

# 教室を対象とした人からの飛沫の拡散に関する研究

## 飛沫の拡散・排出・除去のCFD解析

中澤 郁

指導教員 有波 裕貴 助教

### 1 研究目的

インフルエンザやコロナウイルスなどによる感染症は、飛沫・空気・接触感染が主な感染経路である。厚生労働省は、感染予防のためには換気等によるウイルスの濃度低減が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を示しており<sup>x1)</sup>、一人当たり30[m<sup>3</sup>/h]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」となっている。しかし、この換気量が室内の飛沫感染防止に有効であるかは全く不明である。

本研究では、CFD解析(RANS<sup>\*\*1)</sup>により、小学校の教室を対象に、換気・空調・空気清浄機による飛沫(ウイルス粒子)の拡散状況の解析を行う。粒子が換気等で室内から排出・除去される割合を算出することで、飛沫の排出・除去効果を定量的に評価することを目的とする。

### 2 研究概要

**2.1 解析概要**：図1に解析対象モデル、図2に人体モデル、表1に解析方法を示す。解析対象は小学校の一般的な教室とし、解析領域は9.0[m](x)×9.6[m](y)×3.0[m](z)とする。滞在人員は生徒35名、教員1名の計36名とし、室中央の1名を感染者とする。感染者は10[s]毎に呼吸(呼気の風速1.0[m/s]<sup>x2)</sup>しているとして仮定する。発生させる飛沫の粒径は100[μm]と10[μm]とする。粒径100[μm]の粒子は呼出後すぐ沈降するため無視し、粒径10[μm]の粒子のみ濃度の算出を行う。飛沫の物性は水とし、壁表面における反発係数は1.0<sup>\*\*2)</sup>とする。t=0~600[s]の間は粒子を10[s]毎に100個発生させ、t=600~1,200[s]の間は発生を停止し、粒子数の減衰の解析を

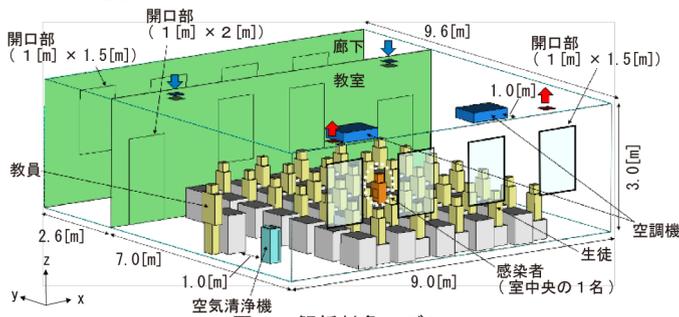


図1 解析対象モデル

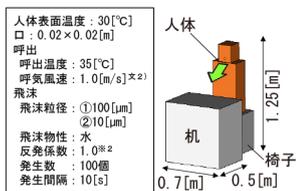


図2 人体モデル

表1 解析方法

解析領域	乱流モデル		標準k-εモデル	
	9.0[m] × 9.6[m] × 3.0[m]	床	壁面対数則	壁面対数則
境界条件	輻射境界	モデル面	輻射率0.9	
	熱伝導	外壁	4.09	
	[W/(m²·K)]	窓	5.99	
温度	等温時: 室温 20[°C]	外気温 0[°C]		
	冷房時: 室温 28[°C]	外気温 35[°C]		
解析時間 t	粒子発生: t=0~600[s]			
	発生停止: t=600~1,200[s]			

行う。RANS解析には汎用数値流体解析ソフトSTREAM ver.2020を使用する。

**2.2 解析条件**：表2に解析条件、図3に空気清浄機<sup>\*\*4)</sup>、図4に空調機を示す。case1、case2では、給気は廊下側天井の給気口(500[m<sup>3</sup>/h]×2箇所)、排気は窓側天井の排気口(500[m<sup>3</sup>/h]×2箇所)から機械換気<sup>\*\*3)</sup>で行う。case2では、空気清浄機を教員の隣に設置し、風量は600[m<sup>3</sup>/h]、吹出風向は上向きに75[°]とする。空調機は教室窓側に2台設置し、風量は780[m<sup>3</sup>/h]、吹出風向は、暖房が下向きに45[°]、冷房は水平方向とする。case3、case4では教室の廊下側・窓側の開口部、廊下の開口部を開放し、自然通風<sup>\*\*5)</sup>を行った場合の解析を行う。窓・扉の開口をcase3では全開、case4では1/4開とし、外部基準風速をそれぞれ1.0[m/s]、3.0[m/s]、5.0[m/s]とする。

### 3 解析結果

**3.1 気流分布・基準化濃度分布**：図5~7に各caseの気流分布(鉛直断面・室中央)、t=590[s]<sup>\*\*6)</sup>の基準化濃度分布<sup>\*\*7)</sup>(鉛直断面・室中央)を示す。

(1) **機械換気**：粒径10[μm]の飛沫は人体周辺の上昇気流により天井付近へ移動し、教室全体に拡散する。基準化濃度は、室中央天井付近では1.1程度と高く、室後方では0.4程度と低くなる。

(2) **機械換気+空気清浄機**：case1-1同様、粒径10[μm]の飛沫は人体周辺の上昇気流により天井付近へ移動し、教室全体に拡散する。基準化濃度は室中央天井付近、感染者付近では1.1程度と高く、室前方、室後方では0.4程度と低くなる。

(3) **自然通風**：窓を開放して自然通風した場合は、粒径10[μm]の飛沫は教室廊下側へ移動し、case1-1に比較して教室全体に拡散する粒子数は極めて少ない。基準化濃

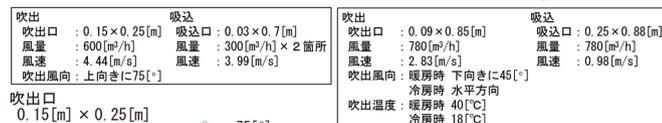


図3 空気清浄機<sup>\*\*4)</sup>

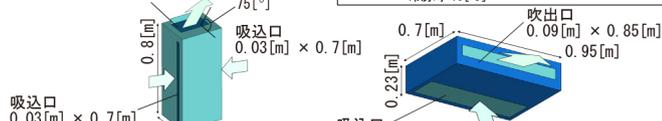


図4 空調機

表2 解析条件

case	換気方式	空調方法	換気方式	窓・扉の開口	外部基準風速
					外部基準風速
case1	機械換気 <sup>**3)</sup>	等温	自然通風 <sup>**5)</sup>	全開	1.0[m/s]
		暖房			3.0[m/s]
		冷房			5.0[m/s]
case2	機械換気 <sup>**3)</sup> + 空気清浄機 <sup>**4)</sup>	等温	自然通風 <sup>**5)</sup>	1/4開	1.0[m/s]
		暖房			3.0[m/s]
		冷房			5.0[m/s]

度は感染者付近では1.1程度と高いが、室前方、室後方では0.1程度と極めて低い。

3.2 各 case の排出率：図8に教室における粒子の残留率、排出率 (case1-1)、図9に各 case 毎の排出率 (t=600[s]、1,200[s]) を示す。

(1) 機械換気：case1-1 の排出率は t=600[s] では31[%]、t=1,200[s] では67[%]となる。case1-2、case1-3 の排出率は case1-1 に比較して低くなる。

(2) 機械換気 + 空気清浄機：case2-1 の排出率は t=600[s] では30[%]、t=1,200[s] では69[%]となり、case1-1 に比較して殆ど差は見られない。空調を行った case2-2、case2-3 の排出率は、case1-2、case1-3 に比較して高くなる。

(3) 自然通風：全ての case において t=1,200[s] での排出率が90[%]程度となり、機械換気を行った場合の case に比較して極めて高い。夏季は窓を開放することが極めて効果的である。

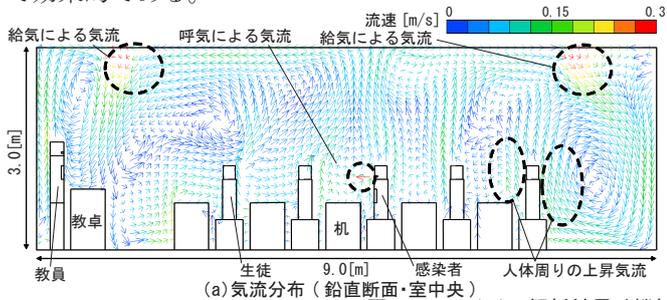


図5 case1-1 解析結果 (機械換気<sup>※3</sup>、等温、換気回数5.3[回/h])

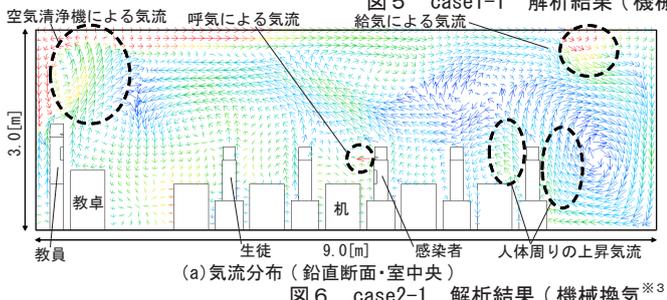


図6 case2-1 解析結果 (機械換気<sup>※3</sup>+空気清浄機<sup>※4</sup>、等温、換気回数8.5[回/h])

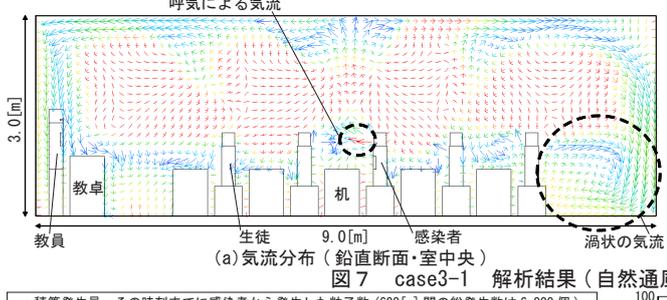


図7 case3-1 解析結果 (自然通風<sup>※5</sup>、開口部全開、換気回数85.6[回/h])

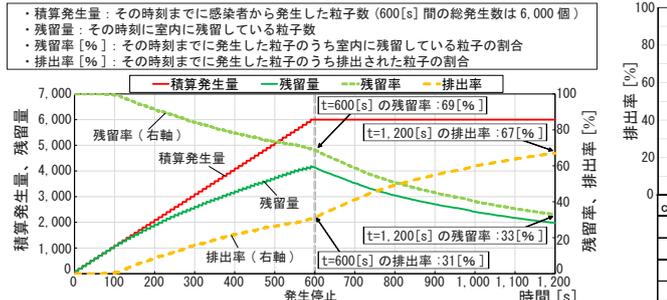


図8 教室における粒子の残留率、排出率 (case1-1)

#### 4 まとめ

- ① case1-1 において粒径 10[ $\mu\text{m}$ ] の飛沫は人体周辺の上昇気流により天井付近へ移動し、教室全体に拡散する。
- ② case1-1 の排出率は t=600[s] では31[%]、t=1,200[s] では67[%]となる。
- ③ 自然通風の全ての case において t=1,200[s] での排出率が90[%]程度となり、機械換気を行った場合の case に比較して極めて高い。夏季は窓を開放することが極めて効果的である。

注釈  
 ※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 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しないように、壁面に到達した粒子は跳ね返るよう設定している。  
 ※3 滞在人員 (36人)  $\times$  30[m<sup>3</sup>/h $\cdot$ 人]=1,080[m<sup>3</sup>/h]  $\approx$  1,000[m<sup>3</sup>/h] とする。換気回数は5.3[回/h]となる。  
 ※4 本研究では、空気清浄機の飛沫除去率を100[%]とする。  
 ※5 本研究では、一般的な小学校を対象としており、外部風の鉛直プロファイルは1/4乗則に従うものとし、軒高風速 (z=12[m]) を基準風速とする。対象教室は3階建ての2階 (床面の高さ：z=4.2[m]) とし、風向は教室から流入し廊下から流出するものとする。  
 ※6 粒子発生最終時刻とする。  
 ※7 室内で発生するトレーサー量を換気量 (1,000[m<sup>3</sup>/h]) で除した値を基準濃度とし、各点のトレーサー濃度は基準濃度で除すことで基準化濃度として表す。基準化濃度が1.0の時、完全拡散濃度となる。

#### 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「PIV風速計による人体呼吸域周辺の風速測定」、2001年

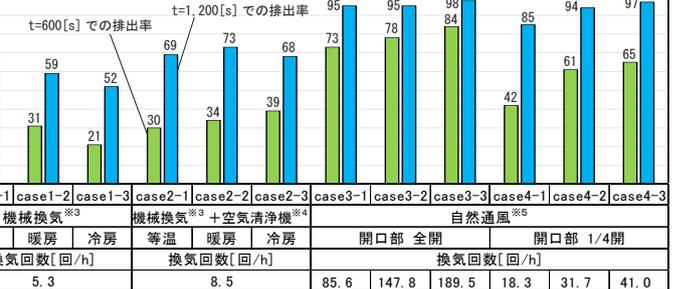
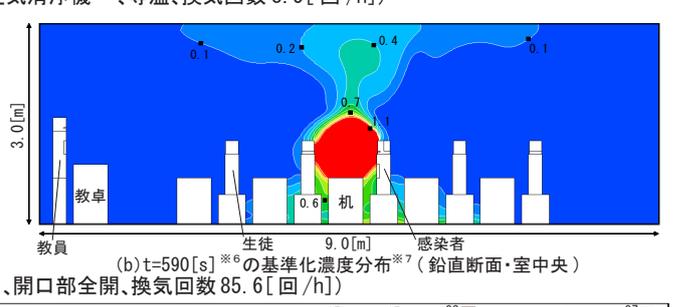
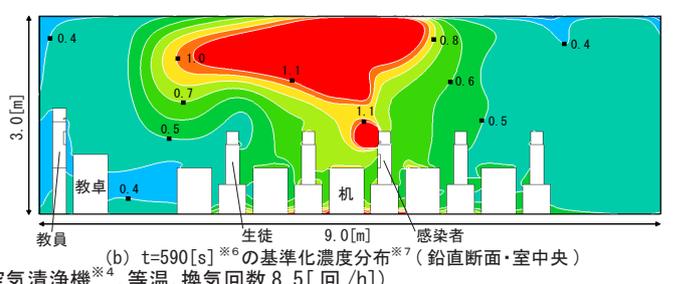
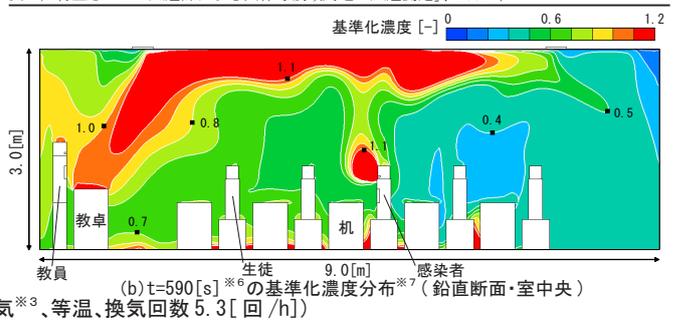


図9 各 case 毎の排出率 (t=600[s]、1,200[s])