

1 原稿種別： 研究論文（原稿種別については投稿規定を参照して
2 記載）

3
4
5 光触媒式小型空気清浄機による飛沫除去挙動の評価

6
7 秋吉 優史^{1,2*}, 綿野 哲¹, 落合 剛³

8
9 Evaluation of the droplet removal behavior by a small air cleaner with
10 photocatalyst

11
12 Masafumi AKIYOSHI^{1,2*}, Satoru WATANO¹, Tsuyoshi OCHIAI³

13
14 ¹ 大阪府立大学 工学研究科

15 (〒599-8531 大阪府堺市学園町 1-1)

16 ² 大阪府立大学 研究推進機構 大阪国際感染症研究センター

17 (〒599-8531 大阪府堺市学園町 1-2)

18 ³ 神奈川県立産業技術総合研究所 川崎技術支援部 材料解析グループ

19 (〒213-0012 川崎市高津区坂戸 3-2-1 KSP 東棟 1 階)

20
21 ¹ Graduate school of Engineering, Osaka Prefecture University,

22 1-1 Gakuen-cho, Nakaku, Sakai, Osaka 599-8531 Japan.

23 ² Osaka International Research Institute for Infectious Diseases,

24 Organization for Research Promotion, Osaka Prefecture University,

25 1-2 Gakuen-cho, Nakaku, Sakai, Osaka 599-8531 Japan.

26 ³ Kanagawa Institute of Industrial Science and Technology (KISTEC),

27 Ground Floor East Wing, Innovation Center Building, KSP,

28 3-2-1 Sakado, Takatsu-ku Kawasaki, Kanagawa 213-0012, Japan.

29
30 *Corresponding Author.

31 E-mail: akiyoshi@riast.osakafu-u.ac.jp (M. Akiyoshi)

32 Tel: 075-753-9852

1 **Abstract**

2 A small air cleaner with the visible-light-responding photocatalyst was
3 developed. This air cleaner is specialized in removal of the splashed
4 droplets which flies between facing peoples to cope with various infectious
5 diseases. Photocatalyst of a tungsten trioxide system which response
6 efficiently to visible-light was sprayed on a conventional nonwoven fabric
7 filter with a visible-light LED module and a silent type fan are applied. The
8 photocatalyst was excited by visible-light to generate active oxygen that
9 oxidizes and decompose various organic matters. In this study, the physical
10 performance of the air purifier was estimated, 1) the removal action of
11 splashed droplets from the oral cavity with special motion-picture system, 2)
12 evaluation of the transmittance of droplets to the filter and 3) droplets
13 capture performance in a clean bench. Furthermore, performance of the
14 photocatalyst system was evaluated by formaldehyde gas decomposition
15 rate in a small chamber. As a result, droplets of 5 micrometers or more can
16 be removed effectively by the small air purifier, and it is considered that the
17 virus contained in the droplets caught by the filter will be inactivated with
18 the photocatalyst by degrees.

19

20 Key words: Infectious diseases, Splashed droplets, Small air cleaner,
21 Photocatalyst

22

1 1. 緒言

2 新型コロナウイルス (SARS-CoV-2) による感染症 COVID-19 に対
3 する感染制御の手段として、密集、密閉、密接のいわゆる三密を避け
4 る、マスクをする、うがい、手洗い、感染者を隔離するなどの昔から
5 の対策が一般には行われている。特に密閉を避けるために換気を行う
6 ことが推奨されているが、構造上換気を行うことが困難であったり、
7 室温維持のために換気量に限界があったりする状況も存在する。また、
8 換気を行っても飛沫による感染は防ぐことが出来ないのは、屋外での
9 飲食でも感染が拡大することから示唆される。ワクチンによる集団的
10 な免疫獲得が急がれるが、今後現れる様々な感染症に対してはその都
11 度対応するワクチンを開発する必要がある、ワクチン開発までの間の
12 社会全体のマクロな感染症制御のために現状の対策に追加するプラス
13 アルファの対策が求められている。

14 COVID-19 の感染経路としては、物体表面を介した接触感染、 $5\ \mu\text{m}$
15 以上の口腔からの飛沫による飛沫感染、 $5\ \mu\text{m}$ 以下の飛沫核などによ
16 る空気感染が挙げられており¹⁾、現在のところそのどれが支配的であ
17 るかは明らかになっていない。また、どれか一つに対策すれば良いと
18 いうわけでは無く、それぞれの感染経路に適した対策を平行して実施
19 する必要がある。WHO 公式文書などでも医学的に $5\ \mu\text{m}$ 以上の口腔か
20 らの液滴を飛沫と呼び、水分が蒸発し糖タンパクや塩などからなる 5
21 μm 以下の粒子は飛沫核と呼ばれるエアロゾルとして区別されてお
22 り^{2,3)}、本稿でもそれに従う。また、特に大きさを指定せずに様々な大
23 きさの液体の粒子を対象とする場合は液滴と表現する。会話や咳など
24 により口腔から放出される液滴は $0.01\ \mu\text{m}$ から数 mm 程度までの広
25 い分布を持つが、主に $2\ \mu\text{m}$ と $120\text{-}150\ \mu\text{m}$ 程度にピークを持ち⁴⁾、
26 一回の咳で 50,000 個以上の液滴が放出されているとの報告もある⁵⁾。
27 $60\ \mu\text{m}$ を超える大きな飛沫は通常の会話では 1 m 以内で重力により
28 沈降するとされているが⁶⁾、室内の気流などの条件によっては $100\ \mu\text{m}$
29 の飛沫でも 5 m 程度まで飛散したとの報告もある⁷⁾。ミーティングや
30 飲食を行うテーブル席や、様々な窓口などでは 1m 以内の距離で会話
31 が行われる場合があり、放出された飛沫の一部は会話を行う相手に到
32 達して、飛沫感染の原因となりうる。WHO によると 2002 年の SARS

1 ウイルス感染の拡大は、接触感染若しくは飛沫による物とされており
2 ¹⁾、新型コロナウイルスに対しても 2020 年 3 月当初の見解では飛沫感
3 染と接触感染が主要な感染経路とされていた ⁸⁾。その後エアロゾルも
4 感染経路となり得ることが 2020 年 7 月に示されたが ²⁾、依然として飛
5 沫は主要な感染経路の一つであると考えられている。富岳によるシミ
6 ュレーションではマスクをしていても飛沫は 2 割程度が漏洩すると報
7 告されており ⁹⁾、さらに飲食店などで食事中はマスクを着用するこ
8 とは出来ない。より粒径が小さく空気中に長時間滞留するエアロゾルと
9 異なり粒径の大きな飛沫の飛程は上述のようにせいぜい数 m で、数
10 秒程度の滞空であるため ⁷⁾、換気を行ったり会話を行う人間から遠く
11 離れた場所に大型の空気清浄機を設置したりしても飛沫対策としては
12 余り意味が無いと考えられる。

13 このため対面する人と人との間を飛び交う飛沫の除去に着目した、可
14 視光応答型光触媒を使用した小型空気清浄機の開発を行った。高性能
15 のフィルターと強力なファンを用いるのではなく、不織布の簡易なフ
16 イルターに静音型のファンを組み合わせて小型化した。フィルターに
17 は可視光で高効率に応答する三酸化タングステン系の光触媒を塗布し、
18 安価な可視光 LED モジュールにより光触媒を励起して発生させたス
19 ーパーオキシドアニオンやヒドロキシルラジカルなどの活性酸素によ
20 り様々な有機物を酸化分解する。これまでに行われた光触媒に関する
21 研究によって様々な悪臭の元になる有機ガスのみならず、菌やウイル
22 スの分解が報告されており ¹⁰⁻¹⁴⁾、その作用メカニズムからこれまで特
23 定の菌やウイルスに対して効果が無いという報告は行われていない。
24 既に二酸化チタン系の光触媒と可視光によって SARS-CoV-2 ウイル
25 スが不活化されることが、査読付論文として報告されている ¹⁵⁾。さら
26 に、今回使用している三酸化タングステン系の光触媒である東芝「ル
27 ネキャット TM」についても、SARS-CoV-2 に対する可視光による不活
28 化の実証と、スパイクタンパクが分解されるというメカニズムの確認
29 が行われ査読付論文として報告されている ¹⁶⁾。

30 今回開発した製品では、光触媒の励起に人体に有害な紫外線では無
31 く可視光を使用しているため、漏れ光を完全に抑える必要がなくハウ
32 ジングの構造を簡素化できる。パソコン用の市販のパーツなどを組み

1 合わせるため極めて安価であり，全ての材料を一般の市場から調達可
2 能で特殊な工具や工作機械を使用せずに容易に製造可能な構造を達成
3 した。

4 本稿では特殊画像撮影による口腔からの飛沫除去挙動評価，フィル
5 ターによる粒度別の液滴透過率の評価，クリーンベンチ内で噴霧した
6 液滴の粒度別捕集性能の評価により，飛沫除去性能を定量的に評価す
7 ると共に，ホルムアルデヒドガスの分解試験による光触媒性能評価を
8 行った。

9

10 2 実験方法

11 2.1 可視光応答型光触媒式小型空気清浄機について

12 **Fig.1** に，本研究で開発した視光応答型光触媒式小型空気清浄機の外
13 観を示す。高効率の可視光応答型光触媒として三酸化タングステン
14 を使用した東芝製ルネキャット™ を使用した。バンドギャップエネル
15 ギーは 2.5 eV であり，理論上波長が 495 nm 以下の可視光線を利用
16 することが出来る^{17,18)} (青色光が 450-485 nm 程度である)。平均粒径
17 は 100 nm 程度であり，市販のスプレー剤では 0.1 wt% の水/アルコ
18 ールスラリーが用いられているが，本研究では 10 wt% のスラリーを
19 純水で希釈して使用した。塗布するフィルター材料は，不織布ワイパ
20 ー (モノタロウ，ポリエステル 45%，セルロース 55%) を用いた。
21 250mm×250mm の不織布が四つ折りになって販売されているが四つ
22 切りにして 1 層のみを使用した。塗布する際のスラリー濃度は 0.3
23 wt% 程度であり，両面へのスプレーでの塗布量と不織布の面積からお
24 よそ 0.4 g/m² 程度の塗布量と見積られた。

25 空気吸い込み用のファンは 120 mm 角の PC 用のケースファンを
26 流用した。1,200 rpm, 1.1 m³/min の風量でノイズの公称値は 19 dB と
27 なっている。LED はごく一般的な白色 LED を使用した 2835 SMD 3
28 LED モジュールを 6 ユニット使用した。分光放射照度計 (ウシオ電機
29 USR45) での測定ではピーク波長 448 nm であり，青色の LED に黄色
30 の蛍光体により 540 nm 程度のブロードな成分をかぶせることで白色
31 に見える。**Fig.2** に示すようにファンにより上から下に吸い込ん
32 だ風をファン下面に設置したフィルターに当て，さらにその下から

1 LED 光を照射している。直接は照度が高すぎて測定できないため、
2 LED からの距離を変えて照度を測定し、距離の逆二乗の関数でフィッ
3 ティングにより外挿することでフィルター位置での照度を 68,500 lux と
4 求めた。なお、ファン、LED 共に 12V 直流電源で駆動し、消費電力
5 は 5W 以下である。フィルターからの排気の風速は、中央部で 0.3 m/s、
6 周辺部の最も速い点で 0.8 m/s 程度であった（熱線式風速計 DT-8880
7 (CEM 社) を使用)。

8

9 2.2 特殊画像撮影による飛沫の吸い込み挙動評価

10 カトウ光研株式会社の微粒子可視化システム PV2-II により、小型
11 空気清浄機に吸い込まれる飛沫の可視化を行った。高輝度の LED 光
12 若しくは一軸方向に発振する 2 W の緑色レーザー光により空気中の
13 液滴を照らし、高速度カメラで撮影して動かない背景などを除去する
14 画像処理を加えて飛沫の抽出を行った。

15 まず、直接口腔から放出される飛沫挙動を捉えるために口腔内を湿
16 らせた上で「ブーブー」という破裂音により飛沫を意図的に大量に放
17 出した結果を高輝度 LED 投光により撮影した。撮影の邪魔となるため
18 小型空気清浄機の LED は消灯しており、フィルターサイドからのエ
19 アフローの漏れが無いようにアルミテープで塞いでいる。さらに、ハ
20 ンドスプレーからの飛沫を一軸発振のレーザー光により横方向から投
21 光して、小型空気清浄機を通過する前後の飛沫を撮影した。

22

23 2.3 不織布フィルターによる飛沫透過率評価

24 ファンにより吸い込まれた液滴がどの程度フィルターにより補足さ
25 れて除去されるかを評価するために 120 mm 角 × 450 mm のダクトを
26 スチレンボードにより制作し、内部に小型空気清浄機と同じファンと
27 不織布フィルター（光触媒は塗布していない）を用いた排気ユニット
28 を設置した。ファンの上流側 120 mm 位置と、フィルターの下流側
29 120 mm 位置中央部にポートを設け、パーティクルカウンター AERO
30 Trak APC 9303-01 (TSI 社) の吸い込みノズルをそれぞれのポートか
31 ら中央位置に挿入することでフィルター通過前後の粒子濃度を測定し
32 た (Fig.3)。パーティクルカウンターノズルからの吸引速度は 4.72×10^{-5}

1 m³/s である。液滴源として一般向けの超音波加湿器に水道水を入れて
2 噴霧器として使用した。真上と斜め 40°方向への 2 つのノズルが付い
3 ており、1 回目の試験では両方から噴霧、2, 3 回目の試験では斜め方
4 向のみの噴霧として液滴量を変化させた。ダクトは HEPA フィルター
5 を内蔵したファンユニット（アズワン ピュアスペース PS01-AD）を
6 用いたクリーンブース内に設置した。当初クリーンブース下側の隙間
7 （通常は内部が陽圧となるため吹き出し口となり問題にならない）か
8 らダクトが外気を吸ってしまったため噴霧しないバックグラウンドで
9 の値が高くなったが、これにより空気中の埃の除去性能を評価した。
10 その後、下部の隙間をシールすることにより測定する液滴濃度に対し
11 て十分清浄な環境を得ている。フィルターの上流側、下流側それぞれ
12 で 2 分間の粒子数測定を 10 回連続繰り返し 1 セットとし、0.3-1, 1-5,
13 5-25 μ m の各分級についての平均濃度（算術平均）と標準偏差を求め、
14 下流側の平均値を上流側の平均値で割ることで透過率を求めた。

15

16 2.4 クリーンベンチ空間内での飛沫除去性能評価

17 2.3 節の飛沫透過試験のクリーンブースで使用した HEPA フィル
18 ターを内蔵したファンユニットを流用して 0.6 m 角 \times 1.5 m のクリー
19 ンベンチを製作し、内部で前節でも使用した超音波加湿器による水道
20 水の噴霧を行った。まず、パーティクルカウンターにより当該体系に
21 おける様々な位置での空間中の液滴濃度測定を行った。さらに、噴霧
22 器とパーティクルカウンターとの間に小型空気清浄機を設置し、様々
23 な位置に於いて液滴量の分布がどのように変化するかを評価した。
24 実験に使用したクリーンベンチの中に設置した噴霧器、小型空気清浄
25 機、パーティクルカウンターのレイアウトを **Fig.4** に示す。クリーン
26 ベンチ上流側の端からの距離を L 、噴霧器とパーティクルカウンター
27 ノズル先端までの平面投影距離を D 、パーティクルカウンターのノズ
28 ル中心のクリーンベンチ底面からの高さを H として定義した。噴霧器
29 中心の位置は $L = 400$ mm で固定、小型空気清浄機位置も $L = 650$ mm
30 で固定とした。

31 HEPA フィルターを内蔵したファンユニットの空気取り入れ口には
32 小型空気清浄機で使用している不織布を 4 層重ねて設置することで

1 クリーンベンチ内での空気流量を調整した。クリーンベンチ底面から
2 高さ 300 mm での風速は $L = 400$ mm 位置に於いて 0.53 m/s, $L = 650$ mm
3 位置で 0.44 m/s であった。噴霧器は斜め 40° 方向のノズルのみを使
4 用した。小型空気清浄機を使用しない状態では噴霧器の高さ 170 mm
5 の噴霧口から目に見える液滴が上昇していき、噴霧器から水平に 200
6 mm 程度の距離で高さ 300 mm 程度（クリーンベンチ中心高さ）にな
7 り水平飛行に移行した。小型空気清浄機を動作させると液滴がファン
8 によって吸い込まれるが、時間によって揺動が激しく一定の状態では
9 無かった。このため、2.3 節同様に 2 分間の測定を 10 回繰り返すこと
10 により粒子数の算術平均と標準偏差の評価を行った。なお実験を実施
11 した部屋の湿度は 30-40% 程度、気温は 23°C 前後であった。

12

13 2.5 ホルムアルデヒド分解試験

14 フィルターによって捕集された飛沫も時間と共に乾いて中に含まれ
15 ているウイルスが再放出される恐れがある。このため、フィルターに
16 光触媒を塗布することで、有機物であるウイルスの分解を意図してい
17 るが、SARS-CoV-2 ウイルスで無くてもウイルスを噴霧しての除去性
18 能の評価は現在国内の実験施設が対応しきれないため実施が極めて困
19 難である。また、光触媒が各種のウイルスに対して不活化の効果を示
20 すことは様々な研究で明らかにされている¹⁰⁻¹⁵⁾。このため本研究では
21 ウイルスを用いた性能評価結果と比較を行うための前段階として光触
22 媒による空気清浄機としての一般的な性能評価を、有機ガスであるホ
23 ルムアルデヒドの分解挙動により評価した。将来的には活性酸素の生
24 成量などの物理的な指標を用いた生残曲線の整理などにより、光触媒
25 によるウイルスの不活化の効果を統一的に評価出来ないか研究を進め
26 る予定である。

27 なお、JIS R1751-4「ファインセラミックス- 可視光応答形光触媒材
28 料の空気浄化性能試験方法-第 6 部：小型チャンバーを用いたホルムア
29 ルデヒドの除去性能」は光触媒自体の評価法であり、空気清浄機全体
30 の評価法ではないため、光源や試験片の材質、サイズ、さらにファン
31 を用いているという部分など様々な点で異なっている。また、日本電
32 機工業会規格 JEM1467 の 1 m³ チャンバー中でタバコを 5 本燃焼さ

1 せたあとの試験は，本研究で評価を行う小型空気清浄機には非常に負
2 荷の高い試験であり，ヤニなどにより光触媒が覆われることで本来の
3 性能が評価出来なくなる恐れがあるため，独自の測定方法とした。

4 測定はホルムアルデメーター htV-m (PPM technology 社)により実
5 施した。測定レンジは 0-50 ppm で電気化学式燃料電池法により測定
6 を行う。0.038 m³ のアクリルデシケーターをチャンバーとして使用し，
7 小型空気清浄機，ホルムアルデメーターを中に入れ，ホルムアルデヒ
8 ド溶液が入った瓶中の蒸気をシリンジで吸引してチャンバーに開けた
9 穴から一定量を注入することで，初期濃度 5 mg/m³ 程度での試験を実
10 施した。

11 さらに，フィルターの高性能化を図るため，ルネキャットTM 10 wt%
12 スラリー原液を不織布にスプレーし WO₃ 触媒の面密度を 0.4 g/m² 程
13 度から 22 g/m² 程度に高めたフィルターを作成して同様の試験を実
14 施した。さらに，有機物である不織布フィルター自体の分解により性
15 能が低下することを防ぐために，酸化分解されない無機材質のセラミ
16 ックファイバーペーパー（坂口電熱 BSFP300, 1 mm 厚）を使用した
17 フィルターを試作した。販売時には形状保持のための有機バインダー
18 が使用されているため，500°Cで1時間ベーキングすることにより有機
19 バインダーを除去した後，無機系の接着剤であるセラマボンド 569 を
20 水で溶かしたスラリーを含浸させることで形状を保持した。通風性を
21 良くするため φ1 mm の穴をポンチで 5mm 間隔で開けた後に，不織
22 布の場合と同様にルネキャットTM 10 wt% スラリーを 22 g/m² 程度ま
23 でスプレーした。

24 25 **3 実験結果・考察**

26 **3.1 特殊画像撮影による飛沫の吸い込み挙動評価**

27 口腔からの飛沫を撮影した動画 (Mov. S1) から 5 フレーム画像を
28 抽出して重ね合わせることで，飛沫の動線を静止画像として求めた物
29 を **Fig.5** に示す。小型空気清浄機上空 30 cm 程度の範囲で，飛沫が引
30 き寄せられ吸い込まれる様子が分かる。

31 **Fig.6** は一軸発振のレーザー光により，小型空気清浄機を透過する
32 ハンドスプレーからの飛沫を撮影した結果である (動画は Mov. S2)。

1 ファンの下側にもレーザー光が届くセッティングとしているが（黒い
2 線状の像が画像処理されたレーザー光の軌跡）、フィルターを透過した
3 飛沫は見られない。

4 一方で、電子たばこからの呼出煙の吸い込み挙動 (Mov. S3) では、
5 一旦吸い込まれた煙がフィルターを透過せずに側方に再放出される挙
6 動も見られた（口腔からの飛沫ではこの挙動は見られなかった）。電子
7 たばこからの呼出煙は $0.1 \mu\text{m}$ 付近にピークを持つ粒度分布を示し¹⁹⁾、
8 サブミクロンの粒径の液滴については逆に広く拡散される可能性が示
9 唆された。

10

11 3.2 不織布フィルターによる飛沫透過率評価

12 不織布フィルターに対する空気中の埃及び液滴の透過率の測定結果
13 を **Table 1** に示す。空気中の埃に対しては、いずれの粒径に対しても
14 70-80 % 程度の粒子が除去されていた。それに対して噴霧器からの液
15 滴では、 $0.3-1 \mu\text{m}$ の液滴はほとんど除去されておらず、 $1-5 \mu\text{m}$ で半
16 分前後の除去率であったが、 $5-25 \mu\text{m}$ の飛沫はほぼ完全に除去できて
17 いた。

18 不織布フィルター一般で、 $0.1 \mu\text{m}$ 以下の粒子や $1 \mu\text{m}$ 以上の粒子で
19 は粒子除去性能が高いが、その間のサブミクロン領域では粒子除去効
20 率が低いことが知られており^{20,21)}、今回 $0.1 \mu\text{m}$ 以下の粒子について
21 は測定出来ていないが、それより大きな粒子についての結果は整合し
22 ている。しかし、使用した不織布は **Fig.7** に示すように長さ 2 mm 幅
23 0.5 mm 程度の比較的大きな穴が多数開口している。本研究における
24 小型空気清浄機ではこの不織布を1層のみ使用しており、この液滴透
25 過試験でも同様である。 $1 \mu\text{m}$ 以上の粒子では慣性衝突や遮りが支配的
26 な粒子除去のメカニズムとなるが^{20,21)}、これだけ大きな穴があるにも
27 かかわらず、 $5-25 \mu\text{m}$ の液滴がほぼ完全に除去出来ることは当初予想
28 していなかった。 $0.3-1 \mu\text{m}$ の液滴が透過していることからフィルター
29 が濡れて液膜により透過しなくなったとは考えられず、ファンにより
30 生じる乱流の効果などを今後検討する必要がある。いずれにしる粒径
31 の大きい飛沫がほとんど除去できていることは、3.1節の特殊画像撮影
32 でも確認できており、空気中の埃でも $5-25 \mu\text{m}$ の粒子については 8

1 割程度除去できていることから、実態を反映していると考えられる。
2 なお、0.3-1.0 μm の液滴について AERO Trak APC 9303-01 の最大可
3 測粒子濃度 (5% 以下の計数損失に収まる) の公称値が $7 \times 10^7 / \text{m}^3$ 程度
4 であり、噴霧器ノズル直近の高い濃度の液滴を測定した場合でも
5 $5 \times 10^8 / \text{m}^3$ 程度でそれ以上大きくならなかったため、計数が飽和して
6 いると考えられる。このためクリーンブース内で噴霧器からの吐出量
7 を抑制して測定を試みた。フィルターの上流側で $(1.9 \pm 0.2) \times 10^7 / \text{m}^3$
8 程度の 0.3-1 μm の液滴は不織布フィルターにより $(1.5 \pm 0.1) \times 10^7 / \text{m}^3$
9 程度に減少したが、透過率 80% 程度と空気中の埃より除去率が低く、
10 やはりサブミクロンの液滴に対してはあまり効果が無いと考えられる。
11

12 3.3 クリーンベンチ空間内での飛沫除去性能評価

13 まず、小型空気清浄機は作動させずに、パーティクルカウンターの
14 ノズルの底面からの高さ $H = 300 \text{ mm}$ における噴霧器中心からの距離
15 D に対する液滴濃度の依存性を評価した結果を **Fig.8** に示す。図中の
16 エラーバーは2分間10回の測定を行った結果から求めた標準偏差を示
17 す (**Fig.8,9** も同様)。 $D = 300 \text{ mm}$ では、0.3-1, 1-5, 5-25 μm の各分級
18 ともほぼ同じ液滴濃度であり、0.3-1 μm の液滴濃度は D が変化しても
19 ほぼ変化しなかったが、前節で述べたように計数が飽和しており、 D
20 が大きくなっても飽和濃度以下には低下していないと考えられる。そ
21 の一方で、1-5, 5-25 μm の液滴濃度は D と共に大きく低下した。1-5 μm
22 の液滴は $D = 300 \text{ mm}$ では $(3.5 \pm 0.2) \times 10^8 / \text{m}^3$ であったのが $D = 700$
23 mm では $(5.1 \pm 1.3) \times 10^6 / \text{m}^3$ まで低下し、5-25 μm の液滴では $D = 300$
24 mm で $(2.5 \pm 0.1) \times 10^8 / \text{m}^3$ であったのが $D = 700 \text{ mm}$ では
25 $(1.9 \pm 2.0) \times 10^5 / \text{m}^3$ まで低下した。

26 次に、 $D = 500 \text{ mm}$ 位置における液滴濃度の高さ依存性について小
27 型空気清浄機を使用しない場合と使用した場合とで比較した結果を
28 **Fig.9** に示す。0.3-1 μm の液滴については計数値が飽和しており高さ
29 による依存性は見られなかったため割愛している。小型空気清浄機を
30 使用しない場合、1-5 μm の液滴は、 $H = 300 \text{ mm}$ 付近での
31 $(6.2 \pm 0.9) \times 10^7 / \text{m}^3$ をピークに、 $H = 100 \text{ mm}$ では $(1.8 \pm 0.2) \times 10^7 / \text{m}^3$ に
32 まで低下していた。5-25 μm の液滴も同様に $H = 300 \text{ mm}$ での

1 $(3.3\pm 0.6)\times 10^7 / \text{m}^3$ をピークに、 $H = 100 \text{ mm}$ では $(1.8\pm 0.8)\times 10^6 / \text{m}^3$ ま
2 で低下した。小型空気清浄機を作動させた場合、 $1\text{-}5 \mu\text{m}$ の液滴は $H =$
3 150 mm での $(3.8\pm 1.0)\times 10^7 / \text{m}^3$ をピークに、 $H = 400 \text{ mm}$ では
4 $(2.3\pm 0.3)\times 10^6 / \text{m}^3$ にまで低下していた。 $5\text{-}25\mu\text{m}$ の液滴はさらに極端に
5 濃度が低下しており、 $H = 150 \text{ mm}$ での $(2.1\pm 1.0)\times 10^7 / \text{m}^3$ をピークに、
6 $H = 400 \text{ mm}$ では $(7.5\pm 17)\times 10^3 / \text{m}^3$ にまで低下していた。一方、 $H = 100,$
7 150 mm に於いては、小型空気清浄機を稼働させる前よりも若干濃度
8 が上がっており、下降気流により下側に吸い寄せられたか、ファンか
9 らの再放出が考えられる。 $H = 100 \text{ mm}$ から 400 mm までの液滴数の
10 合計を比較すると、 $1\text{-}5 \mu\text{m}$ で 60% 、 $5\text{-}25 \mu\text{m}$ で 56% の液滴が小型空
11 気清浄機の稼働により減少した。

12 $D = 700 \text{ mm}$ 位置においても同様の液滴濃度高さ依存性の測定を行
13 った (**Fig.10**)。 $1\text{-}5, 5\text{-}25 \mu\text{m}$ の液滴について絶対数は 1 桁程度低下し
14 ていたが、分布はほぼ同様であり、距離と共に大きな粒子が重力によ
15 り沈降して低い高さでの粒子数が相対的に大きくなる様子は見られな
16 かった (むしろ低い高さでの $5\text{-}25 \mu\text{m}$ の液滴数は $D = 500 \text{ mm}$ の場合
17 と比べて相対的に小さかった)。 0.5 m/s 程度の気流を流しており飛行
18 時間は 1 秒程度であるのに対して、 $10 \mu\text{m}$ の飛沫でも沈降速度は
19 3mm/s 程度と言われているため²⁰⁾ 妥当な結果であると考えられる。
20 $0.5\text{-}20 \mu\text{m}$ 程度の液滴の水分が蒸発するのに要する時間は 0.8 秒程度
21 と言われており²²⁾、**Fig.8** の距離による濃度変化は主に飛距離と共に
22 蒸発した結果であると考えられる。一方で、小さい液滴の方が比表面
23 積は大きいと蒸発速度が速くなると考えられるが、**Fig.8** において
24 $1.0\text{-}5.0 \mu\text{m}$ と $5.0\text{-}25 \mu\text{m}$ の液滴濃度の変化を比較して粒径の小さい
25 $1.0\text{-}5.0 \mu\text{m}$ の方が減少率はわずかに小さい ($0.3\text{-}1.0 \mu\text{m}$ については計
26 測数が飽和しているため検討は出来ない)。 $5.0\text{-}25 \mu\text{m}$ の液滴が蒸発し
27 て $1.0\text{-}5.0 \mu\text{m}$ 程度になる場合と、 $1.0 \mu\text{m}$ より小さい液滴が衝突により
28 合一して $1.0\text{-}5.0 \mu\text{m}$ 程度になる場合の両方の効果が考えられ単純では
29 無く、風速、湿度、温度などによって大きくこの結果は異なってくる
30 可能性がある。ただし、空気中に噴霧された水粒子の挙動解析につい
31 て、湿度 50% 、室温 20°C で一定 (液滴の蒸発による湿度・温度変化を
32 加味しない) とした場合、液滴の水平初速度を 10m/s で気流が無い場

1 合は粒径が大きいほど到達距離が大きく、粒径 $100\ \mu\text{m}$ で 400mm 程度
2 と計算され、また、温度、湿度の条件を変化させてもほとんど変化は
3 見られなかったという結果が報告されている²³⁾。口腔から放出される
4 $60\ \mu\text{m}$ を超える大きな飛沫の初速度は、通常の呼吸では $<1\ \text{m/s}$ 、発声
5 を行う場合で $<5\ \text{m/s}$ 、咳をする場合で $<10\ \text{m/s}$ と言われており、到
6 達距離はそれぞれ $0.2\ \text{m}$ 以下、 $1\ \text{m}$ 程度、 3m 程度とされているが⁶⁾、
7 気流の状態によっては大きく変化すると考えられる。このため、本研
8 究に於いて HEPA フィルターを内蔵したファンユニットの空気取り
9 入れ口に設置する不織布を 4 層から 2 層に変更して $H = 300\ \text{mm}$ での
10 風速を $L = 400\ \text{mm}$ で $0.72\ \text{m/s}$ 、 $L = 650\ \text{mm}$ で $0.63\ \text{m/s}$ と速くした
11 場合の測定も行ったが、4 層の場合とほぼ同様の結果となった。

12 いずれにしろ、本研究で設定した条件では、発生源から $700\ \text{mm}$ の
13 距離に於いて着席時に机から人間の口の高さ程度である $300\text{-}400\ \text{mm}$
14 の高さに於いては、 $5 \times 10^5\ \text{/m}^3$ 程度であった $5\text{-}25\ \mu\text{m}$ の飛沫濃度が小
15 型空気清浄機の動作により $2 \times 10^2\ \text{/m}^3$ 程度にまで低下することが明
16 らかとなった。

17

18 3.4 ホルムアルデヒド分解試験

19 **Fig.11** に小型空気清浄機によるホルムアルデヒド分解試験結果を
20 示す。ホルムアルデヒドは還元性があり空気中で徐々に酸化分解され
21 ていくことやチャンバーへの吸着があるため、まずフィルターを装着
22 しないファンだけの運転でチャンバー内を攪拌してホルムアルデヒド
23 の減衰挙動を評価した。その後、2.1 節で説明した小型空気清浄機を 1
24 日以上空運転し、フィルター表面に付着した有機物などを除去した上
25 でホルムアルデヒド分解試験を実施した。測定時の室温は $27 \pm 3^\circ\text{C}$ 、湿
26 度 $45 \pm 10\%$ であった。

27 ファンによる攪拌のみのブランク試験では反応速度定数 $k =$
28 $8.84 \times 10^{-4}\ \text{/min}$ で指数関数的に減少したが (Fig.10 での \times)、小型空気
29 清浄機を動作させた場合、片対数プロットしても直線とならず、時間 t
30 [min]、定数 $a, b\ [\text{mg/m}^3]$ と反応速度定数 $k_1 = 1.81 \times 10^{-2}\ \text{/min}$ 及び $k_2 =$
31 $1.41 \times 10^{-3}\ \text{/min}$ の 2 つを用いた $a \cdot \exp(-k_1 t) + b \cdot \exp(-k_2 t)$ という式で
32 説明することが出来た (Fig.11 での \circ 。 $a = 0.478\ \text{mg/m}^3$, $b = 4.23\ \text{mg/m}^3$

1 であった)。

2 次に、高性能化を図るため、光触媒の面密度を 22g/m^2 程度に高め
3 た不織布フィルターを用いて同様の試験を実施した (Fig.11 の Δ)。
4 その結果、反応初期の分解速度は向上したが、途中から遅くなる傾向
5 が顕著となった。標準フィルターと同じ式でフィッティングを行った
6 結果、 $k_1 = 2.35 \times 10^{-2} / \text{min}$, $k_2 = 7.15 \times 10^{-5} / \text{min}$ で $a = 3.19 \text{ mg/m}^3$, $b = 1.50$
7 mg/m^3 となった。ここで、焼結法やゾルーゲル法などにより単体の構
8 造体が得やすい二酸化チタン光触媒によるホルムアルデヒドの分解は
9 一般的に単一の反応速度定数による一次反応で表わされる²⁴⁾。現在の
10 ところ三酸化タングステンは微粒子の表面吸着により担持するしか無
11 いため今回使用したフィルターではポリエステル 45%、セルロース
12 55% の有機物の不織布に光触媒微粒子を担持させており、フィルター
13 自身を分解する反応による分解生成物が 密閉されたチャンバー内に
14 蓄積した影響 (分解生成物はホルムアルデヒドでは無いが、センサー
15 は様々な有機ガスに一定の感度を有しており、分子量の大きいガスで
16 ある場合異なる反応速度定数を与えると考えられる)が考えられるが、
17 ガスクロマトグラフィーなどによる分解生成物の成分や挙動の把握な
18 ど、より詳細な検討が必要である。

19 最後に、セラミックファイバーペーパーにより作成したフィルター
20 を用いてホルムアルデヒド分解試験を行った (Fig.11 の ∇)。反応初
21 期の傾きは不織布に 10 % スラリーを塗布した場合と同等だが、その
22 後反応速度は低下せずに指数関数的にホルムアルデヒド濃度は減少し
23 た (3 時間弱で 0.1 mg/m^3 以下にまで減少した)。反応速度定数は $k =$
24 $2.15 \times 10^{-2} / \text{min}$ であり、通常型のフィルターの反応後期と比べて 15 倍
25 程度の反応速度を達成しており、フィルター自体の有機物の分解によ
26 る影響を排除出来たため高性能化が達成出来たと考えられる。

27

28 4 まとめ

29 人と人の間を飛び交う飛沫の除去を目的として可視光応答光触媒を
30 使用した小型の空気清浄機を開発した。特殊画像撮影では口腔からの
31 飛沫が吸い込まれる様子と、飛沫がフィルターにより除去されている
32 様子が視覚的に確認できた。ダクト中でのフィルターによる超音波噴

1 霧器からの粒度別の液滴透過率の評価では、0.3-1 μm 程度のサブミク
2 ロンの液滴はほぼ除去できなかったが、1-5 μm の飛沫は半分程度、5-25
3 μm の飛沫はほぼ完全に除去できることが明らかとなった。0.6 m 角
4 \times 1.5 m のクリーンベンチ空間内で噴霧した液滴の粒度別除去性能の
5 評価では、小型空気清浄機を使用することにより、着席時に人間の口
6 程度の高さを飛ぶ 5-25 μm の飛沫を発生源から 500 mm の距離では
7 1/50 に、700 mm の距離では 1/2,500 にまで、小型空気清浄機を使用
8 しない場合と比較して低減可能であることが明らかとなったが、0.3-1
9 μm のサブミクロンの液滴（エアロゾル）はほとんど除去することが
10 出来なかった。

11 光触媒の分解性能評価のためにデシケーター内でのホルムアルデヒ
12 ドガスの分解試験を行い、気体のホルムアルデヒドが光触媒を用いた
13 小型空気清浄機により酸化分解されることが確認された。また、現在
14 使用している不織布フィルターを無機材料のフィルターにすることに
15 より飛躍的に性能が向上することが確認されたため、今後量産可能な
16 高性能フィルターの開発を行う。

17 本研究で開発した空気清浄機を用いていても、全ての飛沫を除去出
18 来るわけでは無く、あくまでもこれまでの対策に追加して使用する、
19 プラスアルファの対策手段と考えることが重要である。気流や温度、
20 湿度、人の座る位置関係などで結果は大きく変化すると考えられ、さ
21 らに口腔からの飛沫の粒径は今回測定可能であった 25 μm よりも大き
22 い 120-150 μm にピークを持ち、これらの大きな粒径の飛沫の挙動評価
23 が今後必要である。さらに、大きな液滴の蒸発による粒子数の減少、
24 小さな粒径の液滴の再放出など、単純に液滴の数の評価だけではその
25 中に含まれるウイルスの飛散量を評価するには不十分であり、今後化
26 学的、生物学的手法により空間中の物質輸送を検証する必要がある。

27 また、実験室での微生物や飛沫に対するミクロな効果の検証だけで
28 は、実際の現場におけるマクロな感染制御効果の評価を行うことは出
29 来ない。このため、実際に感染症発生が市中に於いて医療機
30 器に対して行われているようにこの小型空気清浄機を使用した場合と
31 使用していない場合の対照群と比較を行うことで有効性の実証試験を
32 行う必要があり、必要な倫理的、行政的手続きについて現在検討を進

1 めている。

2

3

References

- 4 1) World Health Organization: Infection prevention and control of
5 epidemic- and pandemic-prone acute respiratory infections in health care,
6 *WHO Guidelines* (2014) ISBN 978 92 4 150713 4.
- 7 2) World Health Organization. Transmission of SARS-CoV-2: Implications
8 for Infection Prevention Precautions: Scientific Brief. 09 July 2020.
9 (<https://apps.who.int/iris/rest/bitstreams/1286634/retrieve>). Accessed 10
10 May 2021.
- 11 3) Siegel, J. D., Rhinehart, E., Jackson, M. and Chiarello, L.: Health Care
12 Infection Control Practices Advisory Committee: Guideline for Isolation
13 Precautions: Preventing Transmission of Infectious Agents in Health
14 Care Settings, *Am J Infect Control*, **35**, S65–S164 (2007)
- 15 4) Johnson, G.R., Morawska, L., Ristovski, Z.D., Hargreaves, M.,
16 Mengersen, K., Chao, C.Y.H., Wan, M.P., Lic, Y., Xie, X., Katoshevski,
17 D. and Corbett, S.: Modality of human expired aerosol size distributions,
18 *J. Aerosol Sci.*, **42**, 839-851 (2011). doi:10.1016/j.jaerosci.2011.07.009
- 19 5) Lindsley, W.G., Pearce, T.A., Hudnall, J.B., Davis, K.A., Davis, S.M.,
20 Fisher, M.A., Khakoo, R., Palmer, J.E., Clark, K.E., Celik, I., Coffey,
21 C.C., Blachere, F.M. and Beezhold, D.H.: Quantity and Size Distribution
22 of Cough-Generated Aerosol Particles Produced by Influenza Patients
23 During and After Illness, *J. Occupational and Env. Hygiene*, **9**, 443-449
24 (2012). doi:10.1080/15459624.2012.684582
- 25 6) Xie, X., Li, Y., Chwan, A.T.Y., Ho, P.L. and Seto, W.H.: How far droplets
26 can move in indoor environments - revisiting the Wells
27 evaporation-falling curve, *Indoor air*, **17**, 211-225 (2007).
28 doi:10.1111/j.1600-0668.2007.00469.x
- 29 7) Chen, C. and Zhao, B.: Some questions on dispersion of human exhaled
30 droplets in ventilation room: answers from numerical investigation,
31 *Indoor Air*, **20**, 95-111 (2010). doi:10.1111/j.1600-0668.2009.00626.x
- 32 8) World Health Organization. Modes of Transmission of Virus Causing

- 1 COVID-19: Implications for IPC Precaution Recommendations:
2 Scientific Brief: 27 March 2020.
3 (<https://www.who.int/news-room/commentaries/detail/modes-of-transmission-of-virus-causing-covid-19-implications-for-ipc-precaution-recommendations>) Accessed 12 July 2021.
- 4
5
6 9) RIKEN NEWS, 「富岳」で飛沫感染防止に貢献する, **473**, 10-12 (2020),
7 ISSN 1349-1229.
- 8 10) Cho, M., Chung, H., Choi, W. and Yoon, J.: Different inactivation
9 behaviors of MS-2 phage and *Escherichia coli* in TiO₂ photocatalytic
10 disinfection, *App. Environmental Microbiology*, **71**, 270-275 (2005).
11 doi:10.1128/AEM.71.1.270-275.2005
- 12 11) Yao, Y., Ochiai T., Ishiguro H., Nakano R., and Kubota Y.: Antibacterial
13 performance of a novel photocatalytic-coated cordierite foam for use in
14 air cleaners, *App. Catalysis B: Env.*, **106**, 592-599 (2011).
15 doi:10.1016/j.apcatb.2011.06.020
- 16 12) Ochiai, T., Masuko, K., Tago, S., Nakano, R., Niitsu, Y., Kobayashi, G.,
17 Horio, K., Nakata, K., Murakami, T., Hara, M., Nojima, Y., Kurano, M.,
18 Serizawa, I., Suzuki, T., Ikekita, M., Morito, Y. and Fujishima, A.:
19 Development of a hybrid environmental purification unit by using of
20 excimer VUV lamps with TiO₂ coated titanium mesh filter, *Chem. Eng.*
21 *J.*, **218**, 327-332 (2013). doi:10.1016/j.cej.2012.12.048
- 22 13) Choi, S.Y. and Cho, B.: Extermination of influenza virus H1N1 by a
23 new visible-light-induced photocatalyst under fluorescent light, *Virus*
24 *Res.*, **248**, 71-73 (2018). doi:10.1016/j.virusres.2018.02.011
- 25 14) Miyauchi M., Sunada K. and Hashimoto K.: Antiviral effect of visible
26 light-sensitive Cu_xO/TiO₂ photocatalyst, *Catalysts*, **10**, 1093_1-19
27 (2020). doi:10.3390/catal10091093
- 28 15) Matsuura, R., Lo, C.W., Wada, S., Somei, J., Ochiai, H., Murakami, T.,
29 Saito, N., Ogawa, T., Shinjo, A., Benno, Y., Nakagawa, M. Takei, M. and
30 Aida, Y.: SARS-CoV-2 Disinfection of Air and Surface Contamination
31 by TiO₂ Photocatalyst-Mediated Damage to Viral Morphology, RNA, and
32 Protein, *Viruses*, **13**, 942_1-14 (2021). [doi:10.4265/bio.26.119](https://doi.org/10.4265/bio.26.119)

- 1 16) Uema, M., Yonemitsu, K., Momose, Y., Ishii, Y., Tateda, K., Inoue, T.
2 and Asakura, H.: Effect of Photocatalyst under Visible Light Irradiation
3 in SARS-CoV-2 Stability on an Abiotic Surface, *Biocontrol Science*, **26**,
4 119-125 (2021). doi:10.4265/bio.26.119
- 5 17) Sato, A., Yoshida, K. and Fukushi, D.: "RENECATTM"
6 visible-light-responding photocatalyst to improve indoor air quality,
7 *Toshiba Rev.*, **60**, 47-49 (2014). (In Japanese)
- 8 18) Sato, A., Yoshida, K., Fukushi, D., Rokutanda, T. and Esaki, M.: WO₃
9 visible-light-responding photocatalyst to achieve a comfortable indoor
10 environment, *J. Imaging Soc. Jap.*, **55**, 449-454 (2016). (In Japanese)
- 11 19) 野崎 淳夫, 成田 泰章, 一條 佑介: 加熱式タバコからの空気汚染
12 物質の発生に関する研究, 平成 30 年度空気調和・衛生工学会大会
13 学術講演論文集 第 7 巻 空気質編, 85-88 (2018).
14 doi:10.18948/shasetaikai.2018.7.0_85
- 15 20) 竹川 暢之: エアロゾルと飛沫感染・空気感染, *エアロゾル研究*, **36**,
16 65-74(2021) doi: 10.11203/jar.36.65
- 17 21) 明星 敏彦: PM_{2.5} とマスク, *エアロゾル研究*, **28**, 287-291(2013)
18 doi:10.11203/jar.28.287
- 19 22) Morawska, L., Johnson, G.R., Ristovski, Z.D., Hargreaves, M.,
20 Mengersen, K., Corbett, S., Chao, C.Y.H., Liand, Y. and Katoshevskie,
21 D.: Size distribution and sites of origin of droplets expelled from the
22 human respiratory tract during expiratory activities, *J. Aerosol Sci.*, **40**,
23 256-269 (2009). doi: 10.1016/j.jaerosci.2008.11.002
- 24 23) 安井 さおり, 山中 俊夫, 相良 和伸, 甲谷 寿史, 桃井 良尚, 空
25 気中に噴霧された水粒子の挙動解析に関する基礎的研究, 平成 22
26 年 空気調和・衛生工学会大会 近畿支部発表会論文集, (2010)
27 173-176 (A-87). doi: 10.18948/shasekinki.2010.0_173
- 28 24) Hongmin, L., Zhiwei, L., Xiaojiang, Y. and Wenfeng, S.: Kinetic
29 analysis of photocatalytic oxidation of gas-phase formaldehyde over
30 titanium dioxide, *Chemosphere*, **60**, 630-635 (2005). doi:
31 10.1016/j.chemosphere.2005.01.039



1

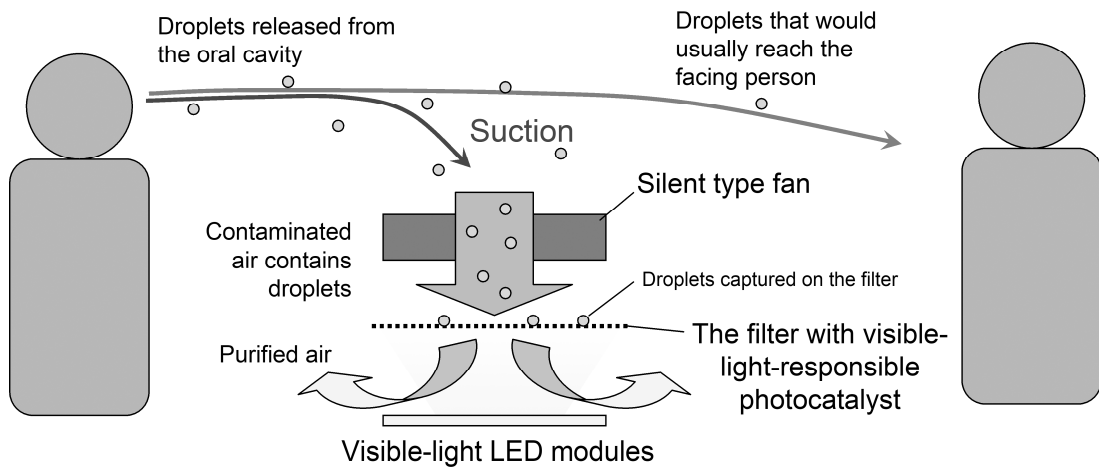
2

3 Fig.1

4 A prototype of the small air purifier with visible light responsible

5 photocatalyst and also with a 120 mm square silent fan.

1



2

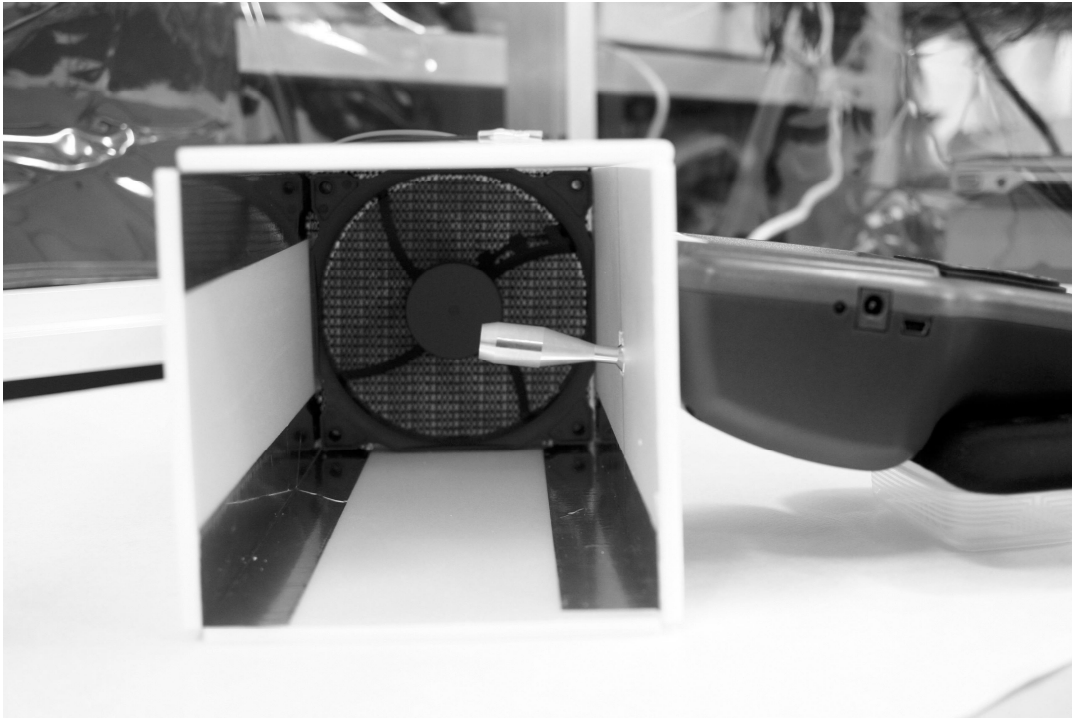
3

4

5 Fig.2

6 Conceptual diagram of the removal of flying droplets between peoples by a
7 small air purifier using a visible light responsive photocatalyst. The
8 number of droplets reaching the person facing each other is reduced by
9 suction by the fan and capture by the filter. The virus in the droplets
10 trapped by the filter is gradually inactivated by the photocatalyst.

11

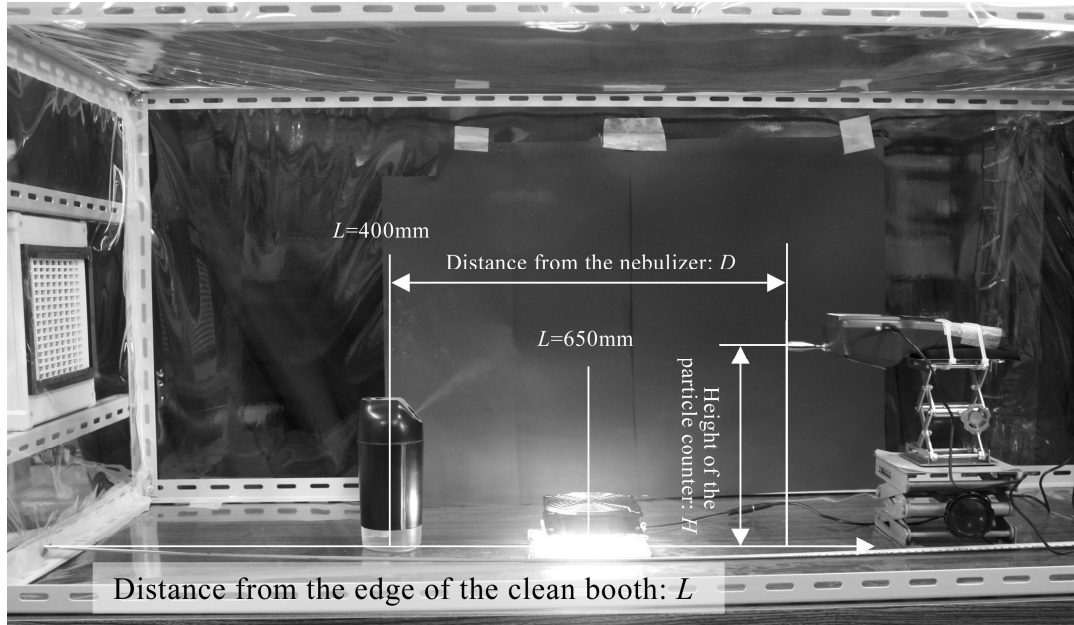


1

2

3 Fig.3

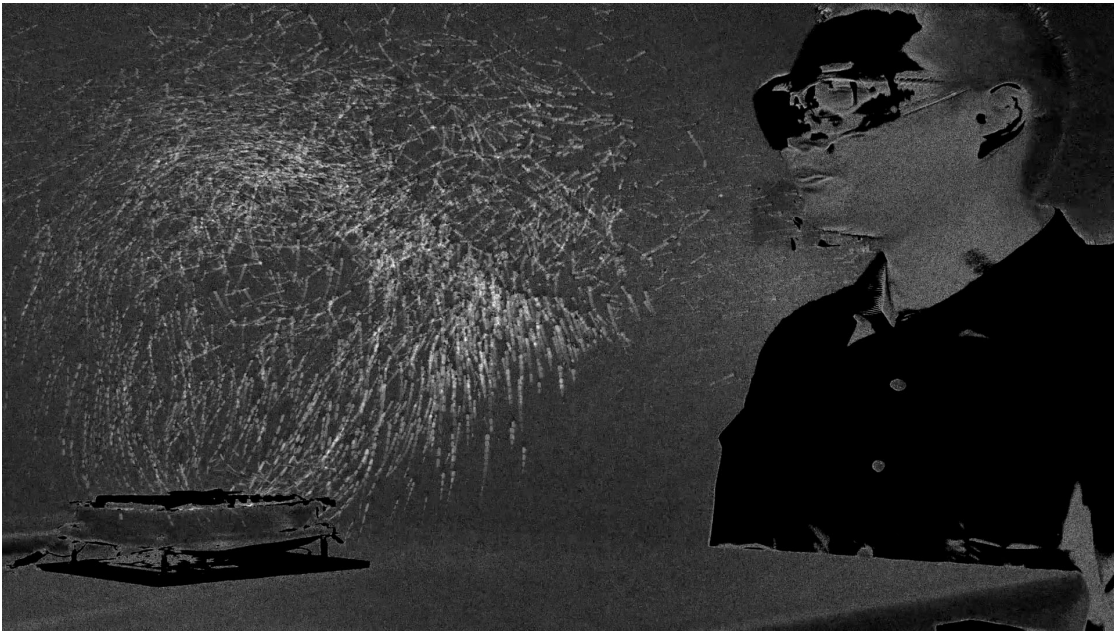
4 The 120 mm square exhaust unit used for the measurement of droplet
5 permeability through the non-woven fabric filter and the suction nozzle of
6 the particle counter inserted through the port upstream of the filter. The
7 upstream side of the duct was placed in the center of the clean booth and the
8 downstream side was placed outside the clean booth, and an ultrasonic
9 nebulizer was installed near the upstream side.



1
2
3
4 Fig. 4

5 Layout of the clean booth, ultrasonic nebulizer, small air purifier, and
6 particle counter used to evaluate the droplet removal performance in the
7 space. The HEPA filter unit was installed at the left end, and the airflow
8 was generated to the right. The distance from the left end of the clean booth
9 is L . The ultrasonic nebulizer was installed at $L = 400$ mm, and the small
10 air purifier is installed at $L = 650$ mm. The projected distance from the
11 center of the ultrasonic nebulizer to the tip of the particle counter nozzle is
12 D , and the height of the nozzle is H . The droplet concentration distribution
13 in the space was measured by changing D and H .

1



2

3

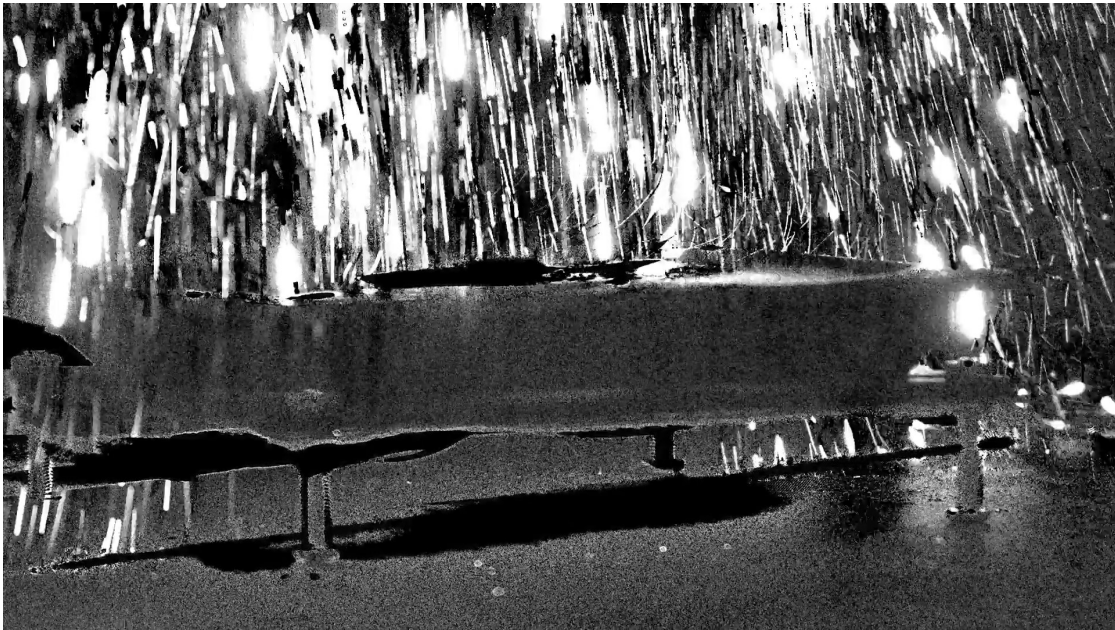
4 Fig. 5

5

6 The droplets emitted from the oral cavity that are inhaled by a small air purifier as
7 visualized by the particle visualization system PV2-II (Kato Koken Co., Ltd.). This
8 image was obtained by capturing five frames from a movie and overlaying them.

9

1



2

3

4 Fig. 6

5 Droplets from the hand sprayer are trapped by the non-woven filter on the
6 underside of the fan, as visualized by the particle visualization system.

7 Droplets on the underside of the fan can be visualized by uni-axial laser
8 scanning on the vertical plane, but few droplets penetrate the filter (the
9 several droplets seen on the left and right sides are those that fell outside
10 the fan).

1
2
3
4
5
6
7
8
9

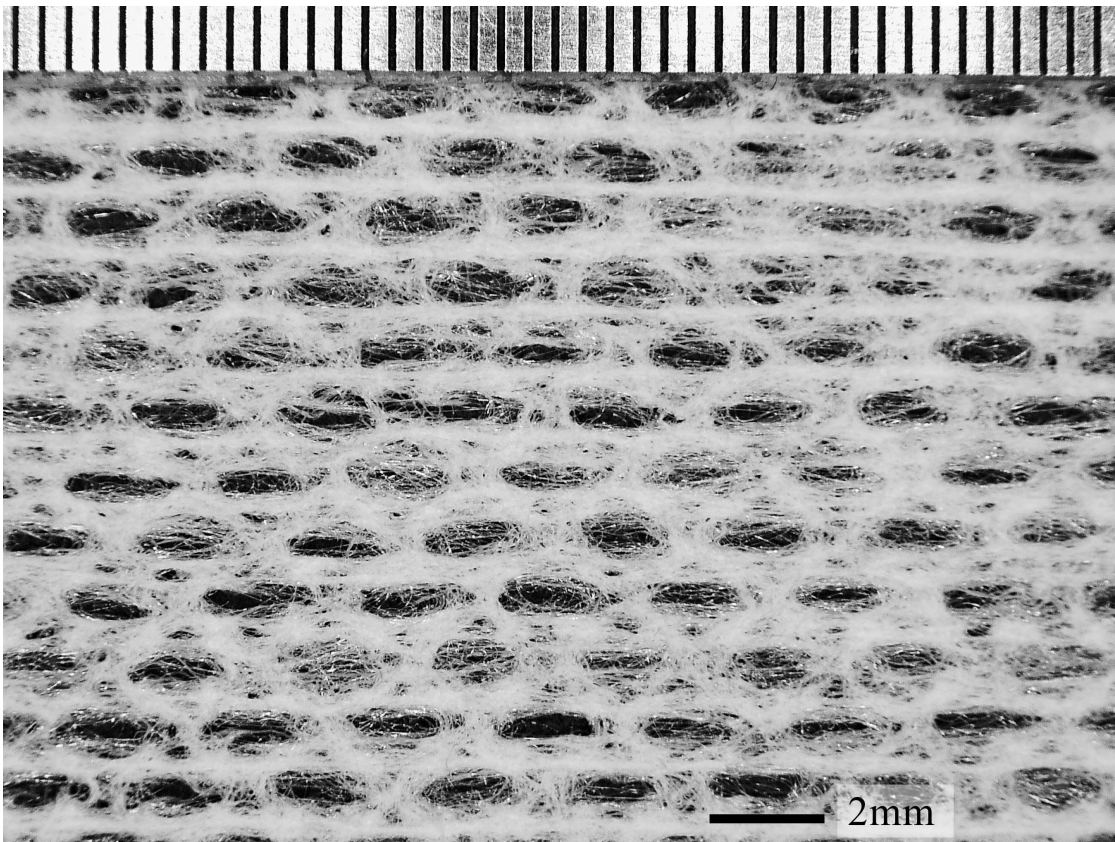
Table 1

Transmittance of droplets from an ultrasonic sprayer through a non-woven fabric filter in an exhaust duct installed in a clean bench. The arithmetic mean and standard deviation were obtained by repeating the measurement 10 times for 2 minutes under each condition.

Condition	Particle Size μm	before the filter		after the filter		Transmittance
		Average	Std. Dev.	Average	Std. Dev.	
		(m^{-3})	(m^{-3})	(m^{-3})	(m^{-3})	
with a little air dust	0.3~1	7.4×10^6	2.4×10^6	2.7×10^6	4.9×10^5	0.37
	1~5	5.1×10^4	1.9×10^4	1.7×10^4	4.2×10^3	0.34
	5~25	9.0×10^2	5.4×10^2	1.8×10^2	1.4×10^2	0.20
in the clean booth	0.3~1	1.2×10^4	7.5×10^3	6.7×10^3	1.4×10^4	0.54
	1~5	1.4×10^2	1.9×10^2	1.8×10^1	5.6×10^1	0.13
	5~25	2.0×10^1	5.9×10^1	0	0	0
with a nebulizer (1st, dual nozzle)	0.3~1	4.1×10^8	2.1×10^7	4.6×10^8	5.0×10^6	1.14
	1~5	1.2×10^7	4.3×10^6	3.6×10^6	2.1×10^5	0.30
	5~25	3.7×10^6	1.7×10^6	2.1×10^2	1.8×10^2	5.8×10^{-5}
with a nebulizer (2nd, single nozzle)	0.3~1	2.8×10^8	1.1×10^7	2.5×10^8	3.5×10^6	0.87
	1~5	2.6×10^6	3.0×10^5	1.0×10^6	1.2×10^5	0.40
	5~25	3.0×10^5	1.5×10^5	1.8×10^1	5.6×10^1	6.0×10^{-5}
with a nebulizer (3rd, single nozzle)	0.3~1	2.7×10^8	8.3×10^6	2.7×10^8	1.1×10^7	0.99
	1~5	2.0×10^6	3.5×10^5	1.5×10^6	1.1×10^5	0.76
	5~25	1.1×10^5	7.8×10^4	5.3×10^1	1.2×10^1	4.7×10^{-4}

10
11

1



2

3

4

5

Fig. 7

6

An optical micrograph of the nonwoven fabric used in the measurement of

7

droplet transmission through the filter and evaluation of droplet removal

8

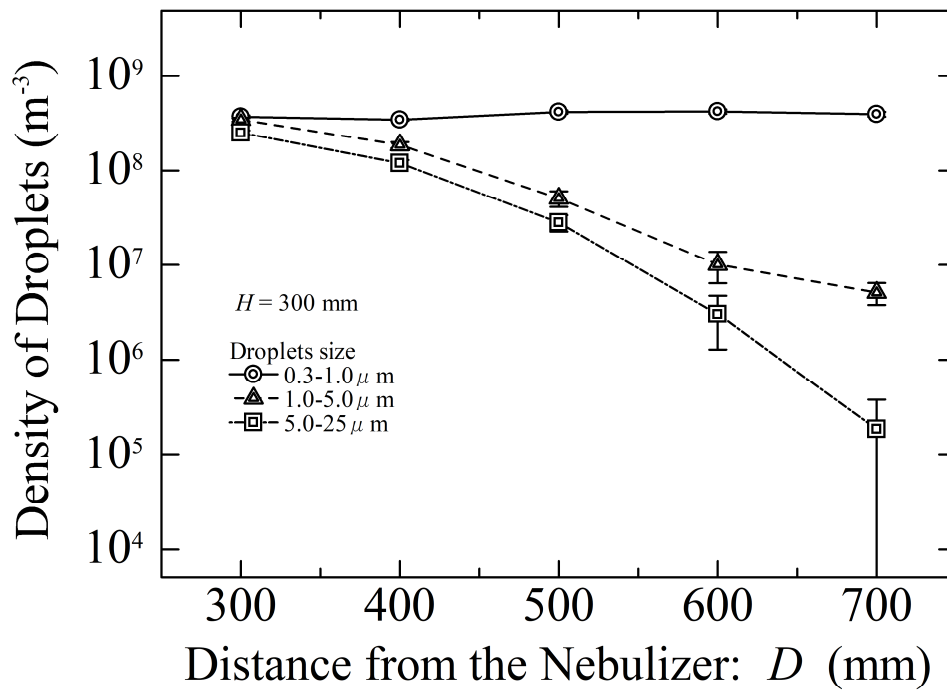
performance in the clean bench. In this study, only one layer of this

9

nonwoven fabric was used in the small air purifier.

10

11



1

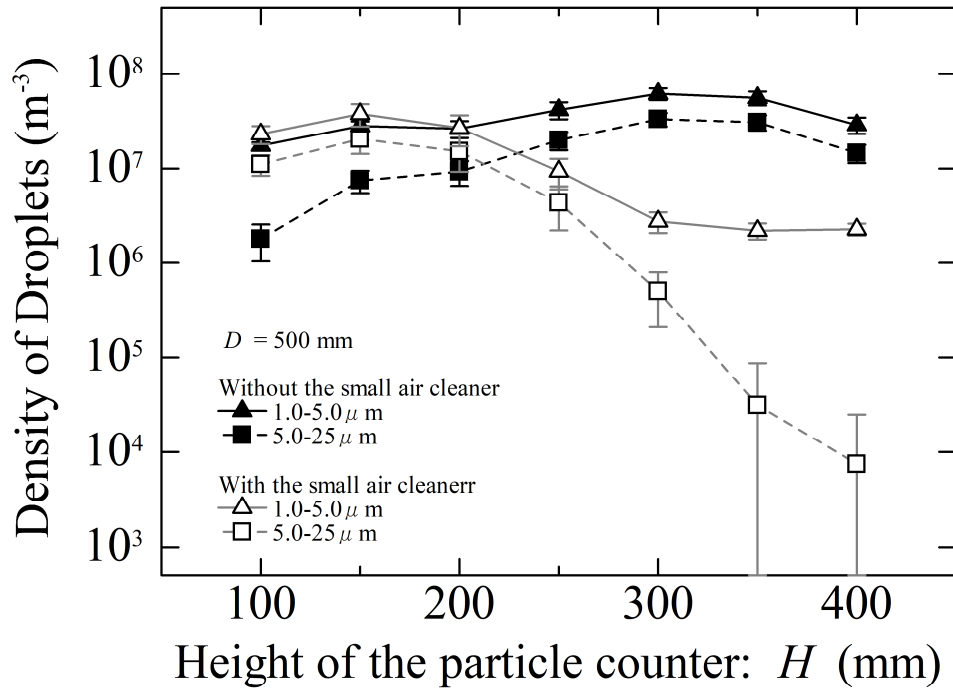
2

3 Fig. 8

4 Dependence of droplet concentration on distance from the nebulizer. The
 5 nozzle height of the particle counter was set at $H = 300$ mm, and the wind
 6 speed was adjusted to a tailwind of about 0.53 m/s at the same height above
 7 the nebulizer. The arithmetic mean and standard deviation (shown with
 8 error bars) were obtained by repeating 10 measurements for 2 minutes
 9 (same as in Figs. 9 and 10).

10

1

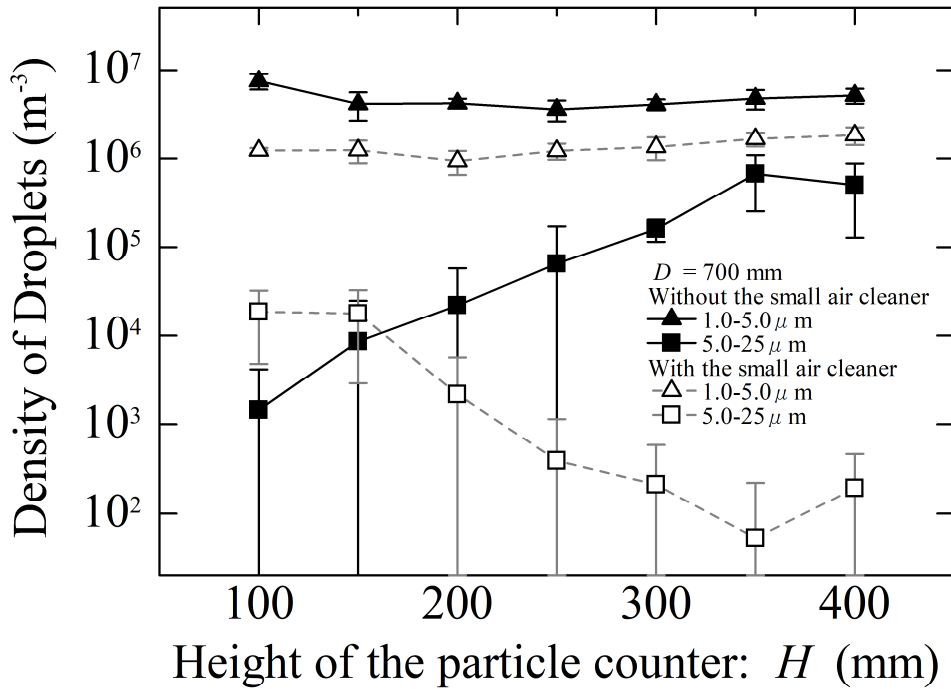


2

3 Fig. 9

4 Dependence of droplet concentration on height H at the distance $D = 500$
5 mm from the nebulizer to the nozzle of the particle counter, with and
6 without the use of a small air purifier located at $D = 250$ mm. Filled dots
7 represent the case without the small air purifier, and open dots represent
8 the case with the small air purifier, respectively.

1



2

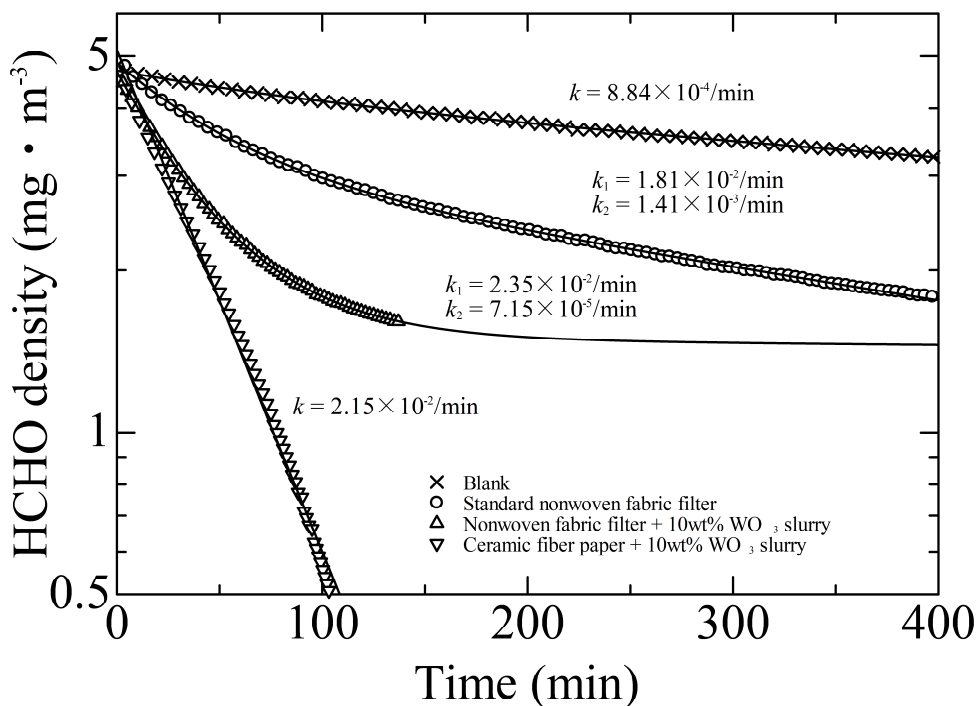
3 Fig. 10

4

5 Dependence of droplet concentration on height H at a distance $D = 700$ mm
6 from the nebulizer to the nozzle of the particle counter, with and without
7 the operation of a small air purifier. The measurements were performed
8 under the same conditions as in Fig. 9, except for the distance to the
9 particle counter, D .

10

1



2

3 Fig. 11

4 The photocatalyst performance of the small air purifier evaluated by the
5 decomposition rate of formaldehyde. The density of photocatalyst (WO_3) on
6 the standard nonwoven fabric filter (\circ) was estimated as 0.4 g/m^2 , while
7 the special filter manufactured with 10 wt% WO_3 slurry (\triangle and ∇) gives
8 the density of 22 g/m^2 . Nonwoven fabric filters (\circ and \triangle) showed small
9 decomposition rate at later stage of the reaction. Fitting analyze showed these
10 results were explained with two reaction kinetic constants. On the other hand,
11 inorganic filter manufactured from ceramic fiber paper (∇) showed 15 times larger
12 and single reaction kinetic constant.

13

14