

# 技 術 論 文

## 25m<sup>3</sup>空間における空気消臭除菌装置の浮遊ウイルス除去シミュレーションと実試験比較によるシミュレーションへの帰納

### Induction to Simulation by Comparing Simulation with Actual Test for Removed Airborne Virus Using FUJICO Air Deodorant Sterilizer in 25m<sup>3</sup> Space



技術開発センター  
第二開発室  
正寶 未宇希  
Miuki Shoho

技術開発センター  
第三開発室 リーダー  
博士(工学) 山本 清司  
Kiyoshi Yamamoto

技術開発センター  
第二開発室 主任技師  
樋口 友彦  
Tomohiko Higuchi

技術開発センター  
第二開発室 主任技師  
博士(工学) 裴 銀榮  
Eunyoung Bae

技術開発センター  
第二開発室 リーダー  
博士(工学) 坂口 昇平  
Shohei Sakaguchi

#### 要 旨

ウイルス感染予防のため、飛沫核のような空間に長時間浮遊し続けるウイルスを除去することが空気清浄機の性能において重要な因子となる。本稿では、まず数値流体解析により当社空気消臭除菌装置の空气中に浮遊するウイルスの除去性能をシミュレーションした。その後、JEM1467 に準じて 25m<sup>3</sup> 試験室で浮遊ウイルス除去試験を実施した。また、数値流体解析に実際の空気消臭除菌装置によるウイルスの 1 パス除去性能を反映させるため、空気消臭除菌装置の空気取り込み口と排出口のウイルス濃度を調べ、これを 1 パス除去性能とした。その結果、シミュレーションと実際の空気消臭除菌装置の試験は、ほぼ一致する結果となった。これにより、空気消臭除菌装置をはじめとするウイルス除去装置を開発する上で、精度の高いシミュレーション予測が可能となり、装置設計やフィルターの選定に活用することで、時間短縮や労力の削減が期待される。

#### Synopsis:

In order to prevent virus infection, removing viruses that float in a space such as droplet nuclei for a long time is an important factor in the performance of air purifiers. In this paper, the performance of our air deodorant sterilizer to remove floating viruses in the air was simulated by computational fluid dynamics at the first. After that, a floating virus removal exam was conducted in a 25m<sup>3</sup> room according to JEM1467. In addition, in order to reflect the actual 1-pass removal performance of floating virus of the air deodorant sterilizer in the computational fluid dynamics, virus concentrations at the air intake and outlet of the air deodorant sterilizer were examined and were considered 1-pass removal performance. As a result, the simulation and the actual test were almost in agreement. When developing a virus removal device such as an air deodorant sterilizer, this effect enables highly accurate simulation prediction, and may reduce time and labor in devising design and selecting filter.

#### 1. 序論

昨今のコロナ禍の影響を受け、空気清浄機の需要は高まっている。新型コロナウイルス(SARS-CoV-2)をはじめとするヒトや動物に感染するウイルスは、咳やく

しゃみなどによって様々な大きさのエアロゾルとして空气中に放出され、5 $\mu$ m 以上であれば飛沫感染、5 $\mu$ m 以下の飛沫核であれば空気感染を引き起こす。飛沫の落下速度は 30~80cm/sec 程度であり、空間に長時

間浮遊することはないとされるが、飛沫核の場合、その落下速度は0.06~1.5cm/sec程度となり、空間に長時間浮遊し続ける<sup>1)</sup>。また、飛沫又は飛沫核の水分蒸発は0.5~20 μmの粒子で0.8秒であり、環境中と水分量が平衡となった飛沫核となる<sup>2)</sup>。よって、これを除去することが空気清浄機の性能において重要な因子となる。ウイルス除去性能試験を行うにあたっては、試験時間やサンプリング頻度など適切な実験条件で行う必要がある。本稿では、数値流体解析により当社空気消臭除菌装置の空气中に浮遊するウイルスの除去性能をシミュレーションした。その後、JEM1467に準じて25m<sup>3</sup>試験室で試験を行うことで除去性能を実測確認したので報告する。また、シミュレーションでは空気消臭除菌装置の1パスでの浮遊ウイルス除去性能を簡易的に100%としたが、実際の1パス除去性能を調べるため、空気消臭除菌装置の空気取り込み口と排出口でウイルス数を調べ、これを1パス除去性能とした。試験より得られた1パス性能をシミュレーションに応用することで、より精度の高いシミュレーション予測が可能となったので報告する。

## 2. 実験方法

### 2.1 解析の概要

拡散物質低減試験を対象として、scFLOW(MSC)を用いて数値流体力学(CFD)にて試験室内流れ場および浮遊ウイルス濃度分布の確認を行った。解析に用いた対象空間の幾何形状をFig. 1に示す。バイオクリーンルームの実形状を再現し、室内に空気消臭除菌装置を配置し、空気消臭除菌装置の上面に排出口と前面下部に取り込み口をそれぞれ設けた。本節での数値解析の目的は、排出口から流入する清浄空気によって作出される試験室内流れ場と室内の浮遊ウイルス濃度分布、空気清浄機による濃度低減効果の関係性を把握することである。

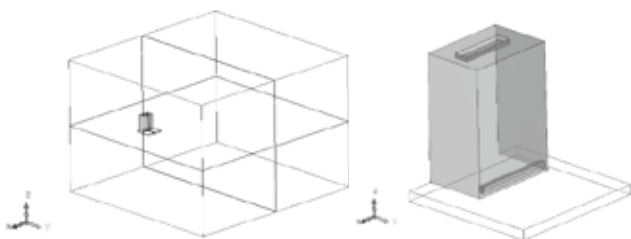


Fig. 1 Section view of analysis results.

### 2.2 解析条件<sup>3), 4)</sup>

解析空間を試験室内のみとし、定常・等温状態と仮定した。乱流モデルとしてRNG  $k$ - $\epsilon$ モデルを用いて解析を行った。解析条件をTable 1にまとめて示す。解析空間は非構造格子にて分割し、約25m<sup>3</sup>の容積に対して総メッシュ数は798,865に設定した。Fig. 1に示し

た通り、結果の表示は排気口及び取り込み口が含まれる  $y$ - $z$  平面 ( $x=1.75$ : Section 1)、浮遊ウイルスのサンプリング箇所の濃度比較が可能な  $z=1.2$  の  $x$ - $y$  平面 (Section 2)の2断面とした。Case 1である初期解析においては、空気清浄機内で浮遊ウイルスが完全に除去されると仮定し、排出口から室内に吹き出される清浄空気内の浮遊ウイルス濃度  $C_{in}=0$  とした。全ての壁面において、浮遊ウイルスの吸着・分解を無視した状態で解析を行った。浮遊ウイルスの拡散については、浮遊ウイルスの濃度差による気中への拡散を0として、移流により運ばれると仮定し、計算を実施した。

Table 1 Analysis conditions

Geometry	3.5m(x) × 3.285m(y) × 2.4m(z) : $V=25[\text{m}^3]$
Turbulent model	RNG $k$ - $\epsilon$ Model
Mesh number	Unstructured grid(Polyhedral): 798,865
Scheme	1st/2nd order upwind scheme
Inflow boundary	Area=0.12m(x) × 0.03m(y) $U_{in}=1.85[\text{m/s}]$ , $Q_{in}=0.4[\text{m}^3/\text{min}]$ $k_{in}=0.0001[\text{m}^2/\text{s}^2]$ , $\epsilon_{in}=0.0001[\text{m}^2/\text{s}^3]$ Case 1: $C_{in}=0$ , Case 2: $C_{in}=0.2 \cdot C_{out}$
Outflow boundary	Area=0.17m(x) × 0.015m(z) $U_{out} = \text{free slip}$ , $k_{out} = \text{free slip}$ , $\epsilon_{out} = \text{free slip}$
Wall treatment	Velocity: No slip Contaminant concentration: $\partial C/\partial x = 0$
Contaminant	Passive contaminant( $D=0$ ) $C_0=1,000,000[-]$

試験室内の浮遊ウイルス濃度の濃度低下の時間依存性については、非定常解析を実施した。解析時間については、実試験と併せて360分の数値解析を行った。

### 2.3 試験室

ウイルス試験に使用した試験室の概要をFig. 2、Fig. 3に示す。試験室は、前室とバイオクリーンルームで構成されており、バイオクリーンルームの内寸は3.5 m (x) × 3.285 m (y) × 2.4 m (z) = 27.594 m<sup>3</sup>であり、室内環境学会の学会規格に準拠して設計されている<sup>5)</sup>。

本実験施設は実験室バイオセーフティ指針 (WHO 第3版) に規定されたバイオセーフレベル2 (BSL2) をクリアしている<sup>6), 7)</sup>。

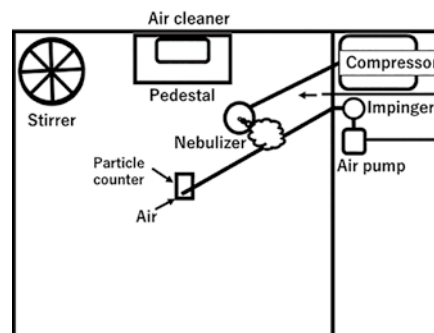


Fig. 2 The appearance of airborne virus exam in 25m<sup>3</sup> (view from above).

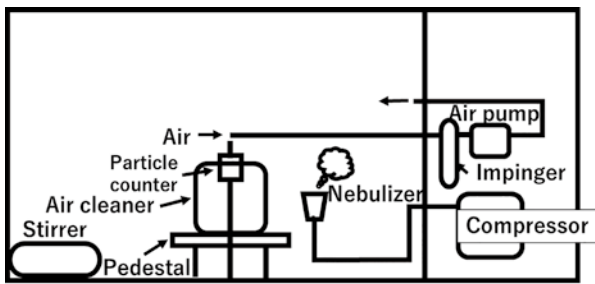


Fig. 3 The appearance of airborne virus exam in 25m<sup>3</sup> (view from the side).

25m<sup>3</sup>試験室内に空気消臭除菌装置と攪拌ファン、パーティクルカウンター（室中心、空気消臭除菌装置の空気取り込み口及び排出口の3点）、温湿度計、ネブライザー、サンプリングライン（室中心、空気消臭除菌装置の空気取り込み口及び排出口の3点）を設置した。パーティクルカウンターとネブライザー、サンプリングラインは各々コネクタよりチャンバー外部のパーティクルカウンター用ポンプ、ネブライザーポンプ及び菌試験用インピンジャー（捕集管）と接続した（サンプリングラインの末端はサンプリング時以外は封鎖した）。

#### 2.4 空気消臭除菌装置の概要

本稿の試験には当社が製造販売している空気消臭除菌装置 MC-S101（商品名：Blue Deo）を用いた（Fig. 4）。



Fig. 4 Appearance of MC-S101.

MC-S101 の装置構造は埃、PM2.5 除去用のプレフィルター、臭い・菌・ウイルスを分解する光触媒フィルター（2種類）、光触媒を励起させるためのUVランプで構成されている（Fig. 5）。

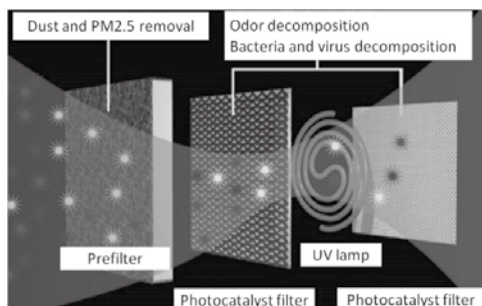


Fig. 5 Illustration of MC-S101.

MC-S101 の仕様について Table 2 に示す。

Table 2 Performance of MC-S101

Product name	Blue Deo		
Model	MC-S101		
Size	Width	187mm	
	Depth	129mm	
	Height	268mm	
Weight	1.4kg		
Operation mode	Low	Medium	High
Air flow	0.13m <sup>3</sup> /min	0.24m <sup>3</sup> /min	0.4m <sup>3</sup> /min
Power consumption	8.5W	9.0W	12.0W
Noise	22dB	28dB	40dB

#### 2.5 使用したウイルス

評価にあたっては、ウイルスの一種であり大腸菌に感染するバクテリオファージ *Escherichia coli parg* MS2(NBRC102619)を使用し、宿主菌は *Escherichia coli*(NBRC106373) を使用した。大腸菌及びバクテリオファージは JEM1467 に準じて、35°Cで 18hr 静置培養した。最終的に得られたファージ原液は冷凍保存し、使用前に解凍し、10 倍希釈して 10<sup>10</sup>~10<sup>11</sup>PFU/mL に調整した。培地は 20mL の普通寒天培地シャーレの上に、50°C程度の軟 NB 培地を 4mL、大腸菌を 0.11mL 添加混合し、蓋をして冷蔵保存したものを使用した。

#### 2.6 ウイルス試験の流れ

攪拌ファンを作動させながら系内を空気清浄し、パーティクルカウンター（TSI 製 AERO TRAK）で 0.3 μm 以上の粒子が 1000 個/28.3L 以下になったのを確認後、空気清浄を止め、2mL の 10 倍希釈ファージ液をネブライザーで約 8 分間噴霧した。噴霧後、2 分間攪拌した後、サンプリングラインよりチャンバー内の空気を 3.5L/min で 0.015%チオ硫酸ナトリウム溶液 20mL を入れたインピンジャーに 50L 捕集させた(0分)。その後、攪拌ファンを止め、試作機を運転し、120分、240分、360分のサンプリングをした。また、自然減衰も同様に試験した。実験条件を Table 3 に示す。

Table 3 Experimental conditions

Amount of spray liquid	2.0 mL
Supply virus concentration	2 × 10 <sup>10</sup> PFU mL <sup>-1</sup>
Amount of collected gas	50 L
Amount of collecting liquid	20 mL
Collected the gas flow rate	3.5 L min <sup>-1</sup>
Collected time	14.3 min

### 3. 結果と考察

#### 3.1 数値流体解析の結果

実験条件を再現した流れ場解析結果のスカラ風速分布を Fig. 6 に示す。吹出風速が 1.85 m/s と高いものの、試験室全体に形成される流れ場については 0.05 m/s 以下の微風状態となった。空気清浄機から鉛直上向きに吹き出された流れが天井面に沿って、試験室内に広がっていくことが示されている。

60 分後の試験室内の無次元化されたウイルス濃度分布の解析結果を Fig. 7 に示す。給気口近傍では低濃度域が確認されるものの、試験室全体では大きな濃度の偏りができていない結果が示されている試験室中心において浮遊ウイルスの減衰推移を数値流体解析により算出した結果を Fig. 8 に示す。これより、360 分の作動により、強運転で 2.3 桁、標準運転で 1.4 桁、弱運転で 0.8 桁まで浮遊ウイルスが減衰すると算出された。

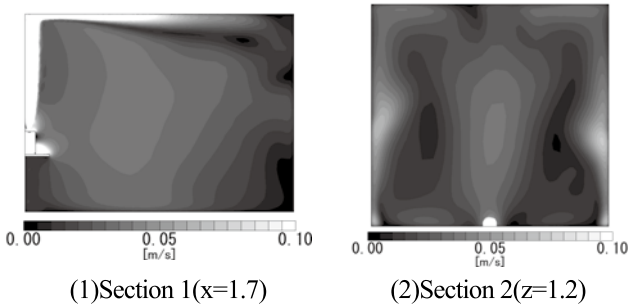


Fig. 6 Velocity magnitude (unit: m/s).

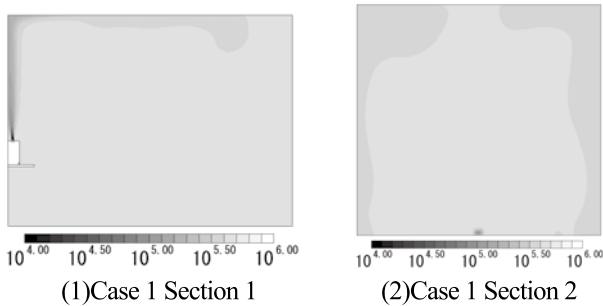


Fig. 7 Dimensionless concentration(60min).

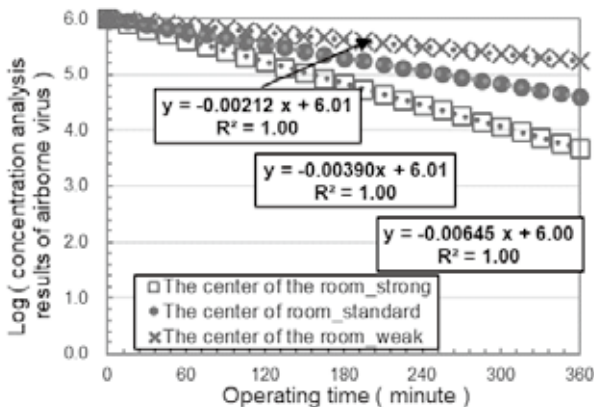


Fig. 8 Results of CFD simulation in each operation mode.

#### 3.2 浮遊ウイルス試験の結果

浮遊ウイルスの自然減衰の推移を Fig. 9 に示す。360 分までの範囲では、ウイルスの対数減衰速度は直線性があり、傾きも -0.002 と低いことから、バイオクリーンルームの高い密閉性が示された。

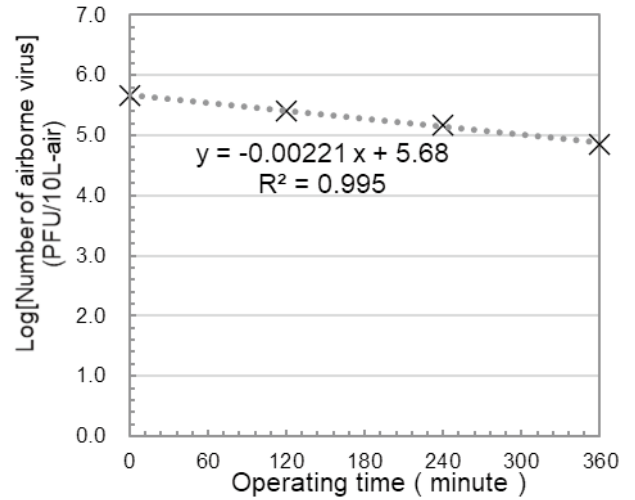


Fig. 9 Transition of natural attenuation of airborne virus in 25 m<sup>3</sup> room.

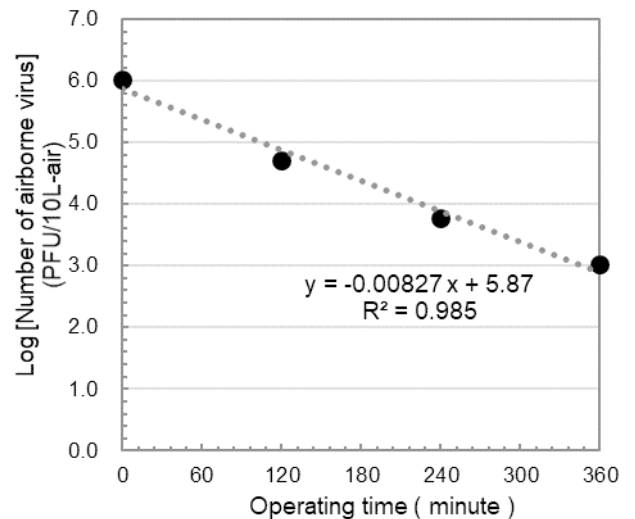


Fig. 10 Attenuation transition of airborne virus when operating the air deodorant sterilizer in a 25 m<sup>3</sup> room.

Fig. 10 に空気消臭除菌装置を強運転で稼働した時の浮遊ウイルス数の推移を示す。360 分で 3 桁程度減少した。Fig. 10 で算出された傾きより、正味の傾きすなわち自然減衰を減じた浮遊ウイルス数の対数減少値の推移とシミュレーション値を比較したものを Fig. 11 に示す。これより、浮遊ウイルス除去試験とシミュレーション結果が近似し、僅かにシミュレーションの方が多く減衰した。ここでシミュレーションでは、装置フィルターのウイルス除去率を簡易的に 100%としているが、実際の 1 パス除去性能を調べるため、同試験中における装置の空気取り込み口と排出口でウイルス濃度の推移を調べた結果を Fig. 12、その時の 1 パス除去性能をまとめたものを Table 4 に示す。1 パス除去性

能は80%を超えていた。これはプレフィルタによる浮遊ウイルスの捕捉と光触媒フィルタによる殺菌効果によるものと考えられる。この1パス性能を85%と近似し、これを数値流体解析に反映し、ウイルス試験結果と比較したものを Fig. 13 に示す。実試験の方が僅かに浮遊ウイルスの減衰が多かったが、両者は近い傾きとなった。実試験の方が浮遊ウイルスの減衰が多くなった理由としては、自然減衰よりも除菌機を稼働させた方が風力により、浮遊ウイルスが壁面へ衝突し壁吸着しやすくなるためと推測される。

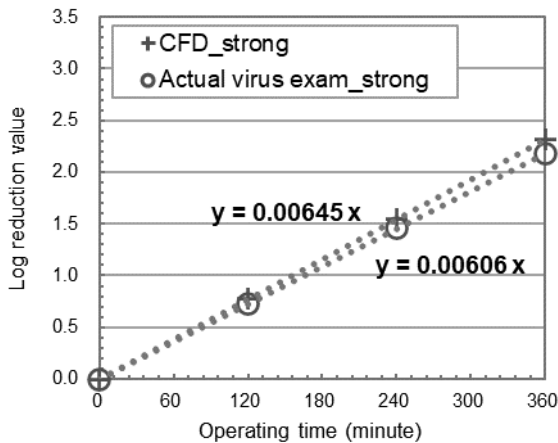


Fig. 11 Comparison of airborne virus exam result and simulation values.

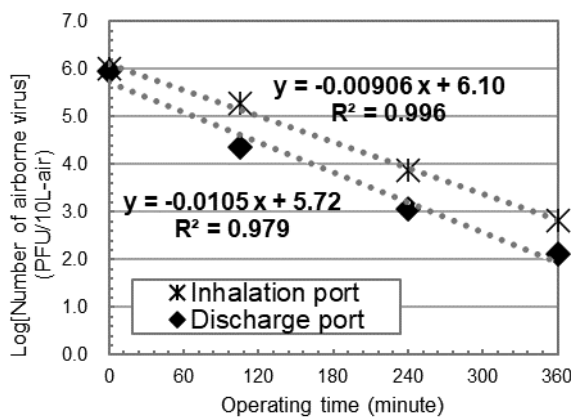


Fig. 12 Transition of the number of airborne viruses at the air intake and outlet during strong operation of the air deodorant sterilizer.

Table 4 Transition of 1-pass removal performance during strong operation of air deodorant sterilizer

Time(min)	1-pass removal performance(%)
0	-
105	88.39
240	84.47
360	80.47
Average value	84.45

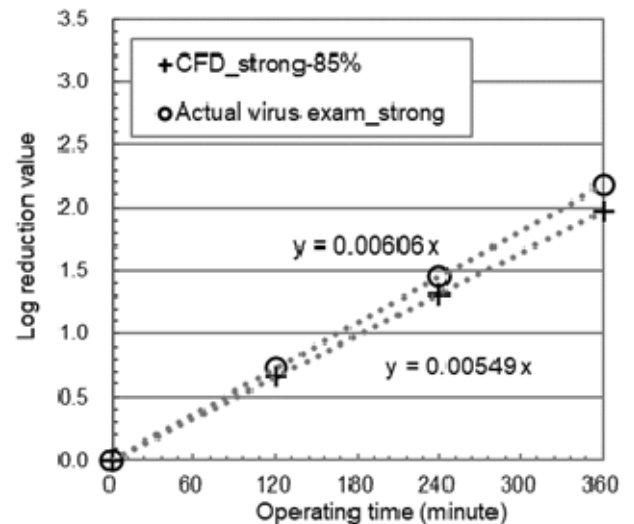


Fig. 13 Comparison of airborne virus exam result and simulation values at 85% 1-pass performance.

#### 4. 結言

試験室内のみを対象とし、定常・等温状態と仮定し、乱流モデルとして RNG  $k-\epsilon$ モデルを用いて解析を行うことで、空気消臭除菌装置の浮遊ウイルス除去性能を予測することができた。その結果を基に JEM1467 に準じて実 25m<sup>3</sup> 空間にて試験したところ、シミュレーションとほぼ一致する結果となった。また、動作中に空気消臭除菌装置の空気取り込み口と排出口でガスサンプリングすることで浮遊ウイルスの1パス除去性能を調べることができた。1パス除去率を数値流体解析に反映させることで、より解析精度が上がると推測されるので、今後は n 数を増やし再現性を確認する予定である。HEPA など1パス性能が予測されるものについては、数値流体解析でシミュレーションした後、使用目的に合わせてフィルターを選択でき、或いはウイルス除去装置を設計する上で、使用目的に合わせて風量や風向きをシミュレーションによって予測できると期待される。

#### 参考文献

- 1) 厚生労働省, “高齢者介護施設における感染対策マニュアル (平成 25 年 3 月)” の公表について”, 厚生労働省ホームページ, 2019, [https://www.mhlw.go.jp/topics/kaigo/osirase/tp0628-1/dl/130313-01\\_08.pdf](https://www.mhlw.go.jp/topics/kaigo/osirase/tp0628-1/dl/130313-01_08.pdf)
- 2) Morawska L et al. : Journal of Aerosol Science. 40 (2009) pp256–269
- 3) 山本清司, 高島伽央里, 樋口友彦, 永吉英昭 : フジコー技報 25 (2017) pp54
- 4) 山本清司, 張文皓, 焼山なつみ, 原賀久人, 大野京一郎 : フジコー技報 22 (2014) pp33
- 5) 室内環境学会 : 室内環境学会標準法 20110001 号

家庭用空気清浄機によるカビ孢子除去性能の評価  
試験法(2012)

- 6) ISBN 92-4-154650-6(LC/NLM 分類 ;QY25),  
WHO/CDS/CSR/LYO/2004.11
- 7) 山本清司, 室内トルエン濃度低減予測のための可  
視光応答型光触媒反応モデリング, 九州大学,  
2017, 博士論文, 111