

# 感染症抑制に向けた空気質管理技術の開発 —空間噴霧による浮遊ウイルスに対する除去性能の評価—

青木貴均<sup>\*1</sup>・中村孝道<sup>\*1</sup>

感染症抑制に寄与する空気質管理技術として、新たに開発した独自のビニルチャンバーとリアルタイムPCR装置による「浮遊ウイルスに対する除去性能評価システム」を構築した。空間への薬剤噴霧効果を検証した結果、塩素系の消毒剤とともに、人体・内装材への影響が消毒剤に比べて小さいアロマオイルのほか、水道水に比べて不純物の少ない脱イオン水についても、浮遊ウイルスに対する除去効果（試験時間内に浮遊ウイルスの除去率が99%以上に到達）があることを確認した。

キーワード：感染症対策、チャンバー、PCR装置、空気質管理、薬剤噴霧

## 1. はじめに

次亜塩素酸水をはじめとした塩素系薬剤（以下、消毒剤）の空間への噴霧については、WHO（世界保健機構）<sup>1)</sup>やCDC（米国疾病予防管理センター）<sup>2)</sup>など国際的な意向を受け、三省庁（厚生労働省・経済産業省・消費者庁）による注意喚起が行われていた。しかし、新型コロナウイルス流行前から用いられてきた、従来通りの適切な薬剤噴霧としての利用については、使用を妨げない<sup>3)</sup>と見解の見直しが行われている。また、近年は感染症対策の製品として、消毒剤によりサブミクロンスケールのミストを生成する噴霧装置があり、公的機関による性能検証<sup>4)</sup>も行われている。一方、消毒剤を空間に噴霧する場合、目や皮膚・呼吸器への曝露による健康への影響、内装材への接触による錆発生やめっき材の破損などのリスクがある。そのため、無人時における利用やビニル養生など、居住者や内装材への配慮が必要となることから、導入が進みにくい状況にある。そこで、上記リスクが小さく有人環境下でも利用可能な、感染症抑制に寄与する空気質管理技術の開発を目的に、独自のチャンバーとリアルタイムPCR装置による「浮遊ウイルスに対する除去性能評価システム」を構築した。また、加湿時に用いられる水道水・脱イオン水や、アロマテラピーに用いられる精油（以下、アロマオイル）について、浮遊ウイルスに対する除去効果を確認した。

## 2. 浮遊ウイルスに対する除去性能評価システムの開発

### 2.1 開発の目的

本システムの開発にあたり、一般社団法人日本電機工業会（以下、JEMA）のマニュアル<sup>5)</sup>を参照した。同マニ

アルに示された公的機関（以下、試験機関）としては、(財)北里環境科学センターと(財)日本食品分析センターの2カ所が指定されているが、分析依頼から実施までの技術検証に、数ヵ月から1年程度の時間を要するため、開発が進まない状況である。そこで、評価試験で用いられるチャンバーの内部構成素材を変更し、当社施設内に短期間で施工でき、かつ公的機関と同水準の精度を有することで、当社独自の検証が可能となる評価システムの開発を目指した。

### 2.2 試験装置の構築

当社技術研究所（茨城県つくば市）の施設内に、ビニル素材によるチャンバー（以下、チャンバー）を設置した試験室を設けた（図-1）。試験機関のチャンバーで用いられている素材は、劣化に強く有機材料の付着が起こりにくいステンレスであるが、材料費が高く、施工期間も数ヵ月程度となる。一方、ステンレスの代替としてのビニル素材は、臭気採取用のサンプリングバッグへの利用など実績があることから、ビニルの劣化や材料表面への成分付着について、問題は無いと考えた。また、材料費が安価であり、短期間で施工できる特徴がある。

さらに、チャンバー内における空気質の劣化について、臭気測定分野において既往知見があり、半日程度であれば官能試験法の許容範囲となる<sup>6)</sup>ことが知られている。評価試験の所要時間は2時間程度であり許容範囲内となる。以上により、ステンレスからビニルへの素材変更による評価試験への影響は小さいと考えた。

チャンバー内に空気循環用の攪拌ファンを置き、高さ1.2m位置にウイルス検液（以下、検液）の噴霧器、チャンバー内の空気を外から捕集するための延長ホースを取り付けた（図-2）。チャンバーの外に空気質サンプリ

\*1 環境研究部

ング機器を据え付け、延長ホースと接続した。

試験機関による浮遊ウイルスのサンプリングは、インピンジャー法により流量5 L/min, 吸引時間2 min, 合計10 Lの空気質を採取する。なお、浮遊ウイルスは空气中に非常に低い濃度で存在するため、大量の空気採取することで測定結果の信頼性が高くなる。そこで、100 L/min以上の高流量条件による空気質採取が可能なコロリスμをサンプリング機器として用いた。

### 2.3 リアルタイムPCR法による測定

試験機関による浮遊ウイルス数の評価はプラーク計数法を用いるが、希釈系列の作成や培地の重層・固定化など煩雑な前処理があり、数日以上の測定期間を要する。そこで、ウイルスDNA抽出キットを用いた簡便な前処理工程となり、かつ測定期間が数時間に短縮されるリアルタイムPCR分析<sup>7)</sup>を採用した。遺伝子増幅は空気質中のウイルスDNAをテンプレートとし、ウイルスタンパク質遺伝子の一部を増幅対象とした。

### 2.4 評価システムの妥当性検証

#### 2.4.1 検液散布試験

新たに構築したチャンバーについて、その性能の妥当性を検証するため、試験機関と当社の測定結果を比較した。試験工程表を表-1に示す。チャンバー内の空気質を一定にするため、試験中は攪拌ファンを常時稼働した。検液は試験開始前に10 min噴霧し、霧化した検液がチャンバー内で均質化するのを待ったため2 min待機し、開始時のサンプリングを行った。採取時間は開始後30 minまでは10 min間隔で行い、その後は60 min後、120 min後のタイミングで空気質を採取した。初期(0 min)のウイルス数から経過時間ごとのウイルス数の対数減少値と減少率を求めることで、ウイルスの除去性能を求めた。

$$Lr = \text{Log}10(Wa) - \text{Log}10(Wt) \quad (1)$$

ここに、Lr：ウイルス数の対数減少値

Wa：初期ウイルス数 (copies/m<sup>3</sup>)

Wt：経過時間ごとのウイルス数 (copies/m<sup>3</sup>)

$$Dr = 100 \times [1 - (1/10^{Lr})] \quad (2)$$

ここに、Dr：ウイルス数の減少率

Lr：対数減少値

試験機関と当社の試験条件を比較した一覧表を表-2

に<sup>4)</sup>、図-3に浮遊ウイルス数を示す。本試験のウイルス数初期値は、試験機関と比較して1/10ほど低くなった。原因として、サンプリング時の流量の違いによる溶媒へのウイルス吸着効率の低下、サンプルの前処理方法の違いによる工程上のロスが影響したものと考えられる。また、0 min～30 minにおいて値のばらつきが見られるが、これは定量評価時の誤差によるものと推察される。ウイルス数の初期値が1/10になるため、本システムによる定量下限値は試験機関の方法と比べて1桁小さくなるが、本システムにおいても、ウイルス量の初期値が10<sup>6</sup>(copies/m<sup>3</sup>)であり、ダイナミックレンジが6桁

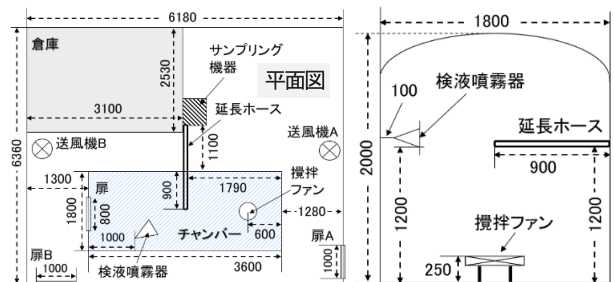


図-1 チャンバー試験室 図-2 チャンバー内部

表-1 試験工程表 (検液散布試験)

試験操作	使用機器	試験品の運転時間 (min)						
		0	10	20	30	60	120	
チャンバー内空気質の均質化	攪拌ファン	稼働中						
ウイルス検液噴霧	ネブライザー	10分	2分	待機				
空気質の捕集	サンプリング機器	1分	1分	1分	1分	1分	1分	1分

表-2 試験条件一覧

試験条件	試験機関	当社	
基礎条件	容量	25.0 m <sup>3</sup>	13.1 m <sup>3</sup>
	温度	23±1°C	
	湿度	50±10%	
	素材	ステンレス	塩化ビニル
ウイルス検液	攪拌ファン	YBS-B257(山善)	YBS-B258(山善)
	噴霧器	ネブライザー【品番:NE-C28, オムロン(株)】	
	濃度	10 <sup>6</sup> (PFU/ml)	
	噴霧時間	10 min	
サンプリング	流量	0.2 (ml/min)	0.4 (ml/min)
	手法	インピンジャー法	
	吸引時間	5 (L/min)	150 (L/min)
	吸着溶媒	2 min	1 min
定量評価	測定法	0.015% チオ硫酸ナトリウム	
	手法	プラーク計数法	リアルタイムPCR法
		宿主菌を加えた培地に重層培養	検液のDNA抽出薬液添加後に分析

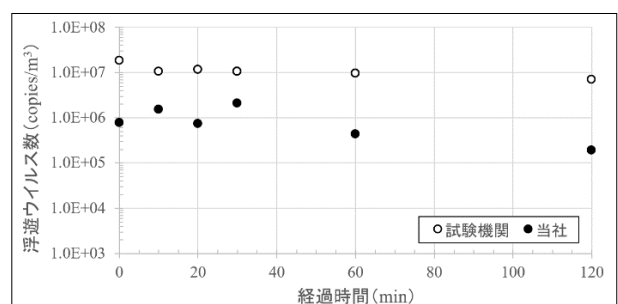


図-3 浮遊ウイルス数 (検液散布試験)

以上となるため、抗ウイルス効果を評価するに当たり、工程上の問題は無いと考えた。図-4に浮遊ウイルス数の変化に基づいた、対数減少値と減少率を示す。試験機関・当社のどちらも60 min後は30%前後、120 min後は50%前後の減少率に留まった。この結果から、ビニルチャンバーを用いて浮遊ウイルスの除去性能評価を行っても、試験機関と同等の結果が得られることから、本評価システムの妥当性を確認した。

### 2.4.2 ウイルス残留確認試験

次に、検液散布後に換気をどの程度行えば、チャンバーによる再試験が可能となるか確認するため、検液散布終了後に清掃・換気を行った際のウイルス残留状況を確認した。試験工程表を表-3に示す。清掃は除菌シートを用いて、チャンバーの内側を拭きとった。その後チャンバーを一晩密閉し、換気開始前に空気質サンプリングを行い、清掃によるウイルス除去効果を確認した。空気質サンプリングは、開始後120 minまでは30 min間隔で行い、その後は1時間間隔で300 minまで実施した。図-5に検液散布試験終了後の結果も含めた浮遊ウイルス数を示す。清掃後に一晩静置することで、ウイルス数が1/100程度に低減した。その後換気を行った場合、60 min後、120 min後の時点で若干のウイルス検出が見られたが、3時間後以降は全て定量下限以下となった。

図-4の結果から、チャンバーを用いた検液散布試験の結果は、本システムにおけるサンプリング流量が試験機関の30倍になるため、浮遊ウイルスの捕集効率が低下する点や、前処理時のサンプルロスにより、採取するウイルス量は試験機関の結果と比べて1/10前後となるが、初期値からの減少率差は試験機関と比較して、60 min時で5%、120 min時で13%に留まったことから、本システムによる評価はJEMAの試験機関と同等の評価ができることを確認した。図-5の結果から、試験終了後にチャンバー内部を除菌シートで清掃後一晩静置し、かつ換気を3時間以上行うことで、チャンバー試験時に散布した浮遊ウイルスが不検出となり、再試験が可能になるシステムであることを立証した。

## 3. 水・消毒剤噴霧試験

### 3.1 噴霧装置

超音波振動子を用いてミストを生成する噴霧器（以下、超音波噴霧器）と、

アロマオイル散布用のサブミクロンスケールのミストを発生させる噴霧器（以下、アロマディフューザー）を用いた。性能一覧を表-4に示す。

### 3.2 試験方法

試験工程表を表-5に示す。試験開始時におけるウイルス検液の散布、サンプリング後のウイルス量の評価は2.4.1に基づいて実施した。超音波噴霧器は噴霧量が

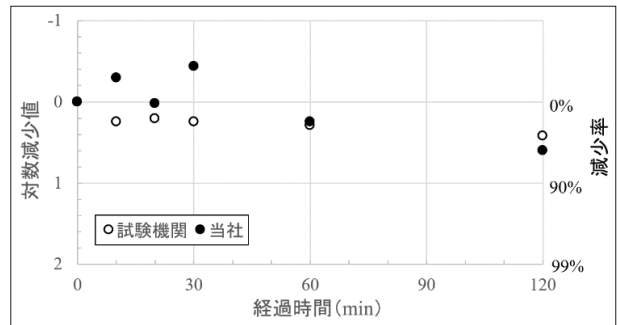


図-4 対数減少値と減少率（図-3から）

表-3 試験工程表（ウイルス残留確認試験）

試験操作	使用機器	試験後の換気時間 (min)									
		試験終了	0	30	60	90	120	180	240	300	
チャンバー内 空気質の均質化	攪拌ファン	→									
チャンバー内の 清掃・換気	清掃器具	清掃	→								
空気質の捕集	サンプリング 機器	1分	1分	1分	1分	1分	1分	1分	1分	1分	1分

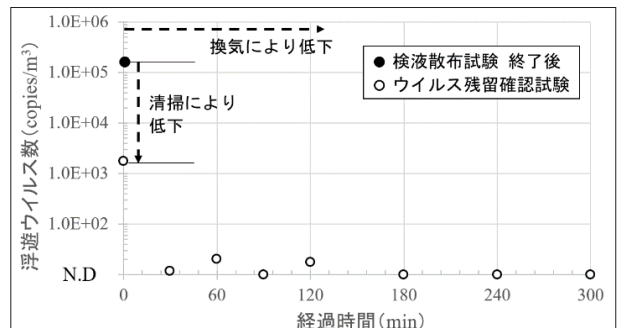


図-5 浮遊ウイルス数（ウイルス残留確認試験）

表-4 ミスト噴霧装置 性能一覧

性能	超音波噴霧器	アロマディフューザー
原理	超音波振動子	ベンチュリー効果
粒径	0.3~1.0 μm	0.1~0.5 μm
流量	20 ml/min	0.72 ml/hour
タンク容量	10 L	150 ml
サイズ	幅250×奥行250 ×高さ875 (mm)	幅140×奥行140 ×高さ150 (mm)

表-5 試験工程表（薬剤噴霧試験）

試験操作	使用機器	試験品の運転時間 (min)						
		0	10	20	30	60	90	120
チャンバー内 空気質の均質化	攪拌ファン	→						
ウイルス 検液噴霧	ネブライザー	10 min	→					
空気質の捕集	サンプリング 機器	1 min	1 min	1 min	1 min	1 min	1 min	1 min
試験品の運転	ミスト 噴霧装置	→						
	超音波噴霧器	→						
	アロマ ディフューザー	→						

20 ml/min と大きいため、居室内では断続利用を行うことを想定し、試験開始から 10 min 稼働した後、試験終了まで噴霧器を停止するものとした。アロマディフューザーは噴霧量が 0.72 ml/hour と小さいため、生活空間において連続運転を行うものと推察し、試験開始から終了まで機器を稼働した。ミスト用の液体は、水道水、脱イオン水、消毒剤（二酸化塩素【200 ppm】を主成分とする）の 3 種類を用いた。試験ケース一覧を表-6 に示す。水道水は脱イオン水に比べて、溶解している不純物の量が多いため、その違いが浮遊ウイルスに対する除去効果に影響を与えるか確認した。

### 3.3 試験結果

図-6 に超音波噴霧器を用いた際の浮遊ウイルス数を示す。Blank (No.1) は 2.4.1 で示した検液のみを散布した結果を示している。水道水を 10 min 噴霧した場合、経過時間 10 min ~ 20 min にかけて浮遊ウイルス数が減少したが、その後は大きな減少は見られなかった。脱イオン水を 10 min 噴霧したケースでは、経過時間 20 min ~ 30 min にかけて浮遊ウイルス数が大きく低下し、その後も漸減する傾向が見られた。消毒剤は経過時間 60 min 以降急激に低下し、120 min 後には定量下限以下となった。図-7 に図-6 の結果に基づいた対数減少値と減少率を示す。120 min 後の結果は、Blank で 75 % 減、水道水を噴霧したケースにて 95 % 減となったが、試験中における浮遊ウイルス除去効果 (JEMA のマニュアル<sup>5)</sup> に基づき、本試験によって得られる対数減少値が 2.0 (減

少率 99%) 以上の際に効果があるものと判定) は確認できなかった。脱イオン水・消毒剤を噴霧したケースでは、試験開始から 60 min で浮遊ウイルス除去効果が確認でき、120 min 後の減少率は脱イオン水が 99.9 %、消毒剤は 99.9995 % 減となった。

図-8 にアロマディフューザーを用いた際の浮遊ウイルス数を示す。Blank と水道水は試験中のウイルス数の挙動傾向に大きな差異が見られなかった。脱イオン水では、経過時間 10 min ~ 30 min にかけて浮遊ウイルス数が低減したが、その後は顕著な変化は見られなかった。消毒剤は経過時間 60 min ~ 120 min にかけて浮遊ウイルス数が大きく低下した。図-9 に図-8 の結果に基づいた、対数減少値と減少率を示す。120 min 後における浮遊ウイルス数は、試験開始時と比較して、Blank で 75 % 減・水道水で 84 % 減・脱イオン水で 97 % 減となり、超音波噴霧器と同様に脱イオン水で減少率が高くなったが、対数減少値として 2.0 (減少率 99%) 以上に到達する効果は見られないことから、アロマディフューザーにおける水道水・脱イオン水による浮遊ウイルス除去効果は認められないと判断した。消毒剤の減少率は 99.98 % となり、浮遊ウイルスに対する除去効果が確認できた。

表-6 試験ケース一覧 (水による効果)

No.	噴霧装置	薬剤種	噴霧条件		
			流量	噴霧時間	噴霧量
1	Blank				
2	超音波噴霧器	水道水	20 mL /min	10 min	200 ml
3		脱イオン水			
4		消毒剤			
5	アロマディフューザー	水道水	0.72 ml /hour	120 min	1.44 ml
6		脱イオン水			
7		消毒剤			

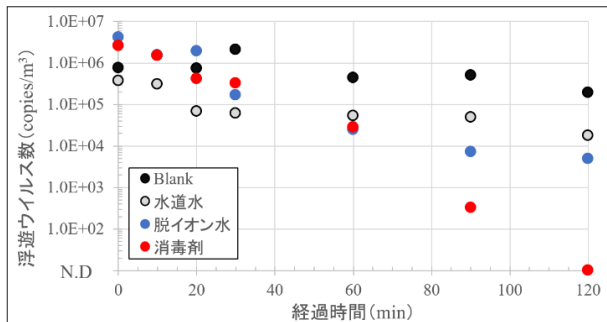


図-6 浮遊ウイルス数 (超音波噴霧器)

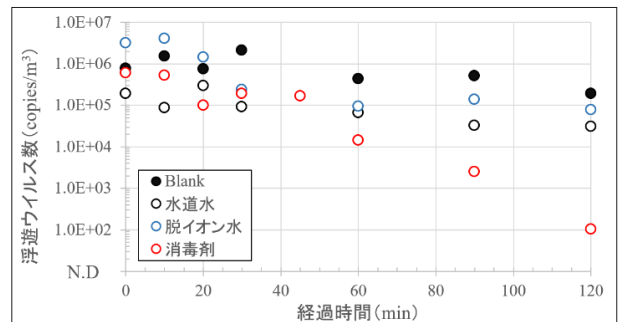


図-8 浮遊ウイルス数 (アロマディフューザー)

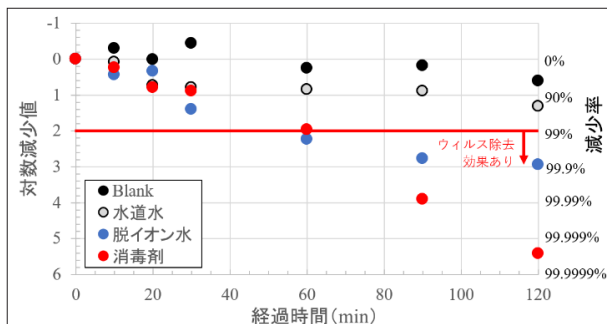


図-7 対数減少値と減少率 (図-6 から)

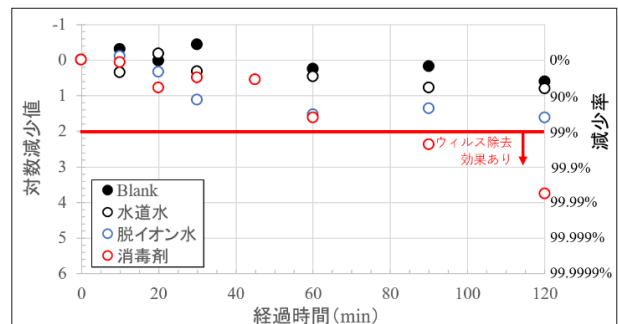


図-9 対数減少値と減少率 (図-8 から)

これらの結果から、超音波噴霧器とアロマディフューザーのどちらを用いても、水道水・脱イオン水によるミストとの接触により、ミスト噴霧を行わない場合と比べて、浮遊ウイルスの減少が可能であることが示された。また、溶解している不純物の量が少ない脱イオン水の方が、より高い性能を示すことが判明した。なお、単位時間当たりの噴霧量は、超音波噴霧器がアロマディフューザーよりも多いため、この差が浮遊ウイルス除去効果（薬剤ミストとウイルスの接触頻度）に表れていると思われる。噴霧量と除去効果の定量的な関係性については、今後検討を進めていきたい。

#### 4. アロマオイル噴霧試験

##### 4.1 試験方法

噴霧器は表-4のアロマディフューザーのみを用いた。ミスト用の液体は、複数種の植物由来成分によるアロマオイル（以下、ブレンドオイル）、単一種のアロマオイルを用いた。ブレンドオイルはエンペロープタイプのウイルス不活化試験にて、1時間で99.9%減少するものを用いた<sup>8)</sup>。単一種オイルの種類は感染症抑制に有効と考えられるアルコール類・アルデヒド類・フェノール類のいずれかを42~89%有するティートリー、ユーカリ・シトリオドラ、ペパーミントの3種とした。表-7にアロマオイル成分の分類と成分

割合<sup>9)</sup>を示す。本検討では、アロマオイルの浮遊ウイルスへの除去効果とともに、香りに対する個人の嗜好性への影響が少ない微弱な芳香濃度での除去効果も併せて評価した。具体的には、アロマオイル成分100%の場合だけでなく、脱イオン水で0.1%に希釈した場合（検知閾値もしくは認知閾値程度の微弱な芳香を感じる希釈香水・以下、アロマウォーター）でも、浮遊ウイルスに対する除去性能が得られるか検討した。

表-7 アロマオイル成分の分類と成分割合

アロマオイル成分の分類	成分割合(%)		
	ティートリー	ユーカリ・シトリオドラ	ペパーミント
炭化水素類	50.8	3.0	9.5
アルコール類	42.3	16.4	45.0
アルデヒド類		63.8	
ケトン類	0.1	0.1	31.2
フェノール類			0.1
オキサイド類	4.6	1.4	5.2
エステル類		1.7	6.1
その他	2.2	13.5	3.0

赤字：感染症抑制に有効と考えられる成分

表-8 試験ケース一覧（アロマオイルによる効果）

No.	薬剤種	精油条件				希釈溶媒	ミスト噴霧条件		
		種類	抽出法	部位	割合(%)		噴霧器	噴霧量	時間
1	Blank								
2	ブレンドオイル								
3	アロマオイル	ティートリー	水蒸気蒸留法	葉・小枝	100	アロマディフューザー	0.72 ml/hour	120 min	
0.1				脱イオン水					
ユーカリ・シトリオドラ		葉		100	脱イオン水				
0.1		脱イオン水							
7		ペパーミント		全草	100	脱イオン水			
8					0.1	脱イオン水			

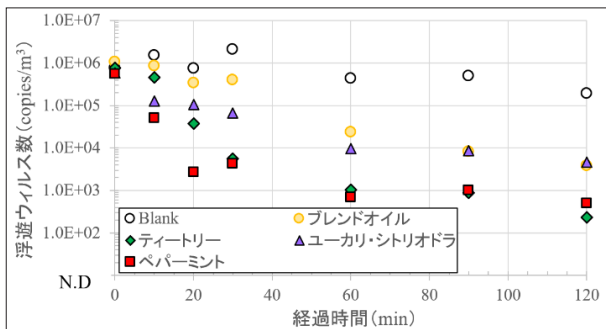


図-10 浮遊ウイルス数（ブレンドオイル・アロマオイル）

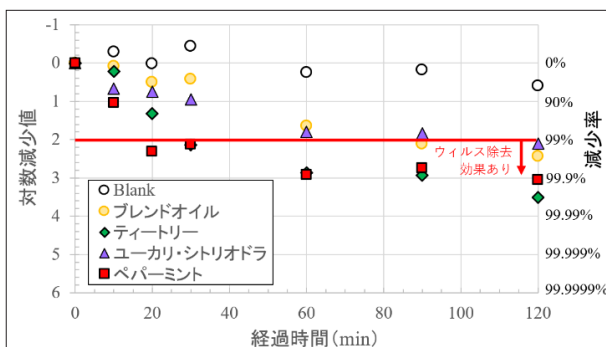


図-11 対数減少値と減少率（図-10から）

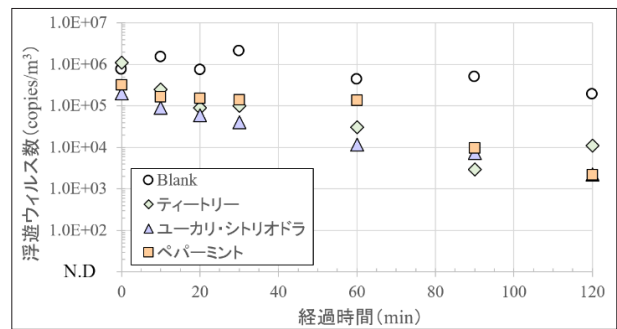


図-12 浮遊ウイルス数（アロマウォーター）

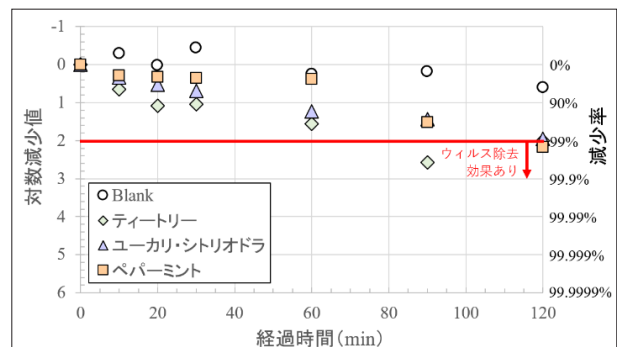


図-13 対数減少値と減少率（図-12から）

## 4.2 試験結果

試験ケース一覧を表-8に示す。ブレンドオイル・アロマオイル噴霧時の効果について、図-10に浮遊ウイルス数、図-11に図-10の結果に基づいた、対数減少値と減少率を示す。ティートリーは経過時間30 min、ペパーミントは経過時間20 minにおいて、浮遊ウイルスへの除去効果が認められた。経過時間120 min後における減少率はティートリーで99.95%、ペパーミントで99.9%となった。ブレンドオイル、ユーカリ・シトリオドラでも浮遊ウイルス数の減少が見られ、その除去効果も認められたが、ティートリー・ペパーミントに比べて、経過時間30～120 minにおける減少率は1オーダー前後低下した。

アロマウォーター噴霧時の効果について、図-12に浮遊ウイルス数、図-13に図-12の結果に基づいた、対数減少値と減少率を示す。ティートリーは経過時間90 min、ペパーミントは120 minにおいて、浮遊ウイルスの減少率が99%以上になり、その除去効果が認められた。ユーカリ・シトリオドラを用いた場合も浮遊ウイルス数は減少したが、試験中の減少率が99%に到達しなかったため、除去効果は認められないと判断した。これらの結果から、ブレンドオイルはユーカリ・シトリオドラの精油と同程度の効果が得られた。ティートリーとペパーミントは、アロマオイル・アロマウォーターのどちらも浮遊ウイルスへの除去効果が見られた。ユーカリ・シトリオドラはアロマオイルのみ効果が認められたが、減少率は他のものに比べて1オーダーほど低かった。このことから、アロマオイルの空間噴霧による感染症リスク低減を図る場合、アルデヒド類よりもアルコール類を多く含んだものを用いた方が、効果が高くなると考えられる。

## 5. まとめ・今後の予定

感染症リスクの低減を目的とした、薬剤の空間噴霧技術について、省庁見解や技術動向の点から見直しが進みつつある。そこで、ミスト用の液体を従来の消毒剤に比べ、より安全な製品にすることで、健康への影響や内装材劣化などの運用リスクを低減し、かつ様々な建物に適用可能となる空間噴霧技術を開発するため、浮遊ウイルスに

対する除去性能評価システムを構築した。また、本システムにより、水道水・脱イオン水・消毒剤・アロマオイルを用いた際の浮遊ウイルスに対する除去効果を確認した。その結果、どの液体でもミストとの接触により浮遊ウイルスの減少が可能であることが判った。水道水と脱イオン水を比較した場合、溶解している不純物の量が少ない脱イオン水の方が、より高い抗ウイルス効果を示した。また、ブレンドオイル・アロマオイルおよびアロマオイルを脱イオン水で0.1%に希釈したアロマウォーターのいずれも、浮遊ウイルスに対する除去効果が見られた。特に、アルデヒド類よりもアルコール類を多く含んだアロマオイルを用いた方が、その効果は高くなることが判明した。今後は運用リスクが小さくウイルス除去効果を有する液体を用いて、オフィス空間を対象にした実証試験を行う。これらの取組みを通して、様々な建物・状況に適用可能となる、感染症抑制に向けた空気質管理技術の実空間への適用を目指していく。

## 謝辞

評価システムの妥当性検証および研究方針・考察について、筑波大学微生物サステナビリティ研究センターの野村暢彦先生・橋本義輝先生にご指導いただきました。ここに記して謝意を表します。

## 参考文献

- 1) Cleaning and disinfection of environmental surfaces in the context of COVID-19, 2020.5
- 2) Guideline for Disinfection and Sterilization in Healthcare Facilities, 2019.5
- 3) 厚生労働省新型コロナウイルス感染症対策推進本部, 新型コロナウイルスの消毒・除菌方法について, 2021.10
- 4) 一般財団法人北里環境科学センター, 北生発 2022\_0009-1号, 2022.5
- 5) 一般社団法人日本電機工業会, 空気清浄機の浮遊ウイルスに対する除去性能評価試験方法, 2011.7
- 6) 風間正光, 官能試験法, 紙バ技協誌, 33巻10号, pp.23-34, 1979
- 7) Shimasaki, et.al., Biocontrol Science, 2018, 23, 7-15.
- 8) 25-YK10507, (株)ファルコライフサイエンス
- 9) (株)フレーバーライフ社, エッセンシャルオイル成分分析表

---

### Development of air quality control technology to control infectious diseases - Evaluation of removal performance against airborne viruses by space spray -

Takahiro AOKI, Takamichi NAKAMURA

As an air quality control technology that contributes to the control of infectious diseases, we have constructed a "removal performance evaluation system for airborne viruses" using a newly developed proprietary chamber device and a real-time PCR device. As a result of verifying the effect of chemical spraying in the space, it was confirmed that aromatic chemicals and deionized water, which contains less impurities than tap water, as well as chlorine-based chemicals, are effective in reducing the risk of infectious diseases.