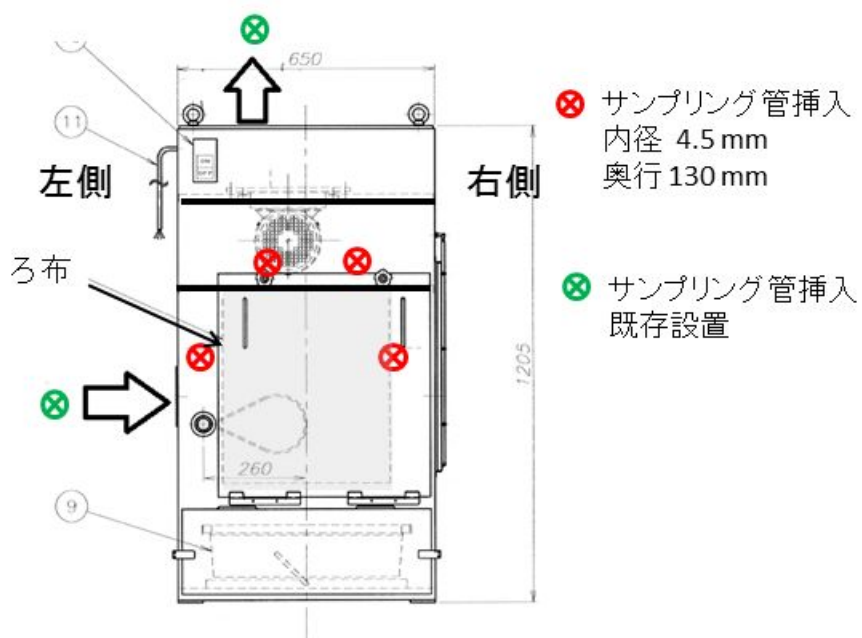


図 4 - 18 除じん装置へのサンプリング管の取り付け
上がるろ布の下流、下がるろ布の上流となる。写真はサンプリング管とミニポンプを接続した粉じん計

4 - 3 結果（平成29年度）

4 - 3 - 1 - 1 帆布フィルタの捕集性能

石灰粉を噴霧分散して帆布フィルタを装着した除じん装置に2台のLD-5を用いて除じん装置の入口・出口濃度を連続測定した。ファンモータの運転はインバータを40Hzとし、ベルマウスの静圧から得られた始めの吸引空気量は $8.1 \text{ m}^3/\text{min}$ （11 m/sのダクト内風速、ダクト内径125mm）であった。1月26日から2月14日までの結果をつないだもので、二成分流動層による石灰粉じん発生が不安定なため、2月9日に粉体供給をテーブルフィーダー・エジェクター（柴田科学DF-3）に変更した。

結果を図4-19に新たに粉じんを供給し始めてからの変化を示す。帆布フィルタの初期の捕集効率は低く、通過率が10%を超えているが、6時間程度で1%ほどまで低下する。当初、石灰粉じん発生が不安定なため入口濃度が安定しない状態であったが、PM2.5サイクロン付LD-5の質量濃度換算係数は約 $0.003 \text{ (mg/m}^3/\text{cpm)}$ であり、質量濃度は $1\sim 5 \text{ mg/m}^3$ ほどであった。ISOで審議されている供給濃度（ 2.5g/m^3 ）の1000分の1ほどであった。しかし、この濃度でも捕集効率は上昇し、2月16日に1時間、2月22日に30分間、2月27日に2時間、2月28日に5時間半の石灰粉じん発生と集じんを続けた。最終日の通過率と圧力損失の測定結果を図4-20に示す。2月28日には通過率は0.2%を切っていたが、ろ布圧力損失は始めの415Paから600 Paまで上昇した。

ELPIを用いて除じん装置の捕集性能を2月22日に測定した。粉じん計LD-5も同時に計測し、両者を比較した。図4-21に示す結果から帆布のバグフィルタを用いた除じん装置は、LD-5では1.2%の通過率であっても、サブミクロンの粉じん粒子の通過率が20%を超えることがわかる。バグフィルタは粉じん層の隙間で粒子を遮り効果で捕集するため、粉じん層と同程度の大きさの粒子は捕集する。しかし、ここでは粉じんの堆積は薄く微小粒子捕集は期待できないと思われる。

作業環境において捕集対象の発じん源の粒子濃度がそれほど高くなく、また断続的な発生の場合に初期捕集効率の劣るここで用いたろ布を用いると、粉じん層は長時間形成されず、払い落としは長時間（日単位）で行わなくてもよいと思われる。

図4-19から図4-21まで通して流入する石灰粉じんの濃度が低下するとLD-5の示す通過率も高くなる。これを確かめるため石灰粉を分散せず、大気じんの濃度が高い日に図4-21と同様の測定をファンの周波数を変えて実施した結果が図4-22である。図4-21の通過率と分離径の交点から粉じん計LD-5で計測している石灰粉じん粒子の大きさは1から $2 \mu\text{m}$ であることがわかる。これは粉じん計に取り付けたPM2.5サイクロンが作動しているためと思われる。一方、図4-22に示すように大気じんを用いるとこのサイズは $1 \mu\text{m}$ 以下となり、大気じんの中にミクロンサイズの粒子が少ないためと思われる。LD-5で大気じんを使用して測定すると、石灰粉じんの通過率は0.2%以下（図4-20参照）の状態であっても計測した通過率は1%ほどであった。また除じん装置を20Hzで運転した場合（面速を下げた場合）は40Hzに比べ通過率は低下している。

LD-5 を用いた通過率測定では、上流側の濃度が 1000 cpm 程度あれば 0.1% 程度までの通過率が測定可能である。しかし、上流側の濃度が低下すると下流の濃度も減少し、かつ大気じんの微小粒子が中心となるため通過率は上昇する。このため上流側の濃度が極端に低下した場合は欠測値とした。

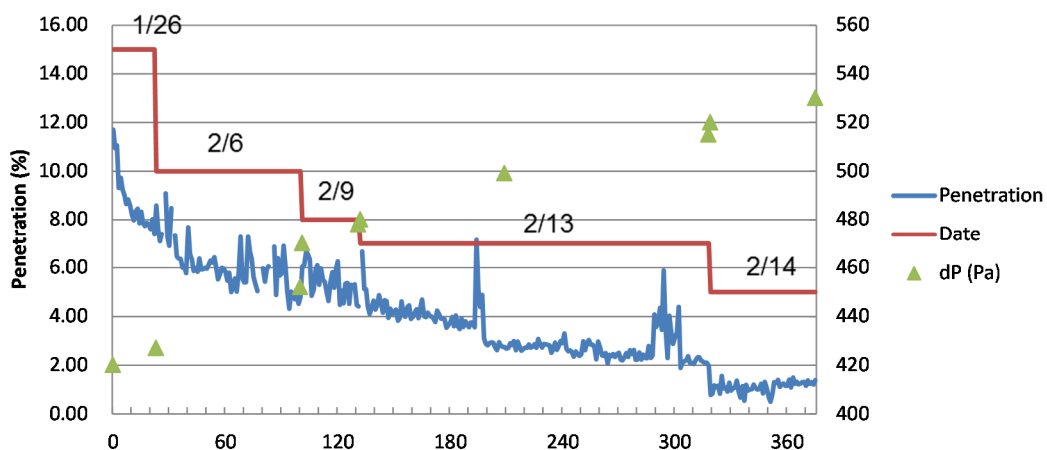
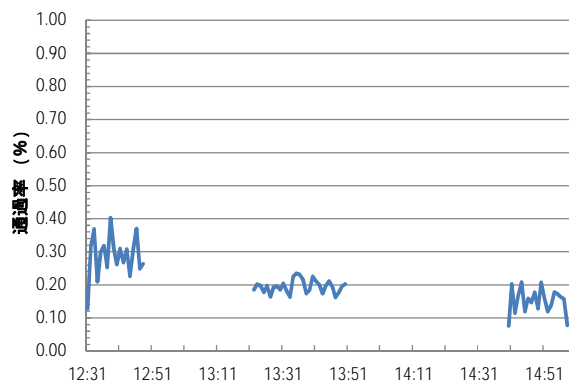


図 4 - 1 9 除塵装置（帆布フィルタ）の粉じん通過率（左縦軸）とろ布圧力損失（右縦軸）の経時変化

1月26日から2月14日まで、経過時間は分単位



2018/2/28

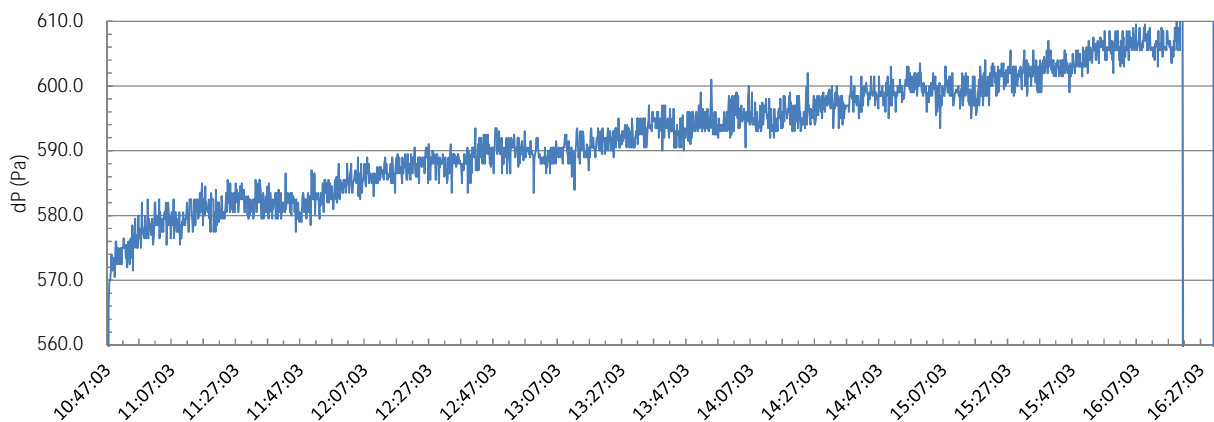


図4 - 20 除じん装置（帆布フィルタ）の粉じん捕集効率（上）とろ布圧力損失（下）の経時変化（最終日2月28日）

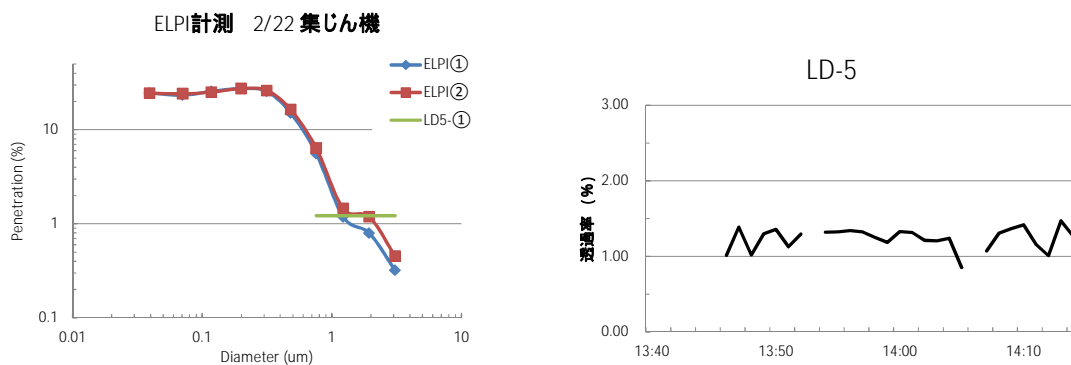


図4 - 21 ELPI と粉じん計 LD-5 を用いた除じん装置（帆布フィルタ）の石灰粉じんの通過率の測定

左 ELPI と LD-5、右 LD-5 の結果、右の図の欠測は発生濃度が極端に低下したため。

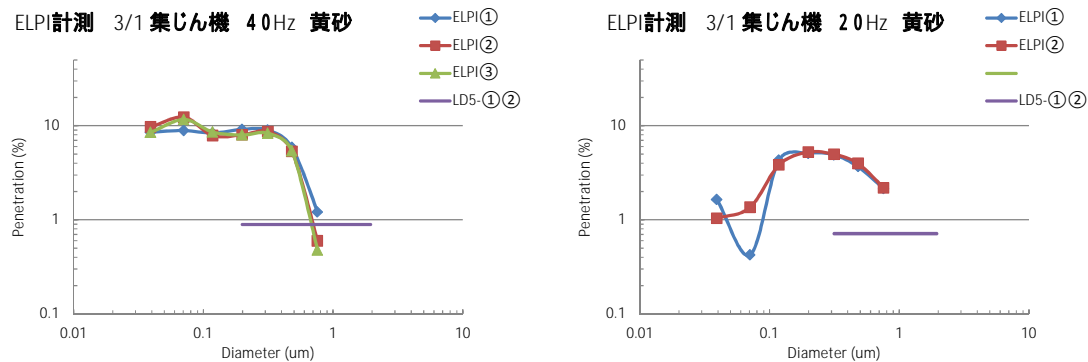


図4 - 2 2 ELPI と粉じん計 LD-5 を用いた除じん装置（帆布フィルタ）の通過率の測定
測定対象粒子は黄砂じん、石灰粉じんの通過率は0.2%以下（図4 - 2 参照）
左は除じん装置を40Hzで運転、右は20Hzで運転した場合。

4 - 3 - 1 - 2 帆布フィルタの払落しの後の結果

上記の石灰粉じんの発生と捕集で一区切りとして、バグフィルタの上の粉じんを除じん装置の払落し機構を用いて手で払落しを行った。その前に内壁から回収した石灰粉は30gであり、後に手動で払い落として回収した石灰粉は24gであった。手で払落しを行った後にダストバケットに落下した石灰粉の様子を図4 - 2 3に示す。粉体のほとんどは吸引口近くの奥左側にのみ落下しており、吸引口近くの（奥の）ろ布表面に堆積した粉じんと思われる。これは粗大粒子がろ布に直接衝突することを避けるため多孔板が設置されており、ろ布の置かれた空間は粉じんが一樣に広がるには狭いためと思われる。このことから厚い粉体層が集塵をしているということではなく、ろ布の表面に僅かに粉体層があれば99%ほどの捕集効率で集塵できることがわかる。

払落し後の除じん装置の捕集性能を測定した結果と上流の粉じん計の濃度の変化を図4 - 2 4に示す。粉じん発生が低下すると通過率が上昇するが、ここでは安定して高濃度の粉じんの発生ができた。最初の通過率は約0.2%であり、払落し前（図4 - 2 0）とほとんど同じで低下は見られなかった。圧力損失は、払落し前610Paから605Paまで低下したが、この4時間で615Paまで再度上昇した。

その後、3月6日に石灰粉を12g、3月7日に26gを粉じんとして供給し、最終的に圧力損失は635Paまで上昇し吸引風量は40Hzで7.3 m³/min（9.9 m/sのダクト内風速、ダクト内径125mm）であった。ここでさらに手動で払落しを行った。払落し後の圧力損失は625Paまで低下し、吸引流量は7.5 m³/min（10.2 m/sのダクト内風速、ダクト内径125mm）であった。ダストバケットに回収した石灰粉は6.8gであった。



図4 - 2 3 払落し直後のダストバケットの石灰粉
画面上方左が粉じん吸引口近く、画面下が取り外し蓋側

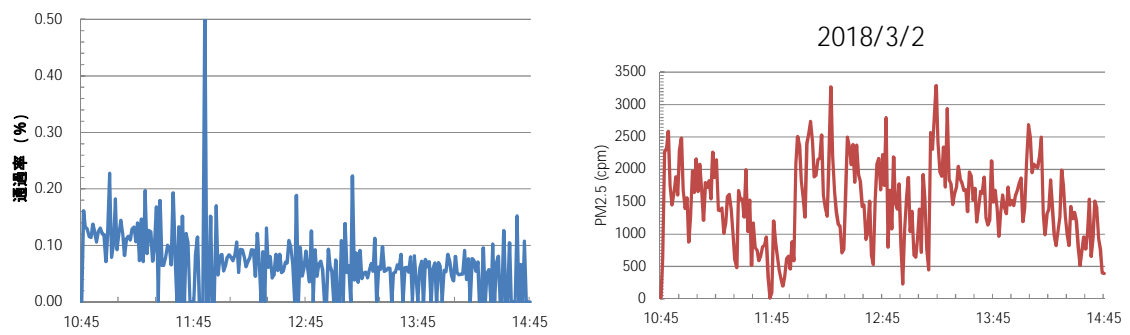
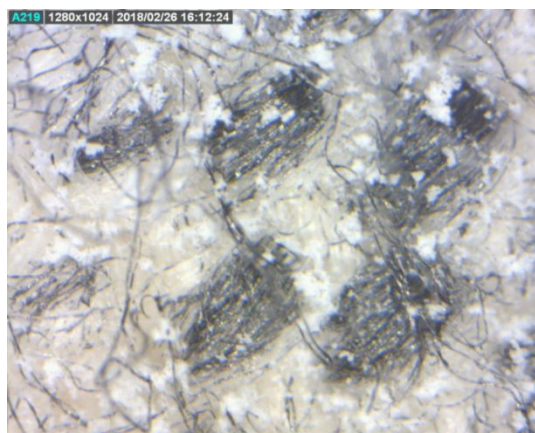


図4 - 2 4 払落し後の除じん装置の捕集性能と供給した石灰粉じんの濃度

4 - 3 - 1 - 3 帆布フィルタの表面状態

図4 - 25に吸引口とは反対側のろ布の表面の顕微鏡写真を新品と比較して示す。粉じん堆積状態は図4 - 21と同じく2月22日後の状態ではLD-5の通過率は1%程度である。その後LD-5の通過率が0.1%程度となり、手動で払落しを行った最終状態(図4 - 24に示す測定を行った後)で、ろ布を除じん装置から取り外して表面を再度顕微鏡撮影した。石灰粉じんの堆積量は、吸引口側(除じん装置奥)と反対側(除じん装置の開口部)では異なっていた。石灰粉は付着しやすいため払落し後も表面に付着していると考えら、他の粉じんでは同じとはいえないと思われる。



(左)新品 (右)石灰粉堆積(中間2月22日) 黒い部分はろ布に引いた油性ペンの線



最終の石灰粉堆積状態、(左)吸引口と反対側のろ布表面 (右)吸引口側のろ布表面

図4 - 25 帆布フィルタの表面の顕微鏡写真

4 - 3 - 2 - 1 ファインフィル (FF) フィルタの結果

除じん装置に FF フィルタを装着し、2 台の LD-5 を用いて除じん装置の入口・出口濃度を連続測定した。ファンの運転は帆布フィルタと同じくインバータを 40Hz とし、ベルマウスの静圧から得られた始めの吸引空気量は $9.5 \text{ m}^3/\text{min}$ (13 m/s のダクト内風速、ダクト内径 125mm) であった。粉体供給はテーブルフィーダー・エジェクター (柴田科学 DF-3) を用いた。

粉じん計 LD-5 による通過率の結果を図 4 - 2 6 に示す。FF フィルタの初期の捕集効率は高く、通過率が 0.5% 以下であった。同時に ELPI を用いて除じん装置の捕集性能を測定し、粉じん計 LD-5 の結果と比較した。結果を図 4 - 2 7 に示す。サブミクロン粒子に対しても捕集性能は帆布フィルタに比べ高いと思われる。

ここで測定した結果からは FF フィルタは低圧力損失で高効率であり、性能が高いが、単価は帆布フィルタの 3 倍であり、現場のろ材の選択で採用されるか問題は残る。

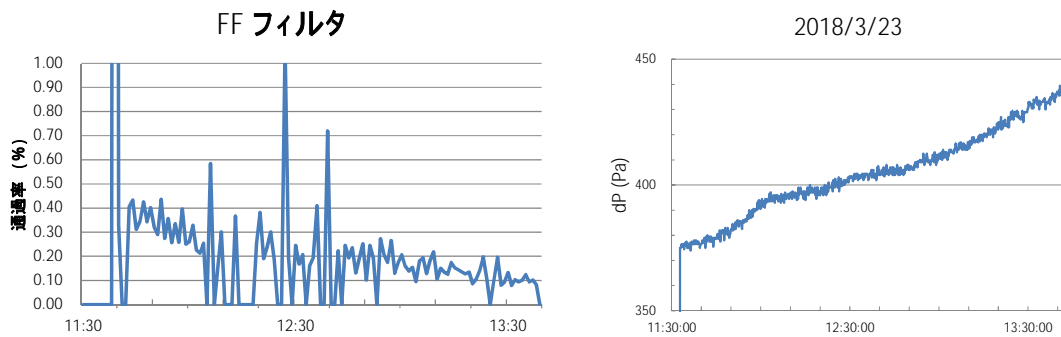


図 4 - 2 6 FF フィルタを装着した除じん装置の捕集性能とろ布の圧力損失の変化

ELPI計測 3/23 集じん機 40Hz 石灰

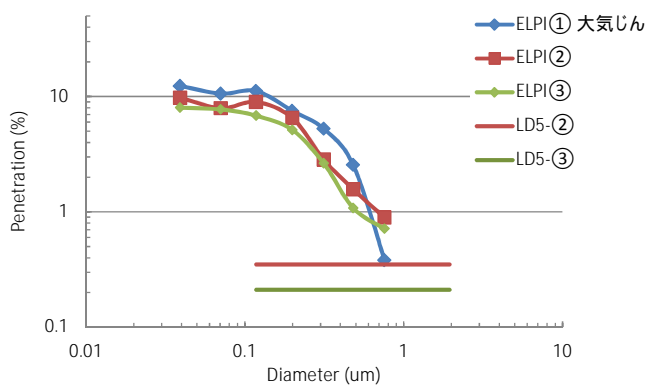


図 4 - 2 7 ELPI と粉じん計 LD-5 を用いた除じん装置 (FF フィルタ) の通過率の測定