

# 屋内における人からの 飛沫の拡散に関する研究

飛沫の沈着に関する模型実験  
及び沈着を考慮した数値解析

指導教員

有波

赤野 智輝

裕貴 助教



# 研究目的

# 研究目的

2019年11月に新型コロナウイルス (SARS-CoV-2) が確認され、世界中に**新型コロナウイルス感染症** (COVID-19) が流行した。

建築環境工学分野では、**CFD※<sup>1</sup>解析** (RANS※<sup>2</sup>) により**飛沫の拡散性状**や**室内での感染リスク分布**等の**検討**が数多く行われている。

既往の研究<sup>文1)</sup>では、**暖房時の教室**を対象に実測とCFD解析を行い、CFD解析の妥当性を検討した。

※1 数値流体力学 (Computational Fluid Dynamics)

※2 レイノルズ平均モデル (Reynolds-Averaged Navier-Stokes simulations) を用いて解析する手法。

文1) 山田：「屋内における飛沫の拡散に関する研究 暖房時の教室を対象とした飛沫濃度のCFD解析」、新潟大学工学部工学科建築分野建築学プログラム卒業論文、2023年

# 研究目的

一方で、定常時の実測結果において室内で発生した飛沫のうち排気口から排出されずに室内に残った飛沫の割合（以下沈着率）が26～55[%]であることが明らかとなった。そのため、沈着が**飛沫の拡散性状に影響を与えている**と考えられる。

表 実測及びCFD解析case<sup>文1)</sup>

case	全熱交換換気扇 × 2台		天井カセット型エアコン × 2台 (教卓側のエアコンは停止)	
	風量 (定格風量)	運転方式	風量 (定格風量)	風向
case1	強 (650[m <sup>3</sup> /h])	熱交換換気	急 (1,470[m <sup>3</sup> /h])	水平から 53[°]下向き
case2			弱 (960[m <sup>3</sup> /h])	
case3			停止	

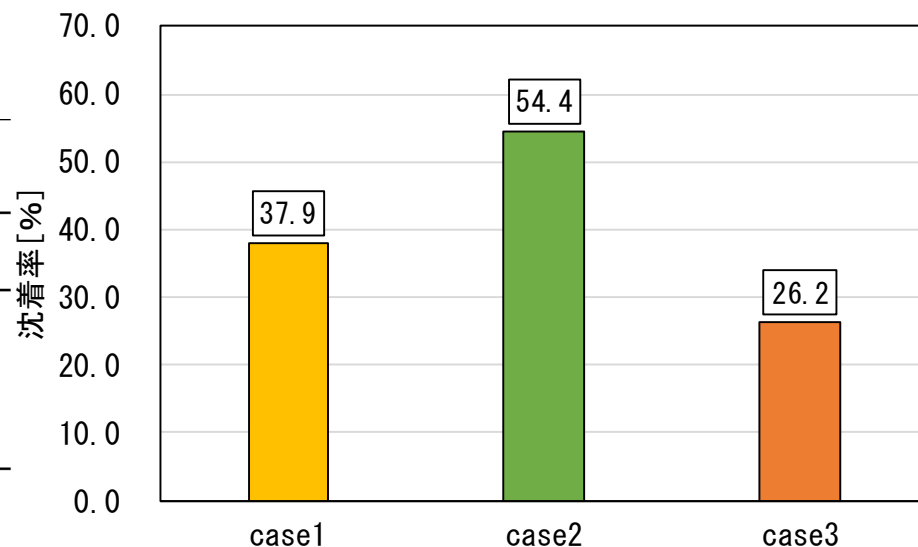


図 各caseの沈着率

文1) 山田：「屋内における飛沫の拡散に関する研究 暖房時の教室を対象とした飛沫濃度のCFD解析」、新潟大学工学部工学科建築分野建築学プログラム卒業論文、2023年

# 研究目的

しかし、室内での飛沫の沈着についてCFD解析において考慮した例は少なく、CFD解析による飛沫の拡散性状に対する沈着の影響は不明である。

表 実測及びCFD解析case<sup>文1)</sup>

case	全熱交換換気扇 × 2台		天井カセット型エアコン × 2台 (教卓側のエアコンは停止)	
	風量 (定格風量)	運転方式	風量 (定格風量)	風向
case1	強 (650 [m <sup>3</sup> /h])	熱交換換気	急 (1,470 [m <sup>3</sup> /h])	水平から 53[°]下向き
case2			弱 (960 [m <sup>3</sup> /h])	
case3			停止	

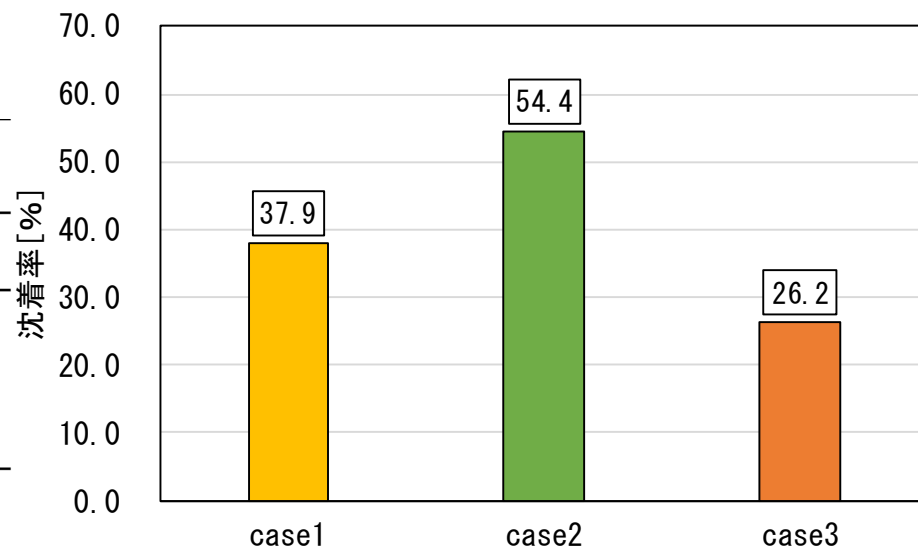


図 各caseの沈着率

文1) 山田：「屋内における飛沫の拡散に関する研究 暖房時の教室を対象とした飛沫濃度のCFD解析」、新潟大学工学部工学科建築分野建築学プログラム卒業論文、2023年

# 研究目的

本研究では、まず飛沫の沈着について把握するため模型を用いた基礎的実験を行い、室内で飛沫が沈着する割合を把握する。

表 実測及びCFD解析case<sup>文1)</sup>

case	全熱交換換気扇 × 2台		天井カセット型エアコン × 2台 (教卓側のエアコンは停止)	
	風量 (定格風量)	運転方式	風量 (定格風量)	風向
case1	強 (650 [m <sup>3</sup> /h])	熱交換換気	急 (1,470 [m <sup>3</sup> /h])	水平から 53[°]下向き
case2			弱 (960 [m <sup>3</sup> /h])	
case3			停止	

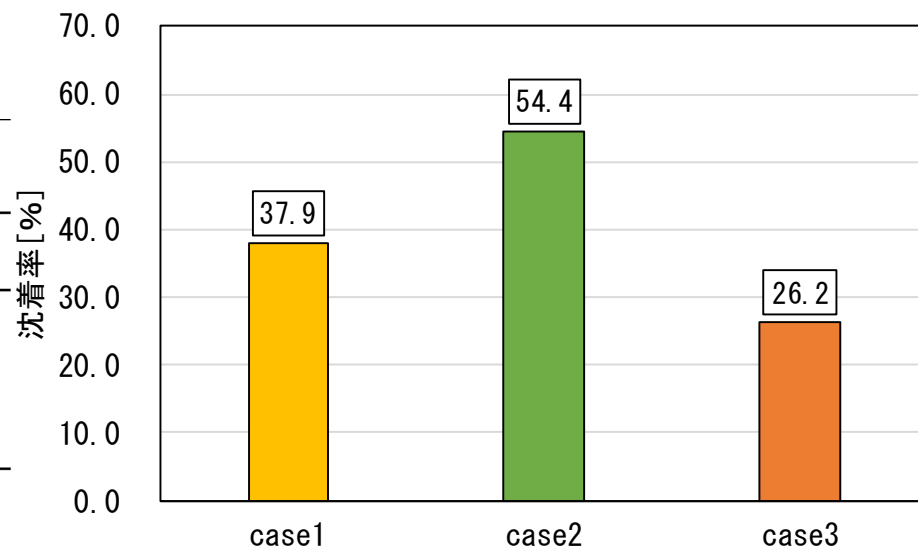


図 各caseの沈着率

# 研究目的

さらに既往の研究<sup>文1)</sup>で行ったCFD解析を基に、**沈着を考慮した検討**を行う。

表 実測及びCFD解析case<sup>文1)</sup>

case	全熱交換換気扇 × 2台		天井カセット型エアコン × 2台 (教卓側のエアコンは停止)	
	風量 (定格風量)	運転方式	風量 (定格風量)	風向
case1	強 (650 [m <sup>3</sup> /h])	熱交換換気	急 (1,470 [m <sup>3</sup> /h])	水平から 53[°]下向き
case2			弱 (960 [m <sup>3</sup> /h])	
case3			停止	

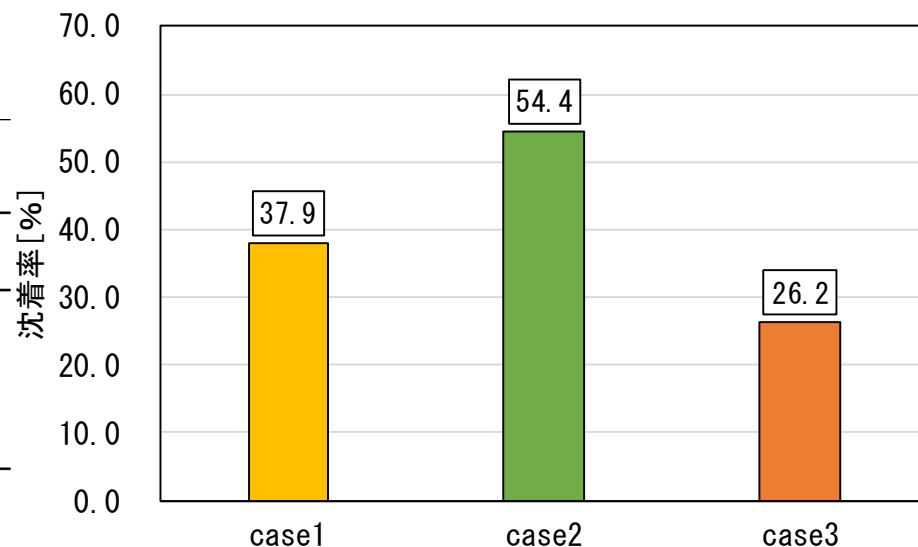


図 各caseの沈着率

文1) 山田：「屋内における飛沫の拡散に関する研究 暖房時の教室を対象とした飛沫濃度のCFD解析」、新潟大学工学部工学科建築分野建築学プログラム卒業論文、2023年

# 研究目的

実測結果と解析結果を比較し、飛沫の沈着の影響を考慮した場合の解析手法を検討することを目的とする。

表 実測及びCFD解析case<sup>文1)</sup>

case	全熱交換換気扇 × 2台		天井カセット型エアコン × 2台 (教卓側のエアコンは停止)	
	風量 (定格風量)	運転方式	風量 (定格風量)	風向
case1	強 (650 [m <sup>3</sup> /h])	熱交換換気	急 (1,470 [m <sup>3</sup> /h])	水平から 53[°]下向き
case2			弱 (960 [m <sup>3</sup> /h])	
case3			停止	

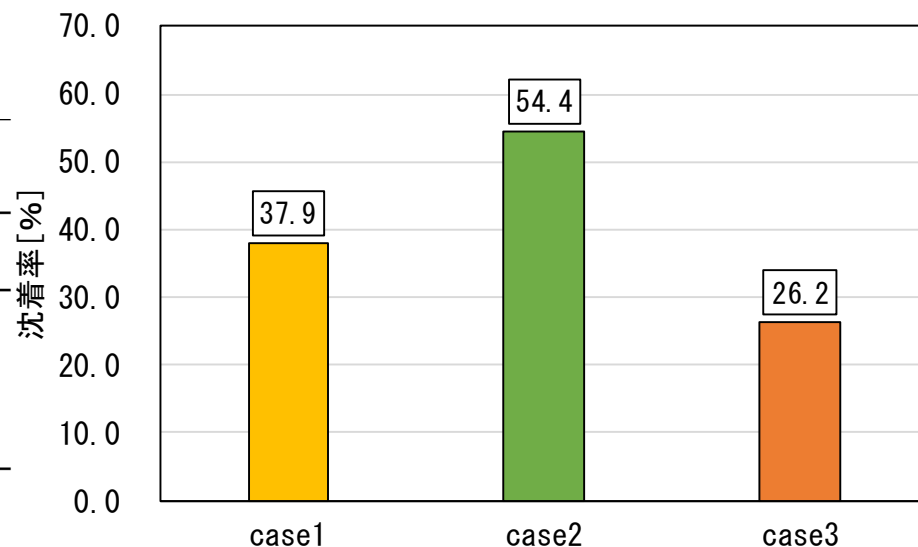


図 各caseの沈着率

文1) 山田：「屋内における飛沫の拡散に関する研究 暖房時の教室を対象とした飛沫濃度のCFD解析」、新潟大学工学部工学科建築分野建築学プログラム卒業論文、2023年



# 飛沫の沈着に関する基礎的模型実験

# 実験概要

実験対象は600 [mm] (幅) × 400 [mm] (奥行き) × 400 [mm] (高さ) で、  
厚さ 8 [mm] のアクリル板で作られた縮尺室内模型とする。

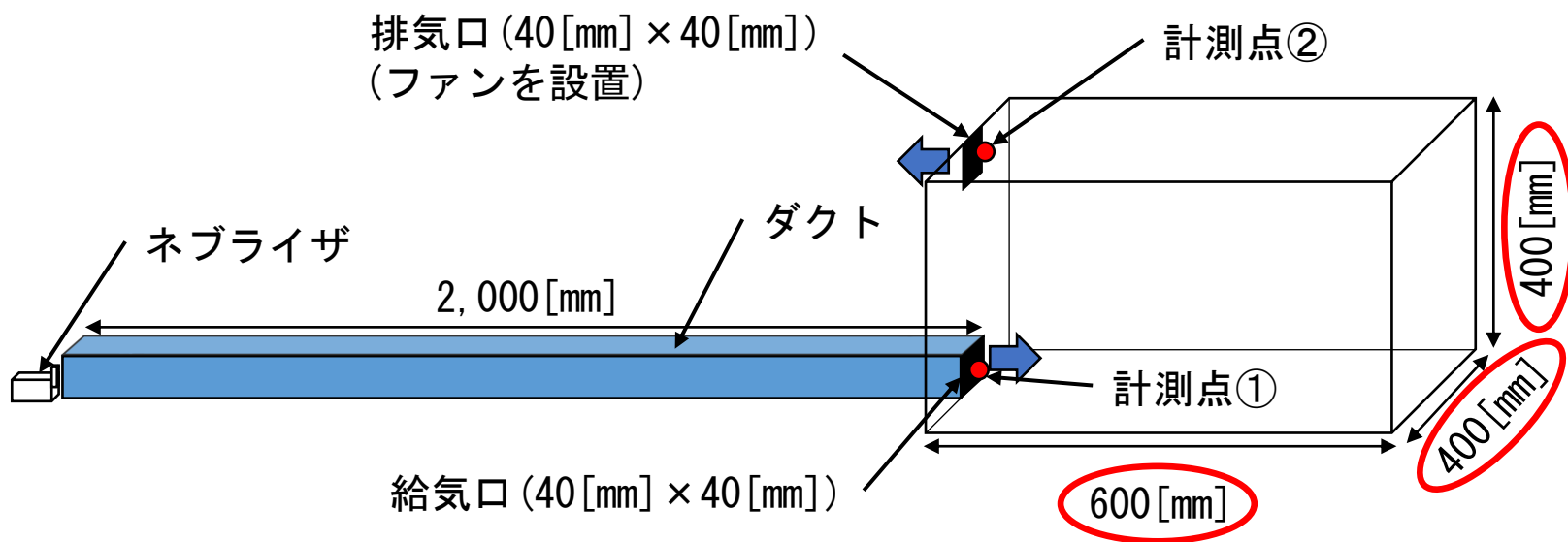


図 1 実験対象の概要 (caseA、caseC)

# 実験概要

模型の片側の側面には、 $40\text{ [mm]} \times 40\text{ [mm]}$  の給気口と排気口が設置されており、循環流が形成されることを意図している。

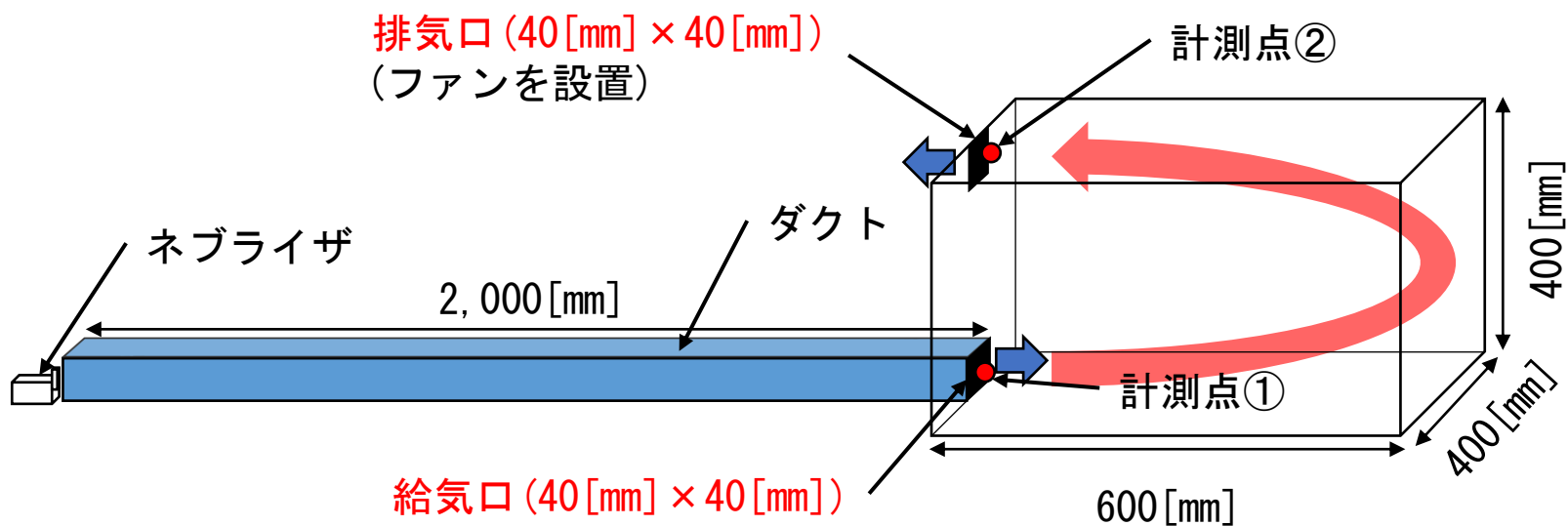


図 1 実験対象の概要 (caseA、caseC)

# 実験概要

給気口には2,000 [mm] のダクトを設置する。

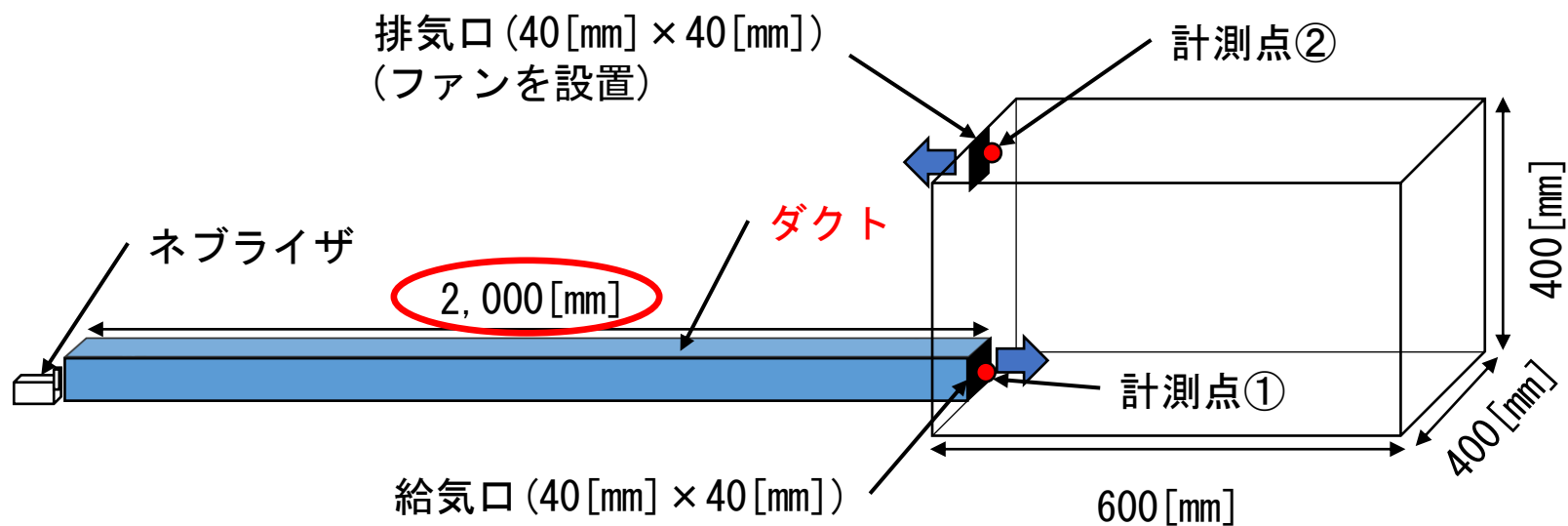


図 1 実験対象の概要 (caseA、caseC)

# 実験概要

排気口側にはファンを設置し、換気方式を第3種機械換気(換気回数:10.2[回/h])とする。

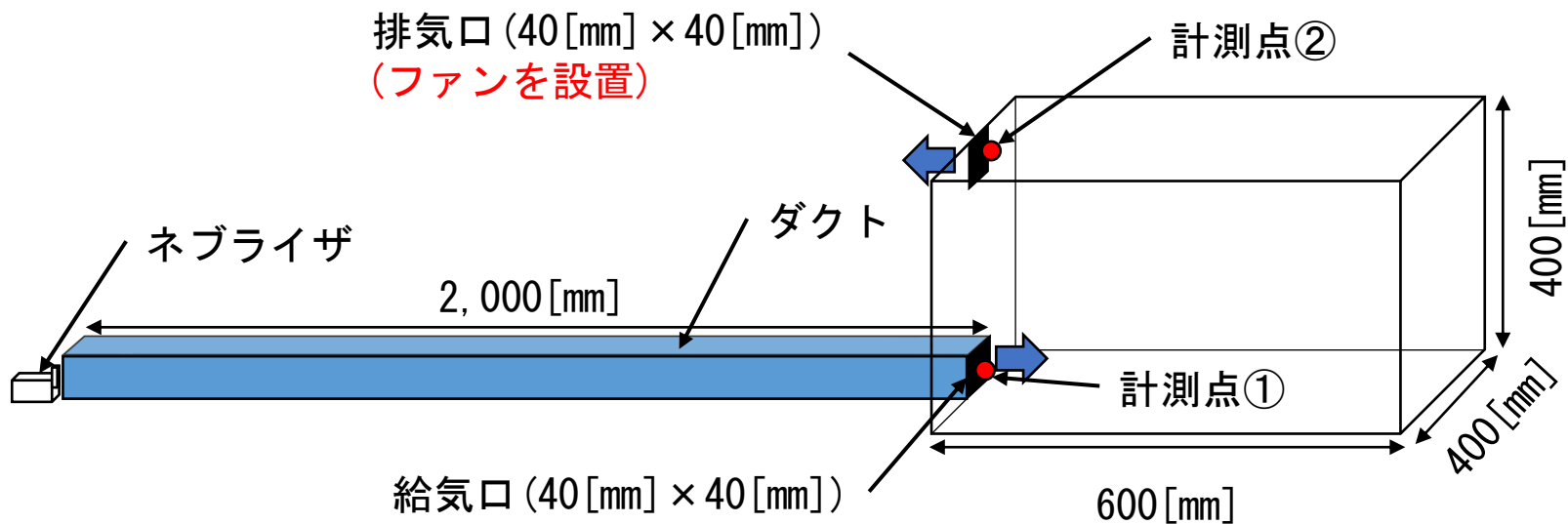


図1 実験対象の概要 (caseA、caseC)

# 実験概要

飛沫は**ネブライザ** (オムロン社製: NE-C28) から生理食塩水を噴霧することによって模擬する。

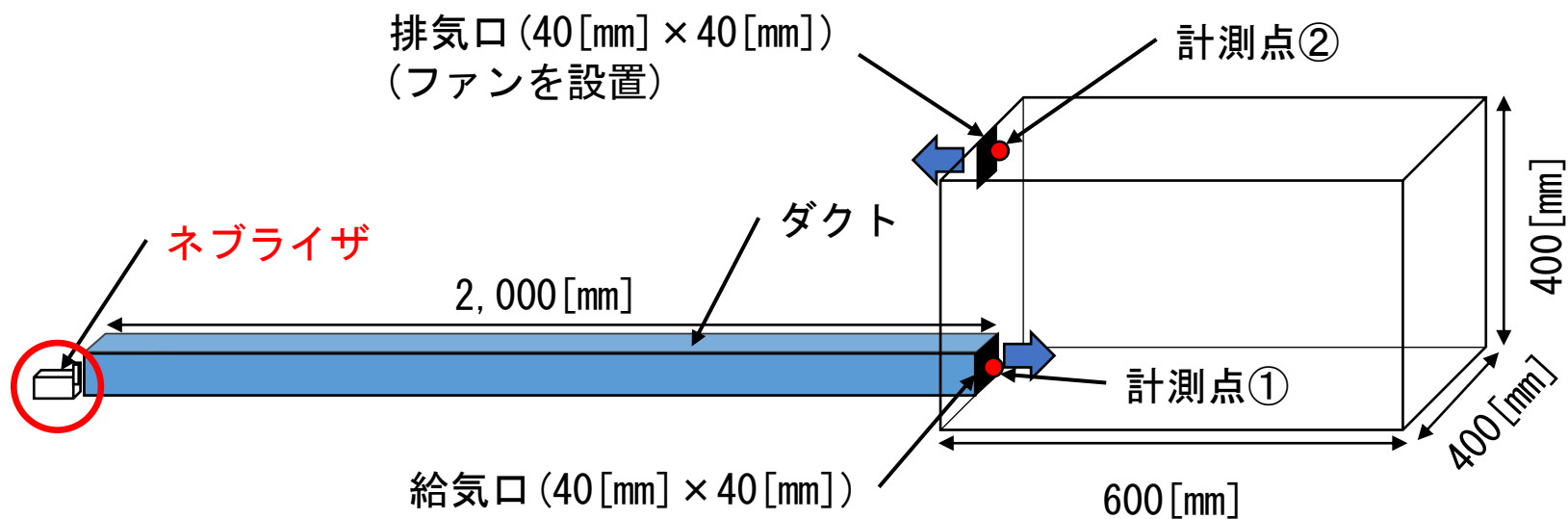


図 1 実験対象の概要 (caseA、caseC)

# 実験概要

飛沫濃度の測定には**パーティクルカウンタ** (リオン社製:KC-52) 2台を使用し、**給気口 (計測点①)** と **排気口 (計測点②)** に設置する※<sup>3</sup>。

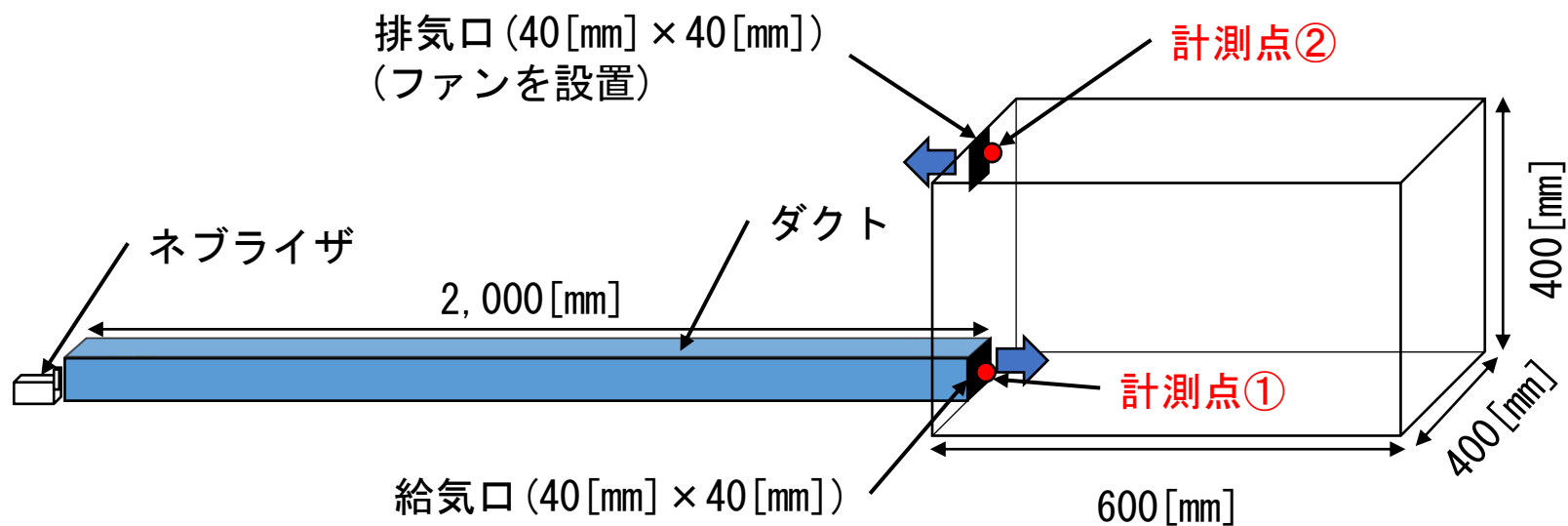


図 1 実験対象の概要 (caseA、caseC)

※<sup>3</sup> caseBでは計測点①、計測点②をパーティクルカウンタ 1台で交互に測定している。

# 実験条件



# 実験条件

caseAではパネルは設置せず、模擬飛沫を60分間噴霧する。

表 1 実験条件

case	パネル	噴霧時間
caseA	無し	60 [min]
caseB	400 × 270 [mm] × 1 枚	80 [min]
caseC	無し	755 [min]

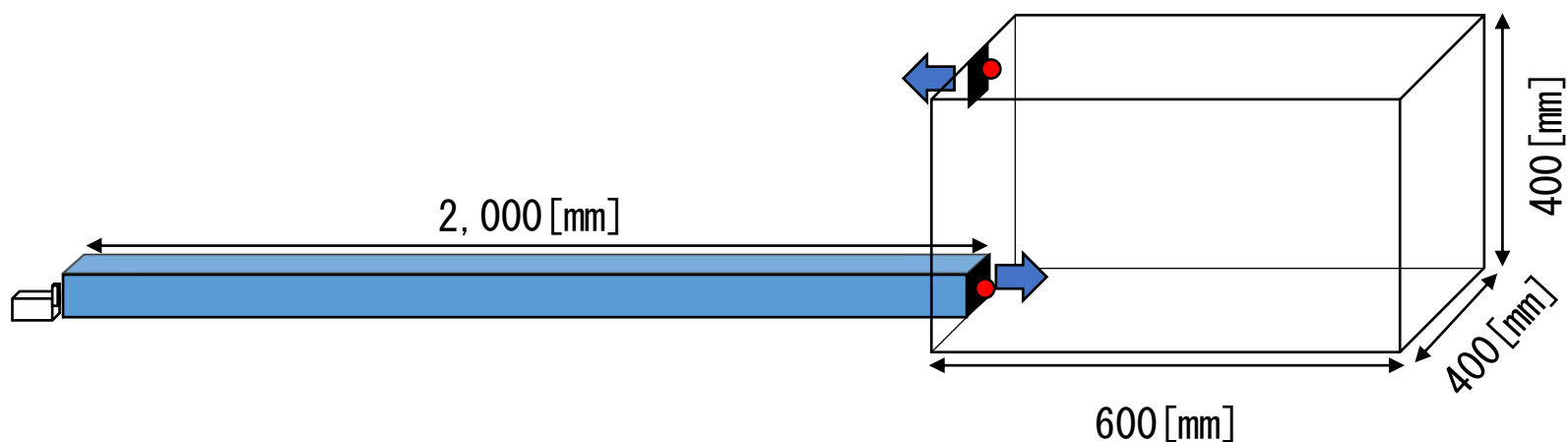


図 1 実験対象の概要 (caseA、caseC)

# 実験条件

caseBは縮尺模型内に流路を変化させるためのパネル(400[mm]×270[mm])を設置し、模擬飛沫を80分間噴霧する。

表 1 実験条件

case	パネル	噴霧時間
caseA	無し	60[min]
caseB	400×270[mm] × 1枚	80[min]
caseC	無し	755[min]

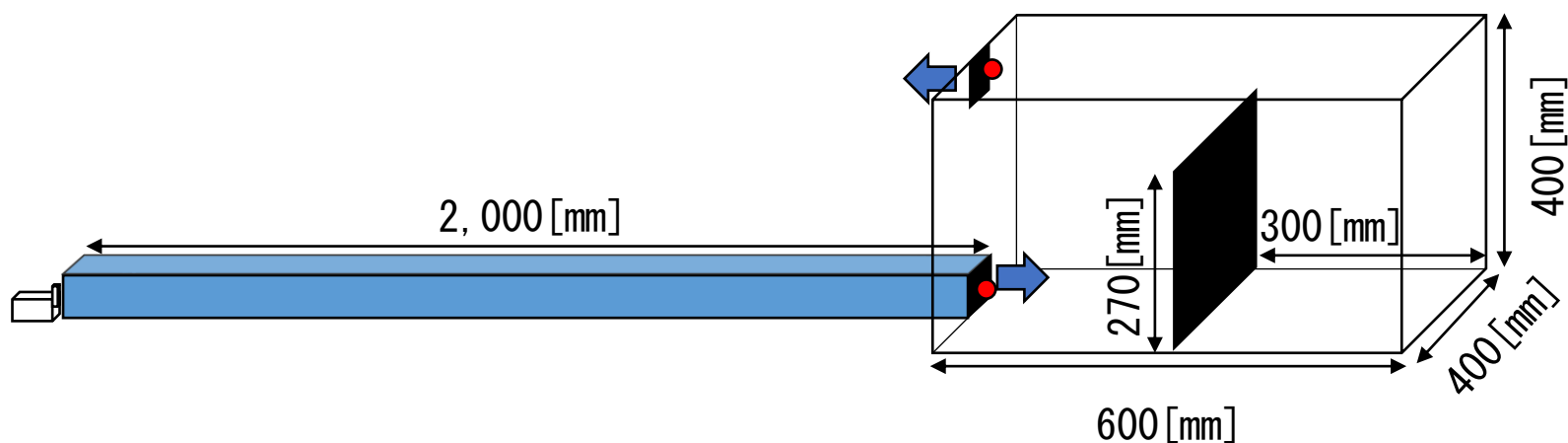


図 1 実験対象の概要 (caseB)

# 実験条件

caseCは飛沫の沈着率が噴霧時間によって変化するか確認するため、パネルは設置せずに模擬飛沫を755分間噴霧する。

表 1 実験条件

case	パネル	噴霧時間
caseA	無し	60 [min]
caseB	400 × 270 [mm] × 1 枚	80 [min]
caseC	無し	755 [min]

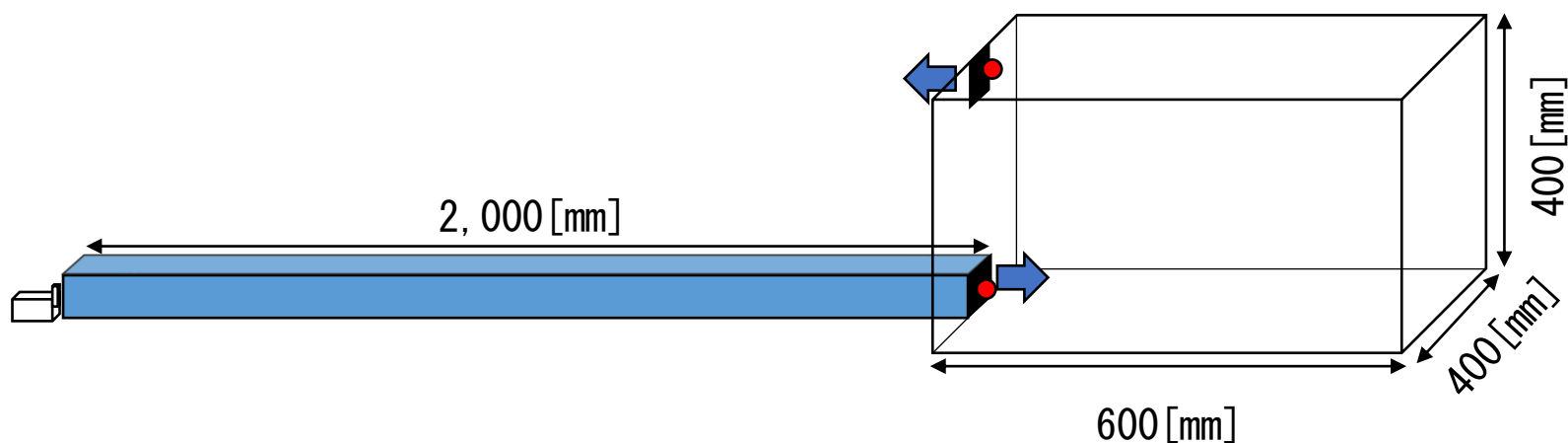


図 1 実験対象の概要 (caseA、caseC)

# 実験条件

沈着率は（１）式で算出する。

$$D = \left(1 - \frac{C_{RA}}{C_{SA}}\right) \times 100 \quad \dots \quad (1)$$

D : 沈着率 [%]  
C<sub>RA</sub> : 排気口から流出した飛沫の平均重量濃度 [mg/m<sup>3</sup>]  
C<sub>SA</sub> : 給気口から流入した飛沫の平均重量濃度 [mg/m<sup>3</sup>]

# 分析方法

パーティクルカウンタからは各粒径区分による**個数濃度**が算出される。

表2 パーティクルカウンタの概要

粒径区分 (代表粒径 <sup>※4</sup> )	0.3~0.5 [ $\mu\text{m}$ ] (0.40 [ $\mu\text{m}$ ])
	0.5~1.0 [ $\mu\text{m}$ ] (0.73 [ $\mu\text{m}$ ])
	1.0~2.0 [ $\mu\text{m}$ ] (1.42 [ $\mu\text{m}$ ])
	2.0~5.0 [ $\mu\text{m}$ ] (3.14 [ $\mu\text{m}$ ])
	5.0 [ $\mu\text{m}$ ] 以上 (5.00 [ $\mu\text{m}$ ])
流量	2.83 [L/min]
測定可能最大個数濃度	140,000,000 [個/ $\text{m}^3$ ]

※4 各粒径区分の個数濃度から回帰直線を算出し、それぞれの粒径範囲の体積を個数濃度で加重平均した時の粒径。

# 分析方法

本研究では、**個数濃度**から**質量**に**換算**し、各粒径区分の**質量**を積算することで**重量濃度**として表す<sup>※5</sup>。

質量に換算し、その値を積算

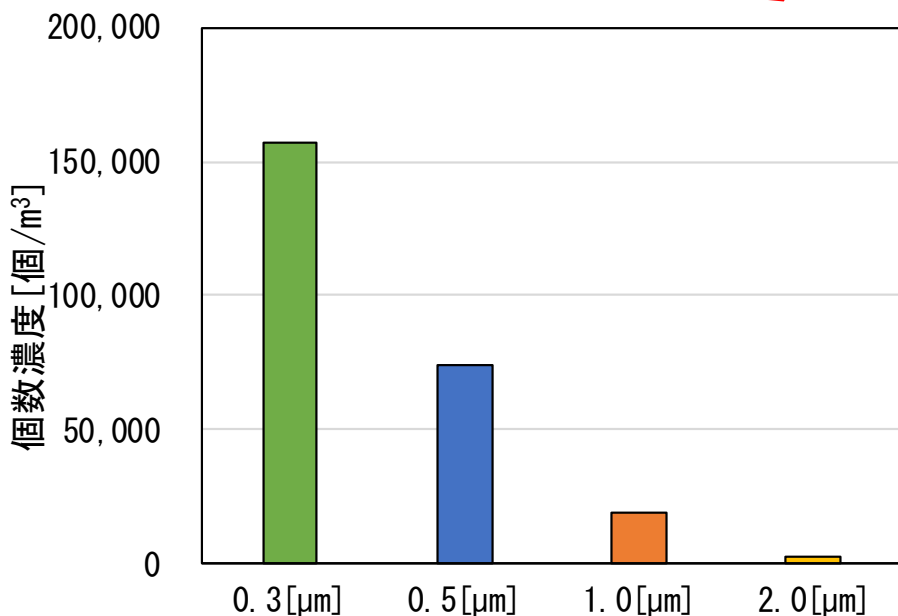


図 粒径ごとの個数濃度

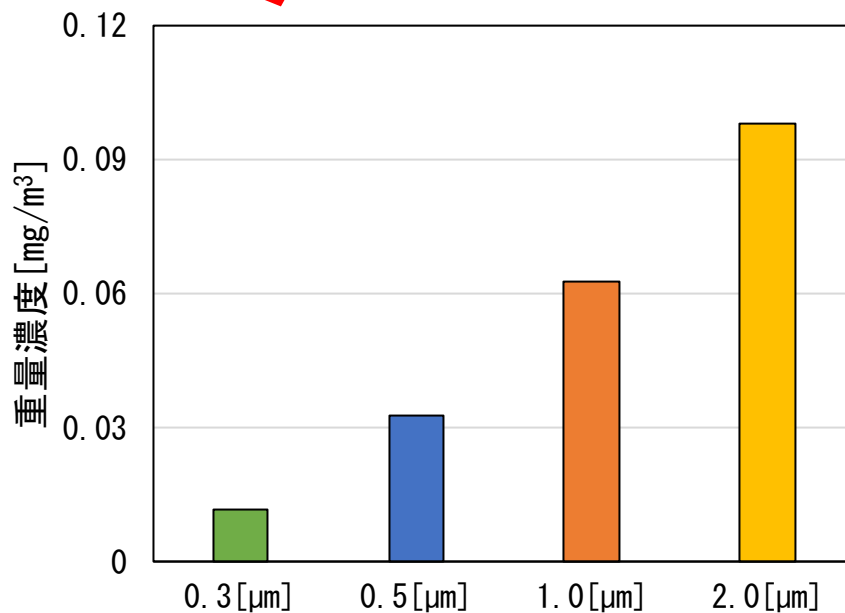


図 粒径ごとの重量濃度

※5 重量濃度の算出において、粒形は球形、直径は代表粒径と仮定し、密度は食塩(2.16[g/cm<sup>3</sup>])を使用している。粒径5.0[μm]以上の飛沫は、測定結果のばらつきが大きいため考慮していない。

# 実験結果



# 実験結果

定常時において給気口 (計測点①)、排気口 (計測点②) で計測した重量濃度に差があり、排気口 (計測点②) での重量濃度のほうが低い。

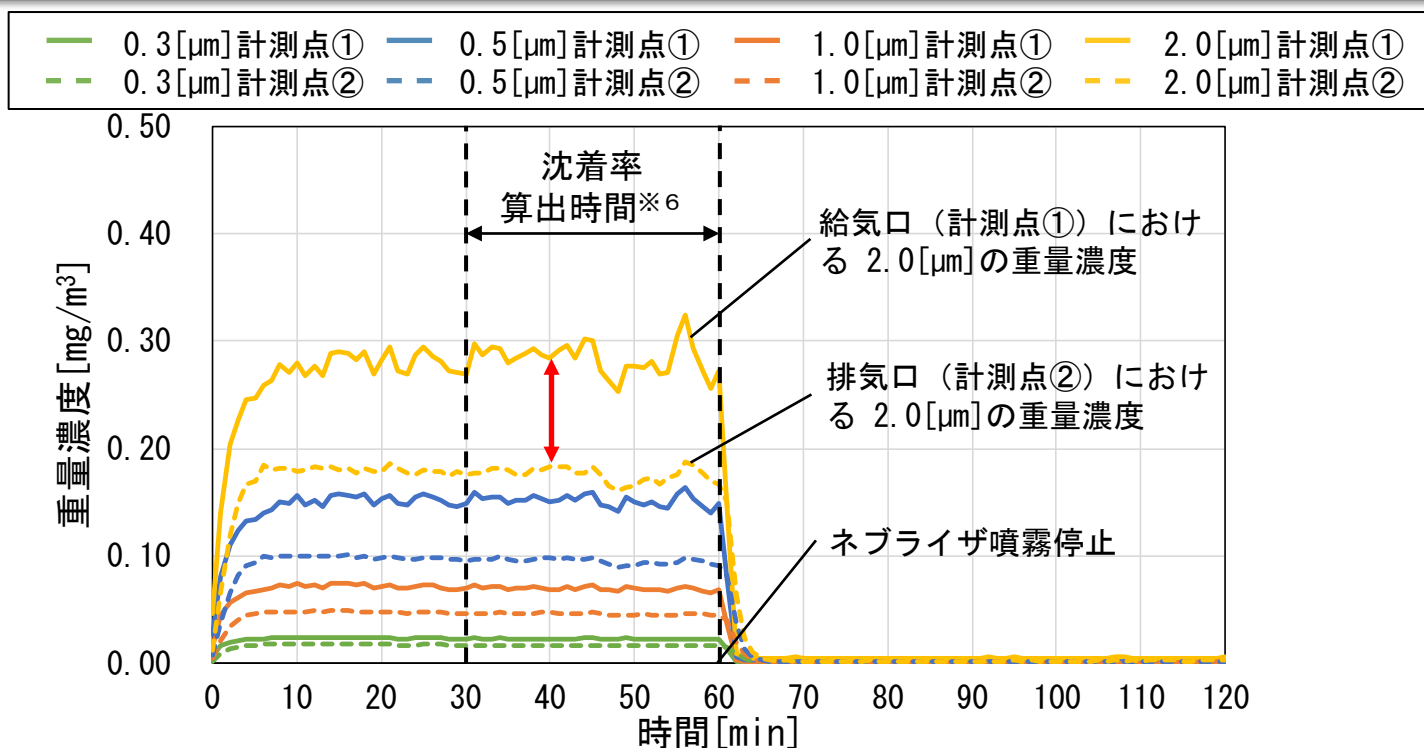


図2 caseAにおける粒径ごとの重量濃度の時系列変化

※6 沈着率の算出に用いる重量濃度はcaseAでは30～60[min]の平均、caseBにおいては計測点①では20～35[min]と52～67[min]の平均、計測点②では36～51[min]と68～83[min]の平均、caseCでは10～755[min]の平均とする。

# 実験結果

どのcaseでも粒径が大きくなるにつれて、沈着率は高くなる傾向がある。

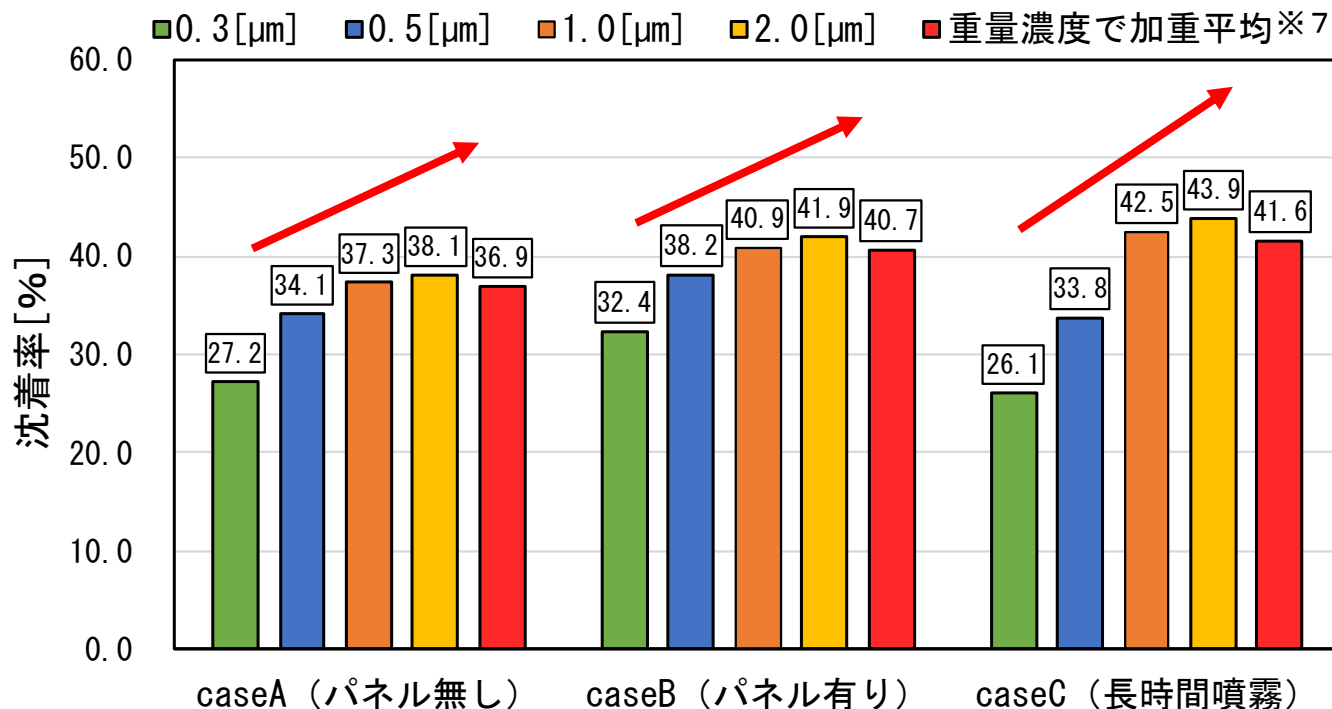


図3 各caseにおける粒径ごとの沈着率※6

※6 沈着率の算出に用いる重量濃度はcaseAでは30～60[min]の平均、caseBにおいては計測点①では20～35[min]と52～67[min]の平均、計測点②では36～51[min]と68～83[min]の平均、caseCでは10～755[min]の平均とする。

※7 計測した各粒径区分の沈着率を重量濃度で加重平均した値。

また、重量濃度で加重平均した沈着率<sup>※7</sup>は、36~42[%]となる。

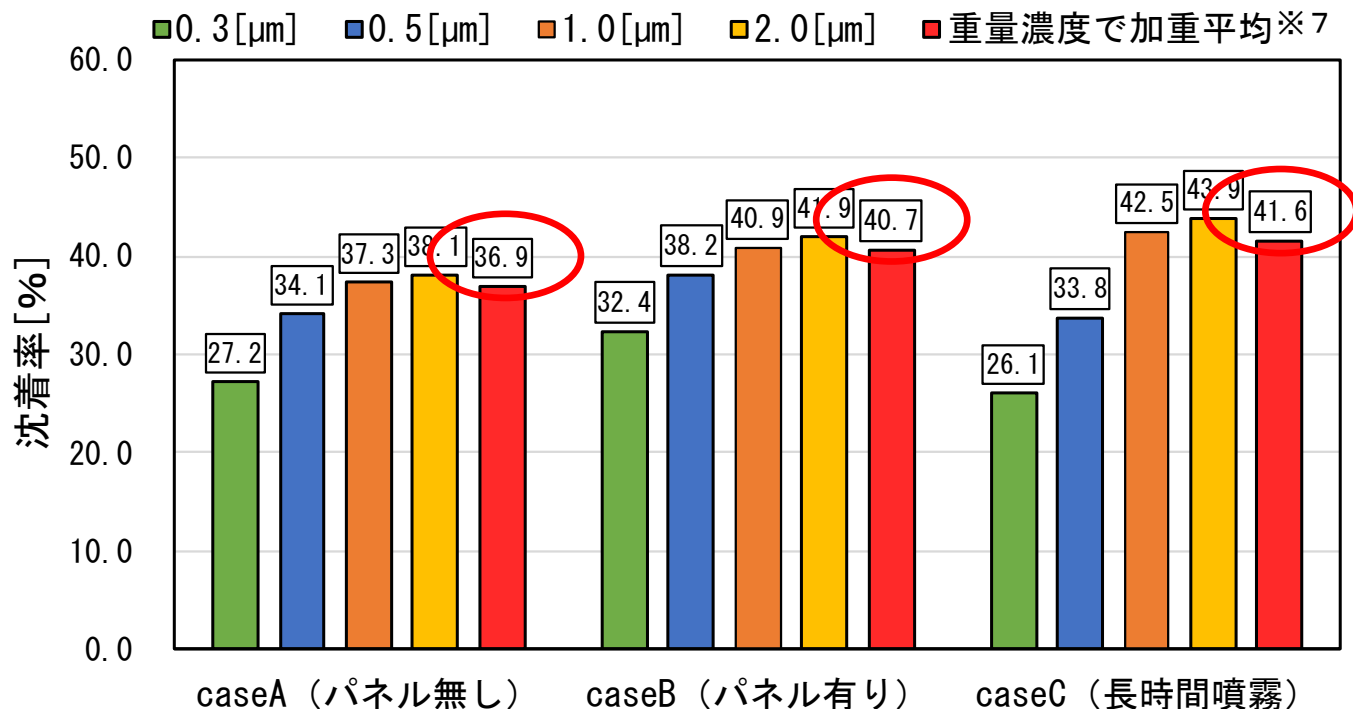


図3 各caseにおける粒径ごとの沈着率<sup>※6</sup>

※6 沈着率の算出に用いる重量濃度はcaseAでは30~60[min]の平均、caseBにおいては計測点①では20~35[min]と52~67[min]の平均、計測点②では36~51[min]と68~83[min]の平均、caseCでは10~755[min]の平均とする。

※7 計測した各粒径区分の沈着率を重量濃度で加重平均した値。

# 実験結果

caseB、caseCの沈着率はcaseAと大きな差は見られないため、パネルの有無や飛沫の噴霧時間によって沈着率はほぼ変化しないと考えられる。

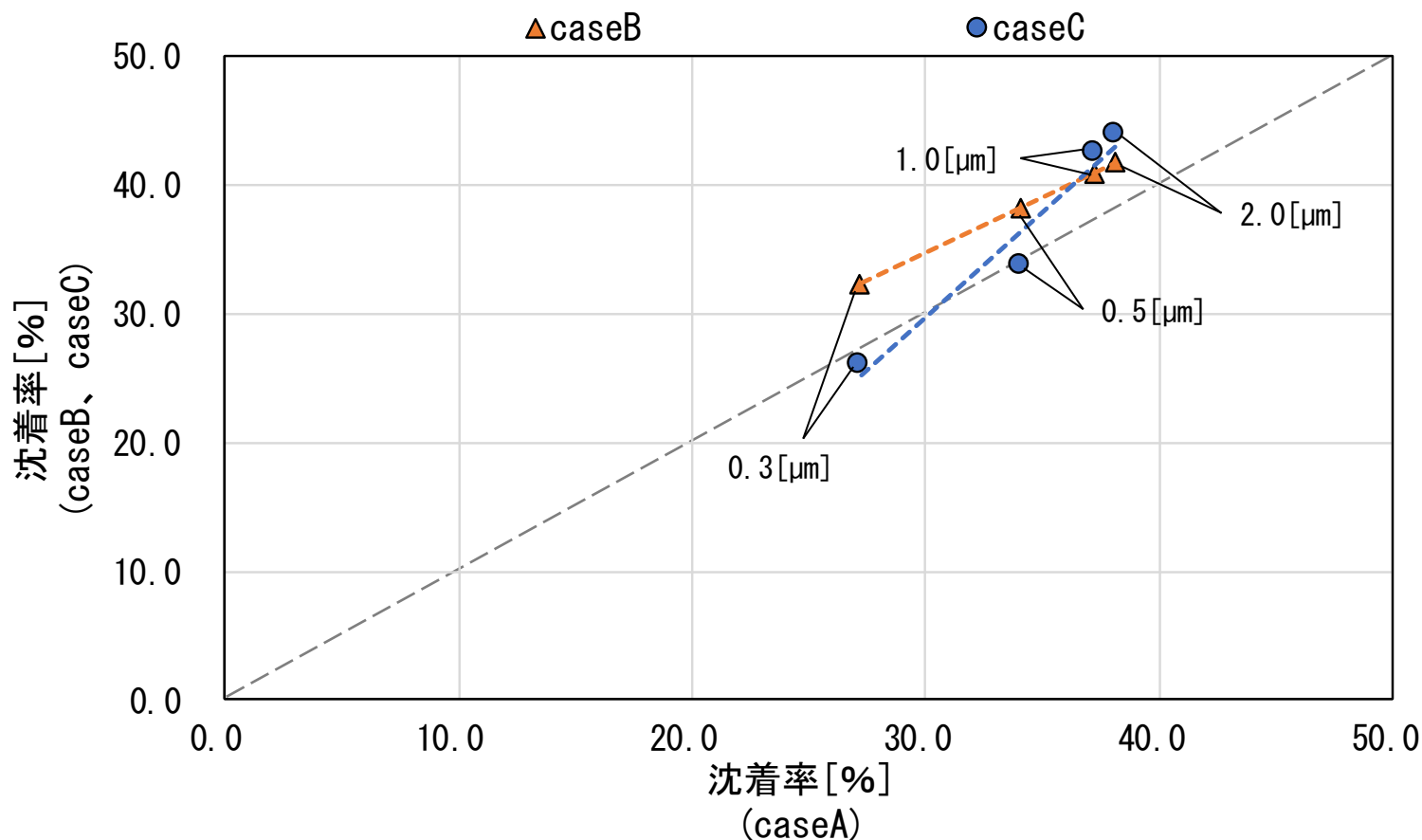


図 caseB、caseCに対するcaseAの沈着率の相関

# 飛沫の沈着を考慮した数値解析

# 解析条件

解析条件、解析対象モデル及び解析caseは既往の研究<sup>文1)</sup>と同様とする。

表3 解析case

	全熱交換換気扇 × 2台		天井カセット型エアコン × 2台 (教卓側のエアコンは停止)	
	風量 (定格風量)	運転方式	風量 (定格風量)	風向
case1	強 (650[m <sup>3</sup> /h])	熱交換換気	急 (1,470[m <sup>3</sup> /h])	水平から 53[°] 下向き
case2			弱 (960[m <sup>3</sup> /h])	
case3			停止	

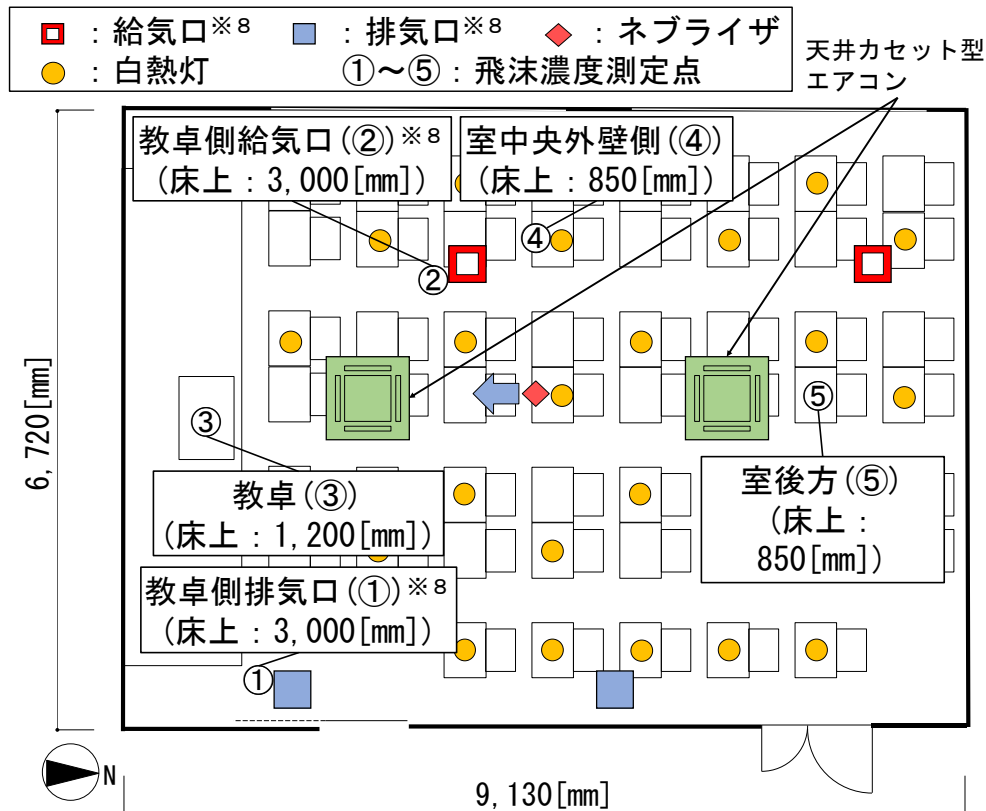


図4 実測及びCFD解析対象の教室平面

※8 給気口、排気口はそれぞれ給排気グリルが設置されている。

文1) 山田: 「屋内における飛沫の拡散に関する研究 暖房時の教室を対象とした飛沫濃度のCFD解析」、新潟大学工学部工学科建築分野建築学プログラム卒業論文、2023年

# 解析条件

解析で用いる沈着率は飛沫の沈着に関する基礎的模型実験のcaseCの粒径ごとの値を用いる。

表3 解析case

	全熱交換換気扇 × 2台		天井カセット型エアコン × 2台 (教卓側のエアコンは停止)	
	風量 (定格風量)	運転方式	風量 (定格風量)	風向
case1	強 (650[m <sup>3</sup> /h])	熱交換換気	急 (1,470[m <sup>3</sup> /h])	水平から 53[°] 下向き
case2			弱 (960[m <sup>3</sup> /h])	
case3			停止	

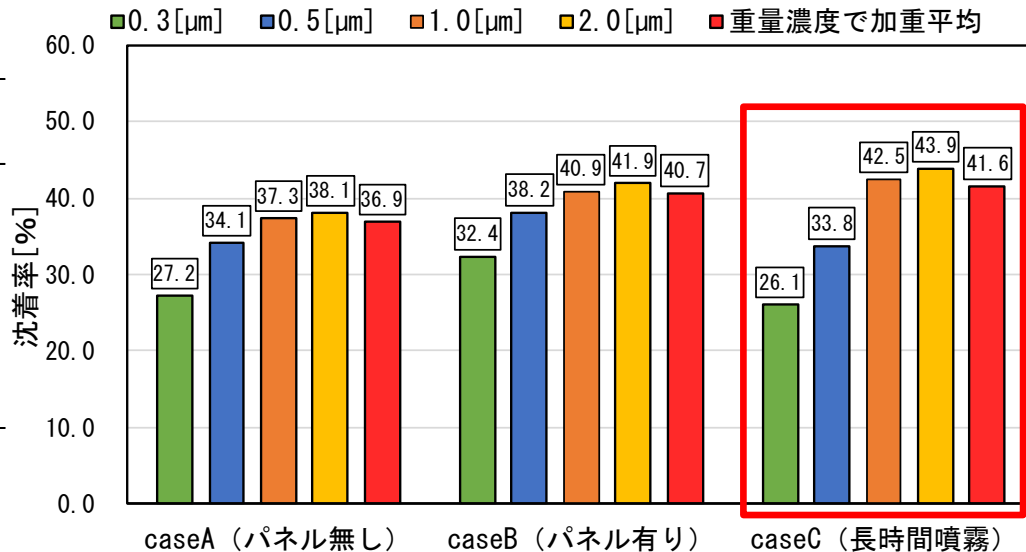


図3 各caseにおける粒径ごとの沈着率

## 解析条件

室内での飛沫の沈着は空間から飛沫を減少させる作用となるため換気量が増加するとみなすことができる<sup>文)</sup>。

室内で飛沫が沈着する場所が不明なため室内の全面に均等に沈着すると仮定し、定常濃度の解析では、各粒径の飛沫の噴霧量から沈着率分を減少させることで、室内での沈着の影響を模擬する。



# 解析条件

濃度減衰時の解析では、まず各濃度測定点の濃度減衰曲線に基づき (2) 式を用いて指数近似を行い、各濃度測定点の局所換気回数を算出する。

$$p - p_o = (p_1 - p_o)e^{-nt} \quad \dots (2)$$

$$p - p_o = (p_1 - p_o)e^{-(1+\frac{a}{100})nt} \quad \dots (3)$$

$$\tau_r = \int_{t_s}^{\infty} \{C_p(t)/C_p(t_s)\} dt \quad \dots (4)$$

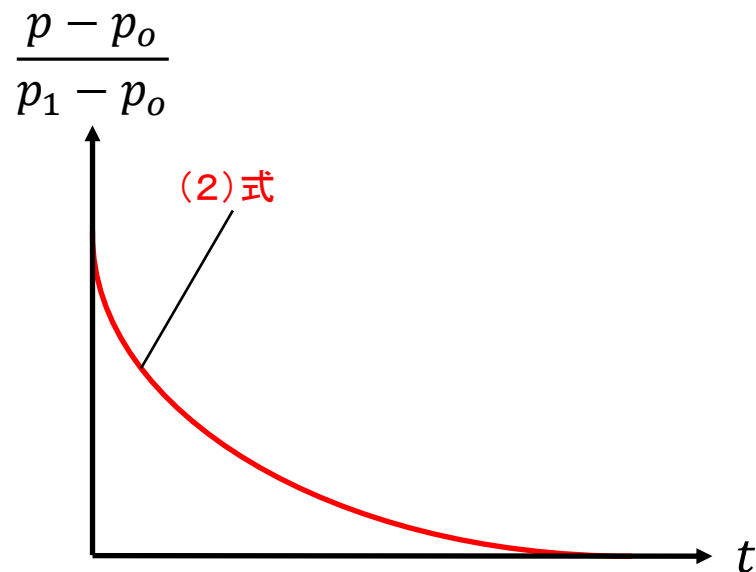


図 沈着を考慮した濃度減衰曲線の概要

$p$  : 汚染物質濃度 [ $\text{m}^3/\text{m}^3$ ]       $p_o$  : 外気汚染物質濃度 [ $\text{m}^3/\text{m}^3$ ]※<sup>9</sup>       $t$  : 時間 [h]  
 $p_1$  : 初期汚染物質濃度 [ $\text{m}^3/\text{m}^3$ ]       $n$  : 局所換気回数 [1/h]       $a$  : 沈着率 [%]  
 $\tau_r$  : 汚染質齢 [s]       $C_p(t)$  : 時刻  $t$  の算出点 P での排気口基準濃度 [-]  
 $t_s$  : ネブライザ停止時刻 [s]       $C_p(t_s)$  : 算出点 P での定常時における排気口基準濃度 [-]

※<sup>9</sup> 外気汚染物質濃度は、教卓側給気口 (2) の濃度とする。

# 解析条件

得られた局所換気回数に対し、沈着率と各局所換気回数に乗じた値を加算し、沈着を考慮した局所換気回数とする（（3）式）。

$$p - p_o = (p_1 - p_o)e^{-nt} \quad \dots (2)$$

$$p - p_o = (p_1 - p_o)e^{-(1+\frac{a}{100})nt} \quad \dots (3)$$

$$\tau_r = \int_{t_s}^{\infty} \{C_p(t)/C_p(t_s)\} dt \quad \dots (4)$$

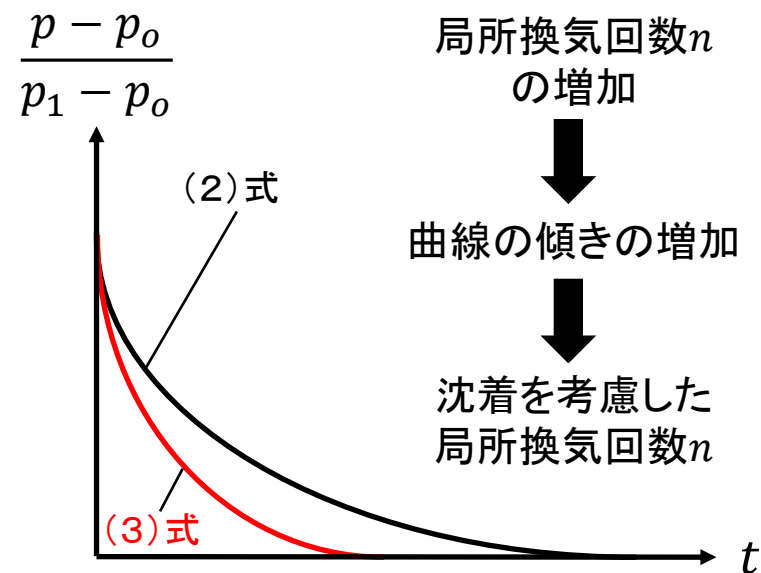


図 沈着を考慮した濃度減衰曲線の概要

$p$ : 汚染物質濃度 [ $\text{m}^3/\text{m}^3$ ]	$p_o$ : 外気汚染物質濃度 [ $\text{m}^3/\text{m}^3$ ]* <sup>9</sup>	$t$ : 時間 [h]
$p_1$ : 初期汚染物質濃度 [ $\text{m}^3/\text{m}^3$ ]	$n$ : 局所換気回数 [1/h]	$a$ : 沈着率 [%]
$\tau_r$ : 汚染質齢 [s]	$C_p(t)$ : 時刻 $t$ の算出点Pでの排気口基準濃度 [-]	
$t_s$ : ネブライザ停止時刻 [s]	$C_p(t_s)$ : 算出点Pでの定常時における排気口基準濃度 [-]	

\*<sup>9</sup> 外気汚染物質濃度は、教卓側給気口（②）の濃度とする。

# 解析条件

(3) 式により、濃度減衰曲線を求め、得られた濃度減衰曲線と  
 (4) 式により、汚染質齡を算出する。

$$p - p_o = (p_1 - p_o)e^{-nt} \quad \dots (2)$$

$$p - p_o = (p_1 - p_o)e^{-(1+\frac{a}{100})nt} \quad \dots (3)$$

$$\tau_r = \int_{t_s}^{\infty} \{C_p(t)/C_p(t_s)\} dt \quad \dots (4)$$

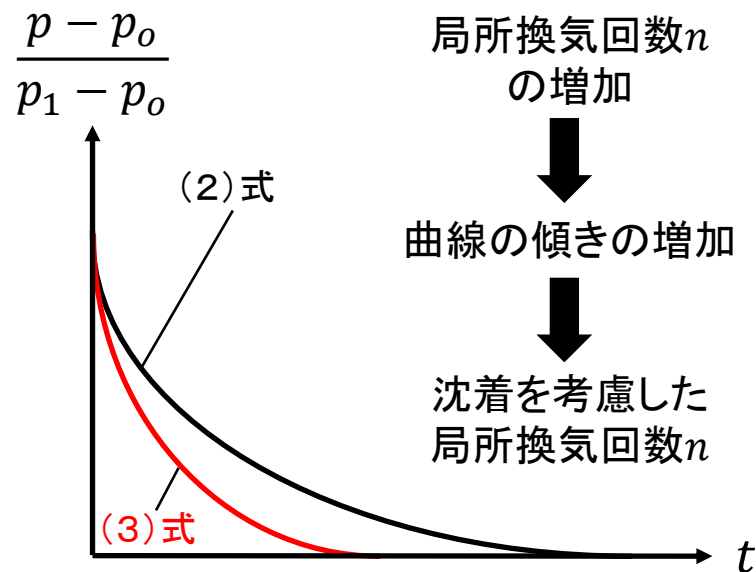


図 沈着を考慮した濃度減衰曲線の概要

$p$ : 汚染物質濃度 [ $\text{m}^3/\text{m}^3$ ]	$p_o$ : 外気汚染物質濃度 [ $\text{m}^3/\text{m}^3$ ]* <sup>9</sup>	$t$ : 時間 [h]
$p_1$ : 初期汚染物質濃度 [ $\text{m}^3/\text{m}^3$ ]	$n$ : 局所換気回数 [1/h]	$a$ : 沈着率 [%]
$\tau_r$ : 汚染質齡 [s]	$C_p(t)$ : 時刻tの算出点Pでの排気口基準濃度 [-]	
$t_s$ : ネブライザ停止時刻 [s]	$C_p(t_s)$ : 算出点Pでの定常時における排気口基準濃度 [-]	

\*<sup>9</sup> 外気汚染物質濃度は、教卓側給気口 (2) の濃度とする。

# 解析結果

# 解析結果

沈着を考慮した場合(本研究)、沈着を考慮しない場合(既往の研究文<sup>1)</sup>)と比較して減衰曲線の傾きが大きくなる。

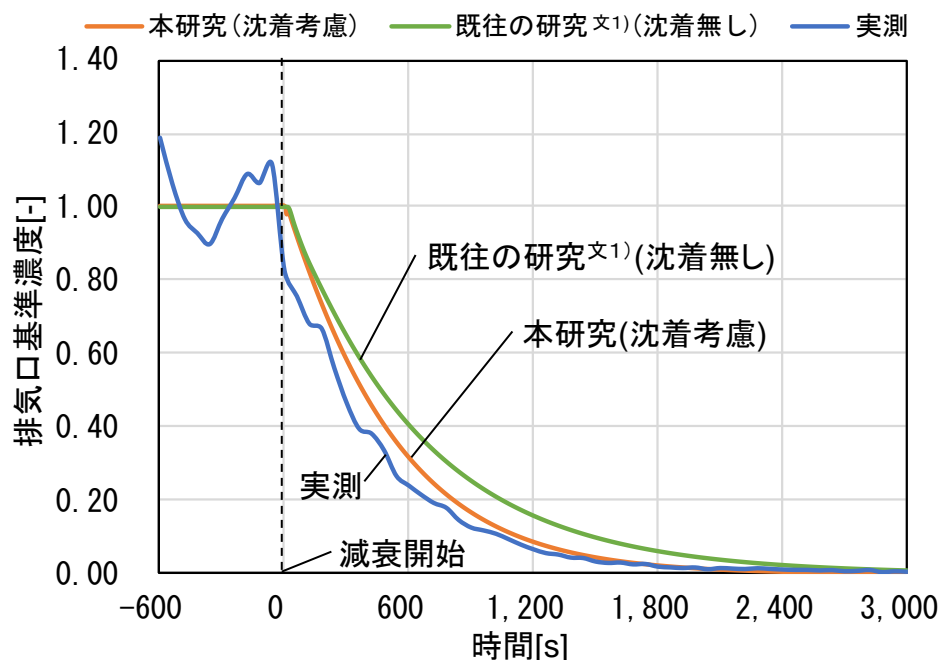


図5 減衰時における教卓側排気口(①)の排気口基準濃度の時系列変化 (case1)

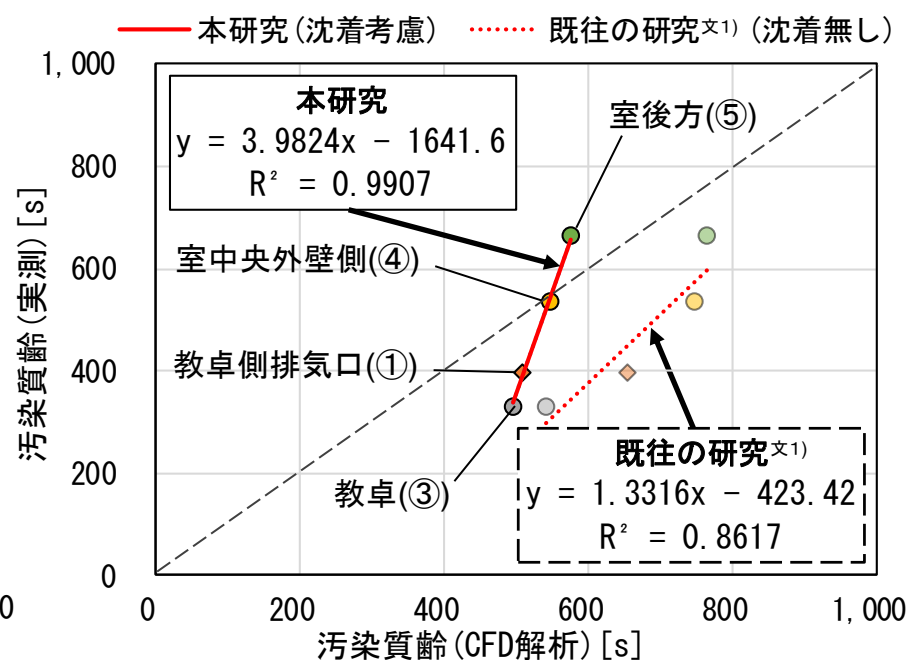


図6 実測結果と解析結果における汚染質齢の比較<sup>※10</sup> (case1)

※10 図中の薄い色のプロットは、既往の研究文<sup>1)</sup>で求めた沈着を考慮しない場合の結果である。

文1) 山田：「屋内における飛沫の拡散に関する研究 暖房時の教室を対象とした飛沫濃度のCFD解析」、新潟大学工学部工学科建築分野建築学プログラム卒業論文、2023年

# 解析結果

汚染質齢を実測結果と解析結果で比較すると(図6)、エアコンを風量急で稼働したcase1では沈着を考慮することで、**実測結果と概ね一致する傾向がある。**

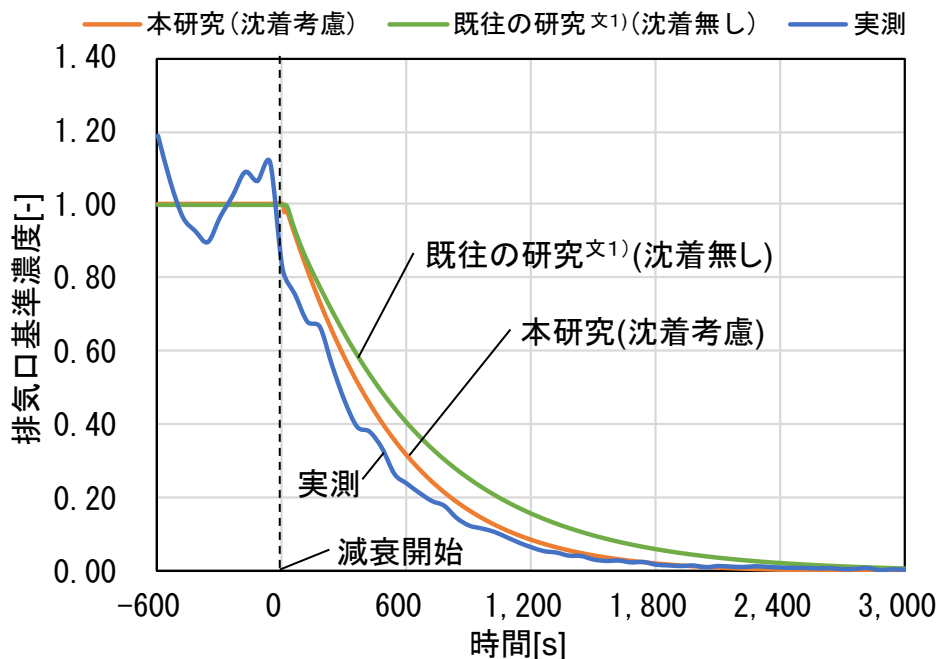


図5 減衰時における教卓側排気口(①)の排気口基準濃度の時系列変化(case1)

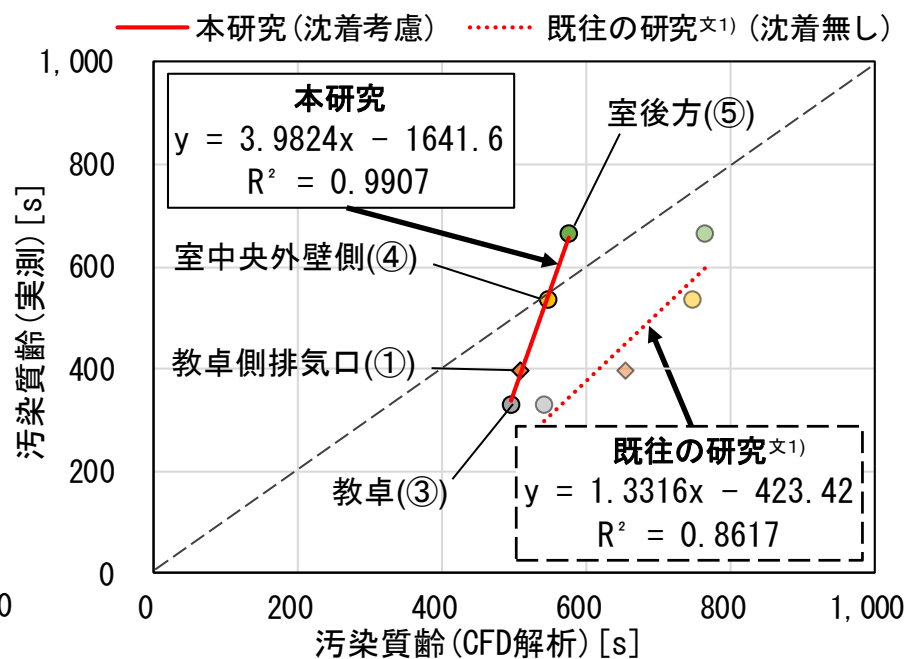


図6 実測結果と解析結果における汚染質齢の比較※10(case1)

※10 図中の薄い色のプロットは、既往の研究文1)で求めた沈着を考慮しない場合の結果である。

文1) 山田：「屋内における飛沫の拡散に関する研究 暖房時の教室を対象とした飛沫濃度のCFD解析」、新潟大学工学部工学科建築分野建築学プログラム卒業論文、2023年

# まとめ

## 飛沫の沈着に関する基礎的模型実験

- ①全ての粒径において給気口(計測点①)よりも排気口(計測点②)のほうが重量濃度が低く、模型内で沈着が生じていると考えられる。
- ②どのcaseでも沈着率に大きな差は見られないため、パネルのような障害物の有無や、ネブライザの噴霧時間の違いによって模型内の沈着率は変化しないと考えられる。

## 飛沫の沈着を考慮した数値解析

- ①エアコンを風量急で稼働したcase1において沈着を考慮することで、汚染質濃度のCFD解析結果は概ね実測結果と一致する傾向がある。