

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。

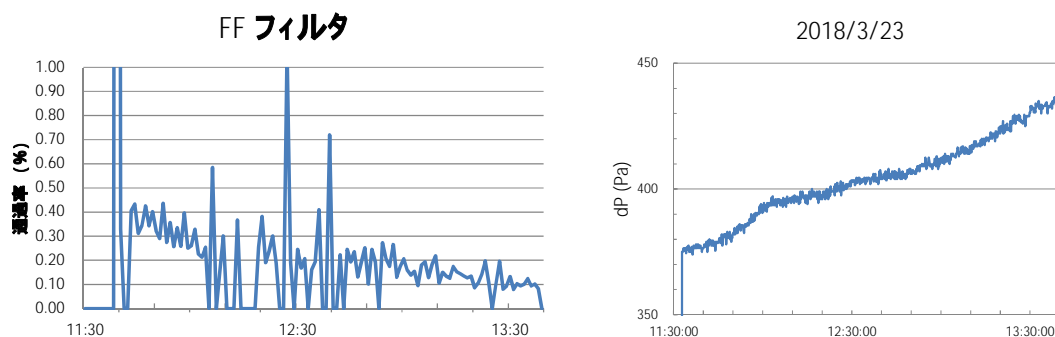


図 4 - 2 6 FF フィルタを装着した除じん装置の捕集性能とろ布の圧力損失の変化

ELPI計測 3/23 集じん機 40Hz 石灰

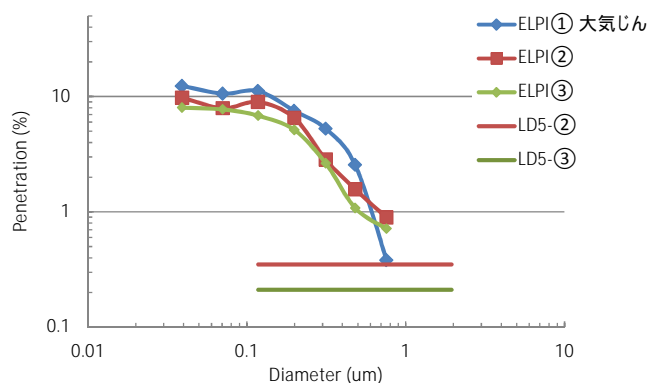


図 4 - 2 7 ELPI と粉じん計 LD-5 を用いた除じん装置 (FF フィルタ) の通過率の測定

4 - 3 - 2 - 2 FF フィルタの払落し後の結果

LD-5 を用いた通過率はすでに測定下限にあるので、以後、石灰粉じんの発生による粉じんの堆積のみを進めた。その後、計 18 g を除じん装置に供給して、FF フィルタ上の粉じんを払落し機構を用いて払落しを行った。ダストバケットに回収した粉体量は 3.5 g であり、他はろ布表面と装置内壁にあるものと考えられる。

4 - 3 - 3 除じん装置の漏れの影響

4 - 3 - 3 - 1 吸引風量と帆布フィルタの圧力損失

帆布フィルタを除じん装置に設置して石灰粉じんを供給し、吸引風量と圧力損失を測定した。吸引風量はインバータでファンモータの回転数を 15 Hz ~ 50 Hz の範囲で調整した。粉じん堆積とともに風量は減少し、圧力損失は増加する。図 4 - 2 8 に入口速度圧と圧力損失の関係を示す。図中の実線は 1 : 1 と 1 : 0.5 の傾きを示し、風量の 2 乗（速度圧）に比例か、風量の 1 乗に比例かを検討した。ろ布だけでは層流で風量の 1 乗に比例すると思われるが、内部の構造からその中間となり、風量が増加すると乱流の 2 乗に近くなることがわかる。一方、4 - 2 - 4 の項で示した除じん装置のろ布取り付け部に隙間を作る方法で、同じく風量と圧力損失の関係を示したのが図 4 - 2 9 である。図 4 - 2 8 と図 4 - 2 9 を重ねても各回転数で結果はほぼ同じライン上に乗る。漏れがある場合（乱流）と粉じん堆積だけの場合（層流）で本来傾向が異なるはずであるが最大 8mm ほどの隙間では違いは明確ではなかった。隙間からの漏れ量（風量）を図 4 - 2 9 を拡大した図 4 - 3 0 に示すように図的に推定した。同じ圧力損失で漏れのある場合とない場合での風量（ダクト内速度）を求めた。帆布フィルタで隙間が 8mm のとき 40Hz でファンを運転した場合は 10.8 m/s、漏れない場合は 8.7 m/s となり、比率は 80% となる。同様に 30Hz で 78%、20Hz で 75% となる。従って 40Hz では 20% の漏れの量（風量の比）と予想される。回転数の低い場合の方が漏れが多いように見える。速度圧と風速の関係式は 4 - 2 - 2 に示した。

取り付け部に漏れがあると、除じん装置を運転しても圧力損失は上昇せず吸引風量は維持され、フードとしての性能は維持されているように見えるが、排気に粉じんが含まれることになり、室内に排気した場合は危険である。

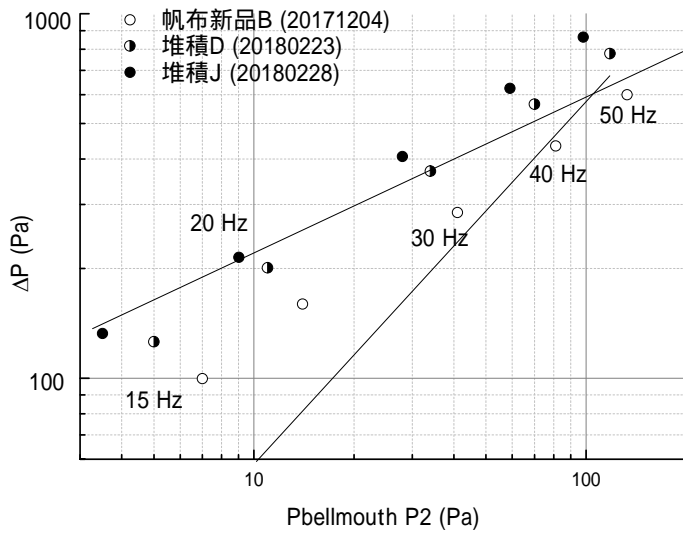


図4 -2 8 粉じんの堆積とともに変化する入口速度圧（吸引風量の二乗）と圧力損失の関係

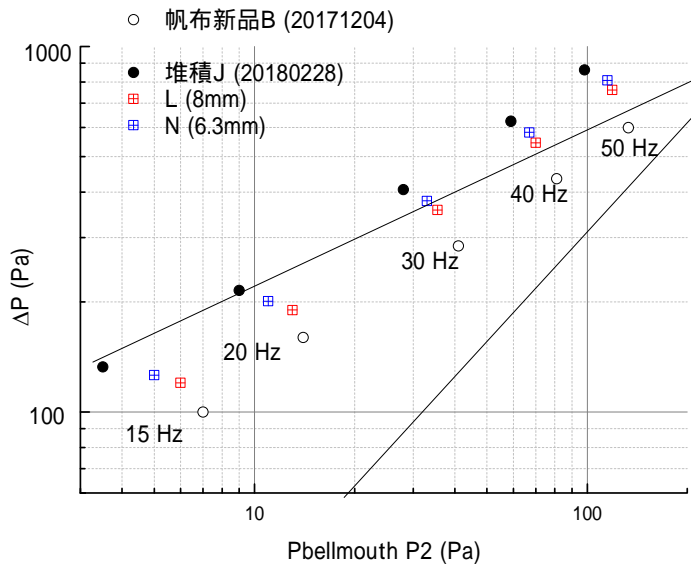
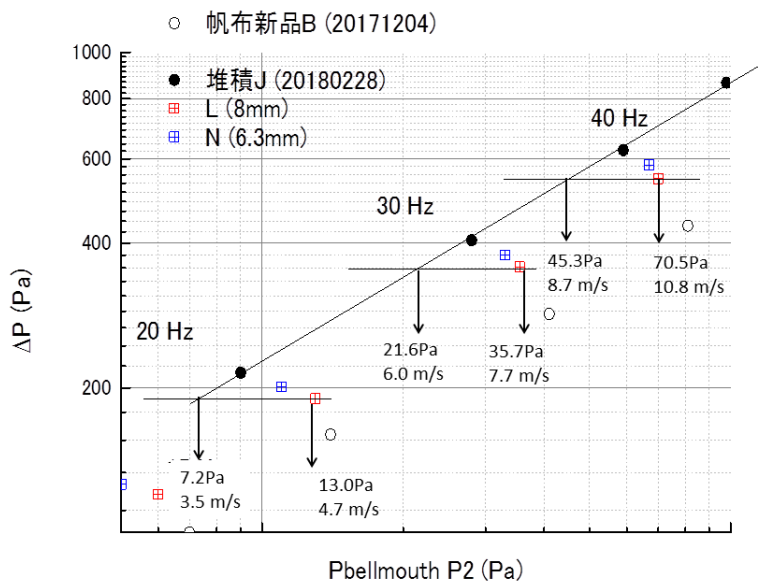


図4 - 2 9 フィルタ取り付け部の漏れとともに変化する入口速度圧（吸引風量の二乗）と圧力損失の関係

漏れのない場合と取り付け部に隙間を6.3mmと8mm置いた場合の結果



1

図4 - 30 フィルタ取り付け部の漏れと入口速度圧（吸引風量の二乗）と圧力損失の関係

同じ圧力損失で吸引する場合の漏れの有無の推定ための方法として除じん装置のフィルタ部を通過する風量（左）と漏れを含んだ全吸引風量（右）の組（隙間8mmの場合）

4 - 3 - 3 - 2 ファインフィル (FF) フィルタの圧力損失と風量

FF フィルタを除じん装置に設置して石灰粉じんを供給し、吸引風量と圧力損失を測定した。風量はインバータでファンモータの回転数を 15 Hz ~ 50 Hz の範囲で調整した。粉じん堆積とともに風量は減少し、圧力損失は増加する。図 4 - 3 1 に結果を示す。一方、4 - 2 - 4 で示した除じん装置のろ布取り付け部に隙間を作る方法で同じく風量と圧力損失の関係を示したのが図 4 - 3 2 である。図 4 - 3 1 と図 4 - 3 2 を重ねても各回転数で結果はほぼ同じライン上に乗る。漏れがある場合と粉じん堆積だけの場合では、帆布フィルタの 8mm の隙間に比べ違いは明確ではなかったため、さらに大きな 10.3mm の隙間を作成して測定した。8mm と 10.3mm の隙間では漏れの違いは大きいと推定された。

漏れの量 (風量) を図 4 - 3 2 を拡大した図 4 - 3 3 に示すように図的に推定した。同じ圧力損失で漏れのある場合とない場合での風量 (ダクト内速度) を求めた。FF フィルタで隙間が 10.3mm のとき 40Hz でファンを運転した場合は 11.5 m/s、漏れない場合は 9.6 m/s となり、比率は 83% となる。同様に 30Hz で 80%、20Hz で 77% となる。従って 40Hz では 17% の漏れと予想される。回転数の低い場合の方が帆布フィルタと同じく漏れが多いように見える。図 4 - 3 0 で示した帆布フィルタと 8mm の隙間の組み合わせで比較すると、FF フィルタの比率は 40Hz で 94% となる。同様に 30Hz で 95%、20Hz で 90% となり、帆布フィルタに比べ漏れの量は少ないことがわかる。この比率について帆布フィルタと FF フィルタの結果を表 4 - 1 にまとめた。ファンの風量を大きくすると (回転数を増すと) 漏れは少なくなる傾向がある。またフィルタの粉じん堆積が進むと漏れは増加する。

同じ方法で FF フィルタに 8mm の隙間を入れて 50Hz でファンモータを運転した場合に粉じん計 LD-5 で除じん装置前後の大气じん濃度を測定した結果は 5.5% の漏れで、流量から推定される漏れは 3% であり、両者は近い関係を示した。

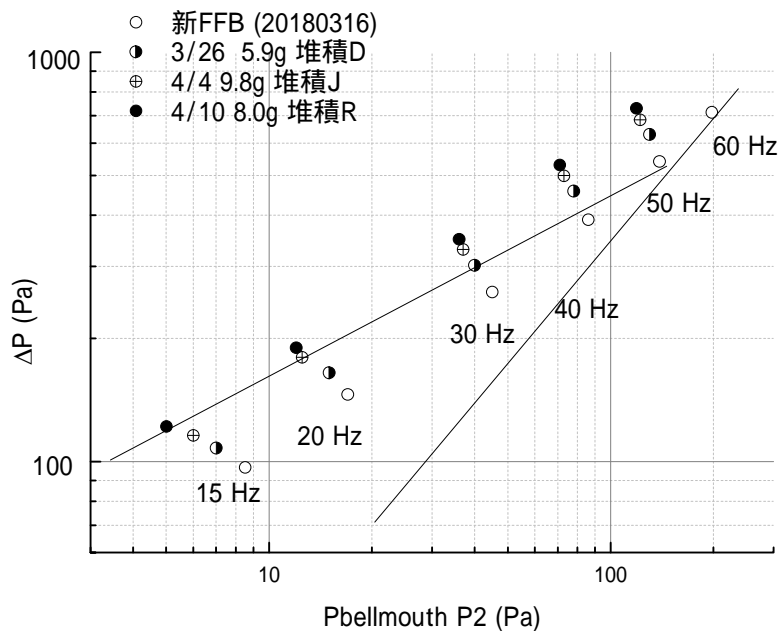


図 4 - 3 1 FFフィルタの粉じんの堆積とともに変化する入口速度圧（吸引風量の二乗）と圧力損失の関係

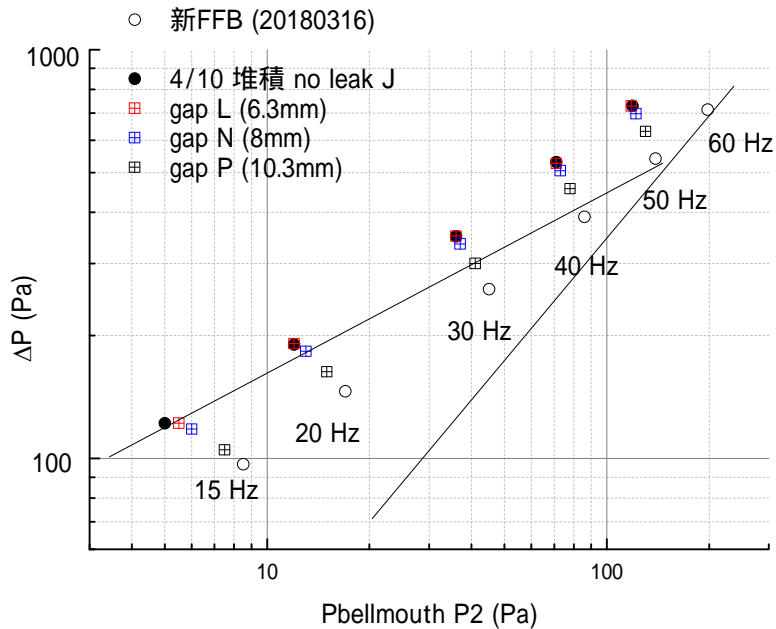
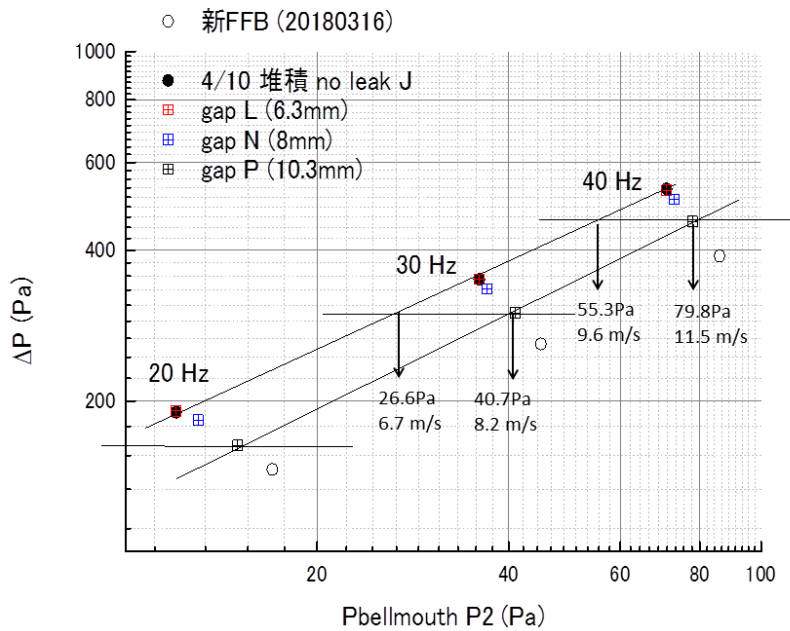


図 4 - 3 2 フィルタ取り付け部の漏れとともに変化する入口速度圧（吸引風量の二乗）と圧力損失の関係

漏れのない場合と取り付け部に隙間を 6.3mm、8mm、10.3mm置いた場合の結果



1

図 4 - 3 3 フィルタ取り付け部の漏れと入口速度圧（吸引風量の二乗）と圧力損失の関係

同じ圧力損失で吸引する場合の漏れの有無の推定ための方法として除じん装置のフィルタ部を通過する風量（左）と漏れを含んだ全吸引風量（右）の組（隙間 10.3mm の場合）

表 4 - 1 各吸引風量と隙間と漏れの比率（ろ過空気風量 Vc / 全空気風量 Vleak）の関係

帆布フィルタ 2月28日 最終

8mm leak	Vc (m/s)	Vleak (m/s)	Ratio (%)
15Hz	2.2	3.2	70.6
20Hz	3.5	4.7	74.5
30Hz	6.0	7.7	77.9
40Hz	8.7	10.8	80.6
50Hz	11.5	14.1	81.6

FFフィルタ 4月10日 最終

8mm leak	Vc (m/s)	Vleak (m/s)	Ratio (%)
15Hz	2.8	3.1	90.3
20Hz	4.2	4.7	89.4
30Hz	7.5	7.8	95.5
40Hz	10.4	11.0	94.5
50Hz	13.5	14.3	94.4

FFフィルタ 3月26日

8mm leak	Vc (m/s)	Vleak (m/s)	Ratio (%)
15Hz	3.3	3.4	95.5
20Hz	4.8	5.0	95.6
30Hz	7.9	8.3	95.2
40Hz	11.0	11.5	95.7
50Hz	14.4	14.8	97.3

FFフィルタ 4月10日 最終

10.3mm leak	Vc (m/s)	Vleak (m/s)	Ratio (%)
15Hz	2.5	3.5	71.4
20Hz	3.9	5.0	78.0
30Hz	6.7	8.2	80.9
40Hz	9.6	11.5	83.5
50Hz	12.5	14.7	85.0

図 4 - 3 0、4 - 3 3 参照

4 - 4 まとめ

4 - 4 - 1 性能測定装置

本研究で用いた測定装置などについて以下にまとめる。

1) 石灰粉じんの分散は凝集しやすく、ISO 関係でも安定分散に苦労しているが、本研究でも分散装置で閉塞を起こすことがしばしばあった。テーブルフィーダー・エジェクターに交換してから取り扱いはかなり容易になった。

2) 粉じん計 (LD-5) に PM2.5 用サイクロンを取り付けた測定装置は、測定対象の粉じんの大きさを規定できること、除じん装置入口側の高濃度の粉じんが流入しても粉じん計を守ることができる利点を確認された。

3) 既存の ISO などの除じん性能測定方法は入口側粉じん濃度を分散装置の粉体供給量を吸引空気量で割ったものとしており、本研究のように入口・出口ともに同じ粉じん計を使用して測定していない。粒子径の規定された通過率を得ることのできる本研究の測定の方が優れていると考える。

4) 本研究で試作した PM2.5 用サイクロンと吸入性粉じん用サイクロンの性能を確認した。

5) 非等速サンプリングについて検討した。サンプリング管の内径を 4 mm (吸引風速 2.25 m/s) と 8 mm (吸引風速 0.56 m/s) で比較してここで使用した 10 m/s ほどの風速では通過率測定に影響がないことを確認した。

6) 除じん装置入口の風速は、ベルマウス型の吸引口を用いることで測定が可能であった。静圧 (速度圧) 測定位置は結果に影響するので ISO5801 に従った位置にするべきと考える。

4 - 4 - 2 帆布フィルタ

帆布フィルタの結果について以下にまとめる。

1) 帆布フィルタは初期の通過率が 10% 以上あり、使用とともに通過率は減少する。現場での使用状況では、新品から約 1 カ月間の使用で除じん性能がでるようになるといわれている。昨年度の現場測定でも同様の帆布フィルタを使用していたが、新品の交換から約 2 ヶ月後に測定した結果であり、そこでは 0.1% ほどの通過率であった。

2) 帆布フィルタは圧力損失が始めの 1.3 倍ほど上昇したところで 1% 以下になるが、石灰の粉じんはフィルタ表面にうっすらと堆積している程度である。図 2 - 1 の時間 圧力損失曲線で、急速に圧力損失が上昇する始めの領域と考えられる。この状態での粉じんの払落しでは、粉じんが多く堆積していた流入部だけで起こり、払落し後も通過率や圧力損失に大きな変化を与えなかった。これについては石灰粉の付着性が強いことも原因かもしれない。

3) 粒子径別の濃度測定装置である ELPI で測定した結果からは帆布フィルタはサブミクロン粒子 (1 μm 以下の粒子) を十分に捕集しないこと (20% ほどの通過率) がわかった。

4) 速度圧 (ダクト内速度の 2 乗) と圧力損失の関係からは粉じん堆積による圧力損失上昇とフィルタ接続部 (パッキン) の漏れの関係は得られなかった。フィルタ接続部に漏れ

があると吸引風量が維持されているように誤解することがわかった。粉じん吸引後も圧力損失が増加せず、吸引風量が維持されている場合は除じん装置の性能に疑問を持つ教育がある。

4 - 4 - 3 FF フィルタ

FF フィルタの結果について以下にまとめる。

- 1) FF フィルタの初期捕集性能は高く、通過率は始めから 1 % 以下であった。
- 2) FF フィルタは帆布フィルタの 3 倍の価格であった。
- 3) ELPI で測定した結果からは FF フィルタもサブミクロン粒子 (1 μ m 以下の粒子) を十分に捕集しないこと (10 % ほどの通過率) がわかった。
- 4) 速度圧 (ダクト内速度の 2 乗) と圧力損失の関係からは粉じん堆積による圧力損失上昇とフィルタ接続部 (パッキン) の漏れの関係は帆布フィルタと同じく得られなかった。
- 5) これまでの結果からは風量から推定される漏れの量と粉じん計を用いて測定される漏れの量は近いことが示唆されたが、今後さらに検討する必要がある。

4 - 5 結果（平成30年度）

4 - 5 - 1 除じん装置の粉じん捕集効率

昨年度実施した帆布ろ布の試験では石灰粉じんの発生が安定しなかったため、本年度、新しい帆布ろ布を取り付けて性能を再度測定した。また3 - 2 - 6に示したように除じん装置本体に銅管のサンプリング管を4カ所取り付けて、入口・出口だけでなく、内部の状態を知ることを目的とした。除じん装置の漏れの影響を知るため、前年と同じ値の差圧(610 Pa)まで石灰粉をろ布に堆積させた後、漏れを作って内部の粉じん濃度を測定し、流量から推定される漏れ率と粉じん濃度から得られる漏れ率を比較検討した。

4 - 5 - 1 - 1 帆布フィルタの結果

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PM2.5サイクロンを取り付けた2台のLD-5と2台のLD-3Kを用いて除じん装置の入口・出口濃度と除じん装置内部のろ布上流・下流を連続測定した。またELPIも同時に除じん装置内部のろ布上流・下流を計測し、通過率を求めた。

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(84 Pa)から得られた始めの吸引空気量は $8.7\text{ m}^3/\text{min}$ (11.8 m/s のダクト内風速、ダクト内径125mm)であった。1月30日10時から16時までテーブルフィーダー・エジェクター(柴田科学DF-3)を途中の粉体供給時を除き連続運転した。

図4 - 34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、通過率は10%を超えているが、6時間程度で1%ほどまで低下する。ろ布(図4 - 18左側上下管)前後で通過率を測定すると除じん装置の前後の約2倍の通過率が計測される。この原因は図4 - 35 - に示すように出口側の濃度はほとんど変わらないが、入口側は約2倍高いことが原因といえる。これは除じん装置内部でろ布の集じん以外に気流速度が内部で急減して粉じん濃度が低下することが考えられる。またろ布出口とファン下流では10%ほど減少している。図4 - 35 - 参照。

なおLD-5を用いた通過率測定では、上流側の濃度が $3\text{ mg}/\text{m}^3$ 程度(1000 cpm)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。

PM2.5サイクロン付LD-5の質量濃度換算係数(K値)はここでは約 $0.003\text{ (mg}/\text{m}^3/\text{cpm)}$ であり、質量濃度は $1\sim 5\text{ mg}/\text{m}^3$ ほどであった。ISOで審議されている供給濃度($2.5\text{ g}/\text{m}^3$)の1000分の1ほどであった。ろ布圧力損失は始めの420Paから6時間で560 Paまで上昇した。粉じん計のK値と吸引流量から推定される石灰粉じんの除じん装置への流入量とろ布上の堆積量は始めの3時間で3.8gと2.0gであり、6時間全体で14.1 gと7.0 gであった。この間に通過率は3時間後で4分の1、6時間後で20分の1となった。

帆布フィルタ 2019/1/30

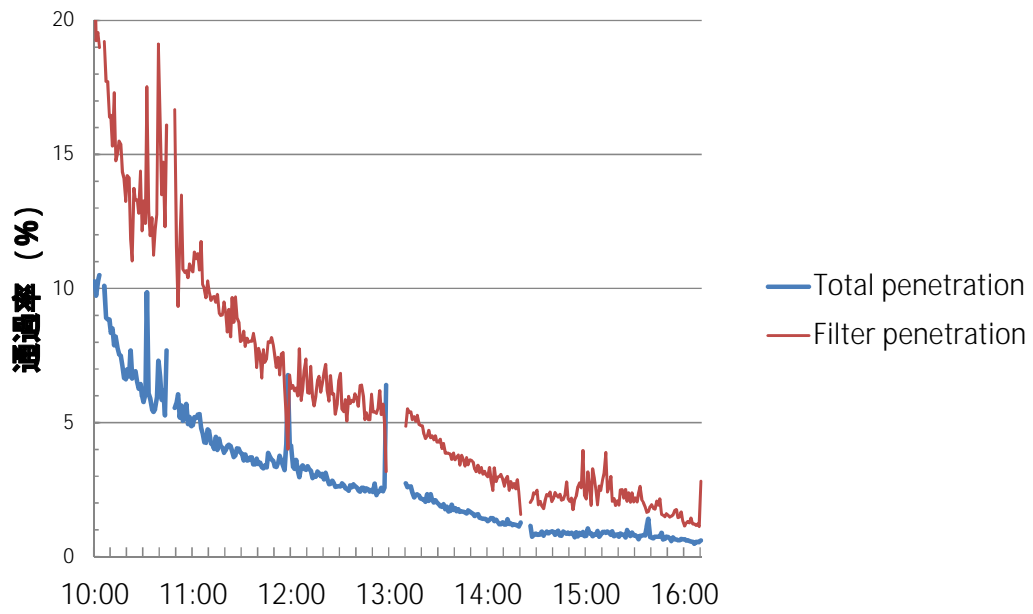


図4 - 3 4 除じん装置前後と帆布フィルタ前後の粉じん通過率の経時変化
1月30日新品から開始しての経過時間(単位は時分)

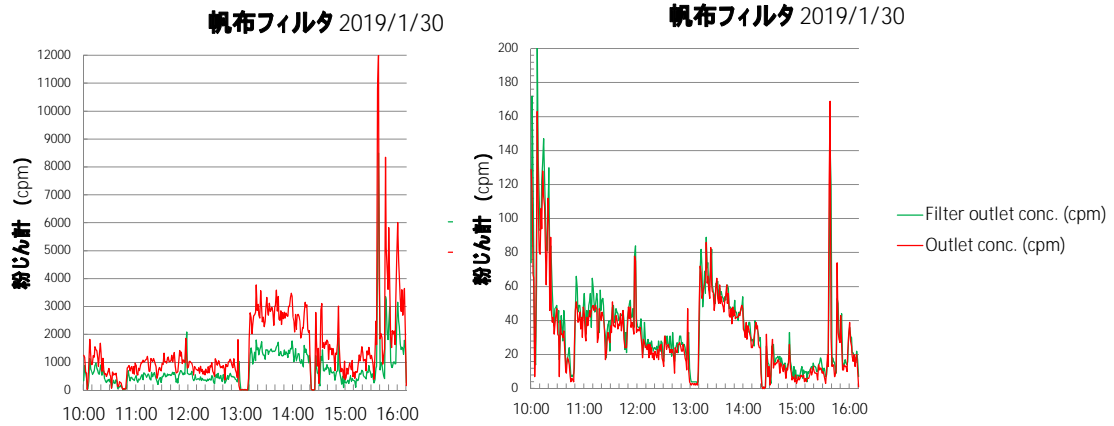


図 4 - 3 5 - 除じん装置前後と帆布フィルタ前後の粉じん計の粉じん濃度 (cpm 単位)
 上流側濃度 (左) 下流側濃度 (右)
 午後に石灰粉をフィーダーのホッパーに再供給するため 10 分間ほどの中断有

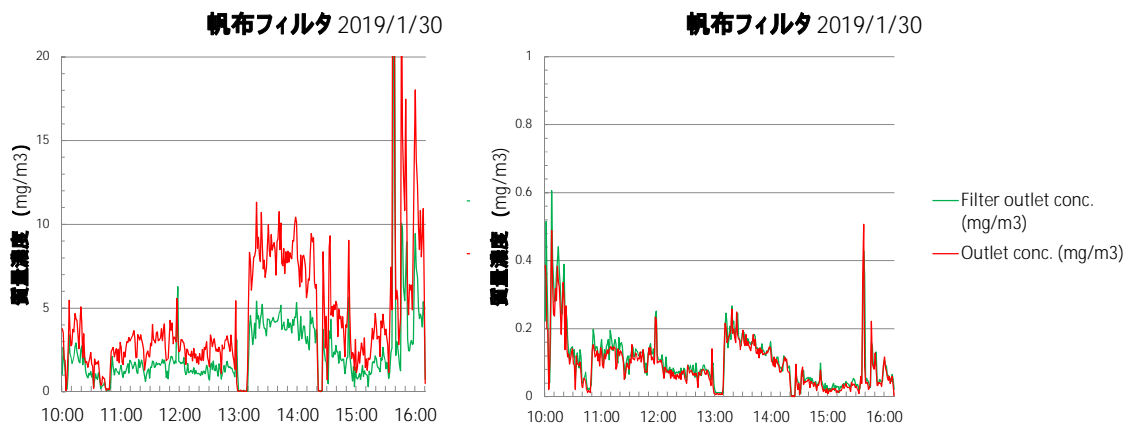


図 4 - 3 5 - 除じん装置前後と帆布フィルタ前後の粉じん計の粉じん濃度 (mg/m³ 単位)
 上流側濃度 (左) 下流側濃度 (右)
 午後に石灰粉をフィーダーホッパーに再供給するため 10 分間ほどの中断有
 PM2.5 サイクロン付 LD-5 の質量濃度換算係数 (K 値) を 0.003 (mg/m³/cpm) とした。

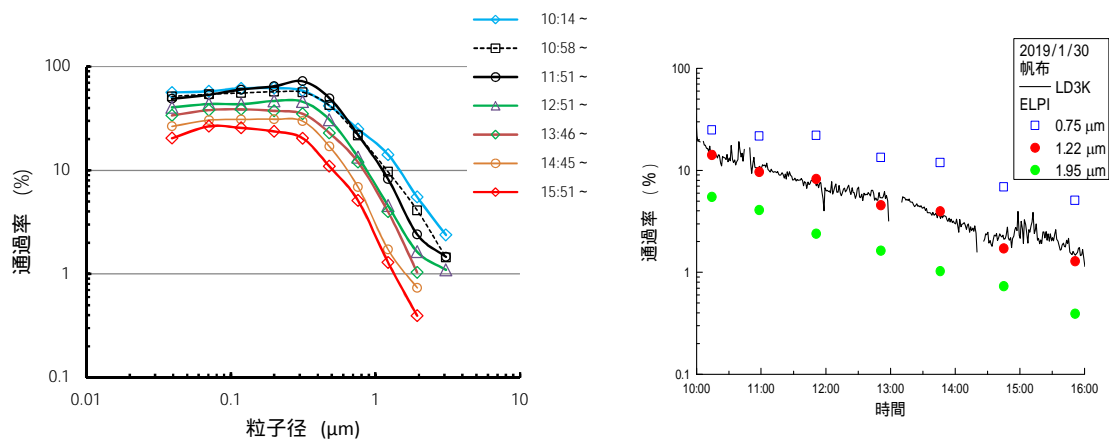


図4 - 3 6 ELPI を用いた除じん装置のろ布前後の粒子径別の通過率(左)とELPI の0.75, 1.22, 1.96 μm サイズレンジの通過率の時間変化と粉じん計によるろ布前後の通過率 (図4 - 1) の時間変化の比較 (右)

ろ布の前後を切り替えて濃度測定をするため 10 分間ほど必要で時間はその中央値。(左) 同時に計測した粉じん計 (LD-3K) による通過率との比較では 1.22 μm レンジがよい対応を示した。(右)

ELPI を用いて除じん装置の捕集性能を同時に計測し、両者を比較した。図4 - 3 6 に ELPI を用いた帆布フィルタ前後 (図4 - 1 8 の右側上下のサンプリング管) の通過率の測定結果を示す。前後を切り替えて濃度測定をするため全体で 10 分間(下流 3 分間、上流 3 分間、下流 3 分間と清浄空気の置換) ほど必要で、図に示す時間はその中央時間である。約 1 時間ごとに計測した。図4 - 3 6 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、PM2.5 サイクロン付粉じん計で 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。PM2.5 サイクロン付粉じん計 (LD3K) による通過率との比較では 1.22 μm レンジが粉じん計とよい対応を示した。

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、粉じんの堆積とともにサブミクロンの粒子の通過率も下がっており、一定の捕集は期待できると思われる。

図4 - 3 6 右の各測定時でのろ布の圧力損失は、変動はあるが凡そ 422Pa, 448Pa, 476Pa, 502 Pa, 522Pa, 544 Pa, 558Pa で上昇した。

除じん装置内部の粉じん濃度の違いを見るため、**図4 - 18**のろ布上流側の左右のサンプリング管にPM2.5サイクロン付粉じん計(LD-3K)を接続し、石灰粉を供給して粉じん濃度の計測を行った。同時に除じん装置前後の濃度をサイクロン付粉じん計(LD-5)に接続して計測した。3台のサイクロン付粉じん計の濃度の測定結果を合わせて**図4 - 37**に示す。除じん装置の通過率はLD-5で測定して、0.5%程度となっている。3時間の石灰粉じんの発生で、ろ布前後の差圧は590 Paに上昇した。左右で粉じん濃度に少し違いが見えるので比を取った結果を**図4 - 38**に示す。変動はあるが常に100%を超えているので、粉じん入口と反対側の右側の方が濃度は少し高いと思われる。

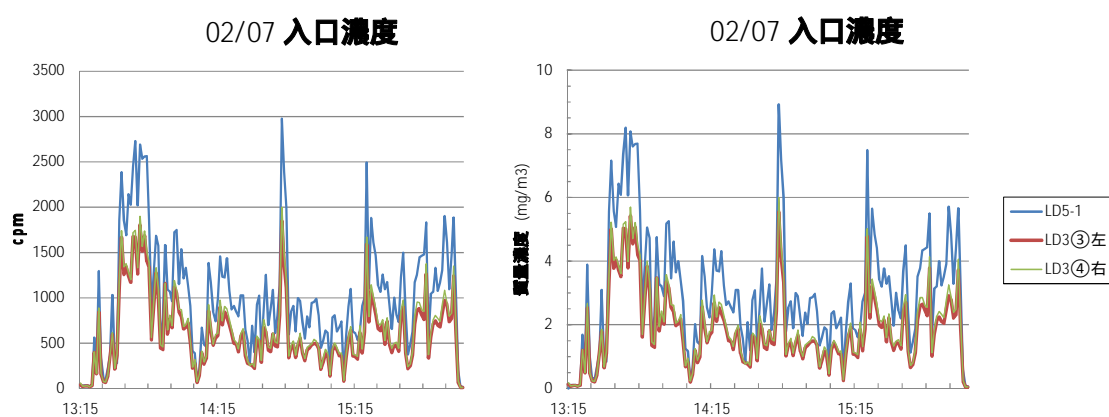


図4 - 37 除じん装置入口と帆布フィルタ上流左右の粉じん計の粉じん濃度
(cpm単位、左)と(換算した質量濃度、右)

PM2.5サイクロン付LD-5の質量濃度換算係数(K値)を0.003 (mg/m³/cpm)とした。

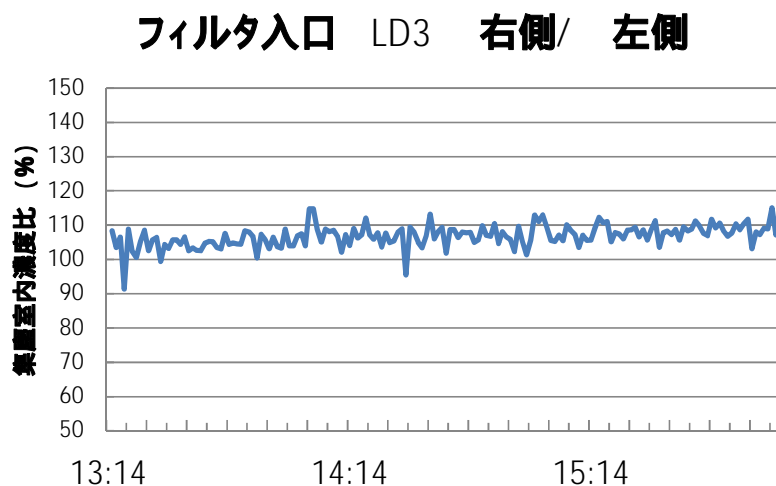


図4 - 38 帆布フィルタ上流左右の粉じん計の粉じん濃度比
粉じん入口と反対の右側の濃度が少し高い。

さらに粉じんの堆積を進めるため石灰粉を導入した。2時間の発生で、ろ布の差圧は 590 Pa から 609 Pa に上昇した。ここでは除じん装置前後 (LD-5) と除じん装置右側のサンプリング管を使用してろ布上流と下流の濃度を測定し、通過率をそれぞれ求めた。図 4 - 3 9 に入口濃度と出口濃度をそれぞれ cpm で示した。テーブルフィーダーのホッパー底部に凝集体を壊すように金網を入れることで発生濃度はこれまでで一番安定した。また図 4 - 4 0 にそれぞれの通過率を示した。通過率は除じん装置入口出口の方がろ布の前後より約半分、図 4 - 3 4 と同じであった。ろ布出口と除じん装置出口の間にファンがあるが、図 4 - 3 5 と同じく濃度の大きな変化はなかった。

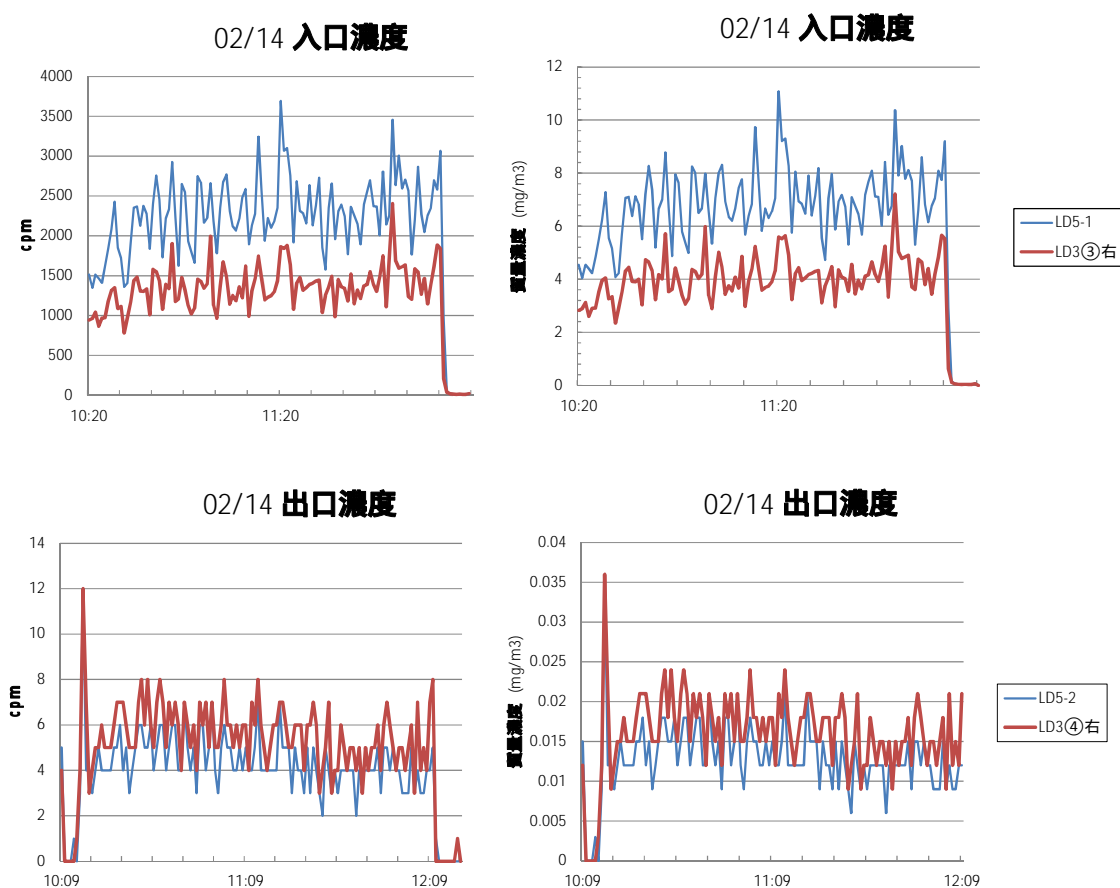


図 4 - 3 9 除じん装置入口とろ布入口 (上) 除じん装置出口とろ布出口 (下) の濃度
 図の左右は (cpm) と (mg/m³)
 PM2.5 サイクロン付 LD-5 の質量濃度換算係数 (K 値) を 0.003 (mg/m³/cpm) とした。

集塵装置 通過率 02/14

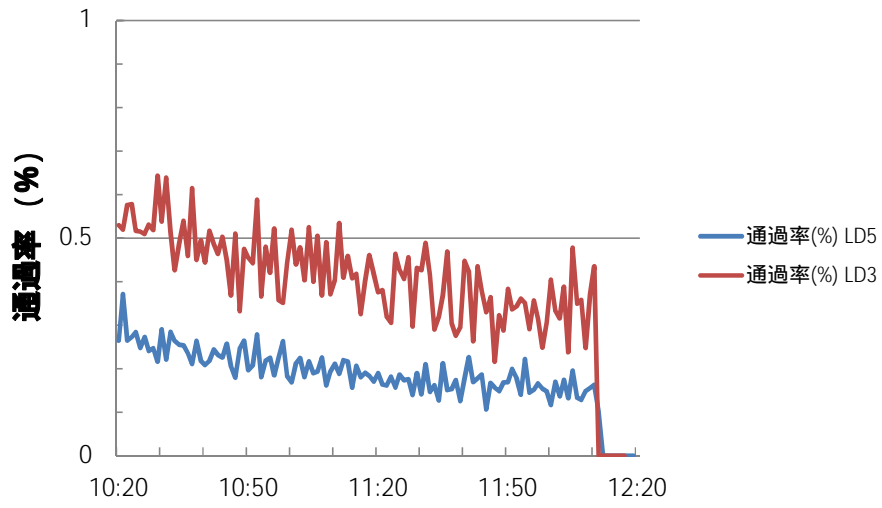


図4 - 40 除じん装置入口と出口での通過率(LD-5)とろ布入口と出口での通過率(LD-3K)

4 - 5 - 2 除じん装置の漏れの影響

4 - 5 - 2 - 1 吸引風量と帆布フィルタの圧力損失による漏れ率

帆布フィルタを除じん装置に設置して石灰粉じんを供給し、吸引風量と圧力損失を測定した。吸引風量はインバータでファンモータの回転数を 15 Hz ~ 50 Hz の範囲で調整した。粉じん堆積とともに風量は減少し、圧力損失は増加する。図 4 - 4 1 に入口速度圧と圧力損失の関係を示す。4 - 2 - 4 の項で示した除じん装置のろ布取り付け部に隙間を作る方法で、8 mm と 10.3 mm の隙間を作り、同じく風量と圧力損失の関係を測定して示した。隙間からの漏れ量（風量）を図的に推定した。同じ圧力損失で漏れのある場合とない場合での風量（ダクト内速度）を求めた。帆布フィルタで隙間が 8 mm のとき 40Hz でファンを運転した場合は 11 m/s、漏れない場合は 10.3 m/s となり、比率は 94 %となる。同様に隙間が 10.3 mm のとき 40Hz でファンを運転した場合は 11.7 m/s、漏れない場合は 9.6 m/s となり比率は 82 %となる。漏れは 100 から引いた値、6 %と 18 %と推定される。速度圧と風速の関係式は 4 - 2 - 2 に示した。

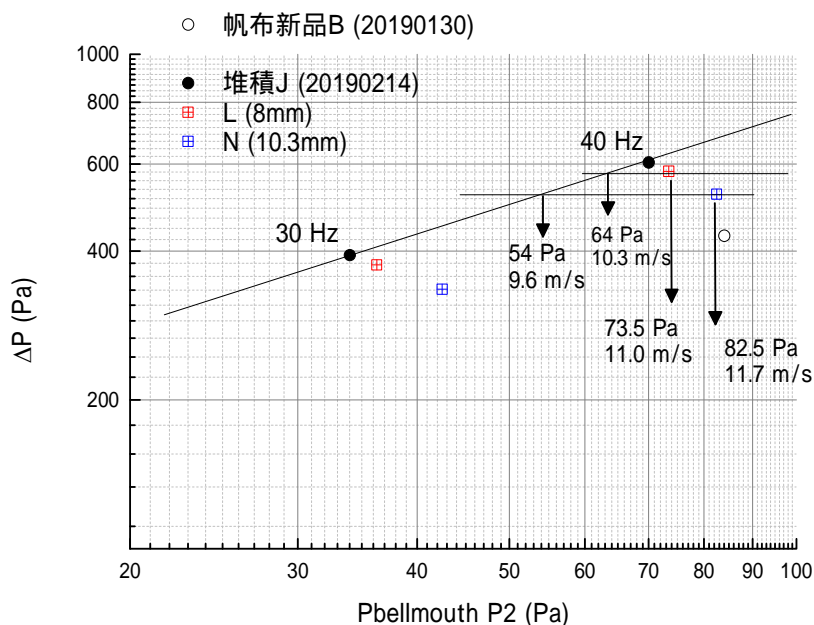


図 4 - 4 1 フィルタ取り付け部の漏れと入口速度圧（吸引風量の二乗）と圧力損失の関係

同じ圧力損失で吸引する場合の漏れの有無の推定方法として除じん装置のフィルタ部を通過する風量（左）と漏れを含んだ全吸引風量（右）の組流量から推定される漏れ率は隙間 8 mm で 6 %、隙間 10.3 mm で 18 %

4 - 5 - 2 - 2 ろ布取り付け部の隙間と粉じんの漏れ率

取り付け部に漏れがあると、除じん装置を運転しても圧力損失は上昇せず吸引風量は維持され、フードとしての性能は維持されているように見えるが、排気に粉じんが含まれることになり、室内に排気した場合は危険である。吸引速度からの漏れの推定は前年度に報告したが、本年度は除じん装置前後（LD-5）と除じん装置右側のサンプリング管を使用し、ろ布上流と下流の濃度(LD-3K)を20分間測定し、通過率（漏れ率）をそれぞれ求めた。図4 - 42に隙間8 mmでの出口濃度と漏れ率を示した。また図4 - 43に隙間10.3 mmで出口濃度と漏れ率を示した。通過率は除じん装置出口の方がろ布下流よりかなり低い値となった。ろ布出口と除じん装置出口の間にファンがあるが、図4 - 35と同じく濃度の大きな変化はなかった。除じん装置入口出口の濃度から求められる平均の漏れ率は隙間8 mmで5.2%、隙間10.3 mmで13%であり、流量から推定される6%と18%と近い値を示した。しかし、隙間を設定した除じん装置右側では、ろ布出口の粉じん濃度も除じん装置出口より相当高くなる。

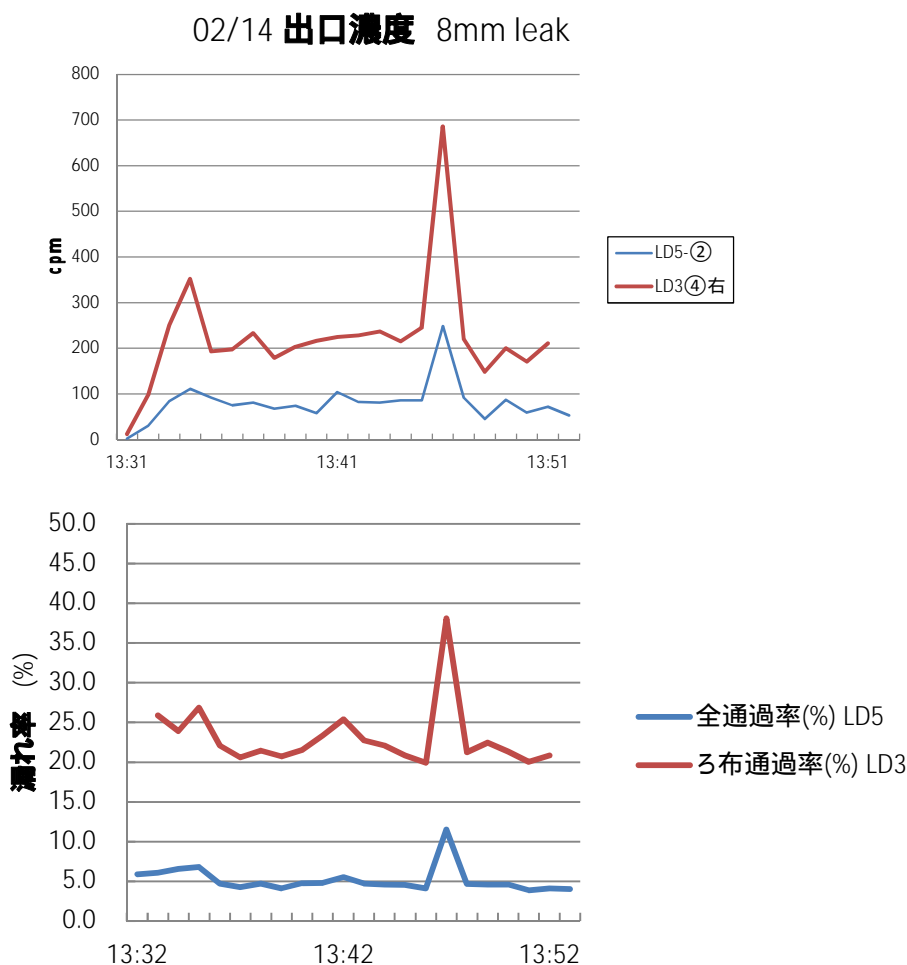


図4 - 42 隙間8 mmでの除じん装置出口とろ布出口の濃度と漏れ率

02/14 出口濃度 10.3mm leak

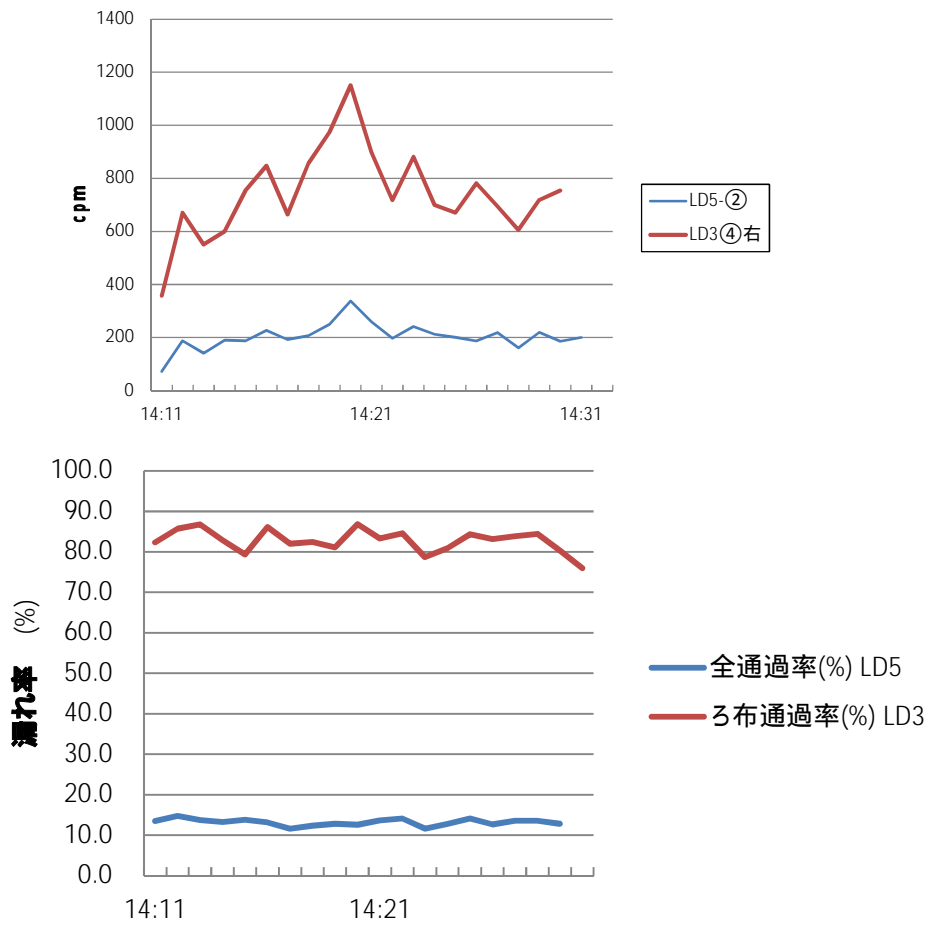


図 4 - 4 3 隙間 10.3 mm での除じん装置出口とろ布出口の濃度と漏れ率

4 - 6 まとめ

4 - 6 - 1 性能測定装置

本研究で用いた測定装置などについて以下にまとめる。

1) 石灰粉じんは凝集しやすく、ISO 関係でも安定分散に苦労しているが、本研究でも分散装置で閉塞を起こすことがしばしばあった。テーブルフィーダー・エジェクターに交換して、さらにテーブルの溝を拡大し、ホッパーの底部に金網を敷いて数ミリの塊を破碎するようにしてから粉体供給の安定はかなり容易になった。

2) 粉じん計 (LD-5 および LD-3K) に PM2.5 用サイクロンを取り付けた測定装置は、測定対象の粉じんの大きさを規定できること、除じん装置入口側の高濃度の粉じんが流入しても粉じん計を守ることができる利点が確認された。吸入性粉じん用サイクロンも作成したが、等速吸引の誤差が大きくなることが心配され、PM2.5 用サイクロンで測定を進めた。

3) 既存の ISO などの除じん性能測定方法は入口側粉じん濃度を分散装置の粉体供給量を吸引空気量で割ったものとしており、本研究のように入口・出口ともに同じ粉じん計を使用して測定していない。粒子径の規定された通過率を得ることのできる本研究の測定の方が優れていると考える。

4 - 6 - 2 帆布フィルタの再試験

帆布フィルタの結果について以下にまとめる。

1) 帆布フィルタは初期の通過率は石灰粉を分散し、PM2.5 サイクロン付粉じん計で測定して 10% 以上あるが、使用とともに通過率は減少する。除じん装置への流入量とろ布上の堆積量は始めの 3 時間で 3.8g と 2.0g であり、6 時間全体で 14.1 g と 7.0 g であった。この間に通過率は 3 時間後で 4 分の 1、6 時間後で 20 分の 1 となった。圧力損失は 1.33 倍ほどの上昇で、ろ布の表面にはうっすらと粉体が見える程度である。

2) 複数の粉じん計で同時計測することで除じん装置内部の粉じん濃度の違いをみた。除じん装置入口手前の濃度とろ布上流側では濃度はかなり異なり、約半分になっていた。内部の構造と流速の低下によると考えられる。ろ布出口と除じん装置出口は間にファンを挟んでいるが差は大きくない。除じん装置内部の内部でもろ布の左右で濃度は異なり、入口と反対側が 5% 程度高い値を示した。

3) 粒子径別の濃度測定装置である ELPI で連続測定した結果からは、帆布フィルタは粒子径別に捕集効率がかなり異なり、ミクロン粒子 (1 μm 以上の粒子) は通過率は 1) の粉じん計の結果と同様であったが、サブミクロン粒子 (1 μm 以下の粒子) では十分に捕集しないことがわかった。前出の PM2.5 サイクロン付粉じん計の相当径は 1.2 μm 程度と考えられる。

4) フィルタ接続部の人工的な漏れの有無を速度圧 (ダクト内速度の 2 乗) とろ布の圧力損失の関係から漏れ率を推定することを試み、併せて粉じん計で漏れを直接測定し、両者はよい一致をみた。

5 . 除じん装置のろ布の捕集性能測定

5 - 1 ろ布ほかの測定試料

試料台（ろ過面積 100 cm²）に固定して内部に設置するため、直径 130 mm の円形に切った測定試料片を用いた（**図 5 - 1 参照**）。試料は、通過率測定装置の校正に使用する標準フィルタ HE1021 と除じん装置に使用したろ布を切り離して取り出して用いた。**表 5 - 1**にこれらの試料の詳細を示す。



図 5 - 1 試料台の写真

表 5 - 1 測定対象試料

No	メーカー	型式	状態	通気抵抗 (5cm/s 時)
1	3M	HE1021	新品	40 Pa
2	アマノ	帆布	洗濯	360 Pa
3	アマノ	帆布	使用済み前側	580 Pa
4	アマノ	帆布	使用済み後側	500 Pa
5	アマノ	FF	洗濯	160 Pa
6	アマノ	FF	掃除機吸引	180 Pa
7	アマノ	FF	使用済み前側	500 Pa
8	アマノ	FF	使用済み後側	560 Pa
9		ろ布	洗濯	80 Pa
10		ろ布	使用済み	140 Pa

5 - 2 試験粒子と試験エアロゾルの発生

試験用粒子には、粒径の揃ったポリスチレンラテックス粒子（PSL粒子、粒子径0.600から2.9995 μ mの5種類）を用いた。医療用ガラス製ネブライザーで懸濁液を噴霧・乾燥して試験エアロゾルを発生する方法を採用した。ネブライザーに各粒子を数滴入れ、約2 mLの蒸留水で希釈して乾燥空気を用いて分散する。粒子数濃度は、粒子径によってネブライザーに投入するPSL粒子懸濁液の滴数で調整した。試験用粒子の概要を表5 - 2に示す。発生した懸

濁液ミストにイオナイザー（SJ-M、キーエンス（株）、東京）を通過した希釈空気を加えて正負イオンを混合することで粒子の荷電の中和を試みた。

表 5 - 2 ポリスチレンラテックス粒子の特徴と OPC の測定レンジ

No	PSL 粒子径 (μm)	メーカー	量(滴/2mL)	OPC 測定レンジ
1	0.600	Duke	1	0.5 μm
2	1.005	Duke	1	1 μm
3	2.020	Duke	2	1 μm + 2 μm
4	2.504	Duke	2	2 μm
5	2.995	Duke	3	2 μm + 5 μm

5 - 3 通過率測定

図 5 - 2 に実験に使用した装置の構成を示す。粒子数濃度の測定は光散乱型粒子カウンタ（リオン（株）KC-52、以下OPC）を2台用いて同時計測を行った。PSL粒子の粒子径に対応するOPCのサイズ範囲を同じく表 5 - 2 に示す。OPCは0.3 μm から5 μm までを0.3-0.5, 0.5-1.0, 1.0-2.0, 2.0-5.0, 5.0 μm 以上の5段についてそれぞれの範囲の粒子数（差分値）を表示する。

サンプルボックス下部に試料をのせた試料台を設置する。試験流量は試料通過速度を5 cm/s と10cm/s とし、ろ過流量は30 l/min と60 l/min とした。表 5 - 2 の試験用粒子を導入して図 5 - 2 に示すような試料台の上流と下流にサンプリング口を取り付け、二台のOPC を用いて粒子径別の個数濃度を上流下流同時に測定し、その比から分級効率を求めた。該当する段の粒子はすべて PSL 粒子の公称径であるとした。

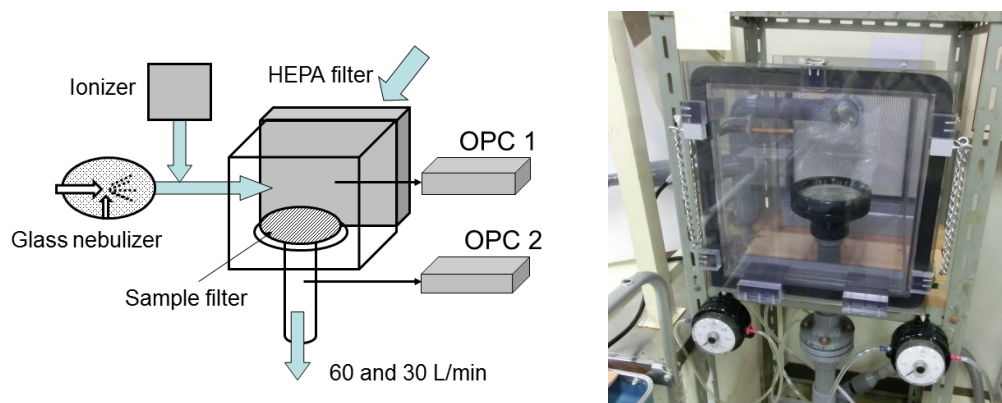


図 5 - 2 ろ布片の捕集性能測定装置の概要と写真

5 - 3 除じん装置のろ布の通過率の測定結果

バグフィルタは袋状の布や不織布に粉じんを流通・捕集する構造で、バグフィルタそのものの捕集効率は高いとはいえず、捕集した粒子によってできた粉体層により捕集する。エアフィルタは微小な繊維からなる疎な構造体でフィルタ内部で粒子を捕集する。図5 - 3にエアフィルタの一種で捕集性能測定装置の評価に使用する標準フィルタについてPSL粒子を用いて測定した結果を示す。エアフィルタはサブミクロン粒子で通過率が最大となることは知られており、ここでも0.6 μm で最大通過率を示し、粒子径が大きくなると急速に低下する。またフィルタ通過速度は速い方がより低い通過率を示している。

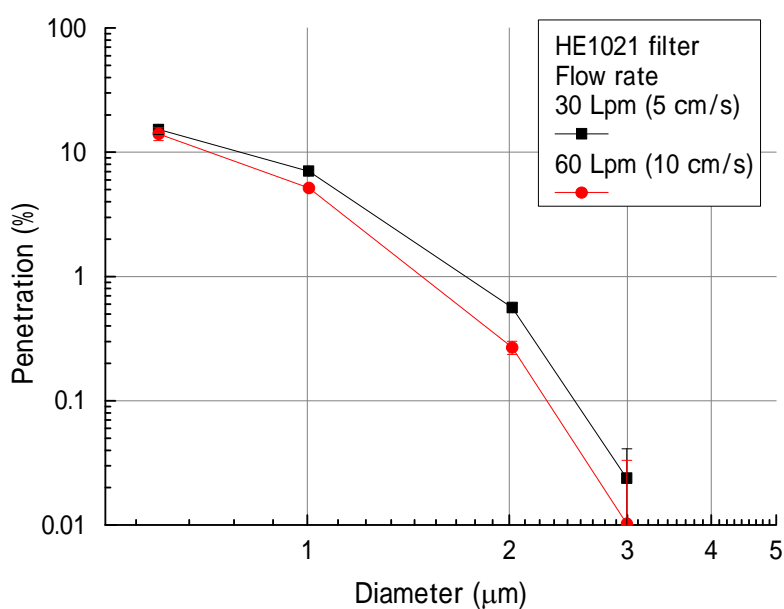


図5 - 3 標準フィルタ HE1021 の粒子径別の通過率
粒子径は標準 PSL の粒子径

5 - 3 - 1 帆布フィルタの通過率

除じん装置に付属していたろ布（帆布）で切り出して、洗濯したもの、手前側と背面側のろ布をできるだけ粉じんを落とさないように切り出した試料について、それぞれ PSL 粒子を用いて通過率を測定した結果を図 5 - 4 に示す。ろ布では気流速度が増加した場合により結果が出ない場合もあった。

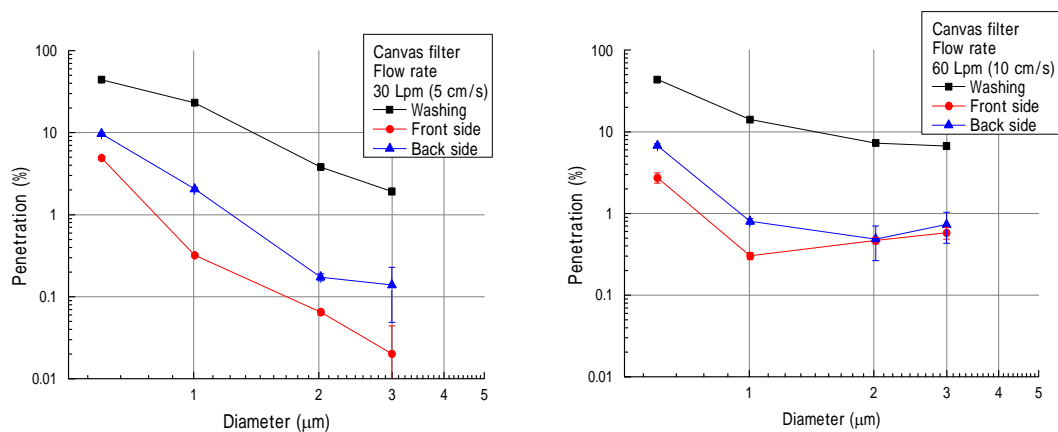


図 5 - 4 帆布フィルタの通過率
通過速度 5cm/s (左) と 10 cm/s (右)

5 - 3 - 2 FFフィルタの通過率

除じん装置に付属していたろ布（FFフィルタ）で切り出して、洗濯したもの、真空掃除機で粉じんを除去したもの、手前側と背面側のろ布をできるだけ粉じんを落とさないように切り出した試料について、それぞれPSL粒子を用いて通過率を測定した結果を図5-5に示す。ろ布では気流速度が増加した場合により結果が出ない場合もあった。洗濯したものはしわがよってろ布にダメージがあるように思われたので真空掃除機で粉じんを除去した試料も測定したが、大きな差はなかった。

FFフィルタは除じん装置に設置した場合に初期から低い通過率を示したが、試験粒子の濃度が希薄で堆積粉じんの影響が見られないこの測定では、通過率は高く性能の良さを示さなかった。

粉じん堆積時の通過率は帆布ろ布とFFフィルタでは場所の効果は逆であったが、表5-1の通気抵抗が高い方が通過率が低い結果で矛盾はしない。

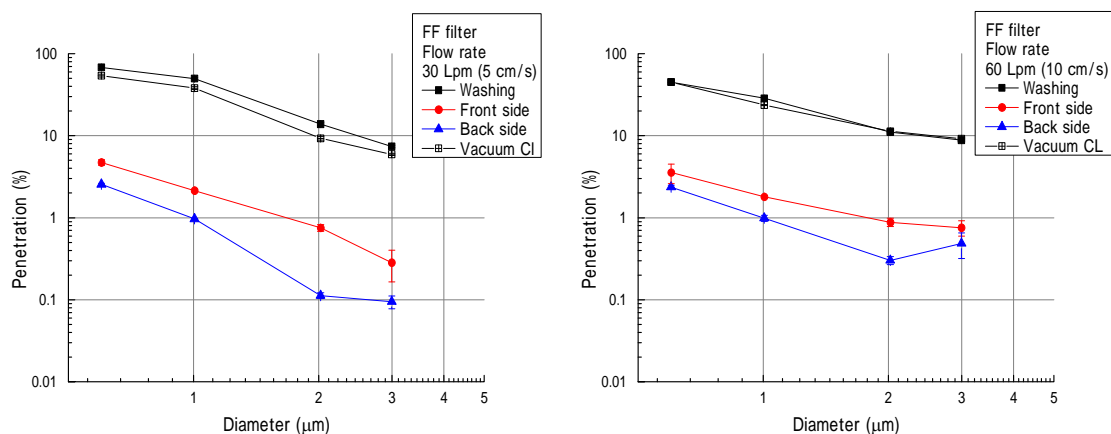


図5-5 FFフィルタの通過率
通過速度 5cm/s (左) と 10 cm/s (右)

5 - 3 - 3 現場使用のろ布フィルタの通過率

除じん装置から外した袋状のろ布（織布）を切り出して、洗濯したものとできるだけ粉じんを落とさないように切り出した試料について、それぞれ PSL 粒子を用いて通過率を測定した結果を図 5 - 1 1 に示す。結果は通気抵抗は低く、通過率はどちらも 1 μm で 50% を超えていた。図 5 - 1 2 に示すように粒子の堆積は狭い面積でも濃淡があった。また現場での運転状態でのろ布通過速度は約 2 cm/s であり、本試験の通過速度が速いことが原因かもしれない。

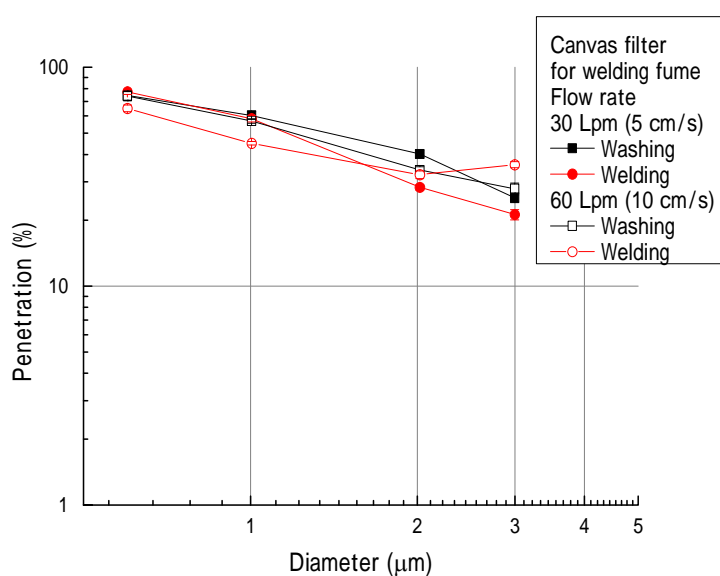


図 5 - 6 大型バグフィルタのろ布（織布）試料の通過率
使用後のろ布とそれを水洗した試料

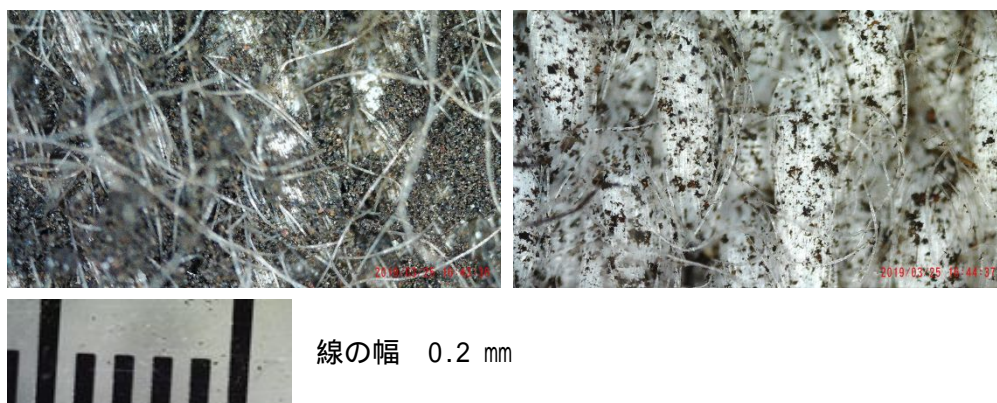


図 5 - 7 大型バグフィルタのろ布表面の拡大写真
観察場所によって堆積じんに濃淡がある。

5 - 4 ろ布試料の捕集性能試験のまとめ

エアフィルタの捕集性能（通過率）を測定する手法を除じん装置のろ布に応用した結果を以下にまとめる。ろ布はすべて織物タイプで不織布タイプの試料はなかった。

1) 標準粒子の希薄なエアロゾルを用いて光散乱粒子カウンタ（OPC）でろ布の通過率を計測した。

2) 本装置で測定した繊維層フィルタの一種である標準フィルタは、標準的な粒子径 - 通過率の関係を示した。

3) 帆布フィルタとFFフィルタは清浄状態では通過率はともに高く、違いは明確ではなかった。石灰粉が堆積した使用済みのフィルタでは除じん装置で示された結果と同様の違いを示した。粉じん負荷がない状態で（織物タイプの）ろ布の性能試験で性能の違いを示すことは難しい。

4) ろ布では大きな粒子で通過速度が速い場合に性能が下がることが示され、繊維層フィルタとは傾向が異なる。

5) 溶接ヒュームを中心とした現場の集じん装置で使用されていたろ布サンプルについての捕集性能はここでは高くなかった。実際の面速が本測定の 5 cm/s より低い速度であったので方法については更に検討が必要である。

6. 考察

6-1 除じん装置に関する現状分析

ろ布を用いるろ過式の除じん装置は新しいろ布では捕集効率は低く、粉じんの堆積とともに捕集効率が次第に上昇するので、どの時点で性能を測定するか問題となる。除じん装置の性能試験では捕集効率が低い初期の状況については短時間ということで議論されることは少ない。またISOや既存のJISでは、除じん装置の性能はすべての粒径の粒子の質量濃度の比で求めており、入口は供給した粉体の質量と吸引空気量、出口は粉じん計を用いた測定である。従って吸入性粉じんより大きな粒子は除去しやすく質量に占める割合も多いため性能をよく見せる点に問題がある。

除じん装置とろ布は必ずしも同じメーカーのもの（純正品）が現場で使用されてはいない。粉じんの堆積に寄らず高効率の捕集の可能なろ布もあるとのことだが、実際は経済原則で選択されている。従って除じん装置メーカーも実際の除じん装置の性能を完全には把握していない。

調べた範囲では除じん装置の点検表は目視による点検のみで明確な数値の指標がない。

PM2.5サイクロン（50%分離径が2.5 μm の性能）を粉じん計LD-5とLD-5Rに取り付けて測定を行った。また新しく開発したハイポリウムエアサンプラ用のサイクロン（吸入性粉じん条件）も使用して質量濃度測定と質量濃度変換係数K値を求めた。PM2.5サイクロンの有無で粉じん計の感度が異なり、2.5 μm 以上の粉じんも粉じん計に影響を与えることがわかった。

呼吸域の粉じん濃度は、電動グラインダー（測定3）も溶接（測定2）も定置の粉じん計（1~1.5mくらいの距離）に比べ高い値を示した。この濃度は除じん装置入口濃度と比べて同じレベル（測定2）や低いレベル（測定3）であった。しかし、作業に伴って発じんしている場合は、呼吸域の粉じん濃度は高く、作業者は呼吸用保護具を着用する必要があることが再確認された。

除じん装置の前後での濃度測定では、PM2.5サイクロンを取り付けたLD-5で入口・出口の粉じん濃度を測定して比（PM2.5粒子通過率）を求めた。除じん装置の管理を良好に実施している場合は、除じん装置の平均通過率は3.6%（測定2）や1.6%（測定3）で良好であった。

除じん装置のファンを起動した直後に出口から粉じんが排出され、その後1から2分で急減することが観察された（測定2）。これはろ布が膨らむときに粉じん粒子がろ布からこぼれる現象と思われる。粉じんを入口から供給せずにファンをON・OFFして出口粉じん濃度を測定・観察することで除じん装置の状態を定量的に監視できる可能性がある。

以上の結果から、ろ過式の除じん装置の性能維持のためには、装置の吸引流量、ろ布の圧力損失およびろ布の性能確認などについて定量的な管理の指標が必要と思われる。

6 - 2 提言

本研究では除じん装置のメーカー、研究者へのインタビューと作業環境で使用している除じん装置の前後にPM2.5サイクロン（大粒子を除去する）を取り付けた光散乱型の粉じん計を用いて捕集性能の測定、また実験室で試験粒子として石灰粉を、測定装置として同様のサイクロンを取り付けた粉じん計を用いて捕集性能の試験を行った。また粒子径別の捕集性能も測定した。この結果を元に以下のような提言をまとめる。

1) 通常の帆布フィルタを装着した除じん装置では、初期に粉じん計の測定で $1\mu\text{m}$ 程度の粒子が10%程度漏れており、作業環境での使用を考えると除じん装置から作業場内への排気は適当でない。特に作業環境の粉じん濃度が低い場合はこの状態が続くので、本研究で用いた石灰粉のような有害性の低い微粉体を予め供給してろ布に粉じん堆積層を形成し、除じん装置からの漏れを低下させることが勧められる。

2) ここで使用したFFフィルタのような初期の捕集性能のあるバグフィルタであれば、室内排気は可能で、フィルタ素材についてなんらかの性能保証、特に初期捕集性能の保証が必要である。しかしながら、織物タイプのろ布は新品での粒子捕集性能はいずれも低い値を示し、粉じん負荷時の定量的な評価法が必要と考えられる。

3) 除じん装置の通過率は粉じんの導入とともに低下し、ろ布上に粉じん層（ケーキ層）の形成を待たなくても1%以下になるので、捕集性能の測定（試験粉じん低濃度）と粉じん払落し性能の測定（試験粉じん高濃度）は分離してよいと考える。

4) 粒子径 $1\mu\text{m}$ 以上が主である粉砕や研磨でできた粉じんであれば織物のバグフィルタは有効である。しかし、粒子径 $1\mu\text{m}$ 以下の粉じんが主である溶接ヒュームや工業用ナノ材料では捕集性能は十分とはいえず、ろ布の粉じん堆積も遅いので屋内排気は勧められない。

5) 除じん装置の性能確認には、ろ布上流・下流で粉じん計による濃度測定が有効である。常時監視は必要なく、定期自主検査のタイミングでよい。

6) 除じん装置の捕集性能測定のため粉じんサンプリング管が装置、特にろ布下流に設置されていれば容易に実施できる。但し除じん装置の内部（ろ布の前後）は大気圧に比べ負圧であり、粉じん計の吸引流量の確認が必要である。

7) 新しいゴムパッキンの場合は多少の取り付け不具合も吸収するが、ゴムの経年劣化があると漏れが懸念される。バグフィルタ取り付け部の気密の確認が定期的に必要である。

9) 必要な保守の測定項目として、ろ布の圧力損失に加えて、吸引流量とろ布下流（または排気中）の粉じん濃度の作業中の連続測定を行えば、その捕集性能は確認可能である。

8) バグフィルタの捕集性能は粉じん堆積状態で変動することが避けられないので、屋内排気を行う場合は、小型除じん装置の排気口に中性能以上のエアフィルタを取り付けて両者の組み合わせで性能を担保することが検討されるべきである。