

屋内における飛沫の拡散に関する研究

単純な室及び教室を対象とした飛沫濃度の実測及びCFD解析

大橋 慶大 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。新型コロナウイルス感染症は、飛沫・空気・接触感染が主な感染経路であるとされており、厚生労働省は、換気によるウイルス等の濃度低減が感染予防に重要であるとしている。「換気の悪い密閉空間」を改善するための換気量 $30[\text{m}^3/\text{h}\cdot\text{人}]$ を満足すれば、ビル管理法における空気環境の基準に適合し、「換気の悪くない空間」と定義している^{x1)}。しかし、この換気量は CO_2 濃度 $1,000[\text{ppm}]$ を元に算出されており、室内の飛沫感染防止に対する有効性は全く不明である。

感染拡大を抑制するために建築環境工学分野では、CFD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。

本研究では、CFD解析(RANS^{*1)}により、一辺が $3.0[\text{m}]$ の単純な室を対象に、換気による飛沫(ウイルス粒子)の拡散性状の解析を行う。粒子が換気で室内から排出・除去される割合を算出し、飛沫の排出・除去効果の定量的評価を行う。

次に教室において模擬飛沫として経口補水液を噴霧し、室内での飛沫濃度の実測を行う。換気、空調の運転

方式を変化させた場合の飛沫の拡散性状を把握する。更に、CFD解析(RANS)を用いて対象教室をモデル化し、飛沫の拡散性状の解析を行うことで、CFD解析の妥当性の検討を行う。

2 単純な室における飛沫の拡散性状

2.1 解析対象: 図1に解析対象モデル、表1に解析条件、図2に床置型空気清浄機^{*2)}を示す。滞在人員は2名とし、人体モデルAを感染者とする。case1は天井の換気口($100[\text{mm}] \times 500[\text{mm}]$)から鉛直方向に換気量 $60[\text{m}^3/\text{h}]$ で給排気を行う。case2はcase1と同じ換気量で、床全面で給気、天井全面で排気を行う。case3、case4はcase1に空気清浄機を追加し、空気清浄機の風量は $300[\text{m}^3/\text{h}]$ とする。case3は床置型、case4は天井カセット型(中央吸込、4方向吹出)の空気清浄機とし、吹出風向は、case3が上向きに $75[^\circ]$ 、case4が下向きに $45[^\circ]$ とする。

2.2 解析方法: 表2に解析方法、図3に人体モデルを示す。RANS解析には汎用数値流体解析ソフトSTREAM ver.2020を使用する。感染者は呼吸(呼出風速 $1.0[\text{m/s}]$ ^{x2)})状態とし、 $10[\text{s}]$ 毎に粒径が $100[\mu\text{m}]$ と、 $10[\mu\text{m}]$ の飛沫を模擬した粒子を口から発生させる。粒径が $100[\mu\text{m}]$ の粒子はすぐに沈降する為無視し、粒径 $10[\mu\text{m}]$ (沈降速度 $0.003[\text{m/s}]$)の粒子のみを対象とし濃度を算出する。粒子の物性は水とし、壁表面における反発係数は 1.0 ^{*3)}とする。粒子発生からの時刻を t とし最初の $t=0 \sim 600[\text{s}]$ の間は粒子を $10[\text{s}]$ 毎に100個発生させ、 $t=600 \sim 1,200[\text{s}]$ の間は発生を停止し、粒子個数の減衰を解析する。

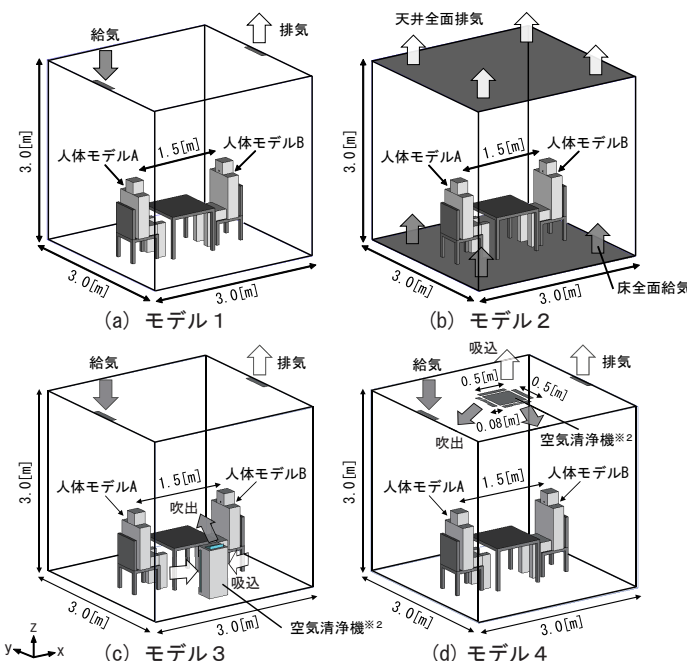


図1 解析対象モデル

case	解析対象モデル	換気量 $[\text{m}^3/\text{h}]$	空気清浄機 ^{*2)} 風量 $[\text{m}^3/\text{h}]$
case1	モデル1	60	無
case2	モデル2		床置型
case3	モデル3		
case4	モデル4		天井カセット型

乱流モデル	標準k-εモデル		
解析領域	$3.0[\text{m}] \times 3.0[\text{m}] \times 3.0[\text{m}]$		
境界条件	表面境界	床	壁面対数則
	熱境界	モデル面	断熱
	輻射境界		輻射率0.9
温度	20 $[\text{C}]$		
解析時間 t	粒子発生: $t=0 \sim 600[\text{s}]$ 発生停止: $t=600 \sim 1,200[\text{s}]$		

吹出
 吹出口: $0.15[\text{m}] \times 0.25[\text{m}]$
 風量: $300[\text{m}^3/\text{h}]$
 風速: $2.22[\text{m/s}]$
 吹出風向: 上向きに $75[^\circ]$

吸込
 吸込口: $0.03 \times 0.7[\text{m}] \times 2$ 箇所
 風量: 1箇所当たり $150[\text{m}^3/\text{h}]$
 風速: $1.98[\text{m/s}]$

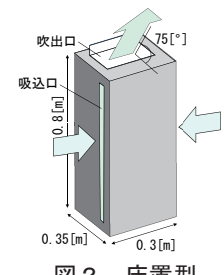


図2 床置型空気清浄機^{*2)}

人体表面温度: $30[\text{C}]$
 口: $0.02[\text{m}] \times 0.02[\text{m}]$
 呼出
 呼出温度: $35[\text{C}]$
 呼気風速: $1.0[\text{m/s}]$ ^{x2)}
 飛沫
 飛沫粒径: ① $100[\mu\text{m}]$
 ② $10[\mu\text{m}]$
 飛沫物性: 水
 反発係数: 1.0 ^{*3)}
 1回の発生数: 100個
 発生間隔: $10[\text{s}]$

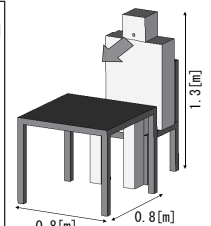


図3 人体モデル

2.3 解析結果

2.3.1 気流分布・基準化濃度分布：図4に各 case における気流分布（鉛直断面・室中央）、図5に各 case における $t=600[s]$ の基準化濃度分布^{*5}（鉛直断面・室中央）を示す。

(1) case1：粒径が $10[\mu m]$ の粒子は、呼出された後、人体周辺の上昇気流により天井付近へ移動し、室全体に拡散する。600[s]での基準化濃度は、人体Aの呼気上部で1.0以上と高く、人体B周辺では0.3程度である。

(2) case2：粒径が $10[\mu m]$ の粒子は、呼出された後、人体周辺の上昇気流、床の吹出気流により天井付近へ移動するが、上昇気流に比較して天井の吸込気流速度が遅い為、飛沫は排出されず、室全体に拡散する。600[s]での基準化濃度は、1.0以上となる部分が他の case に比較して大きく、人体B上部まで広がるが、人体B周辺では0.2程度である。

(3) case3：粒径が $10[\mu m]$ の粒子は、呼出された後、人体周辺の上昇気流、空気清浄機の吹出気流により感染者後方へ移動し、室全体に拡散する。600[s]での基準化濃度は、人体B周辺では0.1程度と低い。

(4) case4：粒径が $10[\mu m]$ の粒子は、呼出された後、人体周辺の上昇気流により天井付近へ移動し、拡散せずに空気清浄機に吸込まれ除去される。600[s]での基準化濃度は、人体B周辺では0.1程度と低い。

2.3.2 各 case の排出・除去率：図6に case1 における排出・除去率、残留率の時間変化、図7に各 case における $t=600[s]$ 、1,200[s] の排出・除去率を示す。 $t=600[s]$ での排出・除去率は、case1、case2で1.0[%]以下、 $t=1,200[s]$ での排出・除去率は、case1で7.2[%]、case2で20.5[%]と極めて低い。換気量が $60[m^3/h]$ ($30[m^3/h \cdot 人]$)での飛沫の排出・除去率は極めて低く、換気方式による差は殆ど見られない。床置型の空気清浄機を設置した case3 の排出・除去率は、 $t=600[s]$ で58.9[%]、1,200[s]で86.3[%]、天井カセット型を設置した case4 の排出・除去率は、 $t=600[s]$ で100[%]と極めて良好な値となる。

単純な室を対象とした今回の解析条件では、粒子（飛沫）は人体の上昇気流によって室の上部へ移動するため

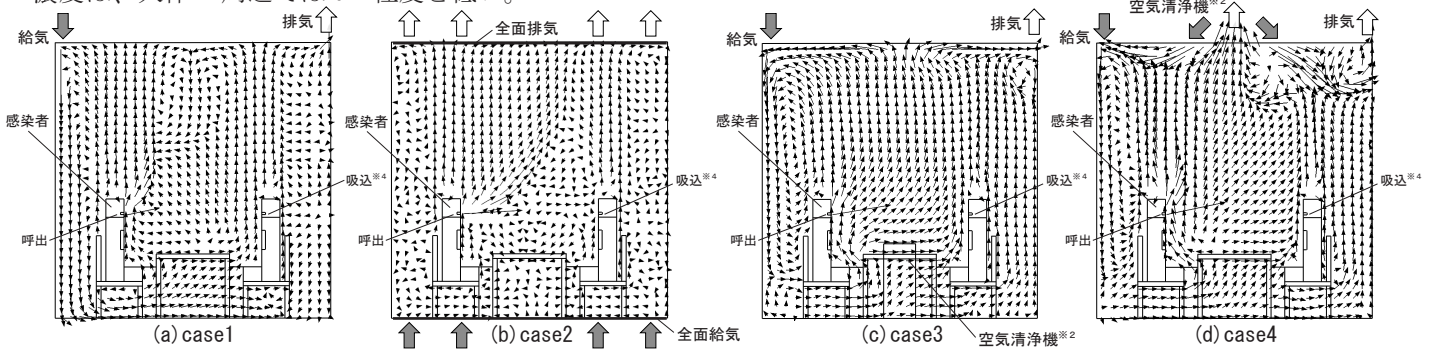


図4 各 case における気流分布（鉛直断面・室中央）

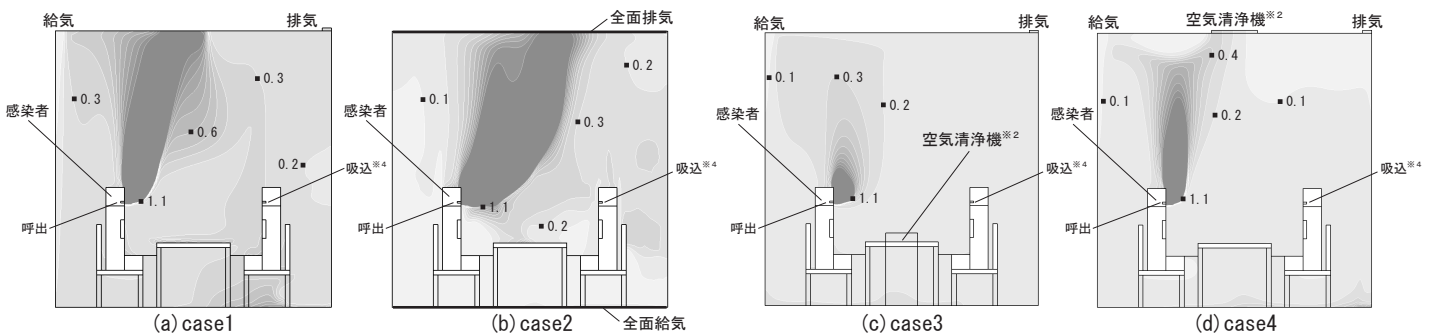


図5 各 case における $t=600[s]$ の基準化濃度分布^{*5}（鉛直断面・室中央）

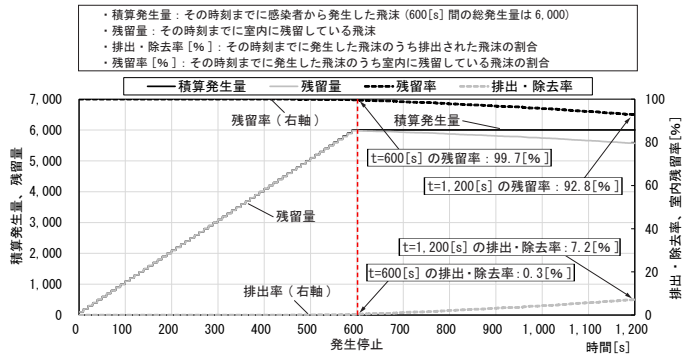


図6 case1 における排出・除去率、残留率の時間変化

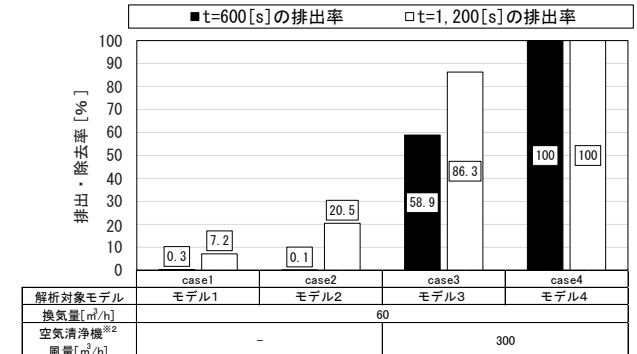


図7 各 case における $t=600[s]$ 、1,200[s] の排出・除去率

空気清浄機の吸込口を天井に設けた方が排出・除去率が向上すると考えられる。特に冬季は換気による室温低下を防止する為、空気清浄機の使用が有効であると考えられる。

3 教室における飛沫濃度の実測

3.1 実測概要：図8に実測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、実測期間は2021年9月27日(月)から9月30日(木)、外気温は20~26[°C]、室温は23~26[°C]である。床面積は約61[m²]、室容積は約189[m³]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6台を教室内に配置して行う。本実測において飛沫は、ネブライザ(カタログ噴霧能力:約0.4[mL/min])から経口補水液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の上に設置し、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、t=0~120[min]は噴霧を行い、t=120~240[min]は停止し、飛沫濃度を測定する。

3.2 実測条件：表3に実測条件を示す。caseAは、全熱交換換気扇を普通換気(熱交換無)、caseBは全熱交換換気とし、風量は強(定格風量:650[m³/h])とする。caseC~caseFは、caseA、caseBに加えてエアコン稼働させ、風向はそれぞれ水平、下向きとする。エアコンの風量は急(定格風量:1,470[m³/h])とする。

3.3 分析方法：表4にパーティクルカウンタの概要を示す。パーティクルカウンタは、各粒径区分の個数濃度を測定する。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^{*8}。尚、外気の粉塵濃度を考慮し、各測定点の重量濃度は、②教卓側給気口の重量濃度を減じている。濃度分布の評価には、①教卓側排気口の定常濃度^{*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で排気口基準濃度として表す。また、汚染質到達齢^{*10}を(1)式より算出する。

$$\begin{aligned} \tau_r &: \text{汚染質到達齢[s]} & t_s &: \text{ネブライザ停止時刻[s]} \\ C_p(t) &: \text{時刻 } t \text{ の算出点 } P \text{ での排気口基準濃度[-]} \\ C_p(t_s) &: \text{算出点 } P \text{ での定常時(90~120[min])における排気口基準濃度[-]} \end{aligned}$$

$$\tau_r = \int_0^{t_s} \{1 - C_p(t)/C_p(t_s)\} dt \quad \dots (1)$$

3.4 実測結果：図9に各caseにおける排気口基準濃度を示す。排気口基準濃度は、caseAでは④室中央外壁側が1.3程度、⑥室中央廊下側が1.2程度と相対的に高くなる。一方、エアコンを稼働した場合の排気口基準濃度は、風向を水平としたcaseCでは③教卓で1.3程度、風向を下向きとしたcaseDでは④室中央外壁側で1.6程度、⑥室中央廊下側では1.2程度と高くなる傾向にある。全てのcaseにおいて⑤室後方の排気口基準濃度は最も低くなる。全熱交換換気扇を熱交換換気としたcaseと普通換気の場合を比較すると濃度分布の差異は殆どみられない。これは室内外の温度差が小さいためと考えられる^{*11}。

図10に各caseにおける汚染質到達齢を示す。汚染質到達齢は、全熱交換換気扇のみを稼働したcaseA、caseBでは④室中央外壁側が50~250[s]となり比較的短い。他の計測点の汚染質到達齢は、300~600[s]と

表4 パーティクルカウンタの概要

粒径区分 (代表粒径(沈降速度) ^{*7})	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]

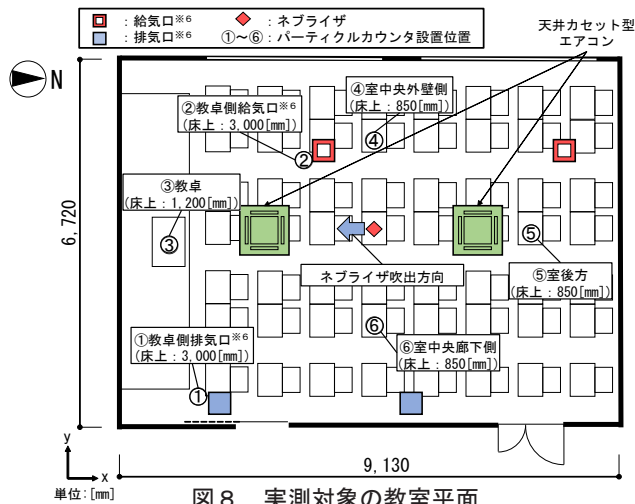


図8 実測対象の教室平面

表3 実測条件

case	全熱交換換気扇×2[台]		天井カセット型エアコン×2[台]	
	風量(定格風量)	運転方式	風量(定格風量)	風向
caseA	強 (650[m ³ /h])	普通(熱交換無)	急 (1,470[m ³ /h])	無
caseB		全熱交換		
caseC		普通(熱交換無)		水平
caseD				下向き
caseE		全熱交換		水平
caseF				下向き

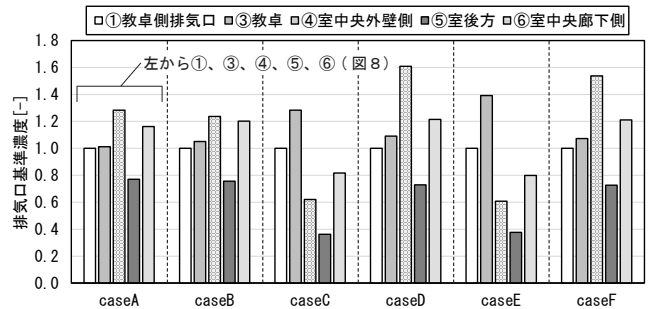


図9 各caseにおける排気口基準濃度

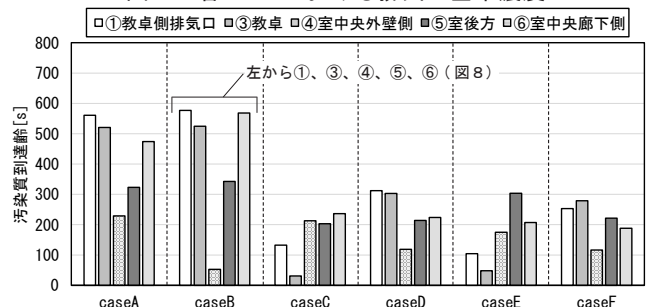


図10 各caseにおける汚染質到達齢

なる。エアコンを稼働した caseC ~ caseF において各計測点の汚染質到達齢は、50 ~ 300[s] となり、caseA、caseB に比較して短くなる傾向にある。

4 教室における飛沫濃度のCFD解析

4.1 解析条件：表5にCFD解析方法を示す。RANS解析には汎用数値流体解析ソフトSTREAM ver.2020を使用する。解析領域は9.13[m](x) × 6.72[m](y) × 3.00[m](z)、流入境界^{※12}は、ネブライザの吹出風速は1.5[m/s]^{※13}、全熱交換換気扇及びエアコンはそれぞれ定格風量とする。温度条件は実験時の室温を考慮して25[°C]とし、飛沫は代表粒径(表4)をネブライザから発生させる。本研究では、全熱交換換気扇を普通換気とした場合(caseA、caseC、caseD)の解析を行う(表3)。

4.2 解析結果：図11にcaseAにおける定常時の排気口基準濃度分布(床上：850[mm])、図12に実測結果とCFD解析結果における濃度分布の比較、図13に実測結果とCFD解析結果における汚染質到達齢の比較を示す。排気口基準濃度において実測結果とCFD解析結果の決定係数は、エアコンを稼働したcaseC、caseDで0.60以上と比較的高く、caseAで0.34となる。一方、汚染質到達齢において実測結果とCFD解析結果の決定係数はcaseAでは0.94、caseDでは0.57と比較的高く、caseCでは負の相関関係となる。室内での濃度分布の相対的な傾向は実測とCFD解析で同様であり、CFDにより実際の教室での飛沫の拡散状況を概ね再現できたと考えられる。

5 まとめ

5.1 単純な室における飛沫の拡散性状

① 粒径が10[μm]の飛沫は、呼出された後、人体周辺の上昇気流によ

り天井付近に移動する。

② 天井カセット型を設置したcase4の排出・除去率は、t=600[s]で100[%]と極めて良好な値となる。

5.2 教室における飛沫濃度の実測

① caseAにおいて排気口基準濃度は、④室中央外壁側が1.3程度、⑥室中央廊下側が1.2程度と相対的に高くなる。
② 全熱交換換気扇を熱交換換気としたcaseにおいて普通換気の場合と比較して濃度分布の差異は殆どみられない。

5.3 教室における飛沫濃度のCFD解析

① 排気口基準濃度において実測結果とCFD解析結果の決定係数は、エアコンを稼働したcaseC、caseDで0.60以上と比較的高く、caseAで0.34となる。

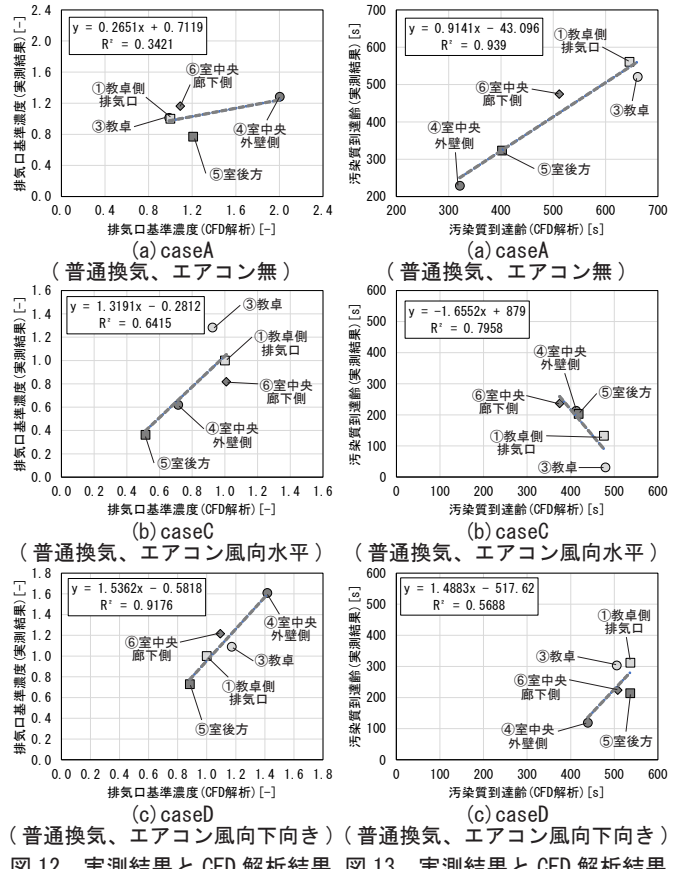


図12 実測結果とCFD解析結果における濃度分布の比較

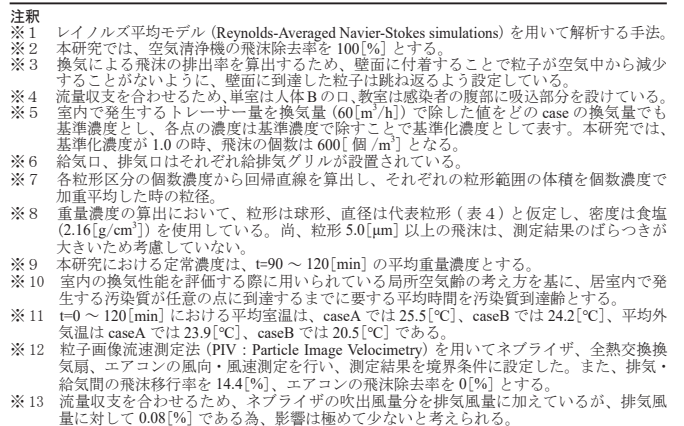


図13 実測結果とCFD解析結果における汚染質到達齢の比較

表5 CFD解析方法

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)	
境界条件	流入境界 ^{※12}	ネブライザ吹出風速	1.5[m/s] ^{※13}
	表面境界	全熱交換換気扇	定格風量(表3)
		天井カセット型エアコン	エアコン
熱境界	床	壁面対数則	
輻射境界	モデル面	断熱	
温度	25[°C]		
飛沫	代表粒径(表4)		

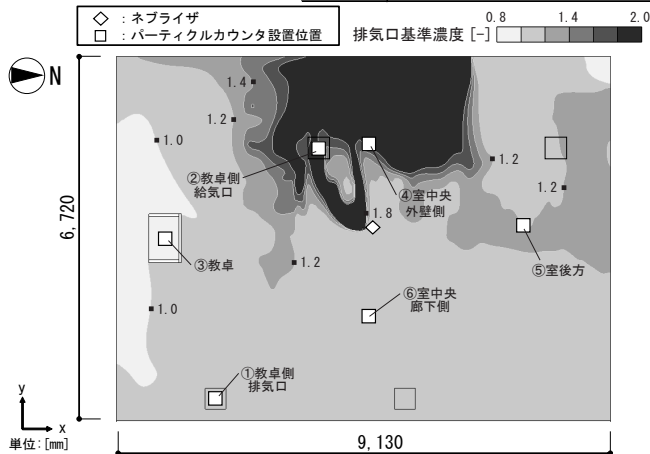


図11 caseAにおける定常時の排気口基準濃度分布(床上：850[mm])

※1 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。
 ※2 本研究では、空気清浄機の飛沫除去率を100[%]とする。
 ※3 換気による飛沫の排出率を算出するため、壁面に付着することで粒子が空気中から減少することがないように、壁面に到達した粒子は跳ね返るよう設定している。
 ※4 流量収支を合わせるため、単室は人体Bの口、教室は感染者の腹部に吸込部分を設けている。
 ※5 室内で発生するトレーサ量を換気量(60[m³/h])で除した値をどのcaseの換気量でも基準濃度とし、各点の濃度は基準濃度で除すことで基準化濃度として表す。本研究では、基準化濃度が1.0の時、飛沫の個数は600[個/m³]となる。
 ※6 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。
 ※7 各粒径区分の個数濃度から回歸直線を算出し、それぞれの粒形範囲の体積を個数濃度で加重平均した時の粒径。
 ※8 重量濃度の算出において、粒形は球形、直径は代表粒形(表4)と仮定し、密度は食塩(2.16[g/cm³])を使用している。尚、粒形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。
 ※9 本研究における定常濃度は、t=90~120[min]の平均重量濃度とする。
 ※10 室内の換気性能を評価する際に用いられている局所空気齢の考え方を基に、居室内で発生する汚染質が任意の点に到達するまでに要する平均時間を汚染質到達齢とする。
 ※11 t=0~120[min]における平均室温は、caseAでは25.5[°C]、caseBでは24.2[°C]、平均外気温はcaseAでは23.9[°C]、caseBでは20.5[°C]である。
 ※12 粒子画像流速測定法(PIV: Particle Image Velocimetry)を用いてネブライザ、全熱交換換気扇、エアコンの風向・風速測定を行い、測定結果を境界条件に設定した。また、排気・給気間の飛沫移行率を14.4[%]、エアコンの飛沫除去率を0[%]とする。
 ※13 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風量に加えているが、排気風量に対して0.08[%]である為、影響は極めて少ないと考えられる。

参考文献
 文1) 厚生労働省「換気の悪い密閉空間」を改善するための換気の方法、2020年
 文2) 村上ら「PIV風速計による人体呼吸域周辺の風速測定」、可視化情報学会誌、2001年