

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実測及び沈着を考慮した数値解析

前田 快人 指導教員 有波 裕貴 助教

1 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^{*1}解析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。しかし、飛沫の拡散性状についてCFD解析結果と実測結果を比較した例は少なく、CFD解析の妥当性は不明である。また、実際の室内空間において飛沫ある程度沈着^{*2}をしていると考えられるが、沈着の影響を考慮した解析はほとんど行われていない。

本研究では、まず暖房時の教室を対象に飛沫濃度の実測とRANS^{*3}によるCFD解析(解析①、沈着無し)を行う。飛沫の拡散性状の実測及びCFD解析結果を比較する。

次に縮尺室内模型を用いて飛沫の沈着に関する実験を行い、室内において飛沫が沈着する割合を把握する。

更に、模型実験で測定した沈着率を考慮してCFD解析を行い(解析②)、実測結果と解析結果を比較することで、飛沫の沈着を考慮した場合の解析手法を検討する。

2 暖房時の教室における飛沫の拡散性状の実測及びCFD解析(解析①、沈着無し)

2.1 実測概要: 図1に実測及びCFD解析対象の教室平面を示す。実測場所は、新潟大学工学部D棟207号室であり、床面積は約61[m²]、室容積は約184[m³]である。実測時の外気温は概ね0~5[°C]である。換気装置は全熱交換換気扇による第1種機械換気、空調装置は天井カセット型エアコン(中央吸込、4方向吹出)であり、それぞれ2台設置されている。飛沫濃度の測定はパーティクルカウンタ(リオン社製:KC-52)5台を教

室内に配置して行う(図1①~⑤)。また、机上には人体による発熱を模擬するため白熱灯29個(100[W/個])を設置している。飛沫は、ネブライザ(オムロン社製:NE-C28、カタログ噴霧能力:約0.4[mL/min])から生理食塩水を噴霧することによって模擬する。ネブライザは室中央の机上に設置し、教卓側に向かって噴霧する。噴霧開始からの経過時間をtとして、t=0~120[min]は噴霧を行い、t=120~240[min]は停止し、飛沫濃度の測定を行う。

2.2 実測及びCFD解析条件: 表1に実測及びCFD解析case、表2にパーティクルカウンタの概要を示す。case1、2では天井カセット型エアコンを稼働し、設定温度22[°C]の暖房運転とする。エアコンの風量は、case1で急(定格風量:1,470[m³/h])、case2で弱(定格風量:960[m³/h])とする。case3ではエアコンを停止する。また、全てのcaseで全熱交換換気扇(熱交換換気)を稼働し、風量は強(定格風量:650[m³/h])とする。パーティクルカウンタにより各粒径区分の個数濃度を測定し、重量濃度を求める^{*6}。

表3にCFD解析条件を示す。RANS解析には汎用数値流体解析ソフトSTREAM ver.2020を使用する。解析は実測対象教室をモデル化して行う。流入境界は、ネブライザ吹出風速を1.5[m/s]^{*7}、全熱交換換気扇及び天井カセット型エアコンの風量をそれぞれの定格風量とする。発生させる飛沫は各粒径区分の代表粒径とする。

2.3 分析方法: 実測及びCFD解析における濃度は、各粒径区分の重量濃度の割合で加重平均して算出する。濃度分布の評価は、教卓側排気口(①)の定常濃度^{*9}を基準濃度とし、各測定点の重量濃度を基準濃度で除すことにより排気口基準濃度として表す^{*10}。

また、ステップダウン法による汚染質齢を(1)式よ

表1 実測及びCFD解析case

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 ³ /h])	熱交換換気	急 (1,470[m ³ /h])	水平から53[°] 下向き
case2			弱 (960[m ³ /h])	
case3			停止	

表2 パーティクルカウンタの概要

粒径区分 (代表粒径 ^{*5} (沈降速度))	0.3~0.5[μm] (0.40[μm] (0.0048[mm/s])) 0.5~1.0[μm] (0.73[μm] (0.0158[mm/s])) 1.0~2.0[μm] (1.42[μm] (0.0601[mm/s])) 2.0~5.0[μm] (3.14[μm] (0.2944[mm/s])) 5.0[μm]以上 (5.00[μm] (0.7470[mm/s]))
流量	2.83[L/min]
測定可能最大個数濃度	140,000,000[個/m ³]

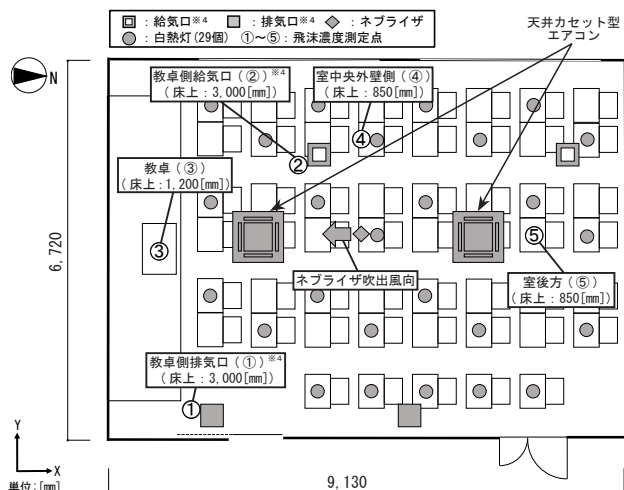


図1 実測及びCFD解析対象の教室平面

り算出する。

沈着率を(2)式より算出する。沈着率はネブライザから発生した飛沫のうち室内に沈着した割合のことである。

$$\tau_r = \int_{t_s}^{\infty} \{C_p(t)/C_p(t_s)\} dt \dots (1)$$

τ_r : 汚染質齢[s] t_s : ネブライザ停止時刻[s]
 $C_p(t)$: 時刻 t の算出点 P での排気口基準濃度[-]
 $C_p(t_s)$: 算出点 P での定常時における排気口基準濃度[-]

$$D = \left(1 - \frac{C_{RA}}{C_{SA} + k}\right) \times 100 \dots (2)$$

D : 沈着率[%] k : 室内で発生した飛沫の平均重量濃度[mg/m³]
 C_{RA} : 排気口から流出した飛沫の平均重量濃度[mg/m³]
 C_{SA} : 給気口から流入した飛沫の平均重量濃度[mg/m³]

2.4 実測及びCFD解析(沈着無し)の結果

2.4.1 沈着率: 図2に各caseにおける沈着率を示す。

沈着率はcase2で54.4[%]と最も高く、case3で26.2[%]と最も低い。

表3 CFD解析条件

乱流モデル	標準k-εモデル	
解析領域	9.13[m](x) × 6.72[m](y) × 3.00[m](z)	
流入境界	ネブライザ吹出風速[m/s]	1.5 ^{*7}
	全熱交換換気扇[m ³ /h]	650
	天井カセット型エアコン[m ³ /h]	case1:1,470 case2:960
壁面境界	壁面対数則	
輻射境界	輻射率0.9	
熱貫流率 [W/(m ² ·K)]	外壁	0.87
	床	1.87
	窓	2.80
	天井	0.88
	間仕切り壁	1.62
室内発熱	白熱灯(100[W]) × 29カ所	
温度 ^{*8} [°C]	外気温	case1:0.5
		case2:4.6
		case3:1.9
	廊下	case1:6.9
		case2:7.4
		case3:7.3
	隣室	case1:6.9
		case2:7.4
		case3:13.0

2.4.2 実測結果とCFD解析結果の比較: 図3に実測結果とCFD解析結果における排気口基準濃度の比較、図4に実測結果とCFD解析結果における汚染質齢の比較を示す。

実測結果とCFD解析結果を比較すると、排気口基準濃度ではエアコン稼働したcase1、case2では決定係数が0.60以上と比較的相関が高く、エアコン稼働していないcase3では負の相関となる。汚染質齢を実測結果とCFD解析結果で比較すると、case1では決定係数が0.86と比較的高いが、case2では0.12と低い。またcase3は負の相関となる。

case1、2はエアコン稼働した場合であり、室内ではエアコンからの吹出気流による強制対流場が支配的となっていると考えられる。一方、case3はエアコンを停止しており、室内では主にネブライザの噴霧気流、換気及び自然対流(貫流熱、室内発熱)によって比較的低速な気流場が生じていると考えられる。空調機等によって生じる強制的な気流場がない場合の解析では、解析条件の更なる検討が必要であると考えられる。

また、実測において飛沫の沈着率が26[%]~55[%]となり、飛沫の拡散性状に影響を与えていると考えられる。そのため、飛沫の沈着の影響を解析で再現することにより解析精度が向上する可能性があると考えられる。

3 飛沫の沈着に関する基礎的模型実験

3.1 実験概要:

図5に実験対象の概要(caseB)を示す。実験対象は600[mm](幅)×400[mm]

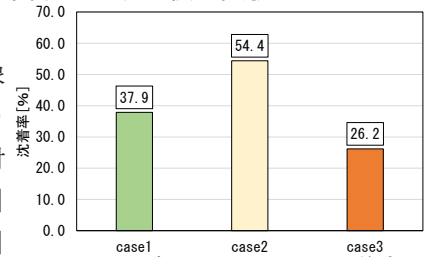


図2 各caseにおける沈着率

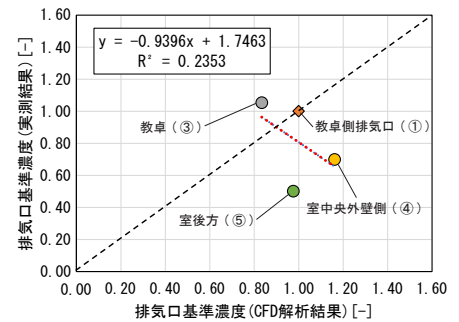
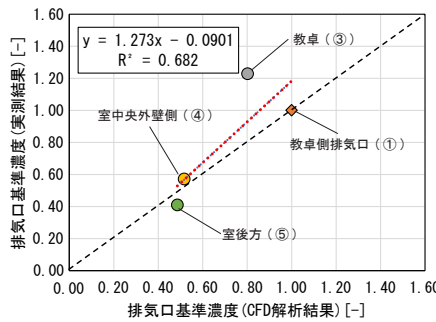
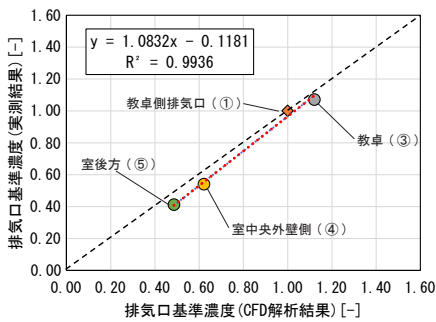


図3 実測結果とCFD解析結果における排気口基準濃度の比較

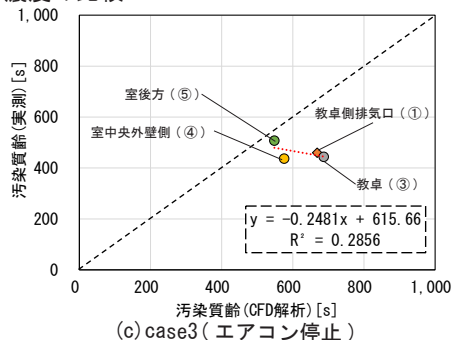
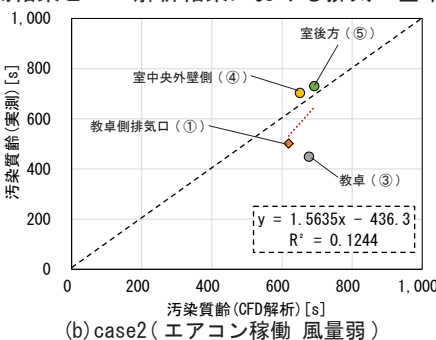
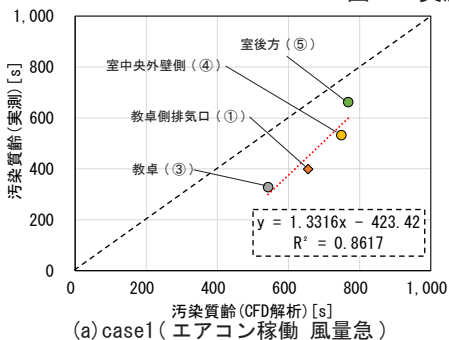


図4 実測結果とCFD解析結果における汚染質齢の比較

(奥行き)×400[mm](高さ)で、厚さ8[mm]の亚克力板で作られた縮尺室内模型とする。模型の片側の側面には40[mm]×40[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。給気口には噴霧した模擬飛沫の水分を十分に蒸発させるため2,000[mm]のダクトを設置する。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。飛沫はネブライザから生理食塩水を噴霧することによって模擬する。飛沫濃度の測定には2章と同様のパーティクルカウンタ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^{※11}。

3.2 実験条件: 表4に実験 case を示す。caseA ではパネルは設置せず、模擬飛沫を60分間噴霧する。caseB は流路を変化させるため、縮尺室内模型内に400[mm]×270[mm]のパネルを設置し、80分間模擬飛沫を噴霧する。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。沈着率は(2)式より算出する^{※12}。

3.3 実験結果

3.3.1 重量濃度の時系列変化: 図6に各 case における粒径ごとの重量濃度の時系列変化を示す。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。

3.3.2 沈着率: 図7に各 case における粒径ごとの沈着率を示す。沈着率の算出に用いる重量濃度は caseA では30~60[min]、caseB において計測点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。

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。

表4 実験 case

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

また、重量濃度で加重平均した沈着率^{※13}は、36~42[%]となる。caseB、caseC の沈着率は caseA と大きな差は見られない。

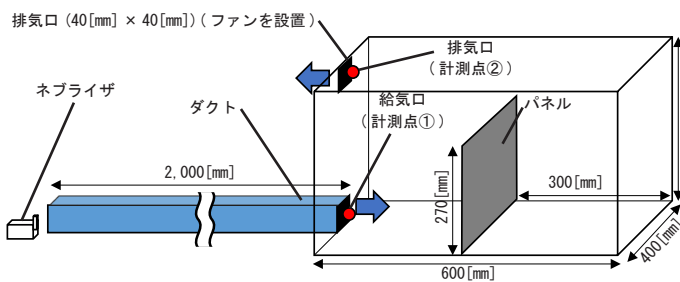


図5 実験対象の概要 (caseB)

パネルの有無や、飛沫の噴霧時間によって沈着率は変化しないと考えられる。

4 飛沫の沈着を考慮した数値解析(解析②)

4.1 解析条件: 解析条件、解析対象モデル及び解析 case は解析①(沈着無し)と同様とする。解析②(沈着を考慮)で用いる沈着率は3章で行った模型実験の caseC の粒径ごとの値を用いる。室内で飛沫が沈

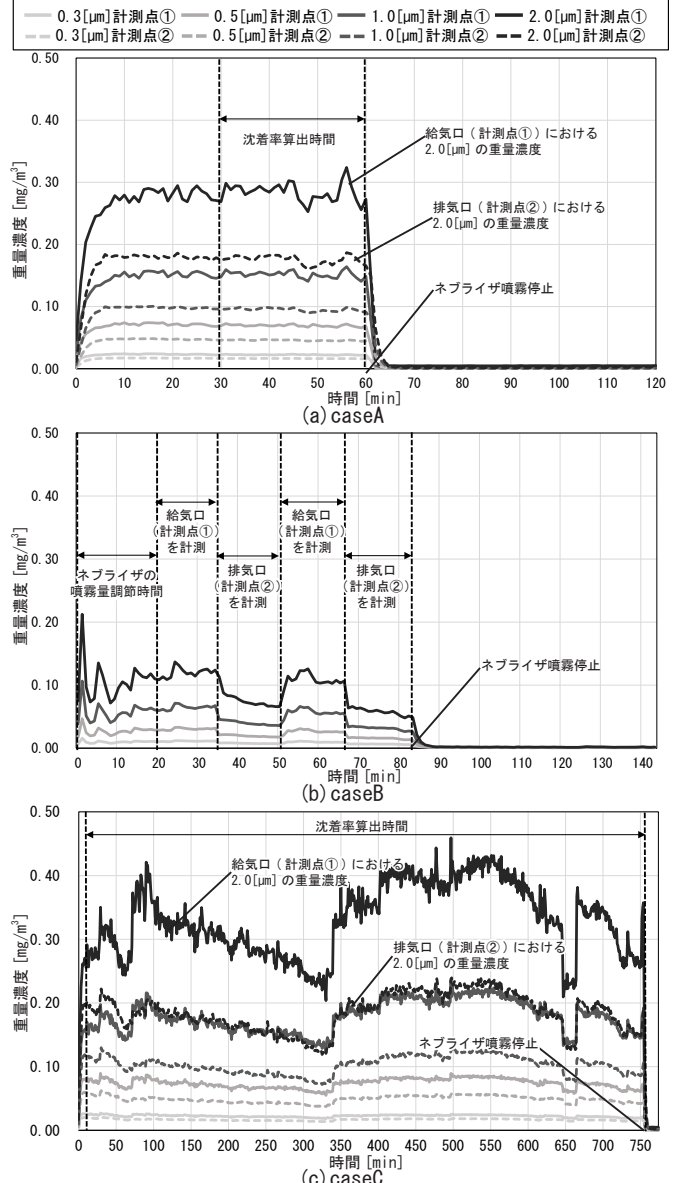


図6 各 case における粒径ごとの重量濃度の時系列変化

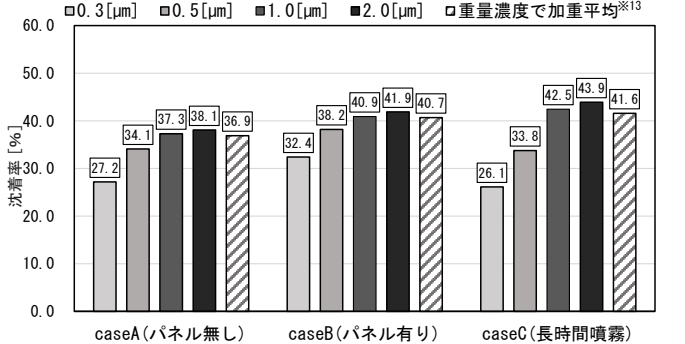


図7 各 case における粒径ごとの沈着率

着する場所が不明なため、室内の全面に均等に沈着して見かけの換気回数が増加すると仮定する。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。濃度減衰時の解析では、まず解析①（沈着無し）の結果に基づき、各濃度測定点の濃度減衰曲線から(3)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。得られた局所換気回数に対し、沈着率と各局所換気回数を乗じた値を加算し、沈着を考慮した局所換気回数とする(4式)。(4式により、濃度減衰曲線を求め、得られた濃度減衰曲線と(1)式により、汚染質齢を算出する。

$$p - p_0 = (p_1 - p_0)e^{-nt} \dots (3)$$

$$p - p_0 = (p_1 - p_0)e^{-(1+\frac{a}{100})nt} \dots (4)$$

p : 汚染物質濃度 [m^3/m^3]	p_0 : 外気汚染物質濃度 [m^3/m^3]*14
p_1 : 初期汚染物質濃度 [m^3/m^3]	n : 局所換気回数 [1/h]
t : 時間 [s]	a : 沈着率 [%]

4.2 実測結果と解析結果の比較: 図8に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9に実測結果と解析結果における汚染質齢の比較^{※15}を示す。沈着を考慮した場合(解析②)、沈着を考慮しない場合(解析①)と比較して濃度減衰曲線の傾きが大きくなる。これは沈着により局所換気回数が増加したためと考えられる。

汚染質齢を実測結果と解析結果で比較すると、エアコンを稼働した case1 及び case2 において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9)。またエアコンを停止した case3 においては、沈着率を考慮しない場合は負の相関となる一方で、沈着率を考慮する場合は正の相関となり、実測結果とほぼ一致する傾向となる。

5 まとめ

5.1 暖房時の教室における飛沫の拡散性状の実測及びCFD解析(解析①、沈着無し)

- ①排気口基準濃度において、エアコンを稼働した case1、case2 では決定係数が 0.60 以上と比較的相関が高い。
- ②汚染質齢において、case1 では決定係数が 0.86 と比較的高いが、case2 では 0.12 と低く、case3 では負の相関となる。

5.2 飛沫の沈着に関する基礎的模型実験

- ①どの case でも、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。

5.3 飛沫の沈着を考慮した数値解析(解析②)

- ①エアコンを稼働した case1 及び case2 において沈着を考慮することで、汚染質齢の解析結果は概ね実測結果と一致する傾向がある。
- ②エアコンを停止した case3 においても、実測結果と解析結果は正の相関となり、実測結果とほぼ一致する傾向となる。

注釈

- ※1 数値流体力学 (Computational Fluid Dynamics)
- ※2 飛沫が壁や床等に付着し、空気中から減少すること。
- ※3 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。
- ※4 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。
- ※5 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。
- ※6 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。尚、重量濃度の算出において、粒径は球形、直径は代表粒径と仮定し、密度は食塩 ($2.16[\text{g}/\text{cm}^3]$) を使用している。
- ※7 流量収支を合わせるため、ネブライザの吹出風量分を排気口の排気風量に加えているが、排気風量に対して 0.08 [%] であるため、影響は極めて少ないと考えられる。
- ※8 それぞれ実測で測定した結果(平均値)を用いる。
- ※9 定常濃度は各 case で変化するので、エアコンを暖房運転した case ではエアコンが稼働している時刻 (case1: $t = 104 \sim 112[\text{min}]$, case2: $t = 79 \sim 87[\text{min}]$)、エアコンを停止した case3 では $t = 90 \sim 120[\text{min}]$ の平均重量濃度とする。
- ※10 外気の粉塵濃度を考慮するため、各測定点の重量濃度は教卓側給気口(②)の重量濃度を減じたものとしている。
- ※11 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。
- ※12 基礎的模型実験において室内で発生する飛沫は存在しないため、 $k = 0[\text{mg}/\text{m}^3]$ となる。
- ※13 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。
- ※14 外気汚染物質濃度は、教卓側給気口(②)の濃度とする。
- ※15 それぞれの図中の薄い色のプロットは、解析①で求めた沈着を考慮しない場合の結果である。

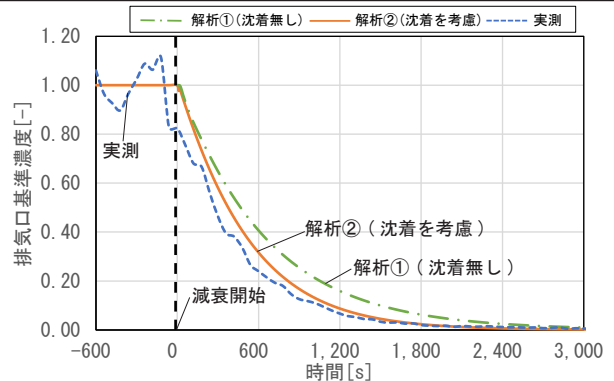
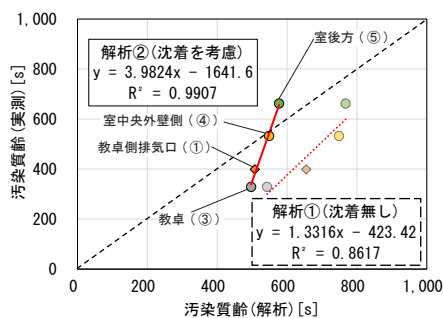
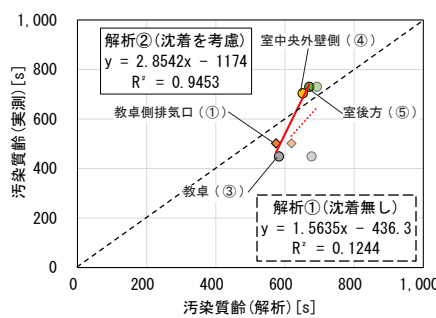


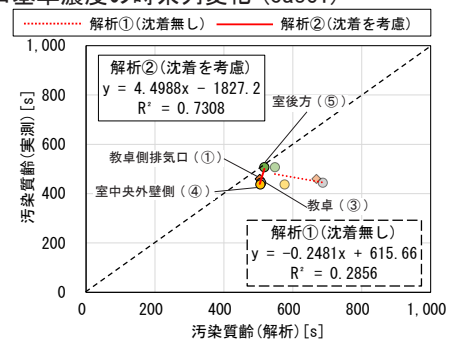
図8 減衰時における教卓側排気口(①)の排気口基準濃度の時系列変化(case1)



(a) case1 (エアコン稼働 風量急)



(b) case2 (エアコン稼働 風量弱)



(c) case3 (エアコン停止)

図9 実測結果と解析結果における汚染質齢の比較^{※15}