

論文

バグフィルタ型 VOC 処理装置の開発

平野 康之^{*1)} 萩原 利哉^{*1)} 小島 正行^{*1)} 伊瀬 洋昭^{*1)}

A Disposal Equipment for Exhaust Gas from Paint Factories Using Bag-Filters Coated with Activated Carbon Powder

Yasuyuki Hirano^{*1)}, Toshiya Hagiwara^{*1)}, Masayuki Kojima^{*1)}, Hiroaki Ise^{*1)}

We developed a novel type of disposal equipment for exhaust gas from paint factories. Organic solvents are consumed in various small and medium-sized enterprises (SMEs). Severely polluted air is caused by photochemical oxidant of volatile organic compounds (VOCs) in urban areas. Although exhaust gas from paint factories needs to be purified, disposal equipments are unfamiliar in SMEs. Emissions from paint factories are large in volume and low concentration of VOCs and paint particles. Granular activated carbon is commonly used as adsorbent for VOCs. In this study, the equipment consists of bag-filters which are coated with activated carbon powder (ACP). ACP was used to remove VOCs and paint particles simultaneously. Pressure drop and disposal efficiency were influenced by particle diameter of ACP. The decrease of particle diameter increases the resistance of gas, with the increment of absorption efficiency. Experimental results revealed that our equipment is applicable to paint factories.

キーワード：VOC，活性炭，塗装工場，中小企業，環境，処理装置

Keywords：volatile organic compounds, activated carbon, paint factories, small and medium-sized enterprises, environment, disposal equipment

1. まえがき

光化学オキシダントの抑制を図るため，揮発性有機化合物（VOC）の排出を規制する改正大気汚染防止法が平成18年から施行されている⁽¹⁾。自主的取組の対象となっている中小規模の吹付け塗装工場では⁽²⁾，塗装ブース内において捕集されなかった微粒子化した塗装ミストと低濃度VOCが発生する。中小企業の多くは排ガス処理装置を設置しておらず，小型且つ維持費が安価な処理装置の開発が望まれている⁽³⁾，⁽⁴⁾。

本研究では，装置価格が低い吸着方式⁽⁵⁾において，従来装備されていた塗装ミストフィルタを省き，吸着材維持費を低コスト化するため安価な粉末活性炭（ACP）を使用し，VOCと塗装ミスト処理を同時にACPで行うバグフィルタ型VOC処理装置の開発に取組んできた。処理装置の縮小モデル機を試作して，ACPの処理性能を調査し，塗装工場への適用について検討した。

2. 排ガス処理装置試作機

2.1 中小塗装工場からの排ガス 開発する処理装置は塗装ブースから排出されるガスを対象とした。労働安全衛生法にのっとり，塗装ブースにおける吹付け作業場所の風速は 0.5 m s^{-1} 以上であり⁽⁶⁾，また塗装ブースの開口部面積は $2 \sim 6 \text{ m}^2$ であることが多いことから⁽⁴⁾，中小塗装工場での換

気量を $10\,000 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ と仮定した。その他標準とした操業条件を表1に示す。塗装ブースの種類は，湿式ブースに比べ設備費の低い乾式ブース⁽⁷⁾を対象とした。乾式ブースの塗装ミスト除去効率については，湿式ブースに比べ塗装ミスト除去効率の低い⁽⁷⁾乾式ブース（アネスト岩田製，BBC-20D）を使用してアミノアルキド樹脂塗料（ロックペイント製，エミラック 050-1205）を吹付け，ブースから排出される塗装ミストをフッ素樹脂処理ガラス繊維フィルタ（Pallflex Products 製，T60A20）により捕集することにより求めた（吹付け量 2 g s^{-1} ，風量 $10\,000 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ ）。また塗料固形分比率は，シンナーで希釈した（塗料：シンナー=100：34.2）アミノアルキド樹脂塗料について，JIS K 5601-1-2 に準じて加熱乾燥後の重量変化から設定した。

表1. 塗装工場の操業条件モデル

換気風量	$10\,000 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$
操業時間	6 h d^{-1}
塗料種	アミノアルキド樹脂塗料
塗料消費量（シンナーを含む）	15.8 kg d^{-1}
塗着効率	40 wt%
塗装ブースの種類	乾式ブース
乾式ブースの塗装ミスト除去効率	94.2 wt%
塗料固形分比率	50 wt%，（白色）

微粒子化した塗装ミストは乾式ブースに装備されている排気フィルタを通過するため，1日に排出される塗装ミスト

*1) 地域結集事業推進部

の固形分量は、表 1 の塗料消費量、塗着効率、乾式ブースの塗装ミスト除去効率、塗料固形分比率から 275 g d^{-1} と推定できる。また、乾式ブースの排気フィルタは VOC を除去しないため、1 日の VOC 排出量は表 1 から同様に、 7.90 kg d^{-1} と計算される。VOC をトルエンとすると、排ガスの平均 VOC 濃度は 32.0 ppm となる。

2.2 縮小モデル機 従来、主に除塵のためにバグフィルタは使用されてきたが、ACP を保持するためにバグフィルタを用い、保持された ACP に塗装ミストと VOC を除去させることを考えた。ACP のバグフィルタへの保持は、バグフィルタでの除塵と同様にバグフィルタ後段を負圧にすることでガスの粉体保持面に対して垂直な力が ACP に作用し、保持される。

1 日の VOC 除去に必要な量の ACP をバグフィルタに保持させた後、塗装作業を開始し、作業終了後に VOC を吸着した ACP を払い落とす。縮小モデル機での払い落としは、実験後にガス処理方向とは逆向きに圧縮空気を瞬間的に流すパルスジェット方式を用いた。

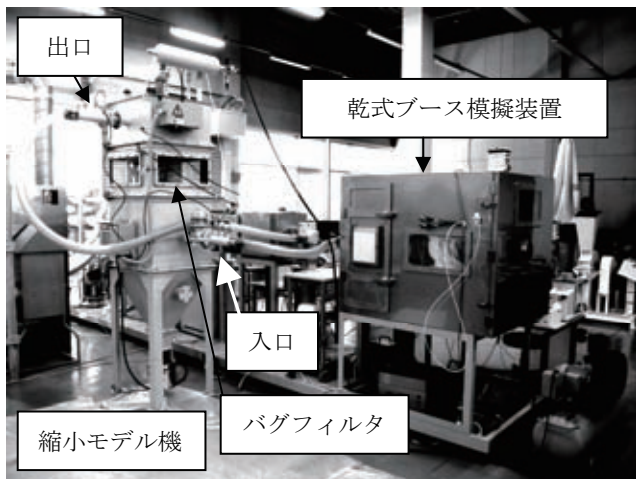


図 1. 縮小モデル機

ポリエステル不織布バグフィルタ（ホーコス製，TE5ME2）を内蔵した 1 / 100 規模の縮小モデル機（図 1）を試作し、スプレーガン（ランズバーグ・インダストリー製，T-AGPV-868-805MT-G）と乾式排気フィルタ（パーカーエンジニアリング製，アレスターパッド）を装備した乾式ブース模擬装置（新菱工業製）に接続した。縮小モデル機の仕様を表 2 に、実験装置の概略図を図 2 に示す。

表 2. 縮小モデル機仕様

処理風量	$36 \sim 200 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$
粉体保持面積	0.5 m^2
バグフィルタ外径	0.155 m
バグフィルタ長さ	0.257 m
バグフィルタ本数	4 本
バグフィルタ設置面積	0.233 m^2 , ($0.44 \times 0.53 \text{ m}$)
塗料吹付け量	0.2 g s^{-1}

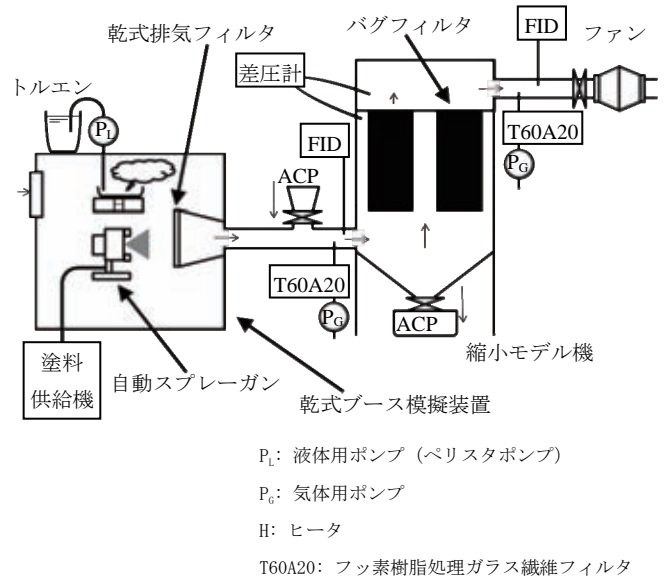


図 2. 実験装置概略図

3. 実験

3.1 粉末活性炭による圧力損失 ACP の導入量を調整してバグフィルタの ACP の保持量を変化させ、ガスが ACP を通過する線速度 (LV) を 0.02 及び 0.04 m s^{-1} として、ACP の圧力損失を測定した。使用した ACP は木質系活性炭であり、粒度の異なる 3 種類を用いた。ACP のメジアン径を表 3 に示す。

表 3. 使用した粉末活性炭 (ACP) のメジアン径

型番	μm
PG-1PD	19
PG-1PD(B)	37
PG-1PD(C)	67

ACP: ダイネン製

3.2 塗装ミスト付着の影響

(1) ミスト導入量 専用シンナーで希釈したアミノアルキド樹脂塗料を吹付け、縮小モデル機へ導入されるミストをフッ素樹脂処理ガラス繊維フィルタを用いて捕集した。実験条件を表 4 に示す。

表 4. ミスト導入量調査実験条件

塗料希釈重量比 (塗料:シンナー)	100 : 34.2
自動スプレーガン使用圧力	霧化エア : 1.20 MPa パターンエア : 0.07 MPa
希釈塗料吹付け量	0.2 g s^{-1}
線速度 (風量)	0.02 m s^{-1} ($36 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$), 0.04 m s^{-1} ($72 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$)
吹付け時間	1200 s

また、乾式排気フィルタを通過し、縮小モデル機へ導入される直前での排気ダクト内のミストの粒度分布を、実際の乾式ブース通過直後の粒度分布と比較した（エアサンプラー：柴田科学製、AN-200 アンダーセンタイプ）。なお、実機乾式ブースでの計測は、アミノアルキド樹脂塗料を 2 g s^{-1} で吹付けた（ハンドスプレーガン：アネスト岩田製、W-101、吹付け圧力 0.24 MPa ）。

(2) ミスト除去 バグフィルタの ACP 保持量を変化させ、表 4 の条件でミストを導入し、ACP で除去できないミストはフッ素樹脂処理ガラス繊維フィルタを用いて捕集した。

(3) 圧力損失 前項 (2) のミスト除去実験時に、ACP へのミスト付着による圧力損失の上昇を計測した。バグフィルタ後段のフッ素樹脂処理ガラス繊維フィルタで捕集されるミストがないことを確認し、導入したミストが全て ACP で付着した場合の圧力損失の変化を求めた。

3.3 粉末活性炭のトルエン吸着性能 メーカーが提供する塗料及びシンナーの MSDS^{(8), (9)} を参考にし、前述 3.2 における希釈塗料の揮発成分比を表 5 に作成した。その結果、トルエンが VOC 排出の 50% 以上を占め、最も寄与することが示されたことから、縮小モデル機の VOC 処理性能はトルエンを用いて評価することとした。

表 5. 希釈塗料中の揮発成分

物質名	重量比, wt%
トルエン	53.5
キシレン	16.3
n-ブタノール*	22.2
エチルベンゼン	7.1
ホルムアルデヒド*	0.8

*最小値と最大値が記載されている物質は中間値を用いた。

一定濃度のトルエンガスを ACP へ送風し、ACP のトルエン吸着率を調査した。一定濃度のトルエンガスを発生させるためにペリスタポンプ（ATTO 製、AC-2120）を用い乾式ブース模擬装置内にトルエンを導入し、 $115 \text{ }^\circ\text{C}$ で加熱気化（トルエンの沸点： $110.6 \text{ }^\circ\text{C}$ ）させた。導入されるトルエンガス濃度が約 100 ppm になるようにペリスタポンプの送液速度を調整し、また導入濃度は FID 式 VOC 濃度計（東亜 DKK 製、GHT-200）を縮小モデル機の入口に接続し監視した。ACP 通過後のトルエンガス濃度も FID で監視し、ACP 通過後のトルエンガス濃度が上昇し、 15 ppm に到達するまでトルエンガスを導入した。トルエン導入量を吸着量とし、トルエンを吸着した ACP 保持量から吸着率を求め、ACP 保持量と粒度の違いによる吸着率の変化を調査した。

4. 実験結果と考察

4.1 縮小モデル機の圧力損失特性 ACP 圧力損失と ACP 保持量の関係を図 3 に示す。圧力損失は、保持量、ガスの ACP を通過する LV 及び粒度に依存し、粒度を大きくすることによって圧力損失を著しく低下させることが可能であった。

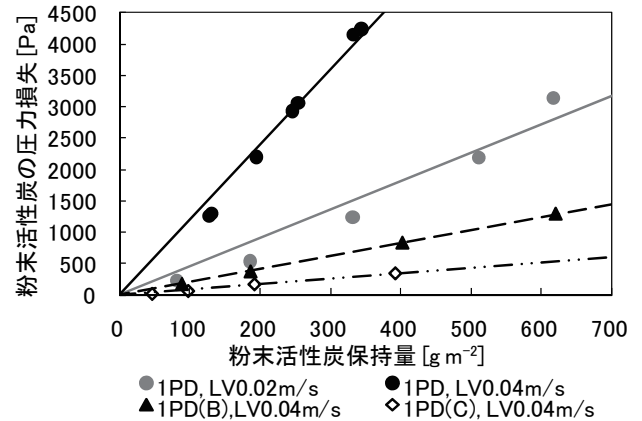


図 3. 粒度ごとの粉末活性炭保持量と圧力損失の関係

4.2 塗装ミスト付着の影響

(1) ミスト導入量 1200 s の吹付け時間での縮小モデル機へ導入される塗装ミスト量を表 6 に示す。

実機における 1 日のミスト導入量 $M [\text{g d}^{-1}]$ は、塗料消費量を $C [\text{g d}^{-1}]$ 、塗着効率を $\eta_T [\text{wt}\%]$ 、乾式ブースフィルタの除去効率を $\eta_R [\text{wt}\%]$ 、塗料固形分比率を $\eta_S [\text{wt}\%]$ とすると、

(1) 式のように表され、表 1 の値から 1 日のミスト導入量は 275 g と計算される。

$$\begin{aligned}
 M &= C \left(1 - \frac{\eta_T}{100}\right) \left(1 - \frac{\eta_R}{100}\right) \frac{\eta_S}{100} \\
 &= 15.8 \times 10^3 \times \left(1 - \frac{40}{100}\right) \times \left(1 - \frac{94.2}{100}\right) \times \frac{50}{100} \\
 &\dots\dots(1)
 \end{aligned}$$

縮小モデル機内において、粉体保持面積は 0.5 m^2 で一定あり、ガスの ACP を通過する LV が 0.04 m s^{-1} のとき、風量は $72 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ である。実機の ACP を通過する LV を 0.04 m s^{-1} と設計した場合、縮小モデル機の風量から、実機の約 $1/140$ スケールである。すなわち、約 $1/140$ スケールの縮小モデル実験において、1 日分のミスト導入量は 1.98 g に相当する。

表 6 の実験結果は、塗装ブース模擬装置での 1200 s の吹付けによって、実機の約 $1/140$ スケールにおける 1 日分のミスト導入量を縮小モデル機へ供給していることを示す。

表 6. 縮小モデル機の 1200s での塗装ミスト導入量

線速度 (風量)	塗装ミスト導入量 g	
	0.02 m s ⁻¹ (36 m ³ h ⁻¹)	0.04 m s ⁻¹ (72 m ³ h ⁻¹)
1 回目	2.12	2.49
2 回目	2.15	2.36
3 回目	2.03	1.72
平均	2.10	2.19

次に縮小モデル機へ導入したミストと実機乾式ブース通過後のミストの粒度分布の比較を図 4 に示す。実機乾式ブースから排出されるミスト粒径とほぼ等しく、そのミストの粒径は数 μm オーダであることが明らかとなった。

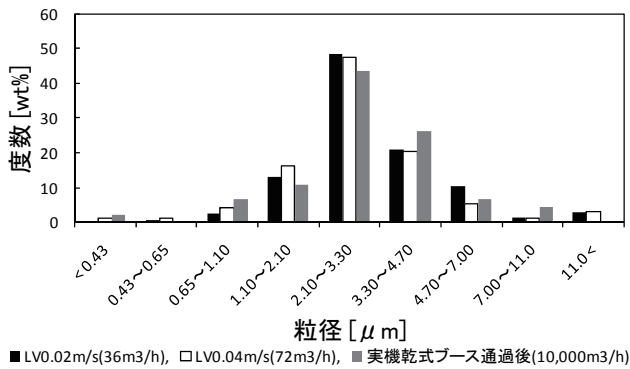


図 4. 縮小モデル機への導入ミストと実機乾式ブース通過後のミストの粒度分布の比較

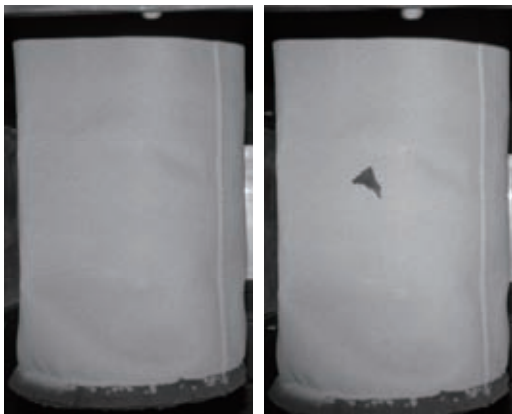


図 5a. 塗装ミスト付着後の全体写真

図 5b. 塗装ミスト付着後の全体写真 (粘着テープではがした部分 ACP のみが観察された)



図 5c. 粘着テープで剥した部分の拡大写真

図 5. 粉末活性炭 (PG-1PD(C)) による塗装ミスト除去

(2) ミスト除去 全てのミスト除去実験において、ACP を通過するミストを捕集するためのフッ素樹脂処理ガラス繊維フィルタは重量変化が検知されず、ACP によるミスト除去率は 100 %であった。従って本方式によって 0.4 μm 程度までの微粒子が除去可能であることが明らかとなった。

目視ではミストは ACP 表面に付着し、バグフィルタ表面まで到達している様子は確認できなかった (図 5)。なお、ミスト付着後の ACP は通常の払い落しで容易に回収可能であった。

(3) 圧力損失 塗装ミスト付着後の圧力損失の変化は小さく、処理装置全体の圧力損失への塗装ミストの寄与は ACP の粒度に比べ小さいことが明らかとなった (図 6)。また ACP へのミスト付着量は一定であるにもかかわらず、ミストが付着すると、保持されている ACP 量に依存して圧力損失が上昇した。このことにより、ガス通過面積と ACP 粒子周りの風速が変化していることが示唆される。

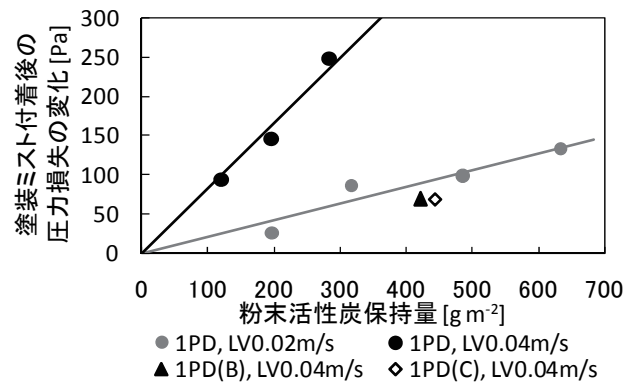


図 6. ミスト付着による粉末活性炭の圧力損失の上昇

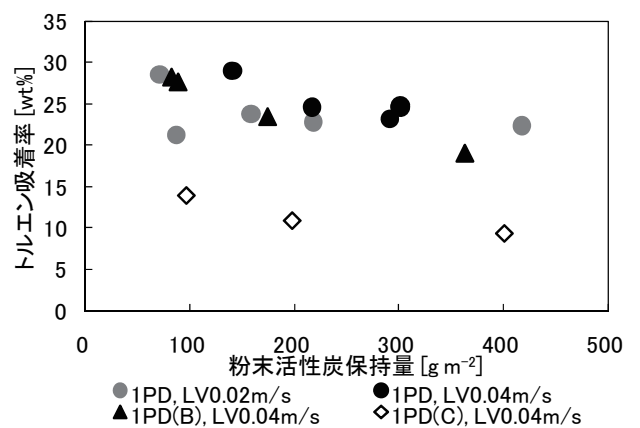


図 7. 粉末活性炭保持量とトルエン吸着率の関係

4.3 縮小モデル機のトルエン吸着性能 ACPのトルエン吸着率を図7に示す。PG-1PD(C)は吸着率が著しく低下した。これはACPの粒子が大きいため、活性炭粒子間の空隙が大きくガスが流れ易く、粒子中心部分のマイクロ孔まで到達するトルエンガスが少ないことが考えられる。この実験結果から使用するACPのメジアン径は37 μm以下が適する。また保持量によっても吸着率は低下する。保持量の増加と共に、粉末層が不均一な厚さとなっていることが目視で確認され、流れの偏りによって吸着率が低下すると考えられる。

4.4 実機的设计 実機の粉体保持面積 S [m²]は、縮小モデルの粉体保持面積が0.5 [m²]で一定であるため、縮小率を R [%]とすると(2)式のように表される。

$$S = 0.5 \times \frac{100}{R} \dots\dots\dots (2)$$

縮小モデル実験において、ガスのACPを通過するLVが0.04 m s⁻¹のとき、 R は0.72 %であるから実機の保持面積は69.4 m²と設計される。同様に、LV 0.02 m s⁻¹のときは R が0.36 %であるから、実機保持面積は139 m²である。実機保持面積を決定するLVは装置の小型化のために大きいことが望まれる。

実機のLVを0.04 m s⁻¹と設定し、実機の設置面積を需要が大きい3.3 m²以下⁽⁴⁾とした場合、例えば実験で使用した外径0.155 m、長さ2.55 mのバグフィルタを使用すると、表2のように4本でのバグフィルタ設置面積0.233 m²であるから、56本を3.26 m² (1.76 x 1.86 m)に装備する設計となる。

LV 0.04 m s⁻¹の吸着率の設計値を、PG-1PDは図7においておよそ30 ~ 25 wt%の範囲であったので最小の25 wt%を用い、同様にPG-1PD(B)は20 wt%、PG-1PD(C)は10 wt%とそれぞれ設定し、1日のACP必要量を次に求める。1日のVOC処理量は7.9 kgであるから、PG-1PDを使用する場合は31.6 kg、PG-1PD(B)は39.5kg、PG-1PD(C)は79 kg必要になる。保持面積は69.4 m²であるから粉末活性炭保持量はそれぞれ表7に示す値となる。粉末活性炭保持量から圧力損失はそれぞれ図3及び6から推定され、表7の値となる。

表7. 吸着率の設定による必要保持量と圧力損失

型番	吸着率 wt%	粉末活性炭 保持量 g m ⁻²	粉末活性炭 圧力損失 kPa	塗装ミスト 付着後の 圧力損失 kPa
PG-1PD	25	455	5	0.4
PG-1PD(B)	20	569	1.3	0.1
PG-1PD(C)	10	1138	1	0.15

PG-1PDは高い吸着率で使用できるためACPランニングコストをさらに低くすることが可能であるが、装置の圧力損失が5 kPaを超えるためイニシャルコストと電力コストが高くなる。PG-1PD(C)は活性炭必要量が大きく、また送風機はPG-1PD(B)使用時と同程度の送風機が必要である。従って使用するACPはPG-1PD(B)が適し、実機の圧力損失は1.3 kPaと設計される。

5. まとめ

粉末活性炭をバグフィルタに保持させて塗装排ガスを処理する装置を試作し、塗装排ガス処理性能を評価した。バグフィルタ型VOC処理装置の圧力損失は、メジアン径37 μmの粒度の粉末活性炭を使用する場合、1.3 kPa程度に制御することができ、高静圧型のブロワを必要としない。また、処理装置は需要が大きい3.3 m²に設置可能であることを示した。表8にバグフィルタ型VOC処理装置仕様をまとめる。

バグフィルタの外径やバグフィルタ間の距離等の最適化によって処理装置のさらなる小型化が期待される。

表8. バグフィルタ型VOC処理装置仕様

風量	10 000 m ³ h ⁻¹
装置設置面積	3.26 m ²
バグフィルタ長さ	2.55 m
バグフィルタ外径	0.155 m
バグフィルタ本数	56 本
粉体保持面積	69.4 m ²
ACP 必要量 (トルエン 7.9 kg d ⁻¹)	39.5 kg d ⁻¹
使用 ACP メジアン径	37 μm
線速度	0.04 m s ⁻¹
VOC 吸着率	20 wt%
装置圧力損失	1.3 kPa

本研究はJST、東京都地域結集型研究開発プログラムにおいて実施されたものである。

(平成22年6月30日受付，平成22年10月8日再受付)

文 献

- (1) 環境省：「大気汚染防止法の一部を改正する法律案」の閣議決定について (2004-03-08)
<http://www.env.go.jp/press/press.php?serial=4763> (参照 2009-08-20)
- (2) 環境省：「揮発性有機化合物 (VOC) の排出規制制度の概要」 (2006-02-22) <http://www.env.go.jp/air/osen/voc/seido/001.pdf> (参照 2010-06-22)
- (3) 中央環境審議会専門委員会：「揮発性有機化合物の排出抑制に係る自主的取組のあり方について」 (2006-08-14)
<http://www.env.go.jp/press/press.php?serial=7055> (参照 2010-06-22)
- (4) 東京都環境局：「中小企業者向け VOC 脱臭処理装置のニーズに関するアンケート調査結果」 (2006-01-16)
<http://www2.kankyo.metro.tokyo.jp/chem/voc/voc2/paint.pdf> (参照 2010-06-22)
- (5) 石黒辰吉：「臭気対策の基礎と実際」，オーム社出版局，p.133 (1997)

- (6) 総務省法令データ提供システム：「有機溶剤中毒予防規則」
(2006-01-05)
<http://law.e-gov.go.jp/htmldata/S47/S47F04101000036.html>
(参照 2010-08-03)
- (7) 奥山岑長：「塗装ブースの種類と管理ポイント」，塗装技術，
Vol.48, No.6 pp.57-64 (2009)
- (8) ロックペイント（株）：「016-1134」（参照 2010-06-25）
http://www2.rockpaint.co.jp/home_j/gijutu/msds/pdf/016-1134.pdf
- (9) ロックペイント（株）：「050-1205」（参照 2010-06-25）
http://www2.rockpaint.co.jp/home_j/gijutu/msds/pdf/050-1205.pdf