

第40回 エアロゾル科学 技術研究討論会
2023年 9月 1日（金） @ 群馬県桐生市 美喜仁桐生文化会館

対面する人と人の上に設置する 小型飛沫除去装置の提案

○准教授 秋吉 優史

大阪公立大学 工学研究科 量子放射線系専攻、
放射線研究センター、
大阪国際感染症研究センター兼任

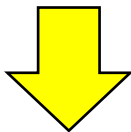
E-Mail: akiyoshi-masafumi@omu.ac.jp

<http://anticovid19.starfree.jp/>

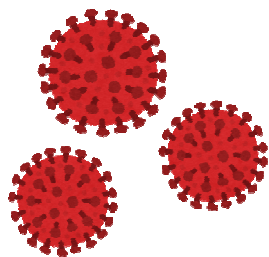


新型コロナウイルスへの工学的対抗策の検討(1)

~~密閉~~



エアロゾル



マスクをしていても、繊維の間や顔との隙間から**半数近く**のエアロゾルは飛散している。長時間滞留するため、換気が悪いと徐々に濃度が高くなる。

換気の状態は二酸化炭素濃度が一つの指標となる。



換気しよう

どうしても換気が悪い場所もある

長時間空気中に滞留し風に乗って遠くまで移動する

5 μ m以下の微粒子で飛沫核とも呼ばれる。数分間空気中に滞留し、広い範囲に拡散しうる。

空気清浄機

△二酸化塩素・オゾンを空間に噴霧するアクティブな「空間除菌」は、有効な濃度と人体に悪影響を与える濃度が近く制御が困難なため推奨しない。

光触媒、紫外線、高性能フィルターを使用したものなど、様々なタイプが販売されており、エアロゾルの捕集、エアロゾルに含まれるウイルスの不活化を行う。

高温になる、ファンヒーターやストーブでも不活化は可能。(エアコンでは不可)



粘膜に付着してから15~20分で感染するため、うがいが出来ない状況であればこまめに飲み込んでしまい胃酸で不活化の方が better。感染者が居る状況で飲食しても大丈夫と言うことでは無い(飲み込む途中で感染する可能性はゼロでは無く、鼻や目からの感染は防げない)。

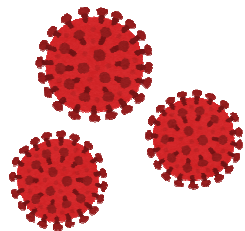
人の居ない空間への紫外線照射

不活化の効果の高い UV-C は人体に対して有害(眼の角膜、皮膚に強い炎症)であるため、**人に当たらないよう**上方の空間に向けて UV-C を照射することで空気中のウイルスを不活化できるため食品工場などでは古くから用いられている。米国疾病予防管理センター、CDCでは公式サイトで Upper-room Ultraviolet Germicidal Irradiation (UVGI) を推奨している。

新型コロナウイルスへの工学的対抗策の検討(2)

飛沫が物体表面にばらまかれて乾燥

~~密接~~

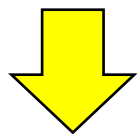


手を洗おう



消毒しよう

コロナウイルスは脂質の膜、エンベロープを表面に持つタイプであるため、「あぶら」を溶かすことが重要。物理的に洗い流すだけでも効果的。次亜塩素酸なども効果がある。



どこに潜んでいるか分からない
ブービートラップ

環境によっては物体表面に付着したウイルスが数日間感染力を保持していることも。飛沫が落下した後もウイルスは感染力を保持していて、接触感染の原因となりうる。

物体表面からの接触感染

手袋、衣類への
光触媒塗布

防護具へのUV-C照射

感染症対策の医療現場では、防護具を脱装する際のリスクが高いため、Cold エリアへの境界で防護具に対してUV-C照射を行う事で感染リスクを低下させる。

物体表面へのUV-C照射

短時間でSARS-CoV-2の不活化が可能なが様々な論文で確認されている。

人体に有害なため人が居るところでは使用することが出来ない。(Care222などは極めて人体への影響が小さい製品も存在するが、まだ完全に安全とは認められていない)

距離の二乗に反比例して弱くなる、透過力が極めて低い、斜め照射では弱くなる、有機物を劣化させるなどの様々な問題を理解して使用する必要がある。

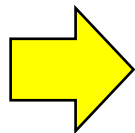
共有物品表面への光触媒や、銅・銀などの金属微粒子の塗布

物体表面への塗布により、常に少しずつ不活化の効果を発揮する。蛍光灯と異なりLED照明は紫外線を放出しないため屋内では可視光応答の光触媒が必要。銅などの金属含有の光触媒は暗くなくても一定期間不活化の効力を発揮する物もある。

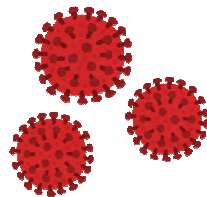
最も簡単には、銅箔テープの貼付けなどでも一定の効果がある。

新型コロナウイルスへの工学的対抗策の検討(3)

~~密集~~

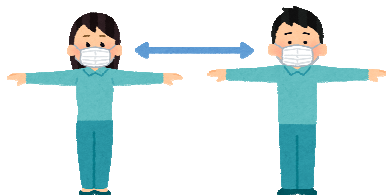


飛沫



ソーシャルディスタンス

大きな液滴に大量のウイルス



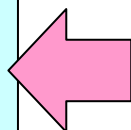
飛沫は2m程度しか飛ばないため、他人との距離を取ることで飛んでくる飛沫から身を守れる

口腔から放出される $5\mu\text{m}$ 以上の液滴を飛沫と呼び、 $120\text{-}150\mu\text{m}$ 程度に分布のピークを持つ。数秒の間に2m程度までの範囲に飛び散る。咳やくしゃみだけで無く、普通にしゃべっているだけでも飛散する。

小型飛沫除去装置

フィルターと光触媒の組み合わせで飛沫をキャッチしてウイルスを酸化分解。

対面する人と人との間、飛沫の飛ぶ距離の範囲に設置されていないと意味が無いいため、たくさんの台数が必要。



飛沫の放出を防ぐためにはマスクが有効で、不織布や布製のマスクでは8割程度の飛沫を止めることが出来るが、残りの2割程度は隙間などから飛散する。このため、飛程よりも近くに座ってのミーティングや窓口などでの会話で感染リスクがある。また、食事中にマスクは困難で会食時のリスクが高い。



「感染を広げない」
目的で全員が着用

飛沫とエアロゾル

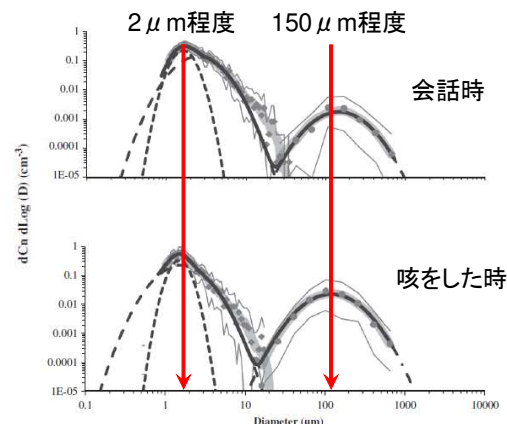
医学的には口腔から放出される $5\mu\text{m}$ 以上の液滴を**飛沫**と呼び、それ以下の物を**エアロゾル**と呼ぶが、 $5\mu\text{m}$ を境に急に物性が変化するわけではなく、落下速度などは連続的に変化する。

しかし、口腔から出る液滴の粒径が示す2つのピーク、 $2\mu\text{m}$ 程度と $150\mu\text{m}$ 程度では明らかに物性は異なり、同一の扱いとすることには無理がある。

様々な報道に於いて**飛沫による感染リスクを軽視**する意見が出ている。マスクやパーティションなどの対策をした上で**残るリスクがエアロゾル**というのは賛同できるが、そういった前提条件無しに軽視することは市民に誤ったメッセージを送ることになる。また、マスクをしていても一定の割合で飛沫は漏出し、吸い込む側は隙間からほぼフリーパスで吸入される。また、飛沫が乾燥して出来る飛沫核がエアロゾルとなる場合や、落下した飛沫が接触感染や飲食物に付いた場合経口感染のリスクとなる可能性も無視できない。

なお、液滴の体積を考えると、100万個のウイルスが口腔から放出されたとしてエアロゾルとして滞空するウイルスは100個程度という見積りが成されている(*)。

(*) 野村 俊之, 新型コロナウイルス感染症(COVID-19)の感染経路に関する微粒子工学的検討, 日本接着学会誌, 57(2021)427-431.



G.R. Jhonson et al., Modality of human expired aerosol size distributions, J. Aerosol Science, 42(2011)839-851.

・屋外での飲食 (BBQなど)

・屋外のスポーツ観戦

でのクラスターの発生は、マスクをしていない状況ではいかに換気がよくても飛沫感染のリスクが存在することを示唆してる。

気流、マスクの有無、会話のトーンなど、様々な状況で支配的となるリスクは変わり、対策も変える必要がある。

パーティションの有用性

これまでマスク以外の飛沫対策として一般にはアクリル板などのパーティションの設置が行われおり、内閣官房新型コロナウイルス対策推進室が取りまとめた政府の感染予防対策でも飲食店におけるパーティション設置が強く推奨されている。

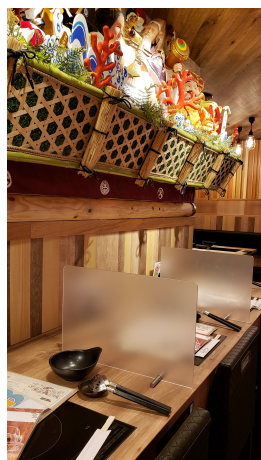
しかしながらその飛沫を防ぐ効果について実験的データは少ない。また換気を行う気流を妨げる要因となることも以前から指摘が成されている。さらに、コミュニケーションが困難になるため設置が困難な場合もあり、パーティションの有用性とその弊害を改めて検討する必要がある。



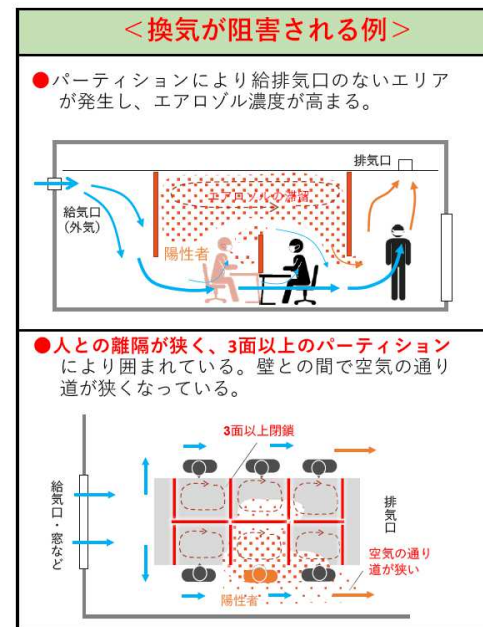
一般的なパーティションの設置例



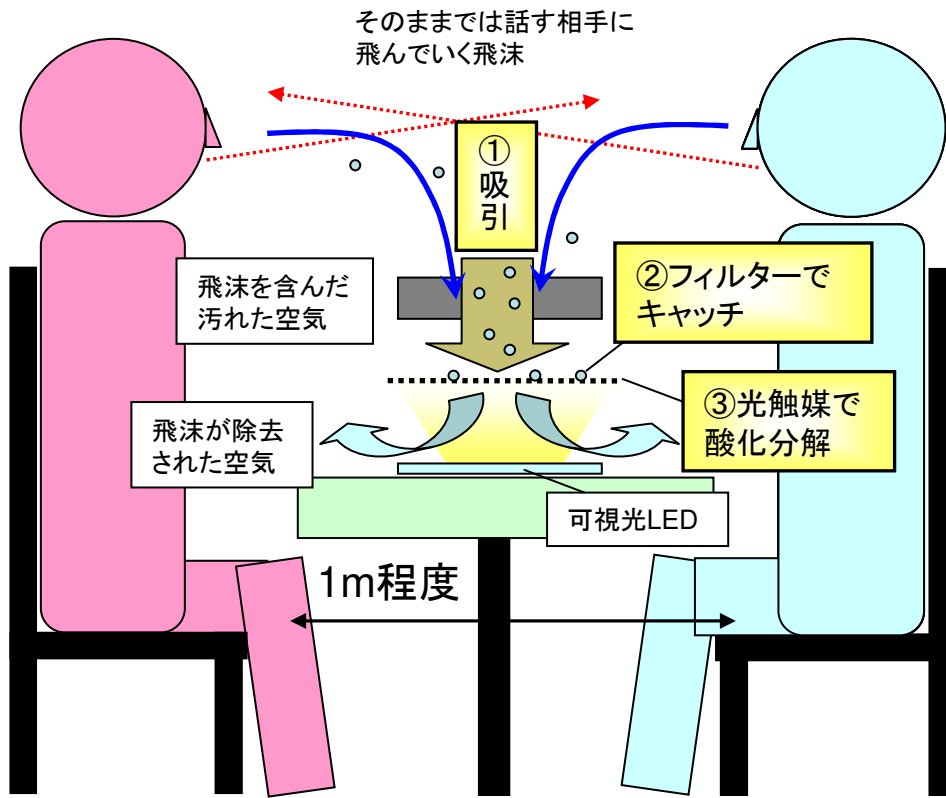
パーティションをあえて設置していない例



パーティションの設置に意味がない例

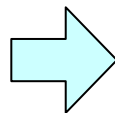


マスクやパーティションは飛沫拡散防止に効果を発揮しているが、同時に声の伝播も一定に妨げてしまう事はこれまで大きな問題になって来なかった。しかし、此処に来て高齢者の会話の聞き取りや意志疎通に大きな弊害を与えている事が徐々に社会問題として認知され出している。その為、やむを得ずパーティションを撤去しているのが左の真ん中の図のケースとなる。その他、快適性の観点からパーティションを撤去した飲食店も徐々に増えてきている実態がある。しかしながら、それらの飲食店がパーティションの代案となる感染対策を適切に施しているかと問われれば、多くの場合で同意する事は難しい。



サブミクロンの飛沫をキャッチしようとする
とHEPAフィルターなどの高性能フィル
ターが必要で、十分な吸引を行うため
には高出力のファンが必要となり、騒音のため
人のそばには置けない。

サブミクロンのエアロゾルは
キャッチしないという割り切り



**飛沫除去に特化した小型飛沫除去装置
というコンセプトを実現**

① 吸引

発生源と対象者の間にひかりクリーナー
を設置した場合、口の高さ程度を飛ぶ
 $5\mu\text{m}$ 以上の飛沫を1/100程度にまで吸
引除去

② フィルターでキャッチ

吸引した $5\mu\text{m}$ 以上の飛沫については、
ほぼ完全にフィルターでキャッチ

③ 光触媒で酸化分解

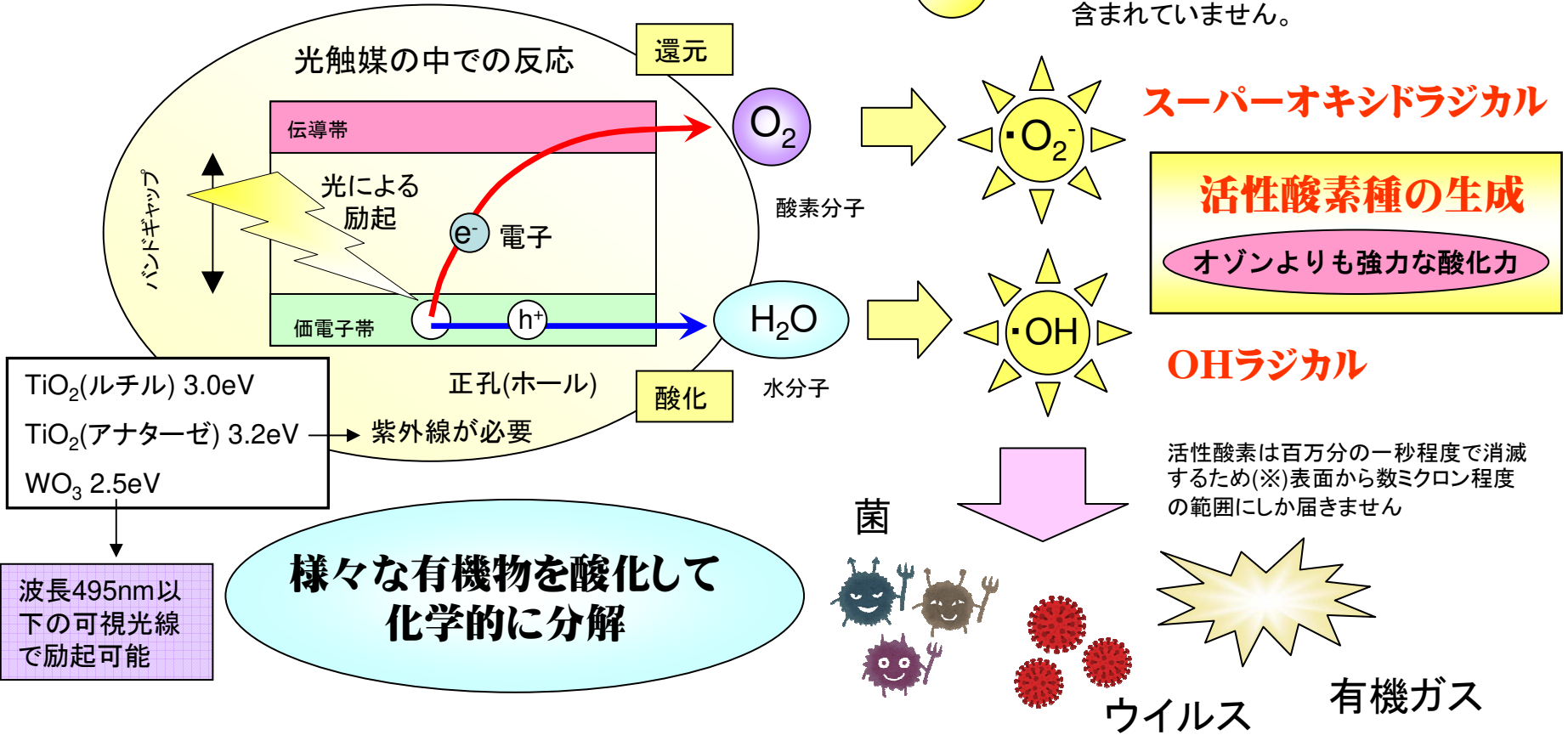
紫外線を放出せず安全な高輝度可視光
LED と、可視光応答光触媒を使用した
無機材質ベースの高性能フィルター(特
許出願準備中)により、高い酸化分解力
を実現。フィルターではキャッチできない
エアロゾル中のウイルスについても除去
できることを確認。

光触媒とは

目に見える可視光線
(400nm~, 3.1eV~)



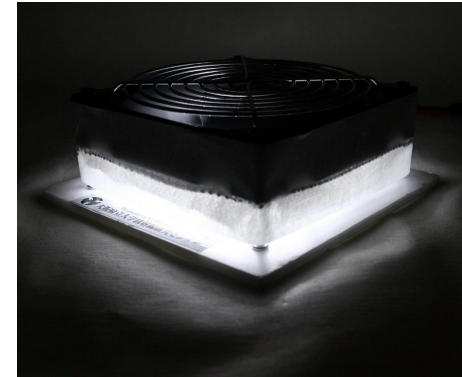
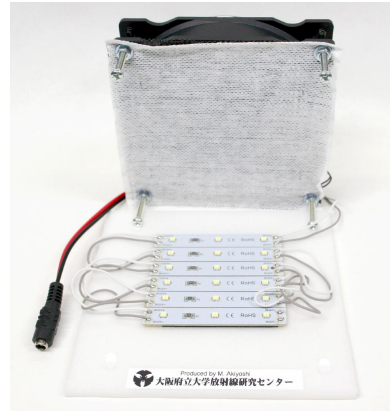
蛍光灯の光には400nm以下の波長の紫外光成分も含まれていましたが、一般的な可視光LEDは440nm程度をピークの青色LEDと黄色の蛍光体の組み合わせで出来ていて、400nm以下の紫外線は含まれていません。



最終的には水と二酸化炭素にまで分解される(完全分解)。

※ 一瞬で大量の有機物を分解するわけではありません

可視光応答光触媒を用いた超低価格な 小型空気清浄機「ひかりクリーナー」



和紙による漏れ光の遮光

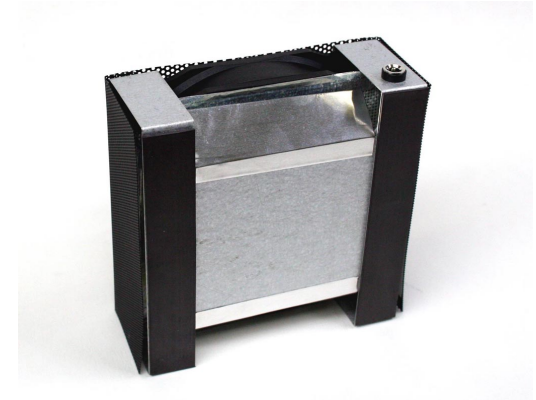
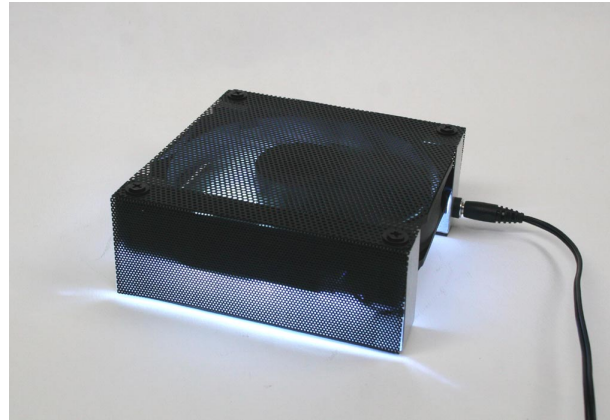


12cm角、高さ5cm、ファンの騒音19dB、消費電力5W以下で、モバイルバッテリーでの駆動も可能

可視光応答の光触媒を使用しているため、漏れ光を完全に遮蔽する必要が無く、簡易な構造での動作が可能。当初開発した標準型はPC用のパーツなどを組み合わせて、極めて安価で製作が可能。価格が安価であれば、その分多数台でのネットワーク構築が可能となる。中学生程度でも工作可能で、半田付けなどの危険な作業も不要。光触媒フィルターは、不織布と市販されている東芝「ルネキャット」スプレーにより製造が可能で、より強力なファンを使用すれば性能向上も可能。

これまでに700台程度を市民に提供し、実際に使用してもらっている。

可視光応答光触媒を用いた小型飛沫除去装置 「ひかりクリーナー2020」



メタルフレームと樹脂メッシュにより見た目を大幅に改善し、持ち運びも可能で、マグネットプレートによりスチール什器壁面への貼付けも可能。

通常は12VのACアダプターで駆動するが、アップコンバーターを使用するとモバイルバッテリーなどのUSB給電でも駆動可能でモバイルでの使用が可能。



2022型

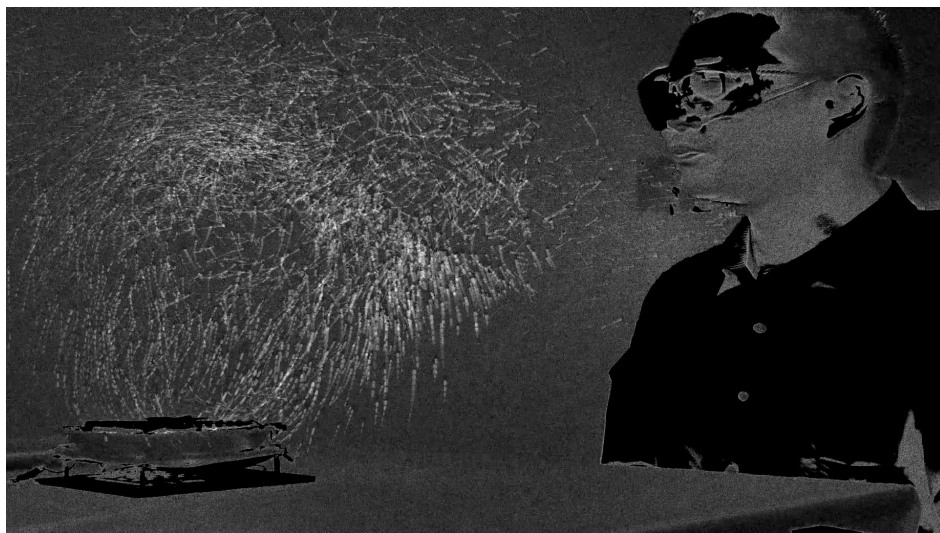
AMED事業で得られた成果を元にした高性能フィルターを使用した製品の産学連携での商品化に向けて、試作機を制作中。試験的な提供を開始しています。

特殊画像撮影による飛沫吸引の可視化

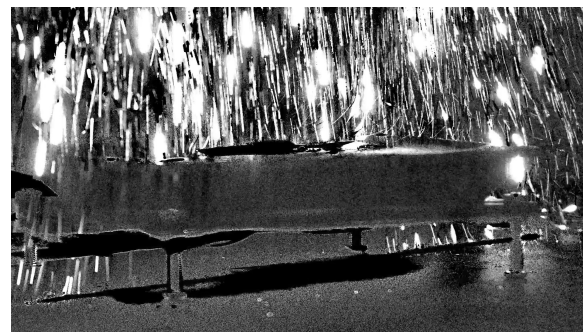


空気中の微粒子を可視化する特殊動画撮影を実施しました。

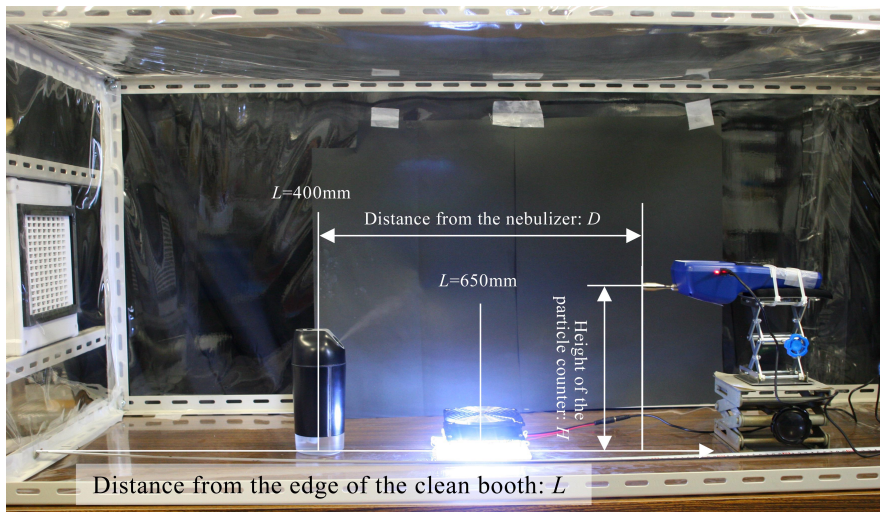
1m 程度の範囲に於いて、口から発声に伴って出た飛沫や、スプレーからの模擬飛沫、エアゾルを模した電子タバコのベーパーなどが吸い込まれていき、なおかつフィルターによってマスクと同じように止められていることが確認出来るかと思えます。



発声に伴う飛沫の撮影に際しては、「ブーブー」と言う破裂音により意図的に大量の飛沫を出しています。

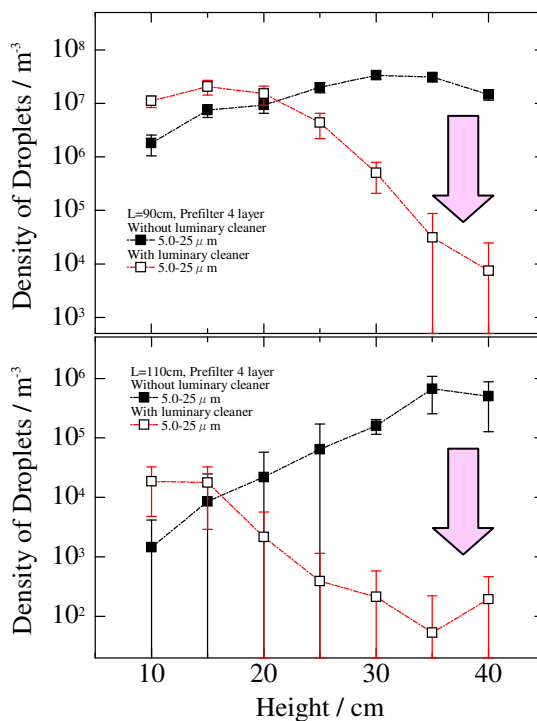
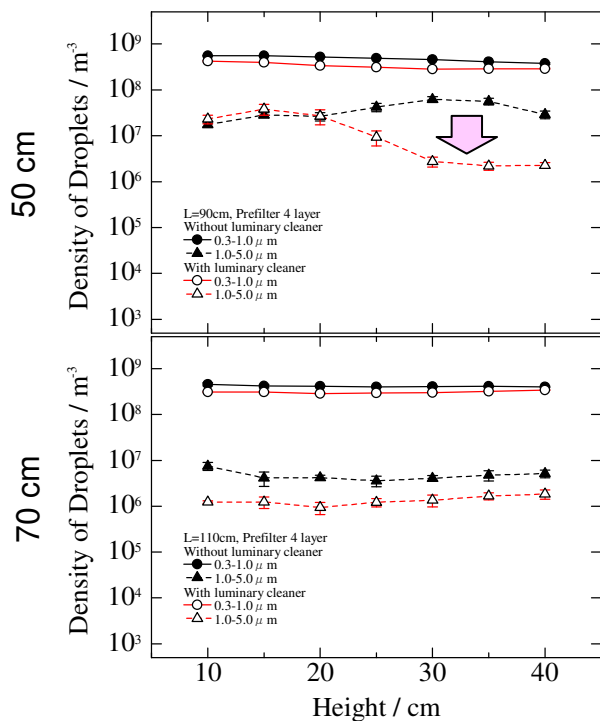


空間を飛ぶ飛沫の捕集率



風速0.6m/s程度のクリーンベンチ内での飛沫捕集試験を行った。超音波加湿器からの水道水の液滴を、下流側に設置したパーティクルカウンターで測定する。液滴は斜めに噴射され、40cm程度の高さで水平に飛行した。

噴霧器からの距離



噴霧器からの距離50cm, 70cm の位置にパーティクルカウンターを設置し、粒子数の高さ依存性を評価した。

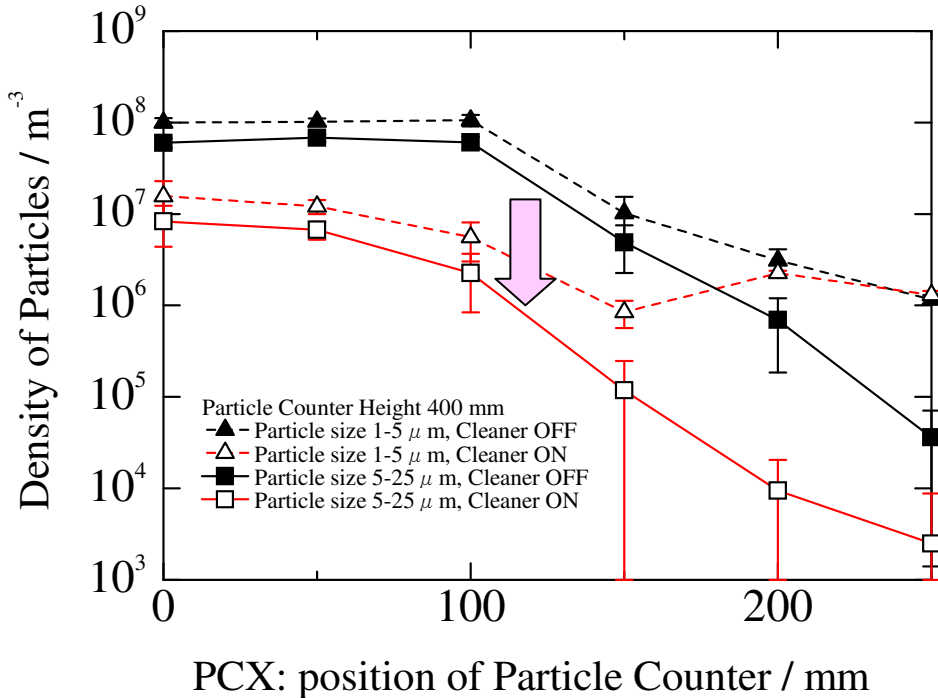
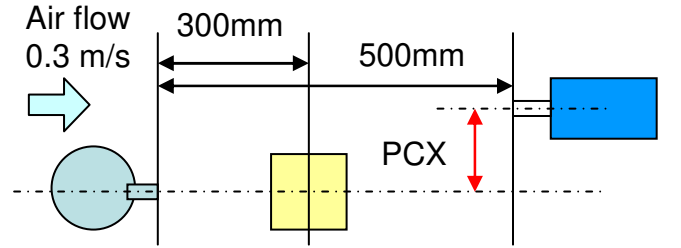
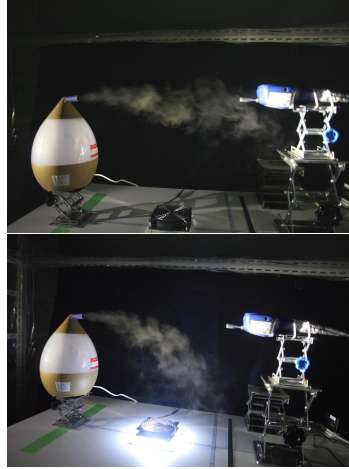
いずれの距離でも、5.0~25 μm の粒径の大きな「飛沫」は、飛沫除去装置の作動によって着席時の顔の高さである40cm程度の高さでは大幅に減少することが確認できた。

0.3~1.0 μm のエアロゾルは測定可能な粒子数を超過しており評価できていないが、別途粒子数を落とした測定でも減少は見られなかった。その間の1.0~5.0 μm のエアロゾルについては1桁程度の減少が見られた。

大型クリーンブースによる飛沫除去性能評価(1)



HEPA フィルターを使用した大型
クリーンブース: 1.5 × 1.5 × 2.4m



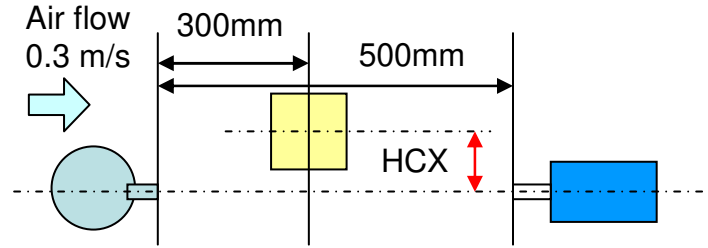
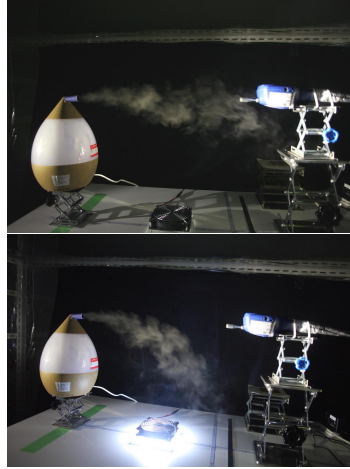
直線的配置だけでなく、対象者が飛沫除去装置からずれた位置にいる場合の模擬を行った。元々大気中を飛ぶ埃の影響を避けるために大型のクリーンブースをセミクリーンルームに設置した。噴霧器に水平に設置したノズルからのミストはHEPAフィルターユニットからの追い風(0.3m/s程度)によってほぼ水平に飛行するよう調整した。噴霧器、パーティクルカウンターとも、着座した際の机面から口の高さ程度である400mmにノズルの高さを設定した。

5.0 ~ 25 μm の飛沫は、中心軸から250mmの範囲で一様に概ね1桁程度減少を示した。また、口腔から放出されるエアロゾルのピークサイズに相当する1.0 ~ 5.0 μm の粒子も、150mm 程度の範囲までは1桁程度減少した。一方、0.3 ~ 1.0 μm の粒子は1割程度の減少に留まった。

大型クリーンブースによる飛沫除去性能評価(2)



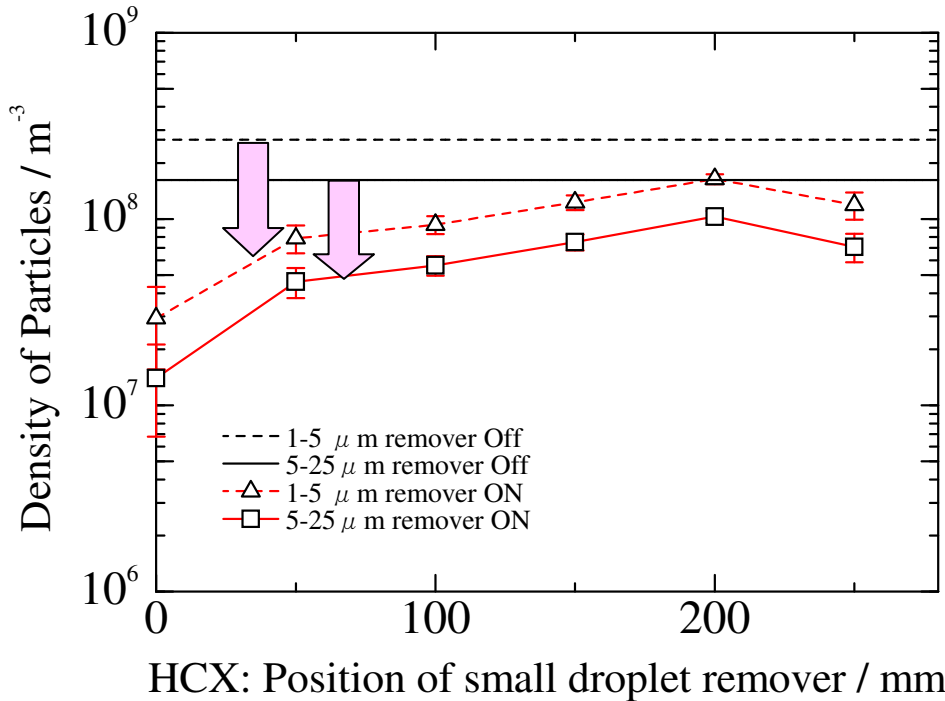
HEPA フィルターを使用した大型
クリーンブース: 1.5 × 1.5 × 2.4m



噴霧器:
ノズルの高さ
400mm

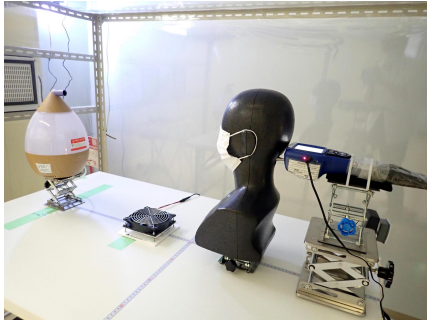
小型飛沫除去
装置:
机面に直置き

パーティクルカウ
ンター: ノズルの
高さ 400mm



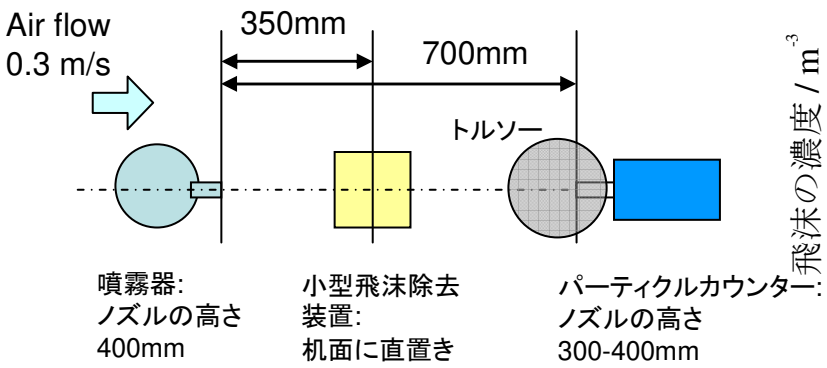
同様に、大型クリーンブースを使用して発生源と対象者を結ぶ直線から小型飛沫除去装置がずれた位置に設置された場合の模擬を行った。5.0 ~ 25 μm の飛沫は、小型飛沫除去装置が中心軸上に設置された場合1/10程度に減少しているが、設置位置が離れるにつれて除去率は減少したが、250 mmまでの範囲で概ね半分程度に減少できていることが確認された。また、口腔から放出されるエアロゾルのピークサイズに相当する1.0 ~ 5.0 μm の粒子も、全く同じ挙動を示す一方、0.3 ~ 1.0 μm の粒子は1割程度の減少に留まった。

大型クリーンブースによる飛沫除去性能評価(3)

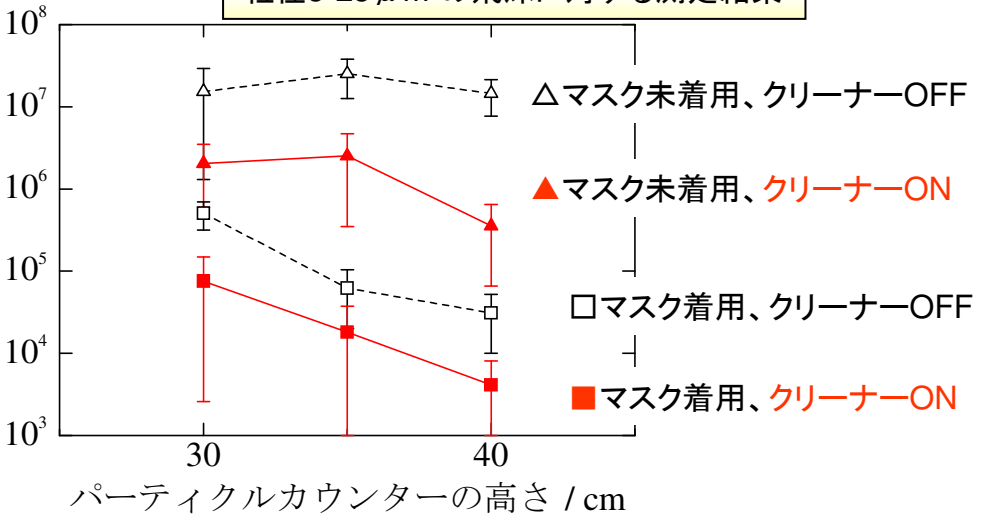


マスク着用が可能なトルソーの後方からパーティクルカウンターのノズルを入れ、一般的な3層不織布マスク着用による飛沫低減効果を検証した。

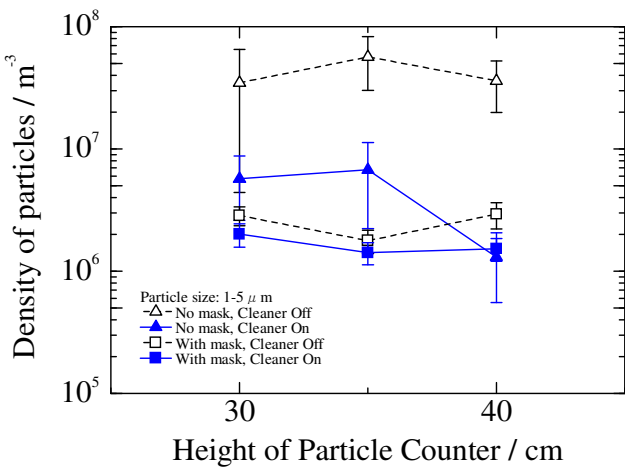
HEPA フィルターを使用した大型クリーンブース (1.5 × 1.5 × 2.4m)中に設置した実験レイアウト。



粒径5-25 μm の飛沫に対する測定結果



粒径1-5 μm の飛沫に対する測定結果



測定の結果、マスク着用により1-5 μmのエアロゾルに対しては1/10~1/30、5-25 μmの飛沫に対しては2~3桁程度、粒子が除去されることが確認された。マスクを着用した状態で小型飛沫除去装置も使用することで、1-5 μmのエアロゾルに対しては30~50%、5-25 μmの飛沫に対しては70~80%程度、さらに粒子数を低減することが出来た。

フィルターによる飛沫の捕獲率



HEPAフィルターを使用したクリーンブース内にダクトを設置し、口腔からの飛沫を模擬した超音波加湿器からの液滴がどの程度フィルターに捕獲されるかを評価しました。

その結果、**5 μm 以上の飛沫に関しては、ほぼ完全に捕集**できていることが確認されました。

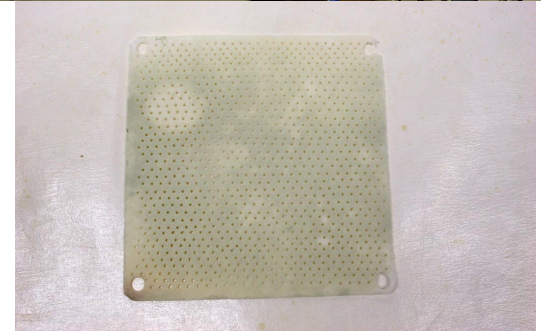
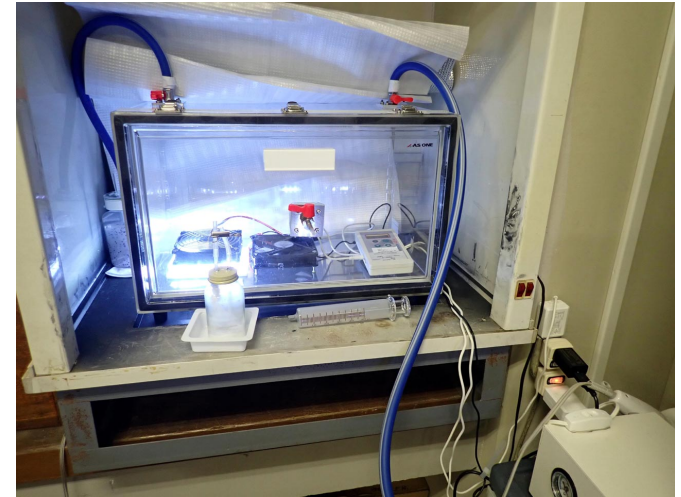
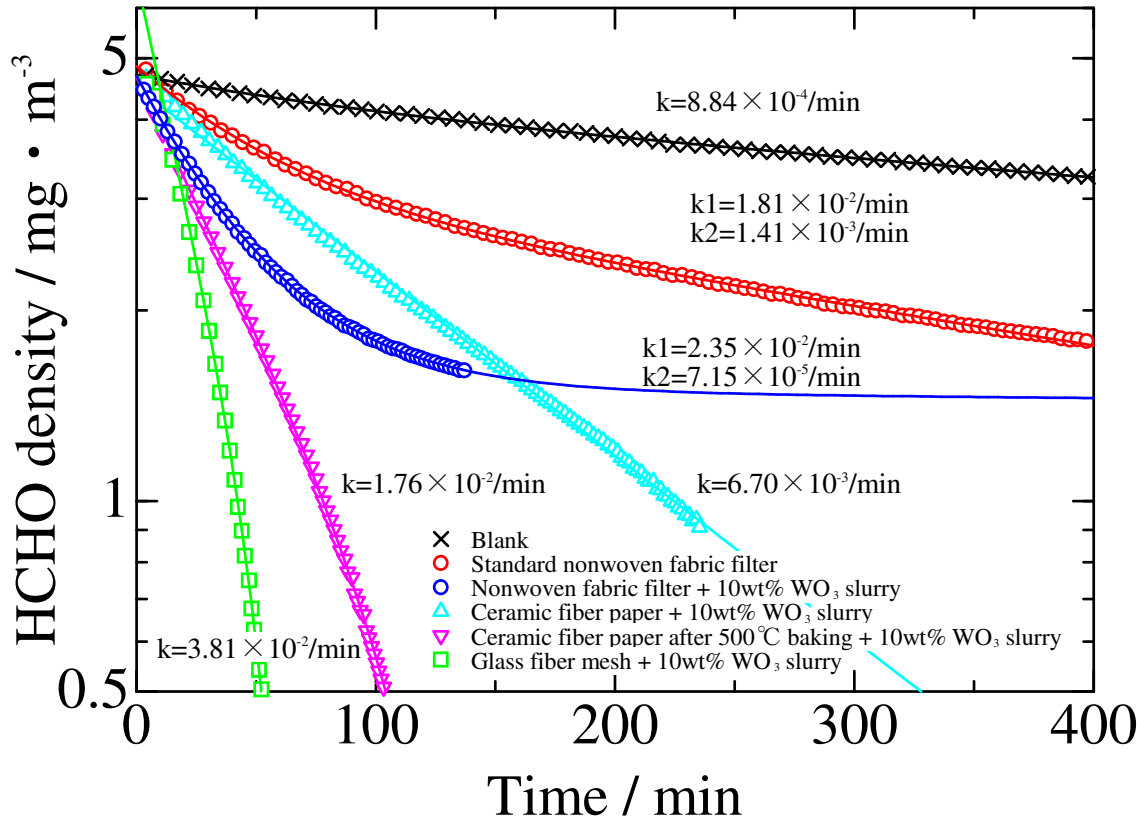
測定条件	Particle Size	上流側 粒子濃度	下流側 粒子濃度	透過率
	μm	$/\text{m}^3$	$/\text{m}^3$	
目張り無しクリーンベンチ内	0.3~1	7.4E+06	2.7E+06	0.37
	1~5	5.1E+04	1.7E+04	0.34
	5~25	9.0E+02	1.8E+02	0.20
目張りしたクリーンベンチ内	0.3~1	1.2E+04	6.7E+03	0.54
	1~5	1.4E+02	1.8E+01	0.13
	5~25	2.0E+01	0.0E+00	0
目張りしたクリーンベンチ内 加湿器使用(1回目)	0.3~1	4.1E+08	4.6E+08	1.14
	1~5	1.2E+07	3.6E+06	0.30
	5~25	3.7E+06	2.1E+02	5.76E-05
目張りしたクリーンベンチ内 加湿器使用(2回目)	0.3~1	2.8E+08	2.5E+08	0.87
	1~5	2.6E+06	1.0E+06	0.40
	5~25	3.0E+05	1.8E+01	5.99E-05
目張りしたクリーンベンチ内 加湿器使用(3回目)	0.3~1	2.7E+08	2.7E+08	0.99
	1~5	2.0E+06	1.5E+06	0.76
	5~25	1.1E+05	5.3E+01	4.73E-04

キャッチしてゆっくり分解

一般に**5 μm 以上の液滴**を飛沫、それ以下の物をエアロゾルと呼んでいます。

1 μm 以下の液滴は計測可能な濃度を超過しており捕獲率が評価できませんでした。

ホルムアルデヒド分解実験



38L サイズの亚克力デシケーターを使用して、有機ガスの一種であるホルムアルデヒド(HCHO)濃度の変化をホルムアルデヒドメータ htV-m を使用して測定した。

簡易な構造かつ低価格で、教育現場などでの自作による普及を検討しているひかりクリーナー標準機でも確実な分解性能が確認されると共に、さらに高濃度の光触媒と無機系の材料を使用したフィルターを用いた試作機は、市販の小型空気清浄機をはるかに凌ぐ性能を発揮した。現在、さらに高性能のフィルターが量産可能となっている。

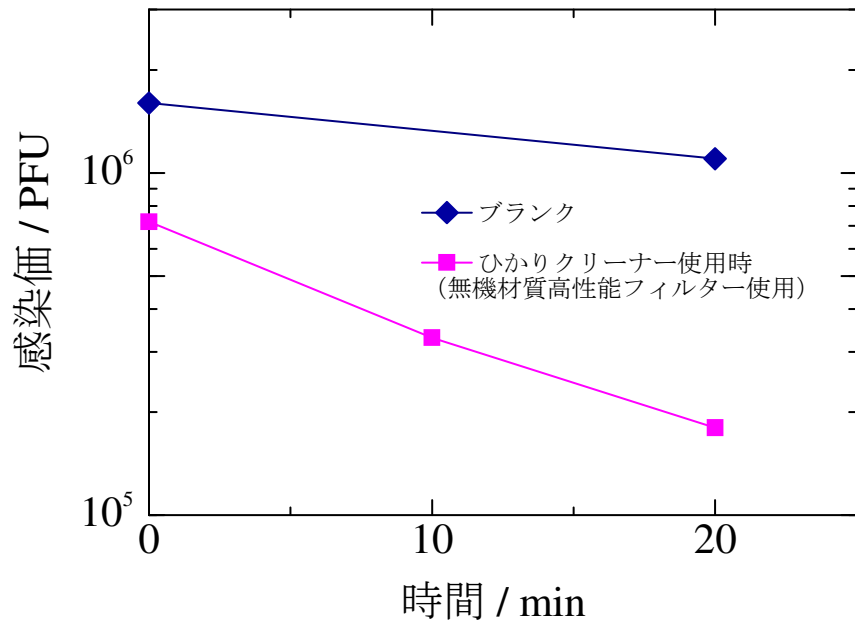
ひかりクリーナーによるエアロゾル中のウイルス除去

370 L のグローブボックス中でネブライザーを用いてバクテリオファージQ β を含む溶液を噴霧、ファンで攪拌しながら 10 L をゼラチンフィルターでサンプリングし、プラーク法に依り感染価を評価した。

その結果、ブランクでは 1.6×10^6 PFUであったのが 20分で 1.1×10^6 PFU となり、**30% 程度減少した**。一方無機材質高性能フィルターを使用したひかりクリーナーを使用することによりスタート時に 7.2×10^5 PFU であったのが 10分後には 3.3×10^5 PFU、20分後には 1.8×10^5 PFU と、**10分でおおよそ半分、20分で 1/4 に減少した**。

ただし、光触媒により不活化したかどうかは、光触媒を塗布していないフィルターも使用して比較を行う必要がある。

実環境は 370L のチャンバーよりもずっと体積が大きい、エアロゾルはガスなどと異なり気流が無ければ余り遠くまで拡散しない事が知られている。人と人の間に設置する事を考慮するとたとえば机の上の直径1mの半球の体積は 262 L 程度になり、現実的な実験と言える。



フィルターでキャッチすることは出来ない、長時間空中に浮遊するエアロゾルに含まれるウイルスも除去できることが示唆された。

東芝「ルネキャット」のSARS-CoV-2 に対する効果

Masashi Uema et al., "Effect of Photocatalyst under Visible Light Irradiation in SARS-CoV-2 Stability on an Abiotic Surface", Biocontrol Science, 26 (2021) 119-125.

査読付論文として公開されている