

ハンドドライヤの使用による飛沫飛散シミュレーションと  
感染リスク試算

三菱電機株式会社

2021年3月15日

## 要旨

本報ではハンドドライヤによって飛散する飛沫の挙動やトイレ内での濃度分布を非定常流体解析と粒子トラッキング、濃度場解析を組み合わせた数値シミュレーションにより調べた。シミュレーションで得られたデータと他の先行研究のデータを組み合わせ、非一様な場合に拡張したWells-Rileyモデルに落とし込むことで、ハンドドライヤの様々な使用条件、曝露条件におけるCOVID-19の感染リスクを試算した。その結果、一般的な使用条件、曝露条件下では感染確率は0.01%程度、極端に悪い使用条件下や高濃度な曝露条件下においても十分低い（感染確率1%程度）ことがわかった。すなわちハンドドライヤの使用によって小さな飛沫は発生するものの、くしゃみなどで発生する飛沫と比べて十分希釈され感染価が低く、一日当たりの曝露時間も短いため感染リスクとなる要因としては小さいといえる。

ハンドドライヤの使用の是非を検討する際には、ハンドドライヤが停止されていることで発生しうる手を洗わないことや手を乾燥させないこと等のデメリットも考慮して判断することが求められる。

## 目次

<b>1</b>	<b>解析目的</b>	<b>2</b>
<b>2</b>	<b>解析I：Lagrange 粒子を用いた飛沫粒子の挙動解析</b>	<b>3</b>
2.1	解析概要と解析条件	3
2.2	解析結果および考察	4
2.2.1	粒径による挙動の違い	4
2.2.2	粒子発生位置による挙動の違い	5
2.3	本章のまとめ	6
<b>3</b>	<b>解析II：Lagrange 粒子を用いたトイレ内での飛沫粒子の挙動解析</b>	<b>7</b>
3.1	解析概要と解析条件	7
3.2	解析結果および考察	7
3.2.1	粒子の挙動	7
3.2.2	粒子の落下時間と落下位置	8
3.3	本章のまとめ	9
<b>4</b>	<b>解析III：パッシブスカラを用いた汚染濃度拡散解析</b>	<b>11</b>
4.1	解析概要と解析条件	11
4.2	解析結果および考察	12
4.2.1	汚染濃度の実測結果との比較	12
4.2.2	場所による汚染濃度の違い	12
4.3	本章のまとめ	13
<b>5</b>	<b>ハンドドライヤによる感染リスクの評価【監修：北海道大学大学院 林基哉先生】</b>	<b>14</b>
5.1	リスク評価の概要	14
5.2	Step1. オフィスにおける感染リスク	14
5.3	Step2. オフィスにおける飛沫発生量と感染価	14
5.4	Step3. ハンドドライヤから発生する飛沫量と感染価	15
5.5	Step4. ハンドドライヤの使用による感染リスク	16
5.6	本章のまとめ	19
<b>6</b>	<b>まとめ</b>	<b>19</b>
<b>A</b>	<b>気流解析の妥当性検証</b>	<b>21</b>
<b>B</b>	<b>パーティクルカウンタによる濃度測定実験</b>	<b>22~28</b>

# 1 解析目的

COVID-19 は SARS-CoV-2 ウイルスによる感染症であり，SARS-CoV-2 は直径 0.06-0.14[ $\mu\text{m}$ ] の球形をしたウイルスである．ウイルスの感染経路は大きく接触感染，飛沫感染（エアロゾル感染），飛沫核感染（空気感染）に分けられる．巷でよく耳にするエアロゾル感染という言葉の定義はあいまいであるが，ここでは飛沫感染と同義とし，感染性のウイルスを含んだ飛沫による感染全般を言うこととする．飛沫核感染は，飛沫から水分が蒸発したさらに小さな粒子（飛沫核）に含まれるウイルスによって感染するものと言うこととする [8]．COVID-19 の飛沫核感染の有無はいまだに明らかになっていないが，飛沫による感染は主要な要因と考えられ，マスクの着用をはじめとした感染防止対策が多くとられている．比較的な大きな飛沫は重力により数秒から数分で沈降するため発生源から十分な距離をとっていれば感染を防げるといわれているが，数 [ $\mu\text{m}$ ] 以下の小さな飛沫は数十分から数時間空気中に浮遊する場合もあり，小さな飛沫が感染源となったとされる例もしばしば報告されている．また小さな飛沫の挙動は空調や換気等の空気の流れに大きく左右されることが推察され，さまざまな状況下における飛沫の挙動や感染リスクを数値解析によりシミュレートする試みが各研究機関で行われている<sup>1, 2</sup>．本報ではハンドドライヤによる飛沫の拡散や濃度分布等を可視化し現状把握を行うため，数値流体解析を援用した飛沫の飛散シミュレーションを行った．

また，汚染物質（ウイルスを含んだ粒子）の発生条件と換気量等から感染リスクを試算することができるものとして，Wells-Riley モデルと呼ばれる以下の式がある：

$$P = 1 - \exp\left(-\frac{I p q t}{Q}\right). \quad (1.1)$$

Wells-Riley モデルは，完全混合状態の室環境について，感染確率  $P$  を見積もるための式であり， $I$  は感染者数， $p$  は呼吸量 [ $\text{m}^3/\text{person}\cdot\text{h}$ ]， $q$  は quanta 発生量 [/h]， $t$  は曝露時間 [h]， $Q$  は室換気量 [ $\text{m}^3/\text{h}$ ] である．quanta とは，ウイルスの量と感染力を包括した量であり，COVID-19 の場合の  $q$  は 14-48[/h] 程度であるといわれている [14]．Wells-Riley モデルは汚染物質が完全混合状態にあることを仮定しており，汚染物質の濃度に顕著な非定常性や非一様性がある場合には正しく感染リスクを見積もることができない．ハンドドライヤにより拡散した飛沫はこの非定常性や非一様性が強いと考えられるため，式 (1.1) を拡張した以下の式を用いて評価することを考える：

$$P = 1 - \exp\left(-I p \int \phi(\mathbf{x}, t) dt\right). \quad (1.2)$$

ここで  $\phi(\mathbf{x}, t)$  は quanta の濃度 [ $1/\text{m}^3$ ] であり，位置  $\mathbf{x}$  と時間  $t$  の関数である．なお，完全混合を仮定すると  $\int \phi(\mathbf{x}, t) dt = qt/Q$  となり，式 (1.2) は式 (1.1) と一致する．本報ではこの  $\phi$  を数値解析および実測試験により求めることでハンドドライヤによる感染リスクの空間依存性，すなわち場所によって感染リスクがどれくらい異なるか，を見積もった．

<sup>1</sup><https://www.r-ccs.riken.jp/wp-content/uploads/2020/08/20200824tsubokura.pdf>

<sup>2</sup><https://www.kit.ac.jp/2020/09/news20200930/>

## 2 解析 I : Lagrange 粒子を用いた飛沫粒子の挙動解析

### 2.1 解析概要と解析条件

まず、ハンドドライヤ稼働時の飛沫の挙動を可視化するため、Lagrange 粒子を用いたシミュレーションを行った。解析対象のハンドドライヤはサイドオープンタイプのジェットタオル (JT-SB116JH2-W) とし、解析空間は半径 3[m] の 8 分の 1 球とした。ハンドドライヤの左右中央を通る平面は対称面、底面および背面は壁面 (滑りなし境界)、球殻面は大気圧力境界とした。またハンドドライヤの気流吹き出し口 (ノズル) は形状を一部モデル化し、カタログ値である 98[m/s] の速度入口とした<sup>3</sup>。またハンドドライヤの手挿入部には、手を模擬した直方体の板 (以下「手」とする) を配置した (図 1a)。

数値解析は Siemens 社の汎用流体解析 S/W の STAR-ccm+ を使用した。気流解析には非定常 RANS の k- $\epsilon$  モデルを採用し、前述の通り粒子の挙動解析には Lagrange 粒子による粒子トラッキングを採用した。数値解析の時間刻み  $\Delta t$  は  $1.0 \times 10^{-2}$  [s] とし、2[s] 間の解析を行った。空間格子はハンドドライヤ付近で高解像度となるように設定し、全セル数は約 200 万とした。

解析の対象とする飛沫粒子は  $5[\mu\text{m}]$  (粒子 1) および  $500[\mu\text{m}]$  (粒子 2) の剛体球であるとし、Lagrange 粒子に重力および空気抵抗の影響を考慮した。一方分子拡散、乱流拡散、分裂、吸着、蒸発による粒径変化等は簡単のため考慮していない。また、気流は粒子に影響を与えるが、粒子は気流および他の粒子に影響を与えない一方向連成の条件で解析を行った。Lagrange 粒子は、手の表面から 5[mm] 離れた位置に一定間隔で配置した計 50 点のインジェクタ (図 1b) から、一定の時間間隔で初速度 0 で発生するものとした。つまり、ハンドドライヤの噴流による飛沫の発生メカニズムや発生量までは本報では再現しないものとし、飛沫発生 of 局所性や非定常性までは考慮しないものとした。本解析で使用したモデルや物性値等を表 1 にまとめて記載する。

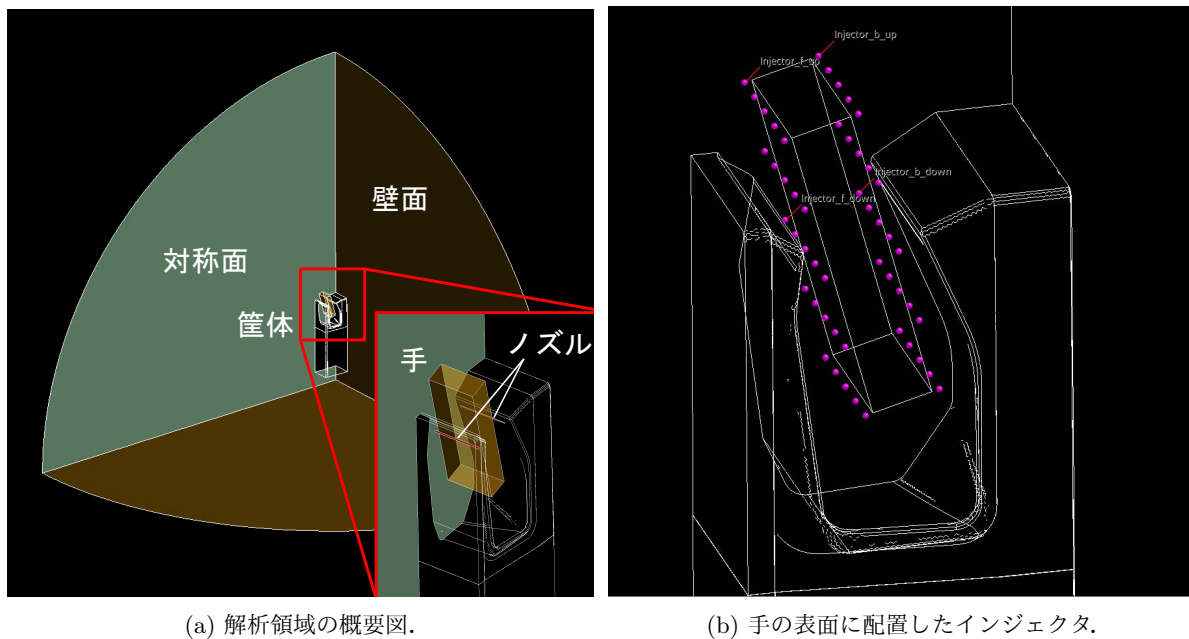


図 1: 解析領域とインジェクタ。

<sup>3</sup>正確にはハンドドライヤの稼働開始から 0.1[s] かけて速度は 0[m/s] から線形に 98[m/s] まで達し、その後は 98[m/s] を維持する速度条件を与えた。これは現象をより現実近づけるとともに、計算の安定性を確保するためである。

表 1: 解析条件

	記号	値	単位	備考
乱流モデル		非定常 RANS $k - \epsilon$		
時間格子刻み	$\Delta t$	$1.0 \times 10^{-2}$	[s]	
解析時間	$T$	2.0	[s]	
総空間格子数		216 万		
気体密度	$\rho_g$	1.1648	[kg/m <sup>3</sup> ]	
気体粘性係数	$\mu_g$	1.855	[Pa·s]	
飛沫密度	$\rho_f$	997.561	[kg/m <sup>3</sup> ]	
粒子 1 の直径	$D_1$	$5.0 \times 10^{-6}$	[m]	
粒子 2 の直径	$D_2$	$5.0 \times 10^{-4}$	[m]	
重力加速度	$g$	9.81	[m/s <sup>2</sup> ]	
抗力係数				Schiller-Naumann の式に従う
粒子拡散				なし

## 2.2 解析結果および考察

### 2.2.1 粒径による挙動の違い

粒子の発生を手の表面からのみとした場合について、粒子 1(5[ $\mu\text{m}$ ]) と粒子 2(500[ $\mu\text{m}$ ]) の挙動を調べた。図 2 に、ハンドドライヤー稼働開始から 2 秒後の粒子分布を示す。<sup>4</sup>

粒子 1 に関して、全体的に重力の影響をあまり受けず、ハンドドライヤーの気流に乗って移動することが確認できる。また粒子は大きく分けてハンドドライヤーの上方から噴出するものと側方から噴出するものがあることがわかる。上方から噴出する粒子は 3[m] 以上の高さまで舞い上がっており、現実の空間では天井にまで到達すると考えられる。側方から噴出する粒子はハンドドライヤーから 1.0-2.0m 程度離れた位置で、ヒトの一般的な呼吸域である 1.6[m] 程度の高さに多く分布することがわかる。

粒子 2 に関して経時的な挙動を調べると重力の影響を受けて放物的な運動をすることがわかった。また粒子 2 に関して一部粒子は 3[m] 近い高さまで到達する結果となった。ただし、500[ $\mu\text{m}$ ] の粒子が 3[m] 飛散するほどの力を受けた場合、剛体ではない実際の飛沫は分裂を生じる可能性がある [12] ため、そのままの粒径で筐体外に飛散することは少ない可能性がある。一方、比較的初速が小さいとみられる粒子に関しては 1.0-1.5[m] 程度の高さまで到達したのち重力により沈下しており、ハンドドライヤーの使用者や周囲にいる人の口から吸い込まれる要因となる可能性は低いものと考えられる。

以上より、特に粒子 1 に代表される比較的小さな飛沫はヒトの呼吸域にも分布している可能性が高いといえる。ただし、飛沫の有無のみが感染につながるものではなく、感染リスクを正しく見積もるためには、飛沫の発生量と呼吸域における飛沫の分布濃度、飛沫に含まれるウイルス量を正しく見積もる必要があることから 4, 5 章ではこれらの検討を行った。

<sup>4</sup>粒子 1 と粒子 2 の表示個数とマーカーサイズはそれぞれ 1:51, 1:5 の比率としている。これは実際の現象における個数やサイズの比率を表しているわけではなく、あくまで見やすくするための処理であるため注意されたい。

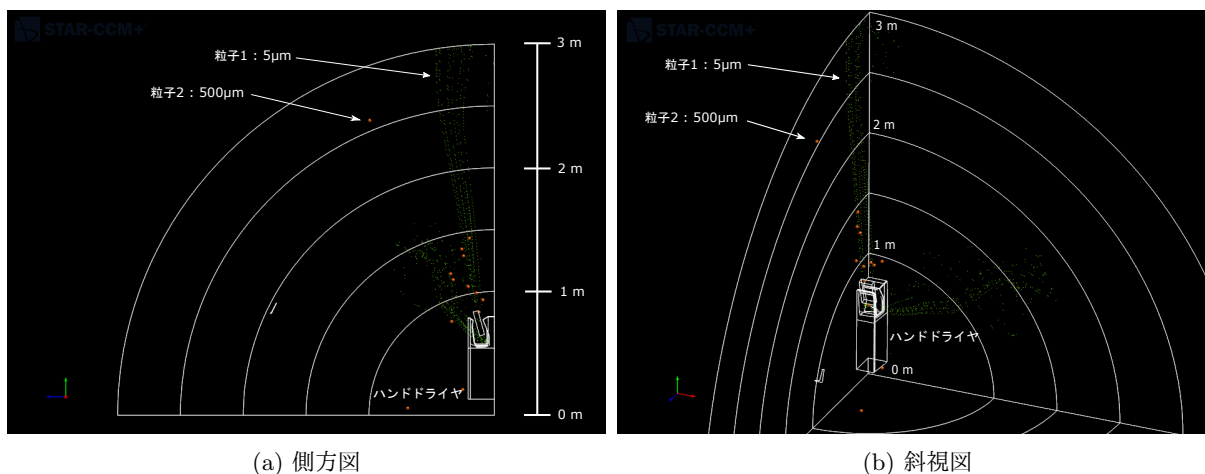


図 2: 2 秒後の飛沫分布 : 粒子 1 と粒子 2 の表示個数とマーカーサイズはそれぞれ 1:51, 1:5 の比率としている。

### 2.2.2 粒子発生位置による挙動の違い

ハンドドライヤの噴流による粒子の飛散は、その発生位置によって挙動が異なることが推測される。そこで、インジェクタを表 2 のように位置によってラベル付けし、それぞれのインジェクタから発生する粒子がそれぞれどのような挙動をするかを調べた。図 3 に、手の甲 (上), 手の甲 (下), 手のひら (下) の各インジェクタから発生した粒子の 1 秒後の分布を示す。インジェクタ位置が“上”であるか“下”であるかによって大きく分布が異なっていることがわかる。一方、手の甲と手のひらの差はほとんど見られなかった。図では省略しているが、手の甲 (上) と手のひら (上) の差も同様にほとんどみられなかった。サイドオープン型のハンドドライヤで一般的に推奨されている使用法として、側面から手を挿入し、5-10 秒ほど時間をかけて上方へ引き抜くというものがあるが、この使用法においては水滴、水膜の多くは常に噴流の衝突位置より下にあるため、図 3 における水色や黄緑色の筐体側方へ飛散する粒子が相対的に多くなる。すなわち、ハンドドライヤ使用者への飛散量は減る一方、筐体への水滴付着や周囲の人への飛沫の飛散は多くなると考えられる。

表 2: インジェクタ位置のラベル分け

インジェクタのラベル	説明
手のひら (上)	手のひら側のうち噴流の上側にある点
手のひら (下)	手のひら側のうち噴流の下側にある点
手の甲 (上)	手の甲側のうち噴流の上側にある点
手の甲 (下)	手の甲側のうち噴流の下側にある点

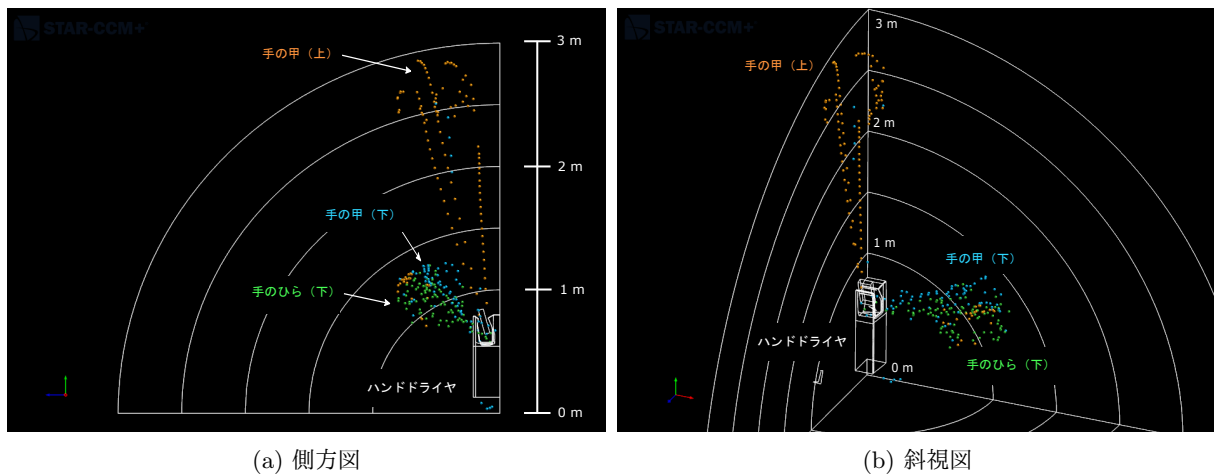


図 3: 1 秒後の飛沫分布：橙色が手の甲（上），水色が手の甲（下），黄緑色が手のひら（下）から発生した粒子である。

### 2.3 本章のまとめ

Lagrange 粒子を用いた飛沫の飛散シミュレーションの結果，粒径や発生位置によって粒子の飛散挙動が異なることがわかった．次章では実際のトイレを模した空間において，粒径による浮遊時間や落下距離等を詳細に検討した．



### 3 解析 II : Lagrange 粒子を用いたトイレ内での飛沫粒子の挙動解析

#### 3.1 解析概要と解析条件

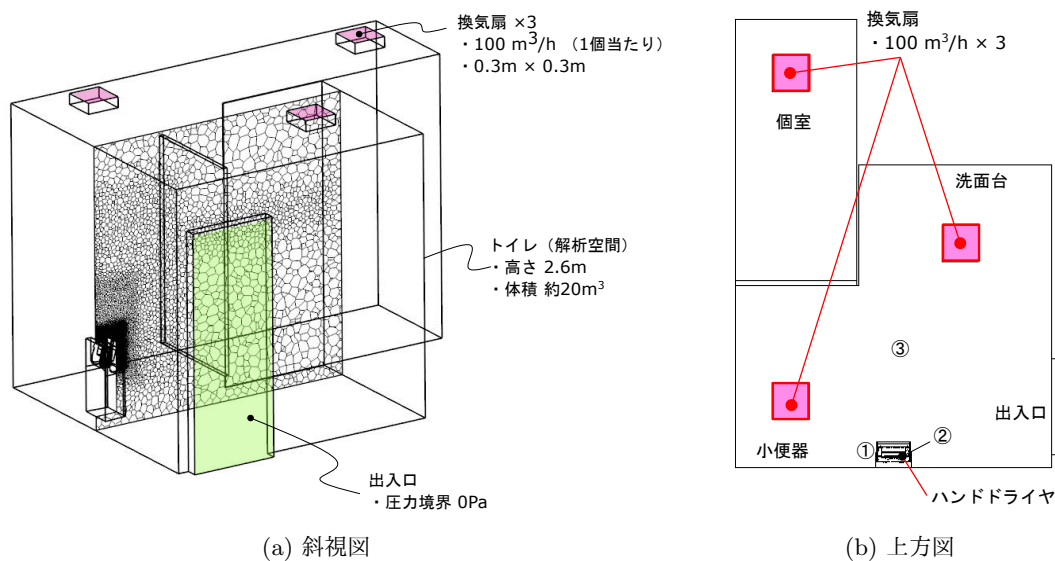


図 4: 解析空間 (中津川製作所ショールーム男性トイレ)

次に解析空間をトイレ空間とし、比較的長い時間スケールでの解析を行うことで、飛沫粒子がハンドドライヤから噴出した後の挙動の解析を行った。対象とするトイレは中津川製作所のショールーム男性トイレで、約  $20[\text{m}^3]$  の体積を有し、天井に取り付けられた換気扇 3 か所から  $300[\text{m}^3/\text{h}]$  (15 回/h 相当) で換気される。また、出入口は大気圧力境界とし、領域外部から飛沫粒子が流入することはないものとする。便器や洗面台等の構造物は本質的ではないため省略した。気流解析モデルや Lagrange 粒子モデル等は 2 章と同じである。Lagrange 粒子の粒径は  $5, 20, 100, 500[\mu\text{m}]$  の 4 種類とし投入粒子数は全粒径で同一としている。Lagrange 粒子は手の甲と手のひらに等間隔で配置した計 18 個のインジェクタから一定の時間間隔で初速度 0 で投入される。投入される各粒径の Lagrange 粒子の個数はそれぞれ 450 個である。本解析では床や側壁、ハンドドライヤ筐体面など、気流に対して壁面境界を課している境界に達した Lagrange 粒子は、解析領域から排除されるものとした。これは壁面に付着した飛沫の再飛散がない条件を模擬しているとともに、計算負荷的にも有利である。解析時間は  $0 \leq t \leq 1800[\text{s}]$  とし、ハンドドライヤの稼働は  $0 \leq t \leq 5[\text{s}]$  の 1 回のみとした。また時間格子  $\Delta t[\text{s}]$  は次のように設定した：

$$\Delta t = \begin{cases} 0.01 & (0 \leq t \leq 5) \\ 0.1 & (5 \leq t \leq 300) \\ 1.0 & (300 \leq t \leq 1800). \end{cases} \quad (3.1)$$

#### 3.2 解析結果および考察

##### 3.2.1 粒子の挙動

$t = 10$  までの各時刻における粒子位置を 1 秒ごとに切り取ったものを図 5 に示す。粒子は粒径ごとに色分けされている。各粒径の発生個数は同数としているため現実の粒径分布とは異なることに注意されたい。 $500[\mu\text{m}]$  の大きな粒子は数秒でほとんどが消失していることがわかる。これは主に床に粒子が落下したためである。 $100[\mu\text{m}]$  の粒子は  $10[\text{s}]$  時も依然浮遊してはいるが、徐々に落下し始めている。また、ドアに阻まれ個室へはほとんど流入していないことがわかる。 $5, 20[\mu\text{m}]$  の粒子は個室を含めてトイレ内全域に拡散していることがわかる。ただし図 5 からは  $5[\mu\text{m}]$  と  $20[\mu\text{m}]$  の粒子の挙動の差異については不明であった。次節以降では床に落下する粒子や空間中に浮遊する粒子について定量的な分析を行った。

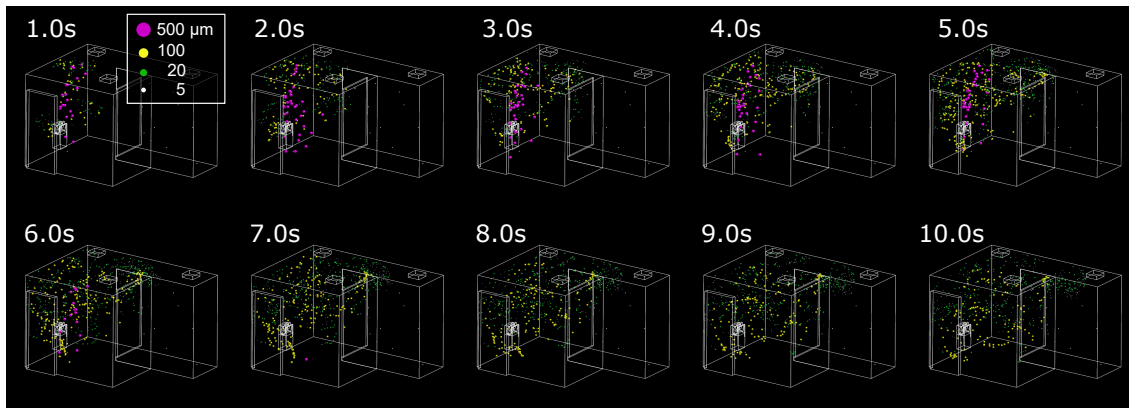


図 5:  $t = 10[s]$  までの粒子の挙動

### 3.2.2 粒子の落下時間と落下位置

各粒径の粒子について、床に落下する時間と距離の関係を図 6 に示す。図は上から換気量 7.5[回/h], 15[回/h], 30[回/h] の場合を表している。換気量の異なる左図 3 つを比較すると、比較的大きな粒子 (100[ $\mu\text{m}$ ], 500[ $\mu\text{m}$ ]) については落下数, 落下時間ともに換気の影響をほとんど受けていないことがわかる。一般的な換気量である 15[回/h] の場合 (図 6 中段) を見ると, 500[ $\mu\text{m}$ ] の粒子は 1.0[m] 以内, 100[ $\mu\text{m}$ ] の粒子は 2.0[m] 以内にほとんどの粒子が落下することがわかる。一方, 小さな粒子 (5[ $\mu\text{m}$ ], 20[ $\mu\text{m}$ ]) については換気量が多いほど, 落下する粒子数が少なくなる傾向が得られた。15[回/h] の場合において投入粒子数に対する床に落下する粒子数の比率は 5, 20, 100, 500[ $\mu\text{m}$ ] の各粒子についてそれぞれ 1.6[%], 38.2[%], 39.1[%], 17.8[%] となっている。5[ $\mu\text{m}$ ] の粒子は換気によって除去されるものが大半を占めるため床に落下する粒子数は非常に少なくなっている。500[ $\mu\text{m}$ ] も床に落下する粒子がやや少なくなっているが, 今回の解析においては床のほかハンドドライヤ筐体や側壁等の面においても Lagange 粒子は排除される条件としているため, 質量が大きく気流の影響を受けにくい 500[ $\mu\text{m}$ ] の粒子は筐体壁面に衝突して計算から排除され, 筐体外に飛び出す粒子そのものが少なくなった結果であると考えられる。

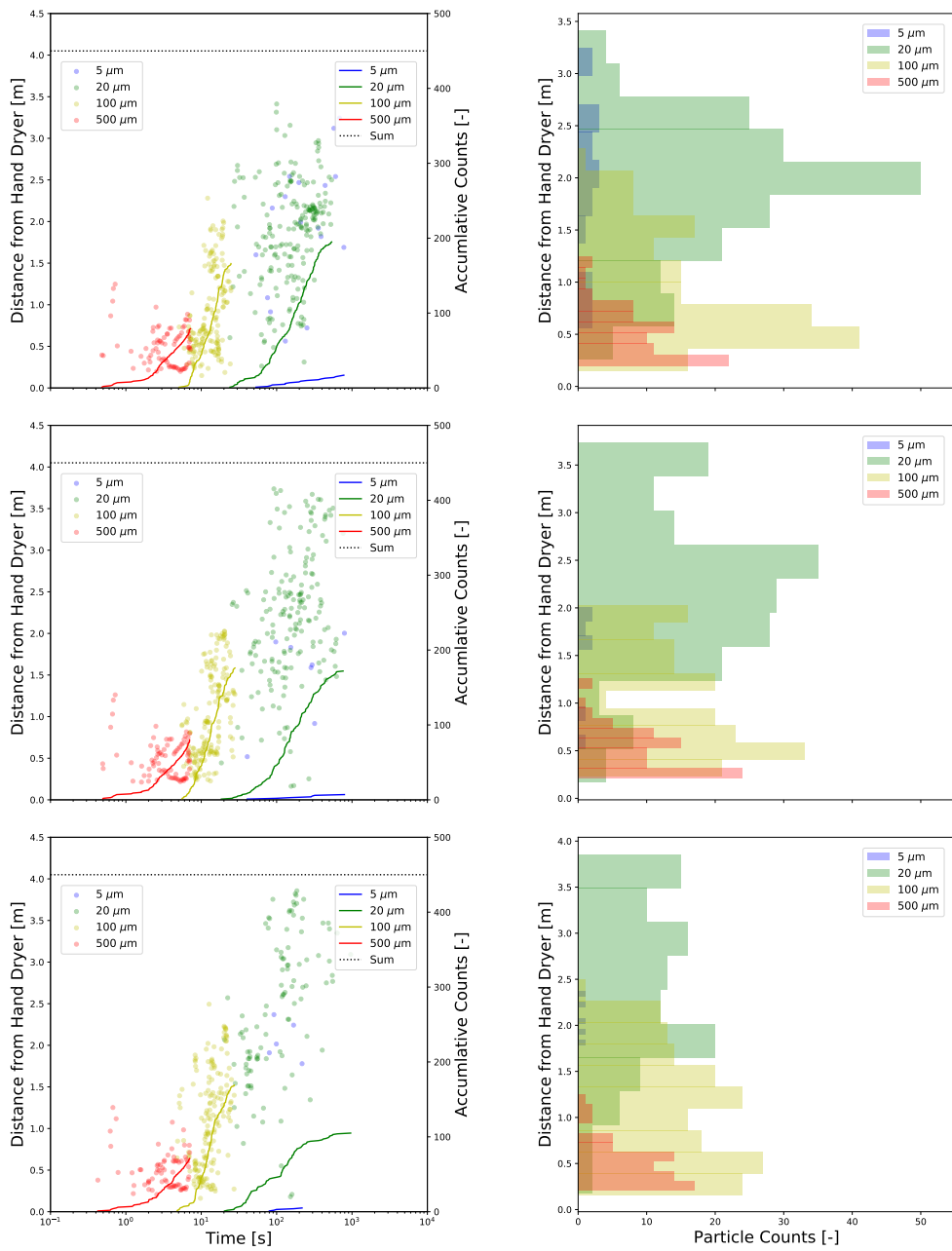


図 6: 各粒子の落下位置と時間の関係 : 図は上から換気量 7.5 [回/h], 15 [回/h], 30 [回/h] の場合を表している。左図の散布図は第 1 軸を参照しており、落下したときの時間とハンドドライヤからの距離を表している。左図の折れ線は第 2 軸を参照しており、各時刻における落下した粒子数の累積値を表している。右図は落下した粒子個数と位置をヒストグラムで表したものである。

### 3.3 本章のまとめ

トイレ空間内での飛沫シミュレーションを行い，基本的な挙動の分析を行った．続く4章では飛沫の発生量の推定と濃度場解析を，5章では北海道大学林教授<sup>5</sup>監修のもと感染リスクの試算を行った．

---

<sup>5</sup>北海道大学大学院工学研究院 建築都市空間デザイン部門 教授

## 4 解析 III：パッシブスカラを用いた汚染濃度拡散解析

### 4.1 解析概要と解析条件

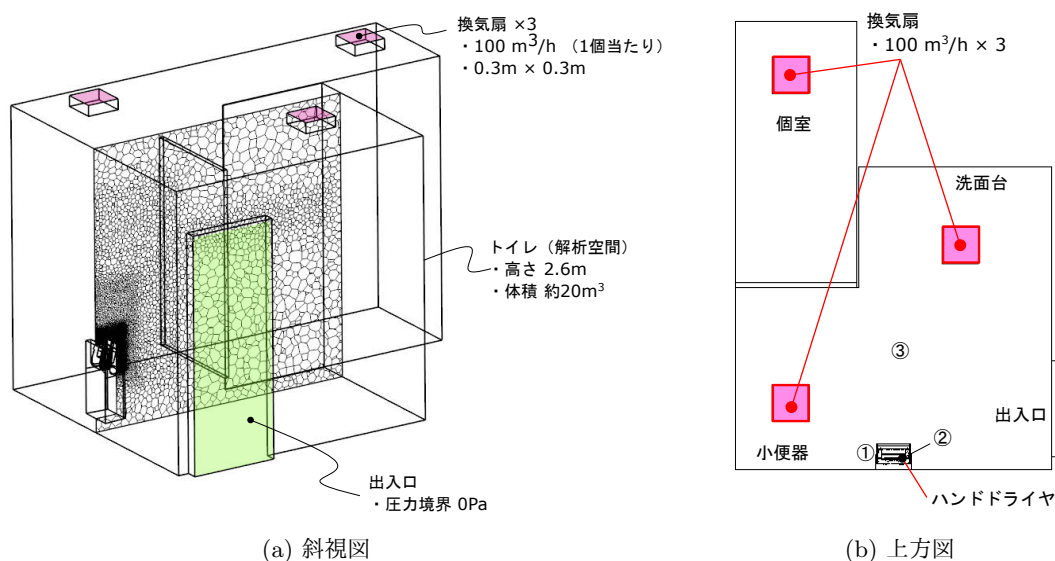


図 7: 解析空間 (中津川製作所ショールーム男性トイレ)

次に、飛沫の濃度場  $\varphi(x, t)$  を非定常ながれ中のパッシブスカラ (流体に影響を与えないスカラ量) の移流拡散方程式の解として求めることを考える。

気流解析の条件および解析領域は解析 II と同様である。濃度解析はパッシブスカラの移流拡散方程式を気流解析と連成させて解くことで行った。Lagrange 的な解析では、粒子の運動を直接解くため視覚的に理解しやすい結果が得られる一方、粒子数の増加に従い計算負荷も高くなるため、濃度等のスカラー分布や各種統計量を得ることが難しい。そこで Euler 的な手法の中で最も取り扱いが容易な本手法を採用した。ただし、粒子径の影響 (抗力や重力) は考慮することができないため、気流に乗って運動するとみなせる小さな粒子を対象として仮定していることに注意する。解析 I や II との用語の混同を避けるため、以下では濃度解析の対象を“粒子”ではなく“汚染”と呼ぶこととする。汚染濃度は単位体積当たりの飛沫の質量と定義し、飛沫に含まれる汚染物質 (ウイルス) の量にはよらないものとする。また、ここでも分裂、吸着、蒸発による質量変化は考慮しないものとする。拡散係数に関しては、分子拡散はほとんど無視できる [9] として、Schmidt 数を 10000 で与えた。ただし乱流拡散については考慮し乱流 Schmidt 数を 0.9 で与えた。汚染の発生は手から発生するもののみを考慮し、ハンドドライヤ稼働中に手の表面から一様かつ一定に  $M[\text{kg/s}]$  の汚染が発生する条件を課した<sup>6</sup>。ここで  $M$  は以下とした：

$$M = \begin{cases} 2.5 \times 10^{-9} & (\text{ハンドドライヤ ON 時}) \\ 0.0 & (\text{ハンドドライヤ OFF 時}). \end{cases} \quad (4.1)$$

$M$  は B 章の飛沫測定においてある測定点で得られた  $5[\mu\text{m}]$  以下の飛沫の質量濃度と、本章の解析で得られる同一の測定点における汚染濃度がおよそ一致するように決めたものである<sup>7</sup>。ここで  $5[\mu\text{m}]$  以下の粒子の発生量を汚染の発生量として選んだ理由は、3 章において重力の影響が小さく、パッシブスカラとしての取り扱いが妥当であると判断したためである。ハンドドライヤの稼働インターバルは  $20[\text{s}]$  に 1 回の使用 ( $10[\text{s}]$  間) を仮定し、 $120[\text{s}]$  間の解析を行った<sup>8</sup>。

<sup>6</sup>すなわち本解析においても汚染の発生メカニズムや非定常性までは再現していない

<sup>7</sup>ただし、実際には測定で検出される粒子は蒸発によって径変化している可能性がある。そこで 5 章ではこの減少量を考慮して発生量  $M$  を補正している。

<sup>8</sup>これは実際の使用頻度を想定したのではなく、B 章の試験条件と合わせたものである。詳細は 5.4 節で述べるが実際に想定される使用頻度は  $120[\text{s}]$  に 1 回程度である。

## 4.2 解析結果および考察

### 4.2.1 汚染濃度の実測結果との比較

実験と数値解析で得られた各測定点での汚染濃度（質量濃度）の時間変化を図 8 に示す。実験値は B 章における各時刻の汚染濃度を、代表粒径  $5[\mu\text{m}]$  以下の粒子に関して和をとったものであるただし、図 8 は 10 秒ごとの各インターバル（ハンドドライヤの稼働インターバル）における最大濃度をそのインターバルの代表濃度としてプロットしたものである。これは実測において位相のずれた各粒径の測定値を足し合わせたことや、解析において発生量の非定常性を考慮しなかったことから不明瞭になっている両者の時間変動を粗視化し比較しやすくするためである。図 8 より各測定点での汚染濃度が各時刻において 1 オーダー程度以下の誤差で一致していることがわかる。全体的に解析値の方がやや濃度を高く見積もっているが、本結果を利用した 5 章でのリスク評価にあたっては、ハンドドライヤの感染リスクを高く見積もる、すなわちより安全側で評価することになるため、問題ない誤差であると考えられる。

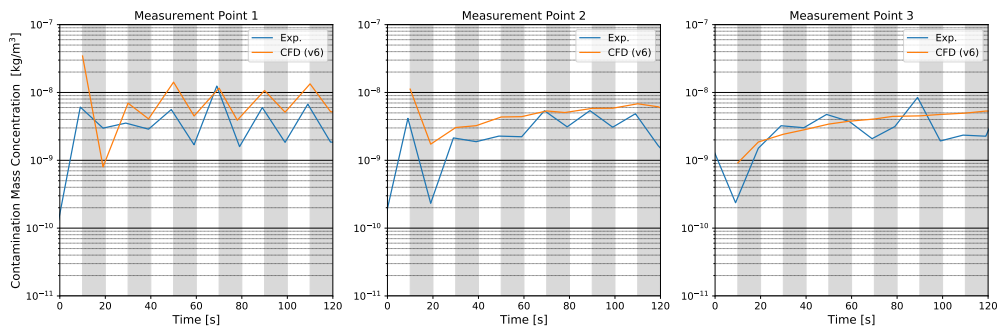


図 8: 実測と解析結果の比較: 左から測定点 1, 2, 3 の結果である。実測値は代表粒径  $5[\mu\text{m}]$  以下の粒子の質量濃度 (B 章) の和を用いており、10 秒ごとの各インターバルにおける最大濃度の時間変化をプロットしている。グレーの領域はハンドドライヤが停止している時間帯を表す。

### 4.2.2 場所による汚染濃度の違い

ハンドドライヤを中心とした各球面 (1.0, 1.5, 2.0, 2.5m) および呼吸域高さ ( $y = 1.6\text{m}$ ) における濃度場を図 9 に示す。ハンドドライヤの上方および斜め側方に濃度が高い領域が確認できる。上方の高濃度領域は解析 I, II でも確認された上方への飛沫による汚染である。この領域の汚染濃度は呼吸域平均濃度に対して 2-3 倍程度の汚染濃度であることがわかった。また、小便器横の壁付近ではやや濃度が高い領域があり、ハンドドライヤ側方へ飛散した飛沫による汚染があることがわかる。小便器に人が立っていた場合、汚染された気流がその人と衝突して舞い上がり、呼吸域に濃度がやや高い領域が形成される可能性があることを示唆する。また、個室内でも周囲と同程度の汚染が見られ、微小粒子はトイレ空間内に広く分布する可能性があることがわかる。これは 3 章で得られた結果とも一致する。一方、出入口から洗面台にかけて濃度がやや低くなっており、換気により新鮮な空気が供給されていることがわかる。十分に換気を行えば飛沫が直接飛散する場所以外の汚染濃度は下げることができるといえる。

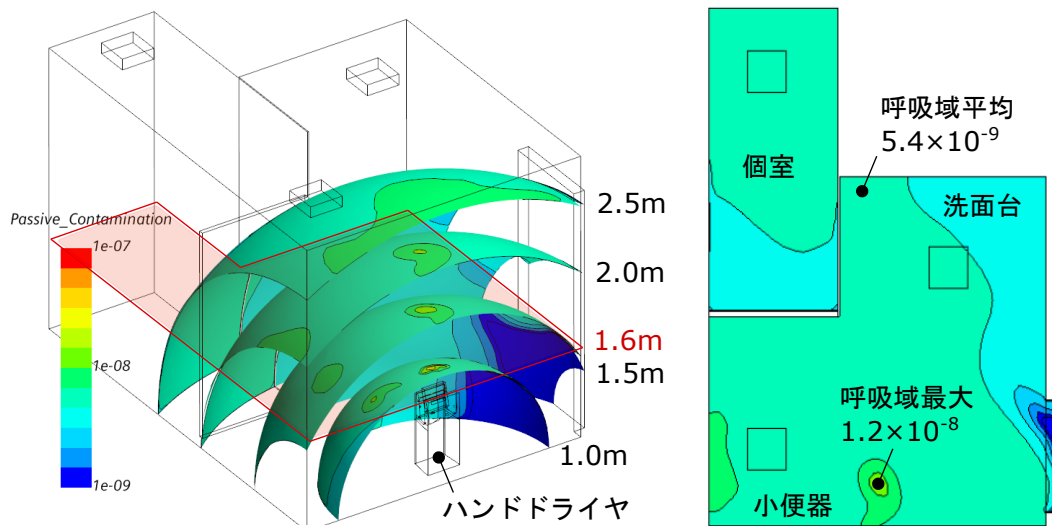


図 9: 汚染濃度場

### 4.3 本章のまとめ

Euler 的な手法を用いて汚染の濃度場解析を行い，パーティクルカウンタによる実測結果と比較した結果，各測定点における汚染濃度はおよそ一致し，ハンドドライヤによって飛散する  $5[\mu\text{m}]$  以下の飛沫量は平均で  $2.5 \times 10^{-9}$  程度であることがわかった．本章で得られた発生量と濃度分布を用いて感染リスク評価を 5 章にて行った．

## 5 ハンドドライヤによる感染リスクの評価【監修：北海道大学大学院 林基哉教授】

### 5.1 リスク評価の概要

ハンドドライヤによる飛沫の挙動と汚染濃度分布、飛沫発生量等が解析 I-III によって明らかになり、トイレ空間内で濃度の高い領域がわかった。しかし、これだけではハンドドライヤによる絶対的な、あるいはオフィスや他の衛生機器の使用等に対する相対的な感染のリスクを見積もることはできない。そこで、式 (1.2) の quanta 濃度を変数とした Wells-Riley 式を用いて、ハンドドライヤの使用による感染リスクを、一般的なオフィスにおける感染リスクと比較し相対的に試算する方法を提案する。

次節以降ではハンドドライヤのオフィスに対する感染リスクを以下のステップで見積もる：

- step 1. ハンドドライヤとの比較対象として、オフィスでの感染リスクを Wells-Riley 式 (1.1) から求める。
- step 2. ハンドドライヤとの quanta 発生量の相対比較のため、オフィスにおける飛沫発生量と感染価を種々の仮定から見積もる。
- step 3. ハンドドライヤの使用による飛沫発生量と感染価を種々の仮定および今回実施した解析や実験の結果を用いて見積もる。
- step 4. step2, 3 の各量の比から、ハンドドライヤの使用による感染リスクを相対的に求める。

ただし、本章におけるリスク計算においては必要な様々な値を複数の先行論文や任意の仮定から与えているものも多く、それらの値の取り方によってリスクの試算値は変わりうる。また、本章におけるリスク計算はあくまで工学的な視点での試算の一例であり、多くの仮定を含んだものであるため、計算されるリスクの正しさを保証することはできず、各分野の専門家の意見等が求められる。

### 5.2 Step1. オフィスにおける感染リスク

Step1. では、オフィスにおける感染リスクを文献値などを参照して Wells-Riley 式 (1.1) にて求める。COVID-19 の一般的な状況下での quanta 発生量は、[14] によると 14-48[h] 程度であると予想されている。ただしこれは他の感染症の基本再生産数と quanta 発生量の関係に COVID-19 の基本再生産数をあてはめて求められた数値であり、何らかの飛沫発生状況を想定して求められた数値ではないことに注意する。また、[6] によると quanta 発生量は標準時において 20[h] 程度であるとされている。ここでは  $q = 20[\text{h}]$  を代表値としてオフィスの感染リスク評価を行う。次に換気量を次のように定める。対象のオフィス状況として、20人の従業員中に1人の感染者がいる状況を想定する。よって  $I = 1$  である。建築物衛生法によれば、標準的なオフィスの換気量は1人当たり  $30[\text{m}^3/\text{h}]$  とされており、20人のオフィスでは  $Q = 600[\text{m}^3/\text{h}]$  となる。なお、このときの quanta の完全混合濃度  $\phi$  は  $q/Q = 0.033[1/\text{m}^3]$  となる。呼吸量  $p$  は  $p = 0.3[\text{m}^3/\text{h}]$  とし、曝露時間、すなわち1日あたりのオフィス滞在時間  $t$  は  $7[\text{h}]$  とする。このとき式 (1.1) よりオフィスにおける感染リスク  $P$  を計算すると、 $P = 6.76[\%]$  となる。

### 5.3 Step2. オフィスにおける飛沫発生量と感染価

オフィスでの感染リスクに対してハンドドライヤの感染リスクを相対的に評価することを試みる。そのためにはハンドドライヤの使用で発生する quanta の量を知る必要があるが、quanta は直接的に測定できる量ではなく、会話で発生する飛沫とハンドドライヤから発生する飛沫は性質も異なるため、直接的にそれを知ることは難しい。そこで quanta を飛沫量と感染価に分離することでオフィスと比較することを考える。

式 (1.1) における quanta や式 (1.2) における quanta 濃度は、本来飛沫の量と感染価（ウイルス濃度）の両方を兼ねた変数であるが、[2, 3, 10] ではそれを濃度と感染価に分離したモデルを用いた分析を行っている。



る。本報でも同様に quanta 発生量  $q$  や quanta 濃度  $\phi$  が飛沫発生量  $M$  や飛沫濃度  $\varphi$  それぞれと感染価  $\alpha$  の積に分離できると仮定する：

$$q = CM\alpha \quad (5.1)$$

$$\phi = C\varphi\alpha. \quad (5.2)$$

$\varphi$  は微小飛沫 ( $5[\mu\text{m}]$  以下) の濃度であり、 $\alpha$  は飛沫に含まれるウイルスの濃度に比例するとして仮定する。そのときの比例定数を  $C$  とする。このとき、オフィスとハンドドライヤ使用時の  $M$ ,  $\varphi$ ,  $\alpha$  それぞれの比を求めることができれば、既知であるオフィスにおける quanta 発生量や濃度からハンドドライヤによる quanta 発生量や濃度を相対的に求めることができ、感染リスクの相対的な比較が可能となる。以下ではまず飛沫発生量と感染価の見積もりを行う。

オフィスにおける飛沫発生量や感染価を示す直接的なデータは現時点でないため、次のような仮定を与えてそれらを見積もる：

- 感染者はオフィス内で 1 時間に 1 回程度の短い会話をする。
- 短い会話は [17] における “Stay Healthy” の発話 10 回に相当する。
- そのときの飛沫の発生量は  $0.003[\text{g}]$  とする。
- そのうちの  $0.4[\%]$  が  $5[\mu\text{m}]$  以下の飛沫である。
- オフィスで発生する飛沫は感染者の唾液であるとし、その感染価  $\alpha_{\text{office}}$  を 1 とする。

1, 2 番目の仮定は、 $q = 20$  に相当する標準的なオフィス環境として、筆者の経験上あまり多くない会話の頻度を想定して設定した。3 番目の仮定に関して、[17] 中に記載の値である  $3\pm 1[\text{mg}]$  の中央値を代表値とした。4 番目の仮定はハンドドライヤからの類推で求めた。ハンドドライヤによる全飛散水量は  $50[\text{mg}]$  と言われている一方、 $5[\mu\text{m}]$  以下の飛散水量は 4 章で求められた  $M$  にハンドドライヤの稼働時間  $10[\text{s}]$  と次節で詳細に説明する蒸発による影響の補正 (8 倍) を乗じた  $0.2[\text{mg}]$  となる。したがって  $5[\mu\text{m}]$  以下の飛沫は全飛散水量の  $0.4[\%]$  であると求められる。会話により発生する飛沫の粒径分布もこれと同じであると仮定して、全飛沫量の  $0.4[\%]$  が  $5[\mu\text{m}]$  以下の粒径であるとした。ここで、 $5[\mu\text{m}]$  以下の飛沫発生量を仮定したのは、 $5[\mu\text{m}]$  以下の飛沫を対象にした 4 章の解析によって求められた飛沫濃度とオフィスにおける飛沫濃度を比較するためである。5 番目の仮定は、あくまでオフィスとハンドドライヤの比を求めるという目的から、唾液の感染価を 1 として規格化して考えることとした。このとき、オフィスにおける  $5[\mu\text{m}]$  以下の飛沫発生量  $M_{\text{office}}[\text{kg}/\text{h}]$  は

$$M_{\text{office}} = 3.0 \times 10^{-6} \times 000.4 \quad (5.3)$$

$$= 1.2 \times 10^{-8} \quad (5.4)$$

となる。なお、完全混合を仮定すると飛沫濃度は  $M_{\text{office}}$  を換気量  $Q$  で割った値となる。感染価  $\alpha_{\text{office}}$  は仮定で与えた通り 1 である：

$$\alpha_{\text{office}} = 1. \quad (5.5)$$

#### 5.4 Step3. ハンドドライヤの飛沫発生量と感染価

次に、ハンドドライヤに関しても同様に飛沫発生量と感染価を見積もる。最初に 4 章の解析と実測試験からハンドドライヤから発生する飛沫量を見積もる。4 章では試験結果との合わせ込みからハンドドライヤ稼働時の汚染の発生量を  $M = 2.5 \times 10^{-9}[\text{kg}/\text{s}]$  としたが、Wells-Riley 式による感染リスクに使用するためにはこれを 1 時間あたりの平均発生量に換算する必要がある。その際以下の仮定を与える：

- ハンドドライヤの使用頻度は 2 分に一回とする。
- 感染者はオフィスと同じ 20 人に 1 人とし、感染性のウイルスを含んだ飛沫は感染者がハンドドライヤを使用したときのみ発生する。

- ハンドドライヤから発生する飛沫量は、試験における蒸発による減少量を考慮して  $M$  の 8 倍であるとする。

1つ目の仮定に関して、今回対象としたトイレは [7] によると最大 30 人が利用すること、また 1 人あたり最大 1[回/h] の頻度でトイレを使用することを想定して算出した。2つ目の仮定に関して、感染性のウイルスを含まない飛沫（感染者以外の手から飛散する飛沫）については汚染濃度として考慮しないこととし、全飛沫発生量（ $5\mu\text{m}$  以下）のうち 1/20（感染者の割合）が“感染性の”飛沫発生量であるとした。これは、機器に付着した水滴はハンドドライヤの使用によってほとんど再飛散することがないことが試験によって確認されたことを受けての仮定である。3つ目の仮定について、[13] によると、蒸発によって飛沫は元の大きさの 40-50[%] の大きさの飛沫核になるとあり、また [18] では粒径の小さな粒子は数秒以下で蒸発するとされている。したがって実測（B 章）で測定された粒子は飛沫核である可能性があり、その場合は元の飛沫の粒子は測定された粒子の 2 倍程度の直径、すなわち 8 倍程度の質量であることが考えられる。これらの知見からハンドドライヤから実際に発生する飛沫量は  $M$  の 8 倍とした。これらの仮定の下ハンドドライヤから発生する飛沫量  $M_{\text{HD}}[\text{kg}/\text{h}]$  は

$$M_{\text{HD}} = 2.5 \times 10^{-9} \times 3600 \times 8 \times \frac{10}{120} \times \frac{1}{20} \quad (5.6)$$

$$= 3.0 \times 10^{-7} \quad (5.7)$$

となる。つまり 1 時間当たりの時間平均で考えた場合、ハンドドライヤの使用によるウイルスを含んだ飛沫の発生量はオフィスにおける感染者の唾液の飛散量の 30 倍程度であると見積もられる。

次に、ハンドドライヤにより飛散する飛沫の感染価を試算する。ハンドドライヤは手洗いを実施した手に対して使用するため、ハンドドライヤにより飛散する飛沫は流水によって希釈されており、飛沫中に含まれるウイルス量（ここでは感染価はウイルス量に比例すると考える）は唾液と比べて少ない（低い）と考えられる。また、手洗いの度合によってその希釈度が異なることも考えられる。そこで一般的な手洗いを実施したときと手洗いが不十分なときとの感染価をそれぞれ次のように試算した。まず一般的な手洗いとして 15 秒間の流水すすぎを考える。このとき [11] ではウイルス量が 1/100 になるとされている。手洗い前の手に咳一回分の唾液が付着していると仮定し、手洗い後の手には [11] よりその 1/100 が残るとする。[17] によると咳一回分の唾液量は  $70 \pm 50[\text{mg}]$  であり、また手洗い後に手に付着している水量を当社で測定したところ  $2000[\text{mg}]$  程度であった。このとき中央値を代表値としてハンドドライヤによって飛散する飛沫の感染価  $\alpha_{\text{HD}}$  を計算すると

$$\alpha_{\text{HD}} = \alpha_{\text{office}} \times \frac{70 \times 0.01}{2000} \quad (5.8)$$

$$= 3.5 \times 10^{-4} \quad (5.9)$$

となる。また手洗いが不十分な場合はその 100 倍の感染価となり、 $\alpha_{\text{HD}} = 3.5 \times 10^{-2}$  となる。

## 5.5 Step4. ハンドドライヤの使用による感染リスク

5.2 節と 5.4 節で得られた飛沫発生量と感染価からハンドドライヤの使用による感染リスクを評価する。5.2 節においてオフィスにおける quanta 発生量が  $q = 20[\text{h}]$  であるときの感染確率（1 日）は  $P = 6.76[\%]$  であることがわかった。これは quanta が完全混合すると仮定したときの感染リスクである。ハンドドライヤの使用による感染リスクとしても、まずハンドドライヤから発生する quanta が完全混合した場合の感染確率を求める。感染者としてはハンドドライヤ 1 台とみなし、 $I = 1$  とする。[5] によると使用頻度の高いトイレの換気回数は 10-15[回/h] と定められており、本計算では換気の良いトイレを想定して  $Q = 15[\text{回}/\text{h}] = 300[\text{m}^3/\text{h}]$  とする。呼吸量  $p$  はオフィスと同じ  $p = 0.3[\text{m}^3/\text{h}]$  とし、曝露時間、すなわち 1 日あたりのトイレ滞在時間  $t$  は多めに見積もり  $0.5[\text{h}]$  とする。quanta 発生量は、飛沫発生量と感染価に比例すると仮定したので、前節までの結果から

$$q_{\text{HD}} = q_{\text{office}} \times \frac{M_{\text{HD}}\alpha_{\text{HD}}}{M_{\text{office}}\alpha_{\text{office}}} \quad (5.10)$$

となる。一般的な手洗い時には  $q_{HD} = 0.175$  となり、quanta が完全混合すると仮定した場合の感染確率は式 (1.1) より  $P = 0.0087[\%]$  となる。これはオフィスの 1/1000 程度である。一方、手洗いが不十分な場合には  $q_{HD} = 17.5$  となり  $P = 0.87[\%]$  となる。これはオフィスの 1/10 程度である。

さらにハンドドライヤ使用時の呼吸域や特に高濃度な領域における感染リスクを図 10 に従って考える。手洗いの条件としては流水すすぎの場合を想定する。汚染の完全混合濃度  $M_{HD}/Q$  は  $3.0 \times 10^{-7}[\text{kg/h}]/300[\text{m}^3/\text{h}] = 1.0 \times 10^{-9}[\text{kg}/\text{m}^3]$  である一方、ある時刻 ( $\tau_1 = 121[\text{s}]$ ) における呼吸域平均濃度、呼吸域最大濃度はそれぞれ  $5.4 \times 10^{-9}[\text{kg}/\text{m}^3]$ ,  $1.2 \times 10^{-8}[\text{kg}/\text{m}^3]$  程度であった (4.2.2 節)。したがって非定常性・非一様性の強い今回のケースでは、従来の完全混合を仮定した Well-Riley 式 (1.1) では感染リスクを低く見積もってしまう可能性がある。そこで非定常性・非一様性を考慮した局所 Wells-Riley 式 (1.2) を考える。式 (1.2) では、式 (1.1) の  $qt/Q$  項が  $\int \phi dt$  に置き換わり、局所的な quanta 濃度の時間積分として表される。これは図 10 中の quanta 濃度の時間変化曲線と横軸が作る図形の面積に相当する。さらに式 (1.2) の quanta 濃度は前節までと同様に飛沫濃度と感染価に分離できる：

$$P = 1 - \exp(-Ip\phi(\mathbf{x})t) \quad (5.11)$$

$$= 1 - \exp(-IpC\varphi(\mathbf{x})\alpha t). \quad (5.12)$$

ただし今回の解析においては quanta 濃度 ( $\propto$  飛沫濃度  $\times$  感染価) の非定常性まで正しく評価することはできなかったため式 (5.12) では飛沫濃度は時間的に一定であるとし、位置  $\mathbf{x}$  にのみよるとしている。つまり、図 10 中の矩形領域の面積 (ある瞬時の quanta 濃度を代表値として曝露時間中は濃度一定と考えたもの) で評価を行うこととする。

前述した飛沫の完全混合濃度、呼吸域平均濃度、呼吸域最大濃度の比は 1 : 5.4 : 12 であった。したがって簡単な手洗いを実施した場合について、呼吸域平均濃度、呼吸域最大濃度のそれぞれにおける感染確率を式 (5.12) より計算するとそれぞれ 0.047[%], 0.10[%] となる。

感染リスクの試算に使用した諸量を表 3, 表 4 に、各条件における感染リスクを表 5 にまとめる。誤差範囲が既知であるものや値の上限 (下限) がある程度限定できるものについてはそれについてもあわせて記載した。表からも分かるようにそれぞれの条件は値に幅を持っており、これらが変わると本章で述べたリスクの値は変わりうる。

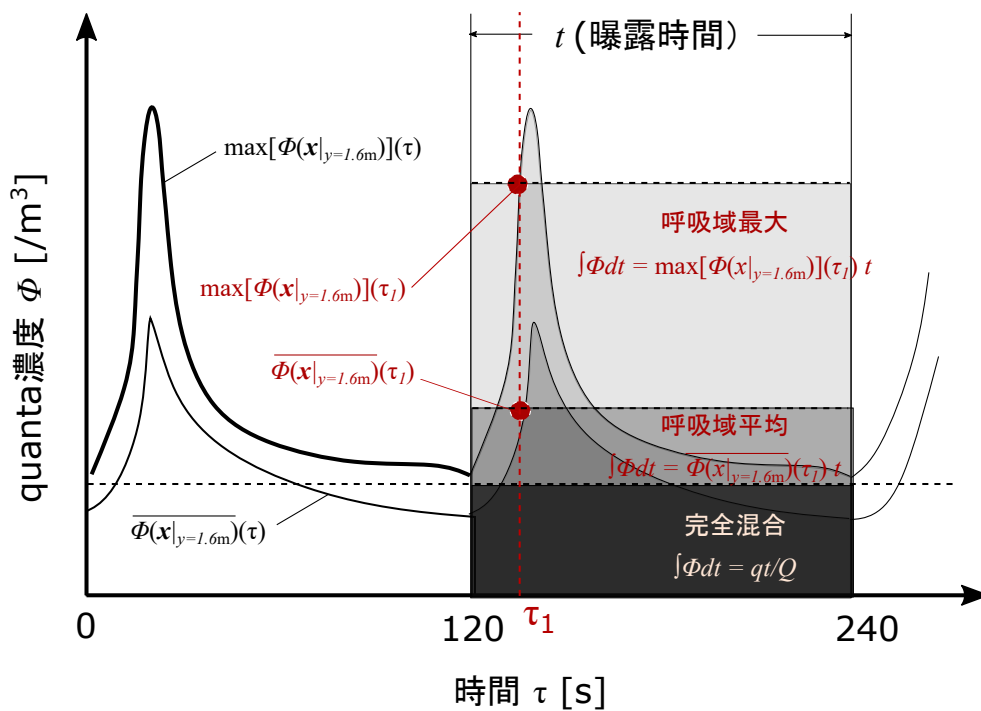


図 10: 局所的なリスク試算の概念図: 太い実線は呼吸域高さにおける quanta 濃度の最大値を表し, 細い実線は呼吸域高さにおける quanta 濃度の平均値を表す. 赤丸は前述の最大値および平均値の時刻  $\tau_1$  における瞬時値を表す. 図中の曲線と横軸が作る網掛け部の面積が本来式 (1.2) における  $\int \phi dt$  項に相当するが, 本節における呼吸域最大リスクおよび呼吸域平均リスクの試算では, 非定常性までは考慮せず時刻  $\tau_1$  における各 quanta 濃度を代表値とすることで計算を行った. なお,  $\tau_1 \doteq 121[\text{s}]$  とした.

表 3: リスク試算に使用した条件の値 (オフィス).

	単位	下限	上限	代表値
従業員数	人	-	-	20
感染者数	人	-	-	1
換気量	m <sup>3</sup> /h	-	-	600
呼吸量	m <sup>3</sup> /h	-	-	0.3
暴露時間	h	-	-	7
一回の会話で発生する飛沫量	g	0.002	0.004	0.003
1 時間当たりの会話回数	回	-	-	1
5 $\mu\text{m}$ 以下の飛沫の割合	%	-	-	0.4
感染価	-	-	-	1

表 4: リスク試算に使用した条件の値 (トイレ・ハンドドライヤ)。

	単位	下限	上限	代表値
従業員数	人	-	-	20
感染者数	人	-	-	1
換気量	m <sup>3</sup> /h	200	300	300
呼吸量	m <sup>3</sup> /h	-	-	0.3
暴露時間	h	-	0.5	0.5
5 $\mu$ m 以下の飛沫の割合	%	-	-	0.4
蒸発による粒径変化	-	0.4	0.5	0.4
小便器個数	個	-	-	1
トイレ容積	m <sup>3</sup>	-	-	20
トイレ使用人数	人	-	30	30
トイレ回数/人・時	回/人・h	-	1.0	1.0
手についている唾液量 (咳一回)	mg	20.0	120.0	70.0
手洗い後残存水量	mg	-	-	2000
手洗い効果	-	0.01	1	0.01,1

表 5: 各条件下における感染リスクの試算値

対象	条件	濃度条件	$\phi$ [/m <sup>3</sup> ]	オフィス比 [%]	P[%]	オフィス比 [%]
オフィス		完全混合	0.033	100	6.76	100.0
ハンドドライヤ	流水手洗い	完全混合	0.001	2	0.0087	0.1
		呼吸域平均	0.003	9	0.047	0.7
		呼吸域最大	0.007	21	0.10	1.6
		手洗い不十分	完全混合	0.058	175	0.87

## 5.6 本章のまとめ

種々の仮定のもとハンドドライヤの使用による感染リスクを試算する方法の一例を示した。代表値を用いた試算によれば、一般的なオフィスにおける一日あたりの感染リスク 6.76[%] に対して、簡単な手洗いを実施していれば、ハンドドライヤの使用による一般的な感染リスクは 0.0087[%] であり、オフィスより十分低く、濃度が高い場所においても感染リスクは 0.1[%] 程度に抑えられることがわかった。手洗いが不十分な場合においても感染リスクは 0.87[%] であった。感染リスクがオフィスに比べて低い大きな要因としては、手から飛散する飛沫は手洗いによって希釈され唾液より感染価が低いと考えられること、トイレに滞在する時間はオフィスに滞在する時間に比べて十分短いことが挙げられる。なお、本章のリスク評価手法は北海道大学 林基哉教授の監修を受け、考え方に概ね問題がないとのコメントをいただいている。

## 6 まとめ

本報では数値解析および実測試験により、ハンドドライヤの使用によって発生する飛沫の挙動を分析したとともに、局所的な濃度場を考慮した感染リスクモデル式を用いてオフィスにおける感染リスクとハンドドライヤによる感染リスクを比較し試算した。ハンドドライヤの使用によって他の衛生機器と比較して少ないもののヒトの呼吸域にも飛沫は飛散するが、1日の感染リスクとしてはオフィスに比べて小さくなる試算となった。特に、簡単な手洗いさえ実施していればトイレ内のうち相対的に飛沫の濃度が高い場所においても感染リスクはオフィスの数十分の一程度となる試算となった。

ハンドドライヤの使用の是非を検討する際には、ハンドドライヤが停止していることによる感染リスク (手を洗わない人や濡れたままの手でドアノブに触れる人が増える等) や社会的デメリット (設置事業者の経済的コスト等) も考慮して判断することが求められる。

## 参考文献

- [1] 浅井, “室内空気汚染とエアロゾルの数値シミュレーション”, エアロゾル研究, 10(3), 179-184(1995).
- [2] 伊藤ら, “病院待合スペースを対象とした非定常不均一濃度分布解析と疫学モデルの連成解析による空気感染伝播予測 第1報”, 空気調和・衛生工学会論文集, 2011.
- [3] 伊藤ら, “病院待合スペースを対象とした非定常不均一濃度分布解析と疫学モデルの連成解析による空気感染伝播予測 第2報”, 空気調和・衛生工学会論文集, 2011.
- [4] 奥山, “流体中の微粒子の挙動”, 地学雑誌 98-6(1989).
- [5] 「空調・衛生工学会規格」HASS 102 1972.
- [6] 倉淵, “新型コロナ対策として換気量はどうやって決めるべきか”, 空気環境運営委員会シンポジウム講演資料, 2020.
- [7] 「事務所衛生基準規則」第17条.
- [8] 昭和大学, “<https://www.showa-u.ac.jp/albums/abm.php?d=755&f=abm00002848.pdf>”
- [9] 日本エアロゾル学会, “室内環境のエアロゾル-その挙動と換気”.
- [10] 福岡ら, “閉鎖空間内の非定常不均一濃度分布と疫学モデル連成解析による曝露リスク評価”, 日本建築学会環境系論文集 第76巻 第659号, 25-33, 2011.
- [11] 森ら, “Norovirusの代替指標として Feline Calicivirus を用いた手洗いによるウイルス除去効果の検討”, 2006.
- [12] 吉原ら, “水滴の急加速分裂に関する研究”, 日本船舶機関学会誌 第25巻 第12号, 1990.
- [13] Brent Stephens, “HVAC filtration and the Wells-Riley approach to assessing risks of infectious airborne diseases”, 2012.
- [14] Dai H., et al, “Association of infected probability of COVID-19 with ventilation rates in confined spaces: a Wells-Riley equation based investigation”
- [15] E.L.Best, et al, “Microbiological comparison of hand-drying methods: the potential for contamination of the environment, user, and bystander”, Journal of Hospital Infection 88 (2014) 199-206.
- [16] Hallett S, Toro F, Ashurst JV. Physiology, Tidal Volume. StatPearls.
- [17] Scott H. Smith, et al, “Probability of aerosol transmission of SARS-CoV-2”,
- [18] Xie X, et al, “How far droplets can move in indoor environments – revisiting the Wells evaporation-falling curve”

## A 気流解析の妥当性検証

ここでは本報で行った気流解析について、その結果が妥当なものであるかを検証する。中津川製作所にて行った筐体周りの簡易な流速測定結果と、流体解析で得られた速度場を比較する(図 11)。図 11 より、ほとんどの点で実測結果と解析結果で良好な一致を示していることがわかる。筐体上方中央の1点で誤差が大きくなっているが、手のモデルとして実測では実物の手、解析では板を使用していることが主原因であると考えられ、解析精度による誤差ではなくモデル誤差であると考えられる。測定値についても簡易な測定であるため測定誤差が含まれていると考えられる。また、解析 II,III では解析領域の拡大による計算メッシュ数の増加を抑えるため、筐体周りのメッシュをかなり粗く設定した。解析領域が異なるため単純な比較はできないが、図 12 および図 11 より、解析領域の違いの影響が少ない筐体近くでは定量的にも定性的にも両者ともに比較的良好に一致しているため、メッシュの粗大化による誤差も大きくはないと結論付けられる。

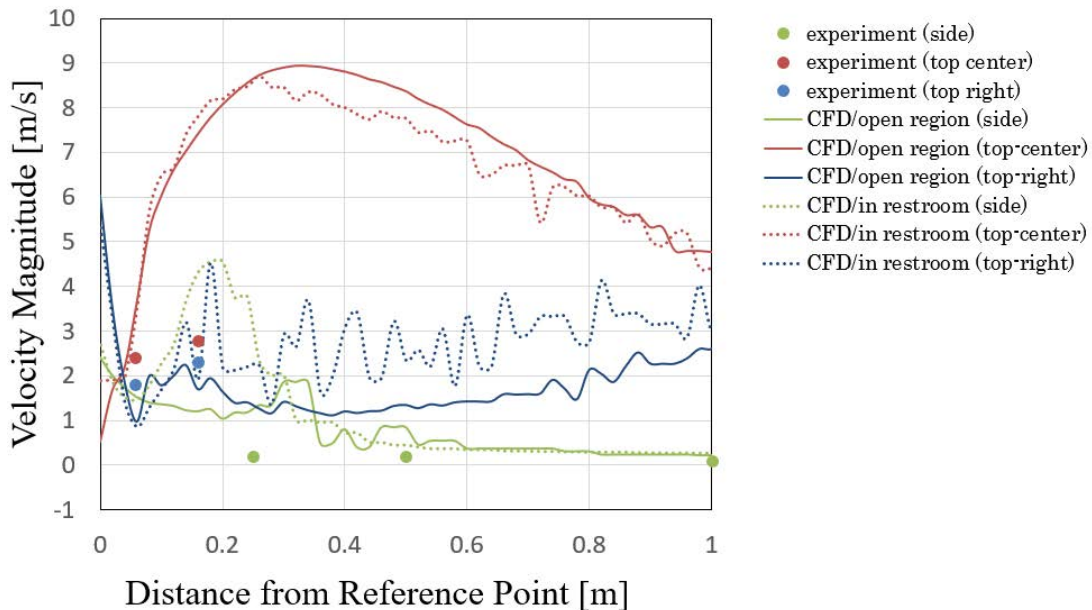


図 11: 各測定点における流速の比較: 測定位置は筐体の 1. 側方, 2. 上方中央, 3. 上方右の 3 方向についてそれぞれ基準点を定め、そこからの距離で整理した。中実点が実測結果、実線が解析 I の結果、点線が解析 II,III の結果である。

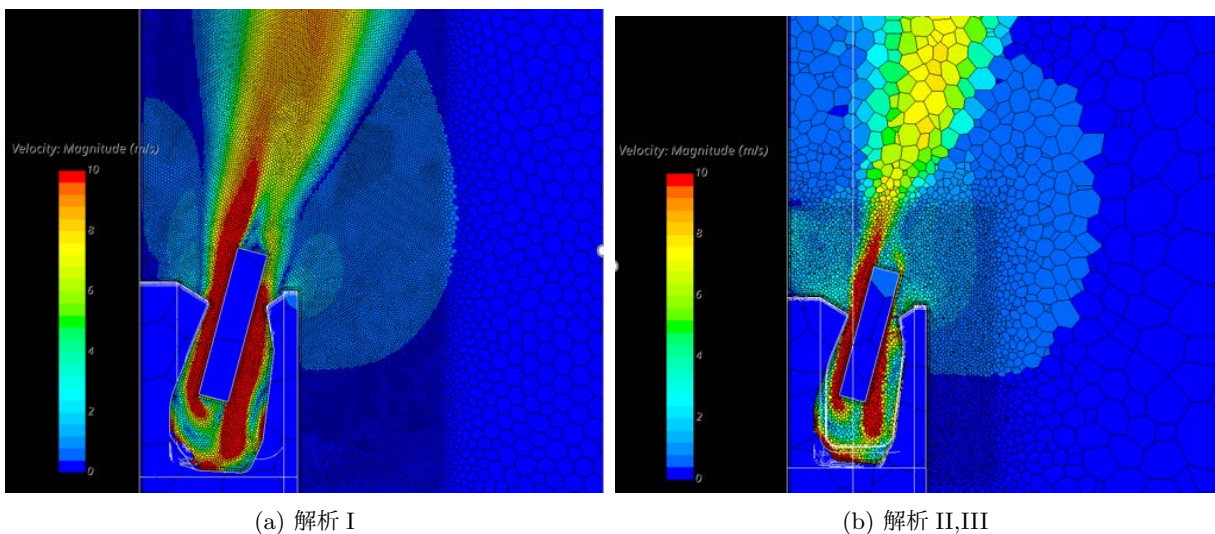


図 12: ハンドドライヤ稼働中の流速分布と計算メッシュ: いずれもハンドドライヤの中央を通る断面における結果を示している。(a)は解放空間での解析(解析 I), (b)はトイレ空間内での解析(解析 II,III)の結果を示しており、それぞれで解析メッシュの解像度は異なっている。

## B パーティクルカウンタによる濃度測定実験

ハンドドライヤ使用時のエアロゾル発生量およびその他のトイレ内衛生機器を使用する際のエアロゾル発生量について、パーティクルカウンタを用いた測定実験を実施した。実験は解析空間に用いた中津川製作所ショールーム男子トイレにて行った。

### B.1 実験内容

以下の実験を実施した。

実験1：ハンドドライヤ使用時に機器からのエアロゾル発生量の確認

連続してハンドドライヤを使用する場合、手挿入部内には使用者の手から除去された水滴が付着する。ハンドドライヤ使用によって、その付着した水滴からのエアロゾル発生量をパーティクルカウンタにて測定する。

実験2：トイレ内の衛生機器使用時のエアロゾル発生量の確認

ハンドドライヤ使用時に使用者の手から発生するエアロゾル発生量、洗面台にて流水での手洗い時に発生するエアロゾル発生量および大便器のフラッシュ時に発生するエアロゾル発生量をパーティクルカウンタにて測定する。

実験3：ハンドドライヤ使用時のトイレ空間のエアロゾル量の測定

換気が通常に行われているトイレ空間において、ハンドドライヤが連続して使用される場合のエアロゾル量を測定する。本測定結果をもとに、4.1節の汚染の発生量を設定<sup>11</sup>する。

### B.2 測定環境および測定機器

測定空間の概略を図14に示す。測定は代表粒子径：0.3, 0.5, 1.0, 2.0, 5.0  $\mu\text{m}$ 以上、吸引流量：2.83L/minのパーティクルカウンタ（株式会社エアリーテクノロジー製 型式：P8-306, リオン株式会社製 型式KC-52）を用いた。パーティクルカウンタの設置位置を図15に示す。なお、ハンドドライヤを用いた実験では測定器1の位置は解析と実験で筐体を挟んで左右逆になっているが、左右差は誤差として以下では同一の測定点として考える。

測定を実施する前に、室内に設置したHEPAフィルタ付の空気清浄機（三菱電機ホーム機器株式会社製 型式：MA-83H-W, 処理風量：8.3 $\text{m}^3/\text{min}$ ）にて測定空間の塵埃を可能な限り除去した。

また、ハンドドライヤ運転時に機器内部から微細な塵埃が発生する可能性があるため、HEPAフィルタを通した空気をハンドドライヤに供給する方法とし、ノズルから噴出する風速を運転モード「強」と同等とした。

---

<sup>11</sup>汚染発生量を任意に設定した予備解析を一度実施し、各測定位置での実験と解析の濃度の比を見積り、本解析ではその比から粒子発生量を再設定した。パッシブスカラの移流拡散方程式はスカラ量に対して線形であるため、任意の発生量で解析を行い、後処理で実験と合わせてもよい。



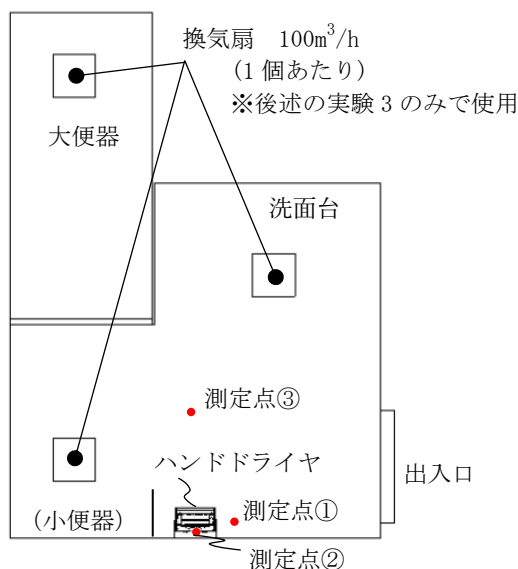


図 14. 測定空間の概略(空間容積:約 20m<sup>3</sup>)

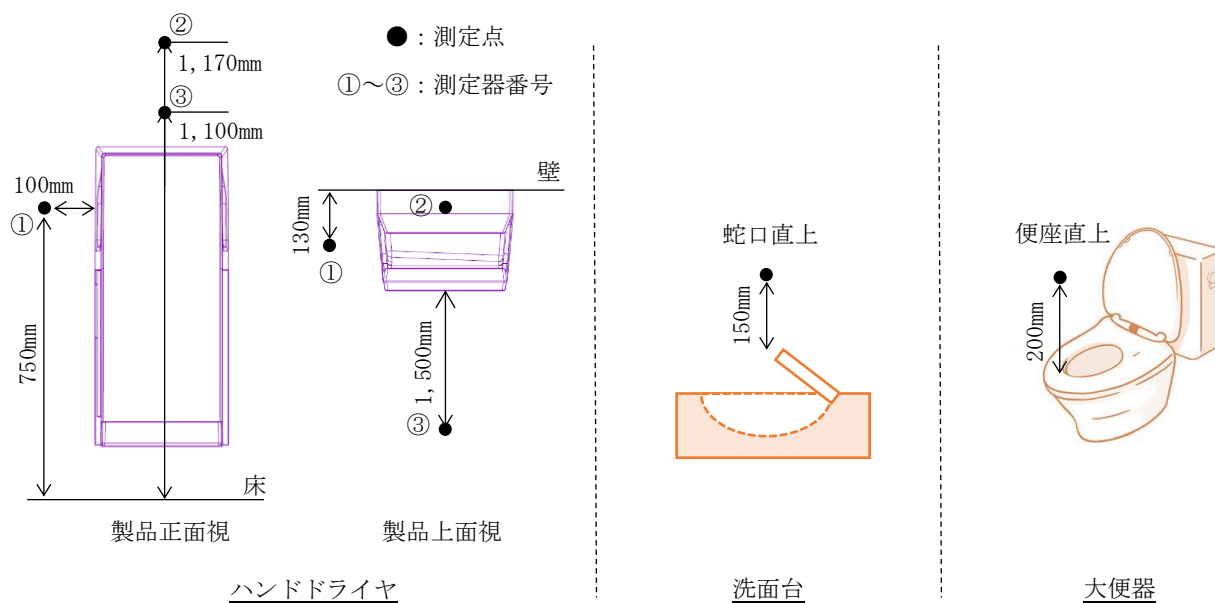


図 15. 測定器の位置

### B.3 実験条件と手順

#### B.3.1 実験1: ハンドドライヤ使用時に機器からのエアロゾル発生量の確認

ハンドドライヤの手挿入部に霧吹きを使って水滴を付着させる。付着させる水滴量は手挿入部に溜めることのできる4mLとした。水滴を付着とさせる前と後でハンドドライヤを連続運転し、パーティクルカウンタで測定する。ハンドドライヤを運転させる際は、手は濡らさずに行い、霧吹きによる水滴付着の影響を排除するために、測定はハンドドライヤ運転開始の60秒後から行った。

#### B.3.2 実験2: トイレ内の衛生機器使用時のエアロゾル発生量の確認

各衛生機器の使用条件および動作サイクルを表5に示す。各条件におけるエアロゾル発生量をパーティクルカウンタで測定する。

表5；使用条件

機器	使用条件，動作サイクル
ハンドドライヤ	水道水を満たした水槽に両手を浸けた後に，軽く手を3回払って水切りを行う．手の指は伸ばし，適度に開いた状態でハンドドライヤに手を上から挿入し，運転開始後に5秒間で上方に手を抜く．その後に，製品側面より手を再度挿入して，1回目と同様に5秒間で上方に手を抜く．この動作を20秒サイクルで2分間行う．
洗面台	水道水(流量4.8L/min)で15秒間手洗いをを行う．この動作を30秒サイクルで2分間行う．
大便器	「大」で流水を行う．この動作を20秒サイクルで2分間行う．

### B.3.3 実験3: ハンドドライヤ使用時のトイレ空間のエアロゾル量の測定

空気清浄機を用いて室内の塵埃を除去した後に，換気扇(図14)をONにする．換気により出入口から流入する塵埃を含む空気は，出入口に空気清浄機を設置して除塵した後に，室内に吸気させる．

塩水(1.2%濃度，ハンドドライヤ使用による核を含んだエアロゾル飛沫を想定)を満たした水槽に両手を浸けた後に，軽く手を3回払って水切りを行う．手の指は伸ばし，適度に開いた状態でハンドドライヤに手を上から挿入し，運転開始後に5秒間で上方に手を抜く．その後に，製品側面より手を再度挿入して，1回目と同様に5秒間で上方に手を抜く．この動作を20秒サイクルで2分間行う．各条件におけるエアロゾル発生量をパーティクルカウンタで測定する．

## B.4 測定結果および考察

### B.4.1 実験1

実験で得られた各代表粒径の個数濃度<sup>12</sup>を図15に示す．手挿入部近傍の測定器1および2のいずれにおいても，手挿入部内の水滴有無による差はなく，測定された粒子は実験前に空気清浄機で除塵しきれなかった塵埃が測定されたと考える．よって，ハンドドライヤ使用時に機器に付着した水滴からエアロゾルは発生していないと考える．測定器1においては，1 $\mu$ m以上の粒子は水滴あり，なしともに測定されなかった．

### B.4.1 実験2

実験で得られた各代表粒径の個数濃度<sup>13</sup>および代表粒子径の球を仮定して単位体積当たりの粒子質量(質量濃度)に変換したものを図16に示す．また，各衛生機器の動作サイクルにおける各代表粒径の個数濃度のピーク平均値を図17に示す．各衛生機器の使用時にエアロゾルが発生していることが確認できた．粒径0.3 $\mu$ mは大便器のフラッシュ時が最も多く発生(大便器>洗面台>ハンドドライヤ)しており，粒径5 $\mu$ mは洗面台での手洗い時が最も多く発生(洗面台>大便器>ハンドドライヤ)していた．

各粒径において，ハンドドライヤ使用時に発生するエアロゾルは，他の衛生機器に比べて低い結果となった．

### B.4.3 実験3

実験で得られた各代表粒径の個数濃度<sup>12</sup>を図18に示す．測定器1-3のいずれにおいても，粒子径が小さい粒子ほど測定個数が多くなっている傾向がみられる．5.0 $\mu$ m以上の粒子については測定される個数が非常に少なくなっており，有意な測定結果を得ることが難しいと考えられる．

また，ハンドドライヤのON/OFFに合わせて個数濃度も増減しており，比較的良好な測定ができていると考えられる．測定器3については測定個数の増減が鈍くなっており，ハンドドライヤから離れた位置では気流による拡散によってハンドドライヤのON/OFFの影響が小さくなるのがわかる．

さらに実験で検出された各代表粒径の粒子に対して，代表粒子径の球を仮定して単位体積当たりの粒子質量(質量濃度)に変換したものを図19に示す．個数では粒径の小さいものほど多い傾向だったが，質量で見ると大きい粒子ほど大きくなる傾向がみられる．すなわち，飛沫中のウイルス濃度が粒径によらず一定であると仮定すると，単位体積当たりの空気中に含まれるウイルス量は粒径の大きい粒子に含まれるものが支配的であると考えられる．代表粒径5.0 $\mu$ m以下の粒子の質量濃度の総和を求めることで，解析と比較するためのデータとすることができる．

<sup>12</sup>0.047Lあたりの個数．今回使用したパーティクルカウンタでは1[s]で0.047[L]の空気を吸引し，それに含まれる粒子の個数をカウントする．

<sup>13</sup>1Lあたりの個数．1[s]で0.047[L]の空気を吸引してカウントされた粒子の個数を1Lあたりに換算する．

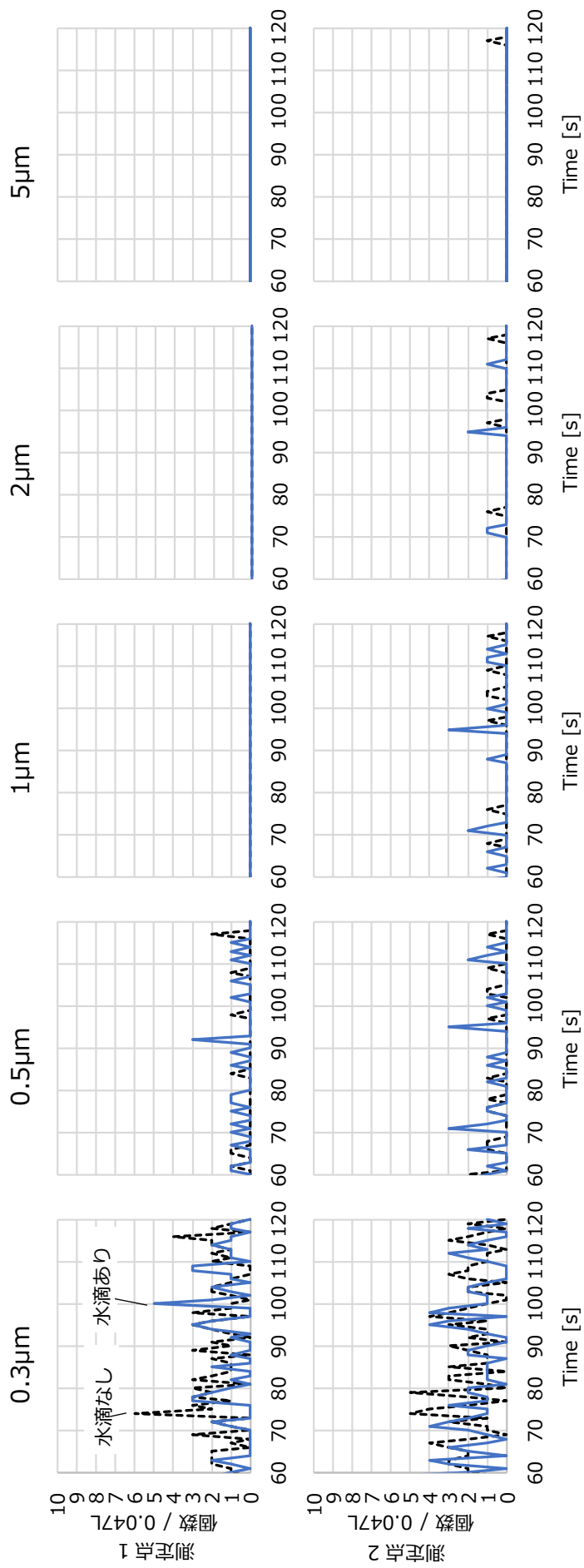


図 15: 手挿入部内の水滴あり, なしの場合の粒子個数濃度の時間変化

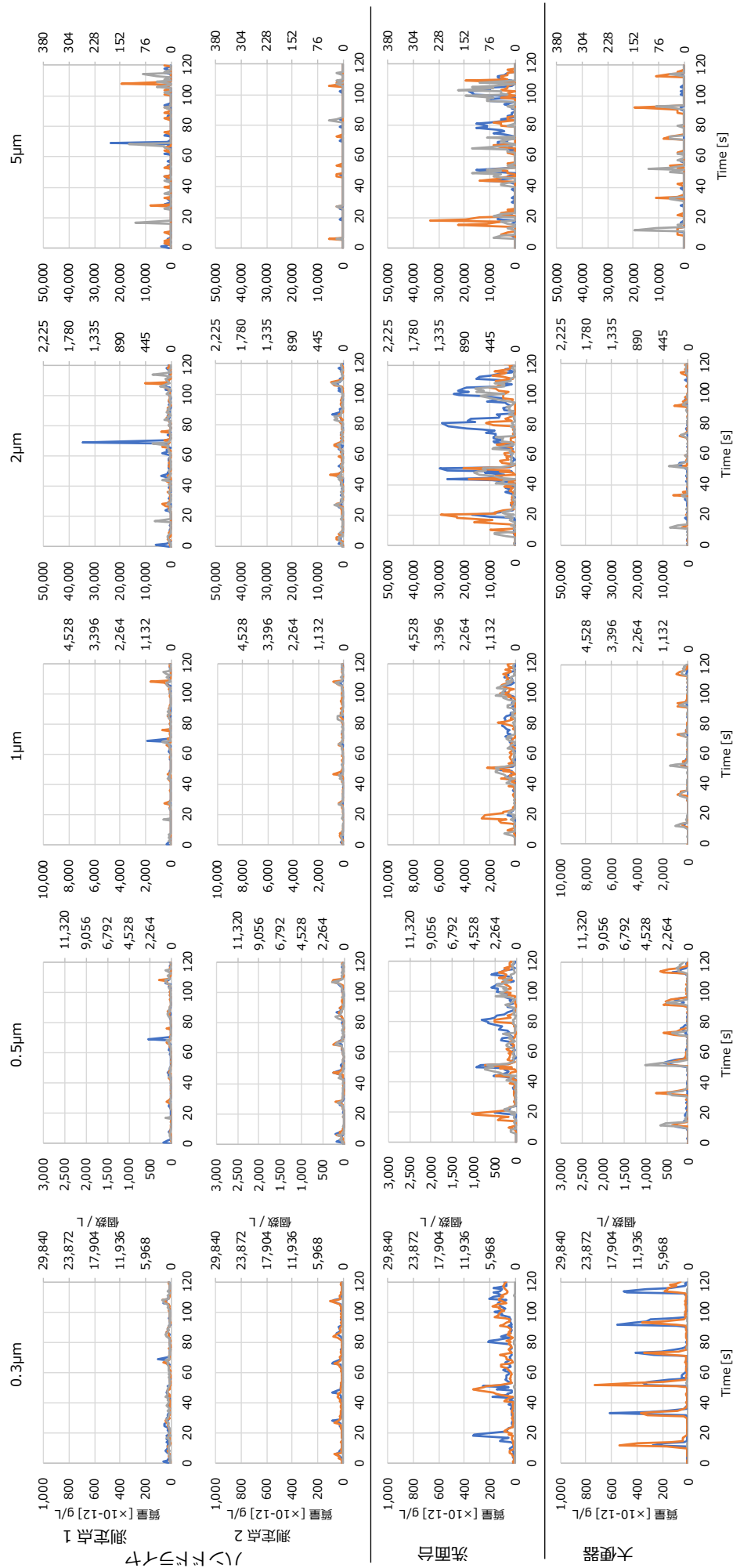


図 16: 各衛生機器の使用時の粒子個数濃度の時間変化 (試行回数: 3 回)

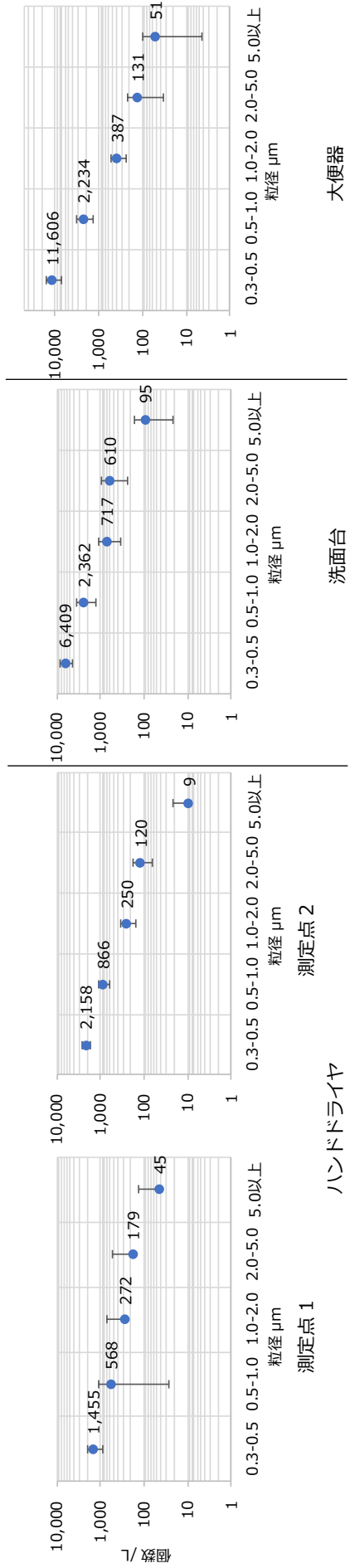


図 17: 各衛生機器の動作サイクルにおける各代表粒径の個数濃度のピーク平均値 (図 16 の実測値から試算)

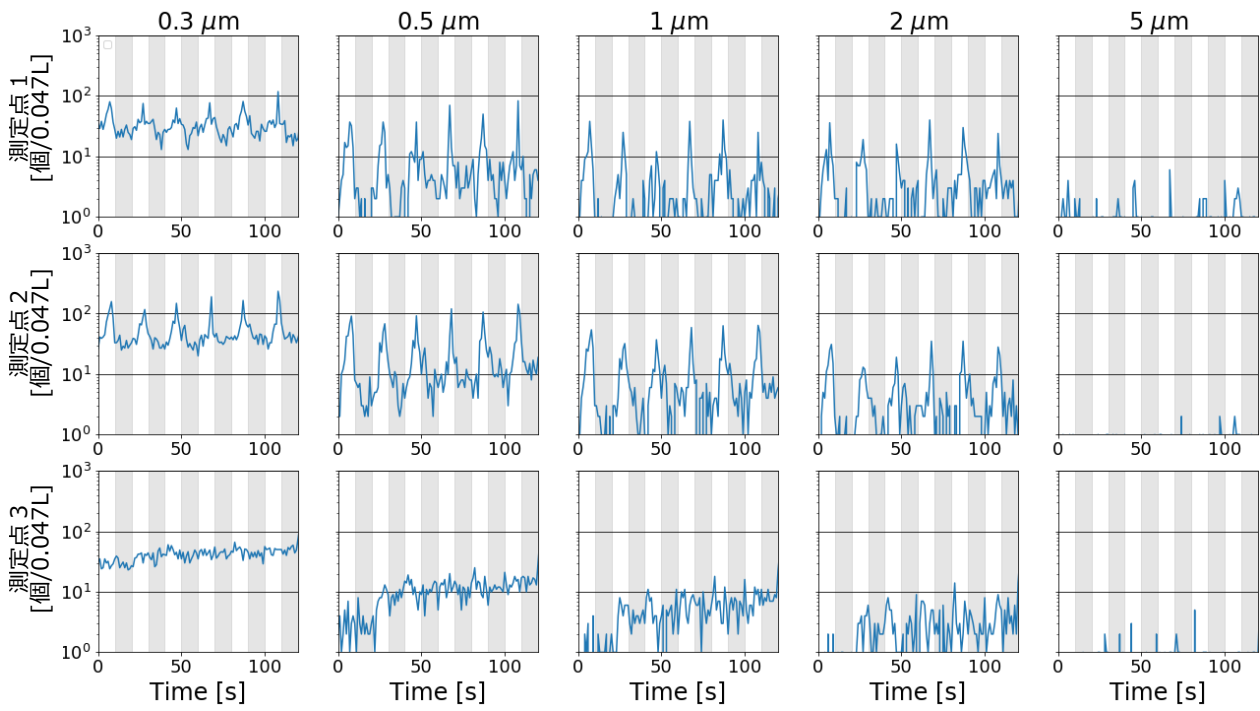


図 18: 粒子個数濃度の時間変化  
 (グレーの網掛け部はハンドドライヤを停止している時間であることを表す.)

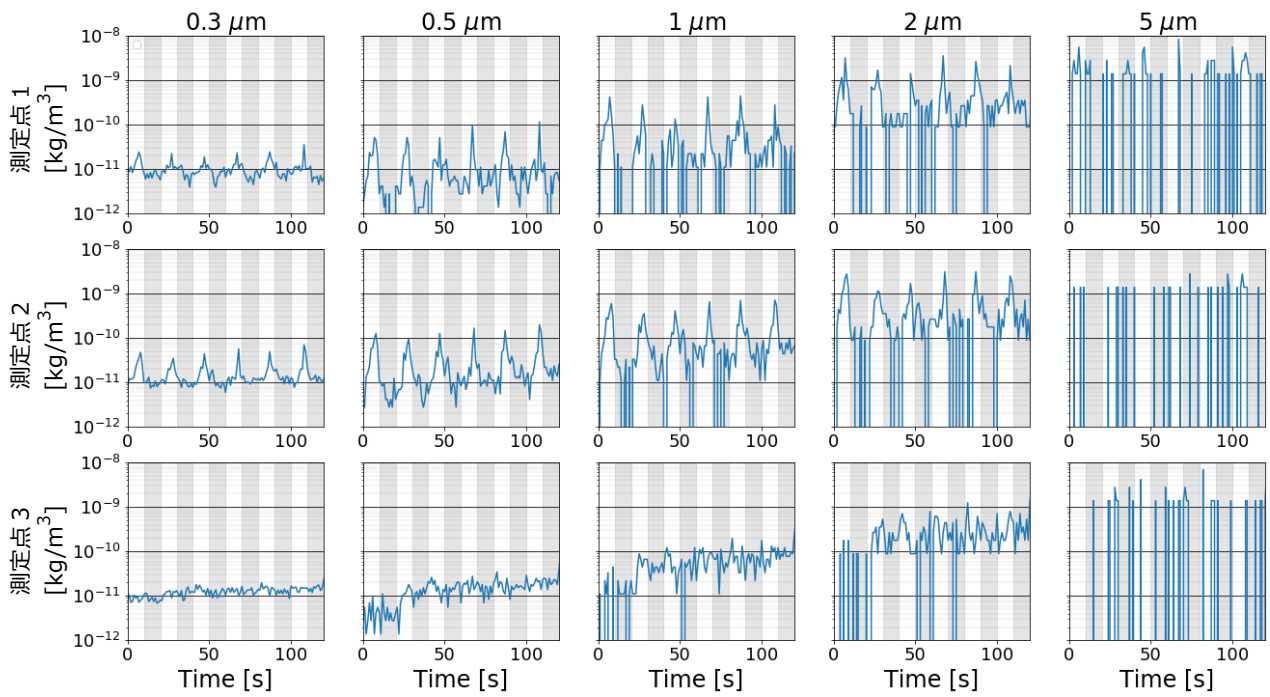


図19: 粒子質量濃度の時間変化 : 図18の実測値から質量濃度に変換した場合の時間変化  
 (グレーの網掛け部はハンドドライヤを停止している時間であることを表す.)