

屋内における飛沫の 拡散に関する研究

教室を対象とした飛沫濃度の実測及びCFD解析

指導教員 前田 快人
有波 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。

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、CFD解析の飛沫の拡散性状について**実測結果**と**比較**した例は少なく、**CFD解析の妥当性は不明**である。

研究目的

本研究では、**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※¹)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。

※ 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。

研究概要

実測概要

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)、

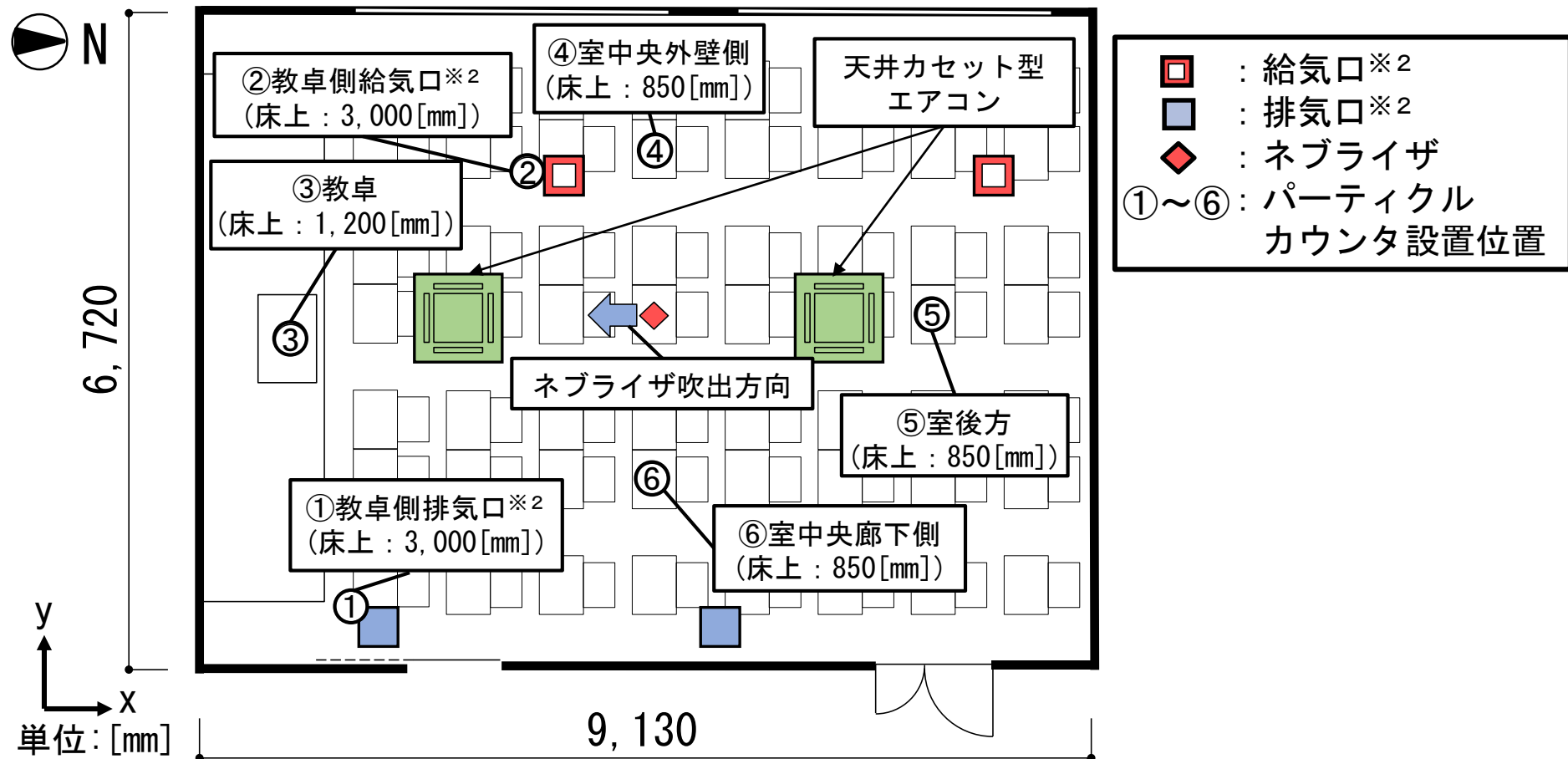


図1 実測対象の教室平面

※2 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。

実測概要

外気温は20～26[°C]、室温は23～26[°C]である。

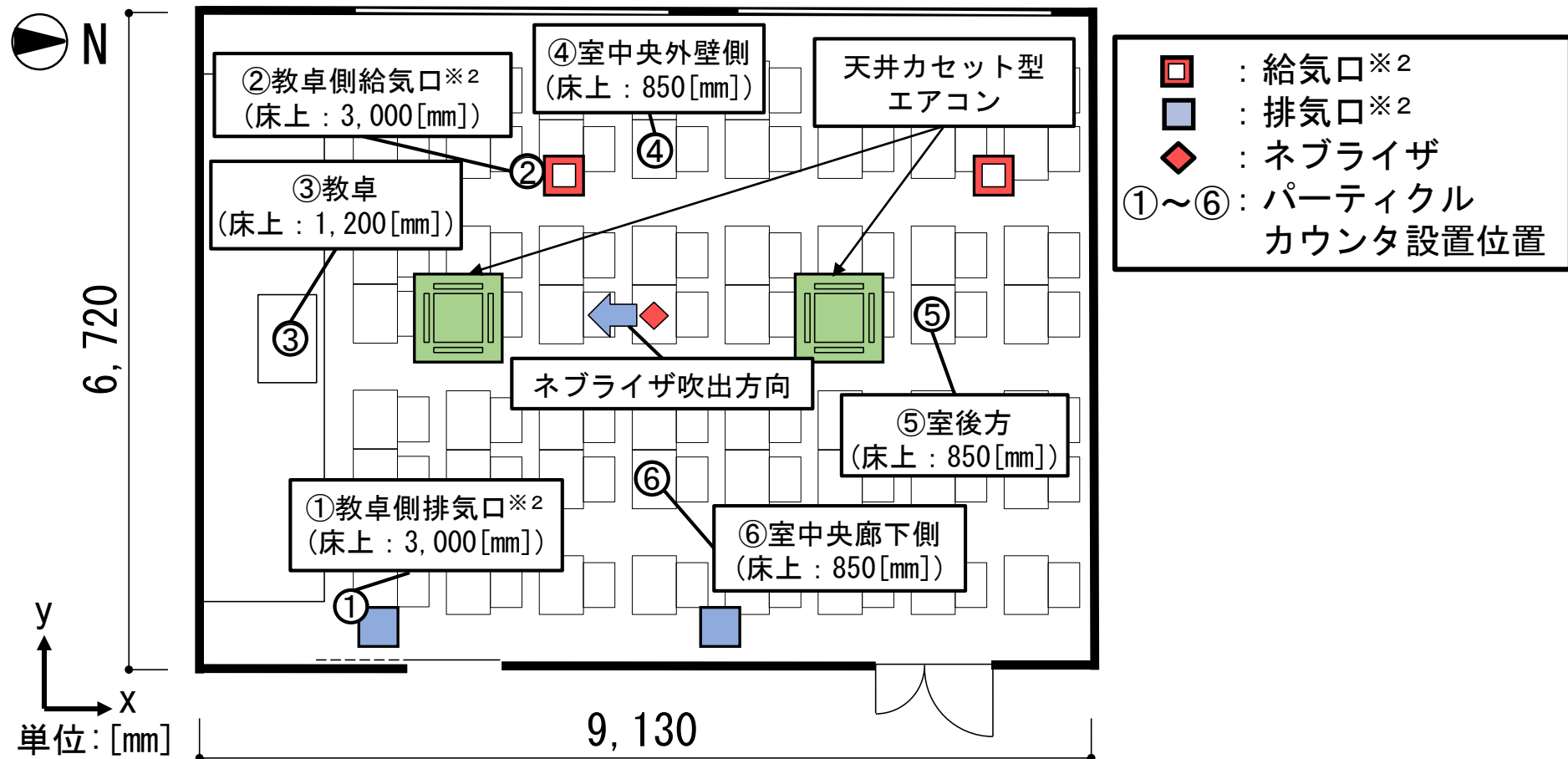


図 1 実測対象の教室平面

※2 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。

実測概要

床面積は約61[m²]、室容積は約189[m³]である。

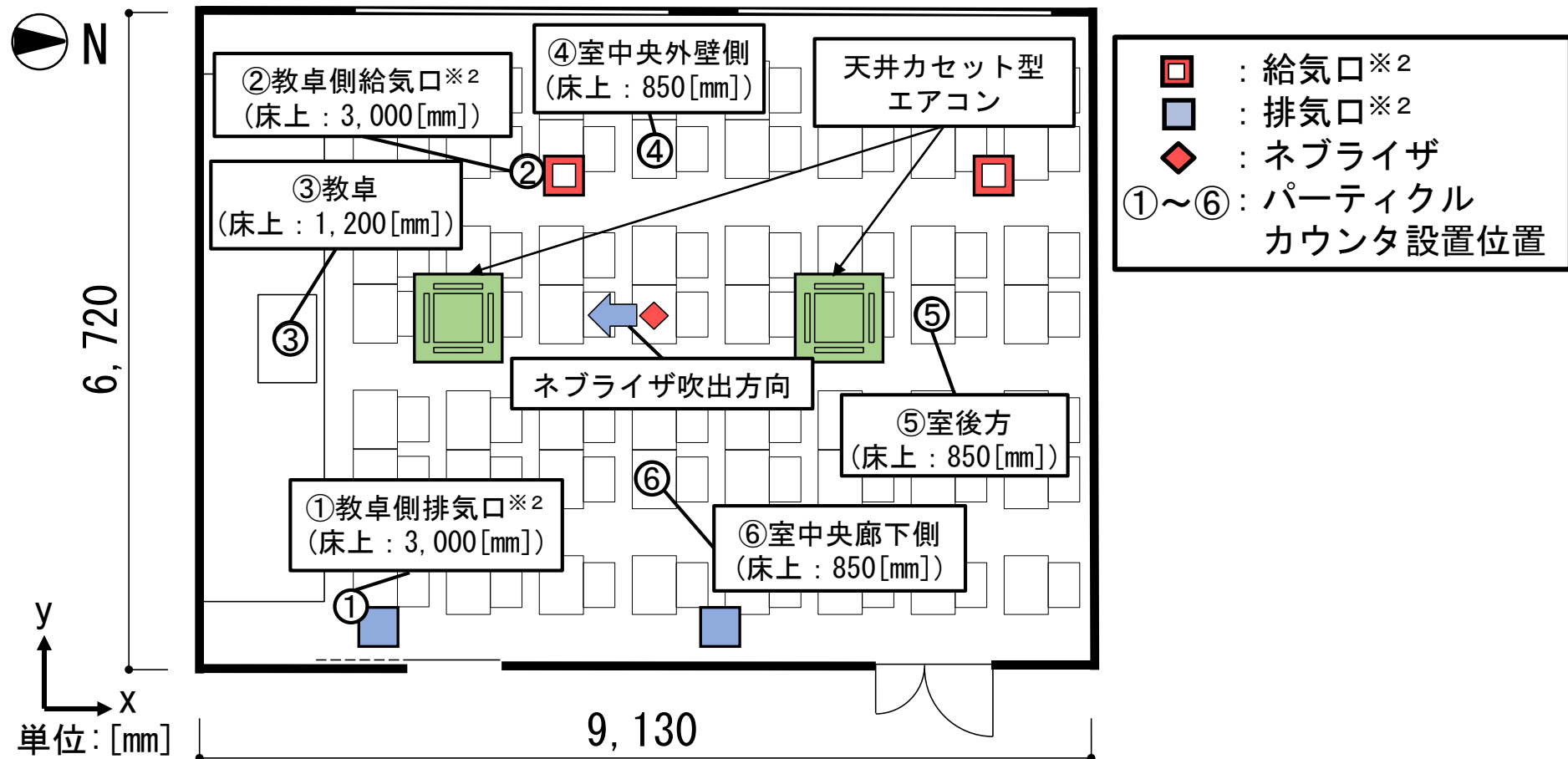


図1 実測対象の教室平面

※2 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。

実測概要

換気装置は全熱交換換気扇による第1種機械換気、

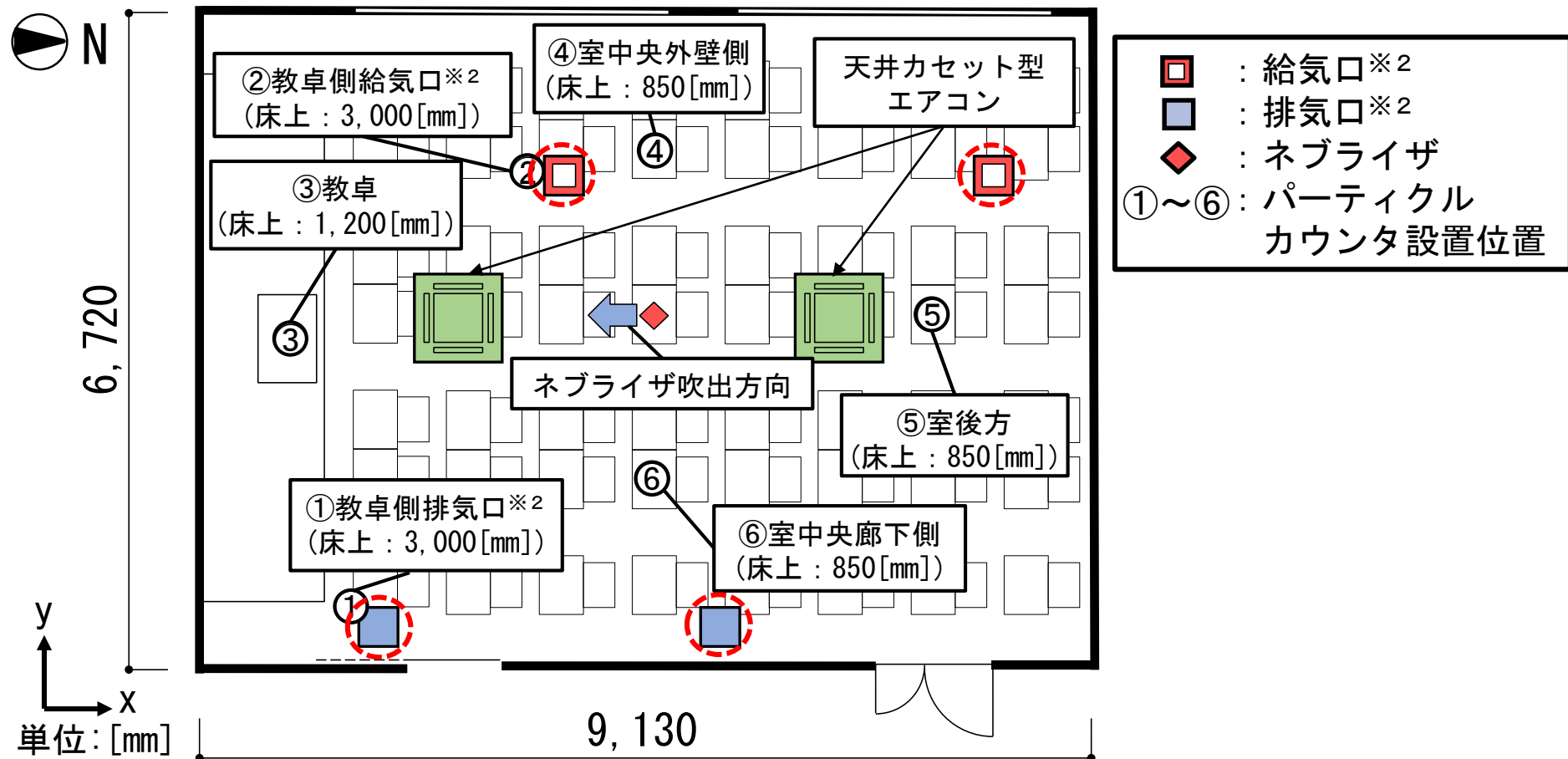


図1 実測対象の教室平面

※2 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。

実測概要

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。

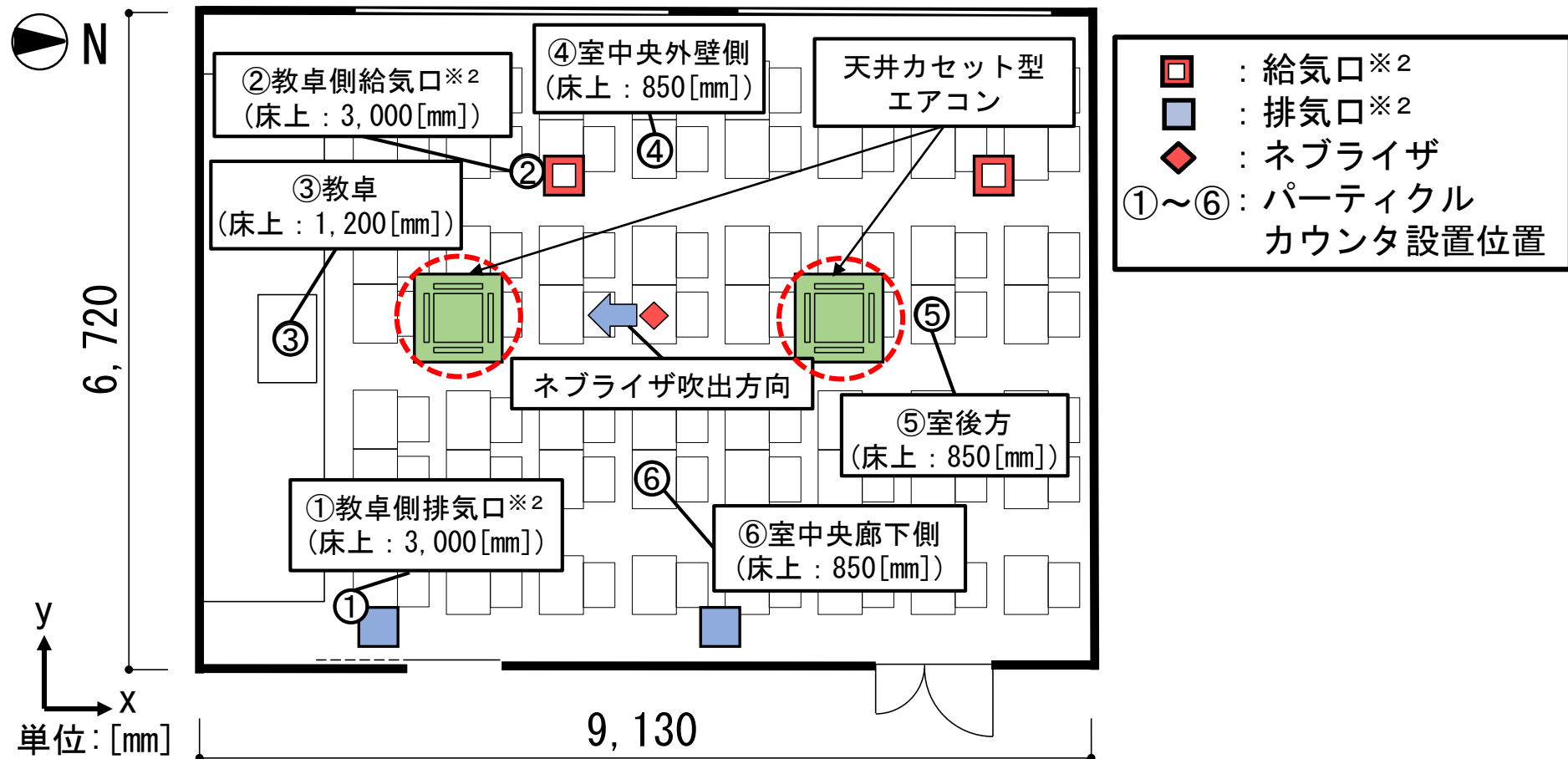
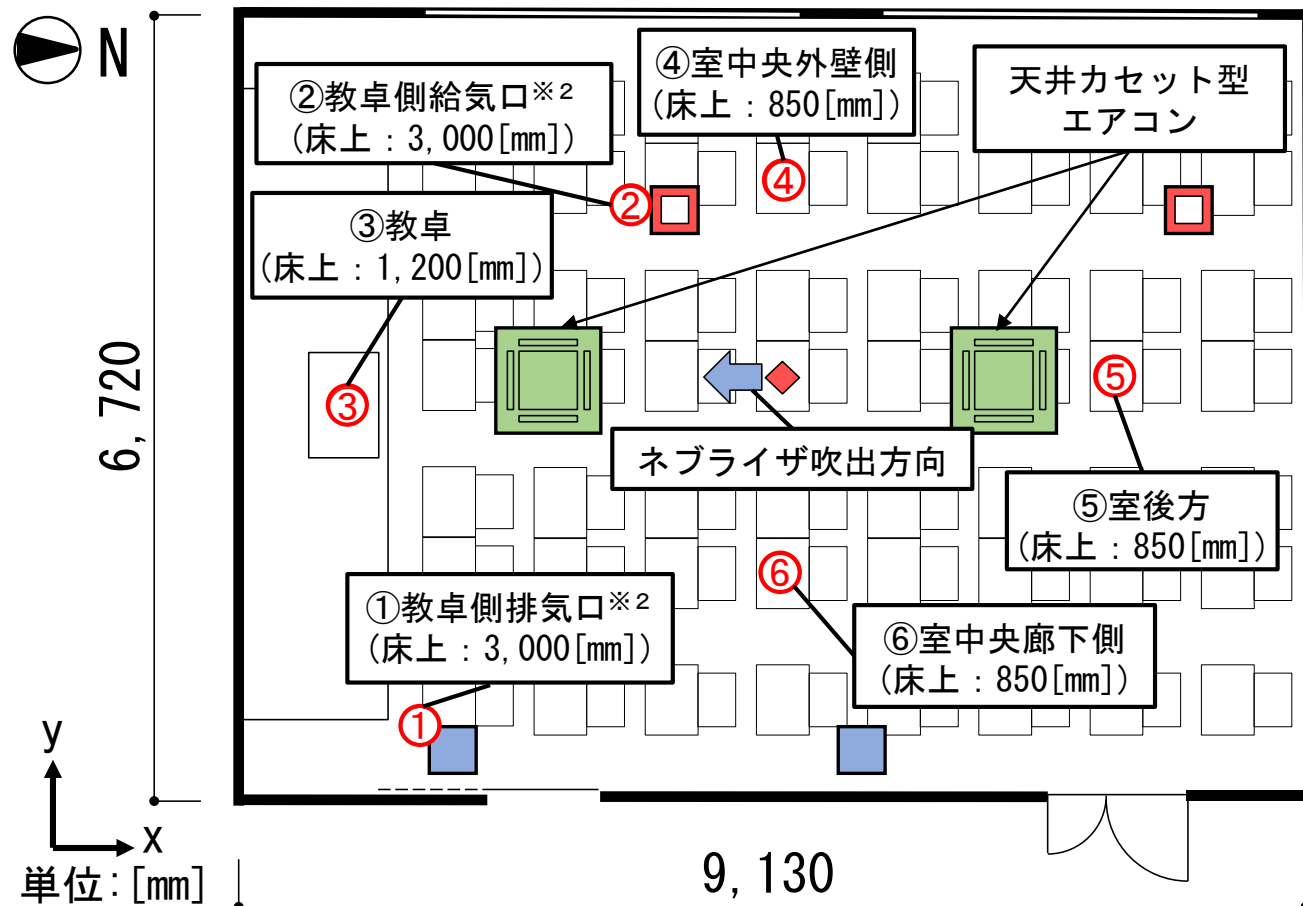


図1 実測対象の教室平面

※2 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。

実測概要

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。



- : 給気口※2
- : 排気口※2
- ◆ : ネブライザ
- ①～⑥ : パーティクル
カウンタ設置位置



図 1 実測対象の教室平面

図 パーティクル
カウンタ

※2 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。

実測概要

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。

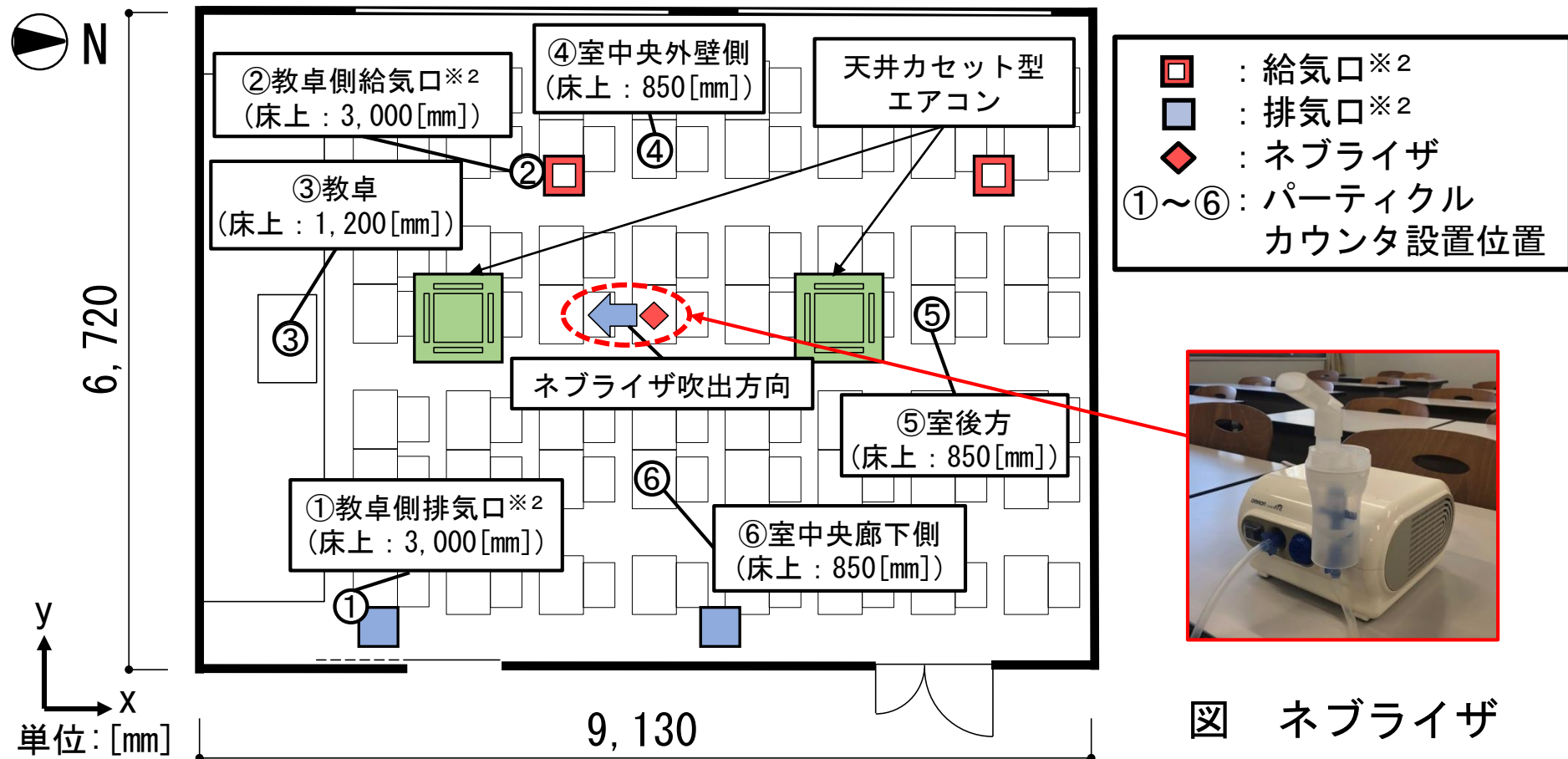
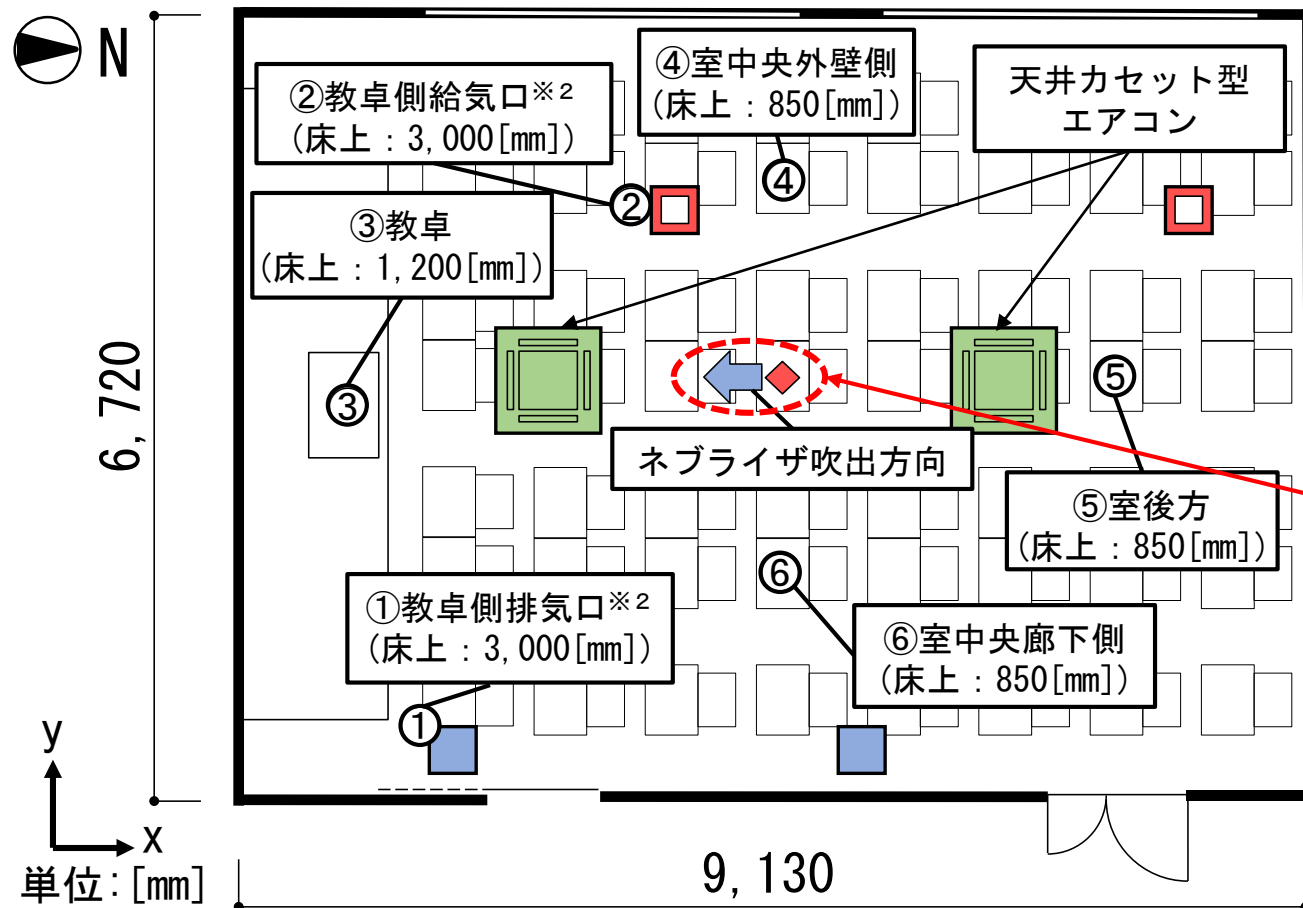


図 1 実測対象の教室平面

※2 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。

実測概要

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。



- : 給気口※2
- : 排気口※2
- ◆ : ネブライザ
- ①～⑥ : パーティクル
カウンタ設置位置



図 ネブライザ

図1 実測対象の教室平面

※2 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。

実測概要

噴霧開始からの経過時間を t とし、 $t=0\sim120[\text{min}]$ は噴霧を行い、 $t=120\sim240[\text{min}]$ は停止し、飛沫濃度を測定する。

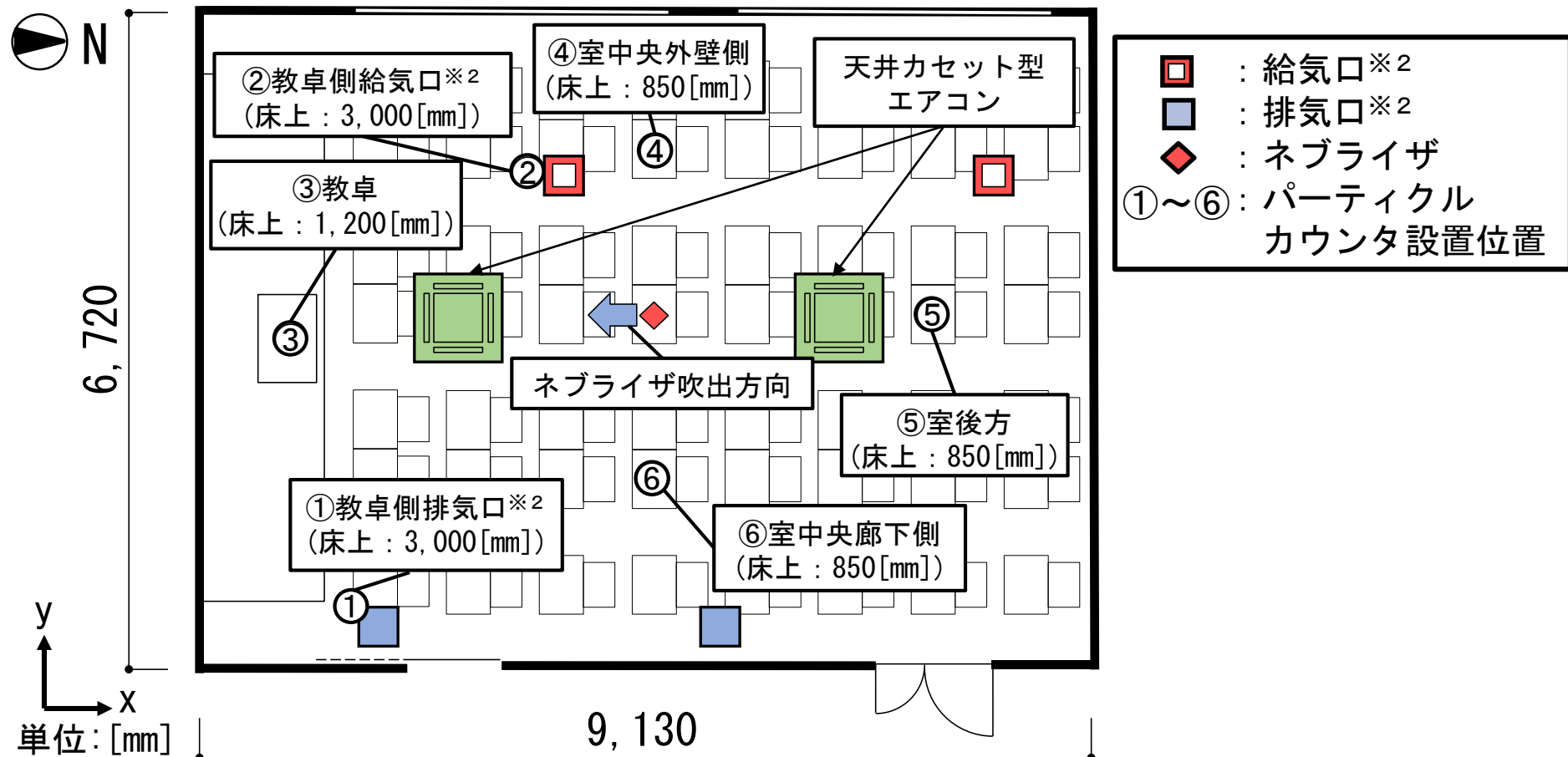


図1 実測対象の教室平面

※2 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。

実測条件

case1は全熱交換換気扇を普通換気（熱交換無）、case2は全熱交換換気とし、風量は強（定格風量： $650\text{[m}^3/\text{h]}$ ）とする。

表 1 実測及びCFD解析条件

case	全熱交換器 × 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
case1		普通 (熱交換無)	無	
case2		全熱交換		
case3	強 (650[m³/h])	普通 (熱交換無)	急 (1,470[m³/h])	水平
case4				下向き
case5		全熱交換		水平
csae6				下向き

実測条件

case3～case6はcase1、case2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。

表 1 実測及びCFD解析条件

case	全熱交換器 × 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
case1		普通 (熱交換無)	無	
case2		全熱交換		
case3	強 (650[m³/h])	普通 (熱交換無)	急 (1,470[m³/h])	水平
case4				下向き
case5		全熱交換		水平
csae6				下向き

実測条件

エアコンの風量は急(定格風量:1,470[m³/h])とする。

表 1 実測及びCFD解析条件

case	全熱交換器 × 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
case1		普通 (熱交換無)	無	
case2		全熱交換		
case3	強 (650[m³/h])	普通 (熱交換無)	急 (1,470[m³/h])	水平
case4				下向き
case5		全熱交換		水平
csae6				下向き

実測条件

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。

表2 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) ^{※3})	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 パーティクルカウンタ

※3 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。

実測条件

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※⁴。

表 2 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)※ ³)	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 パーティクルカウンタ

- ※³ 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。
- ※⁴ 重量濃度の算出において、粒径は球形、直径は代表粒径(表2)と仮定し、密度は食塩(2.16[g/cm³])を使用している。尚、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。

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。

表2 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) ^{※3)}	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]

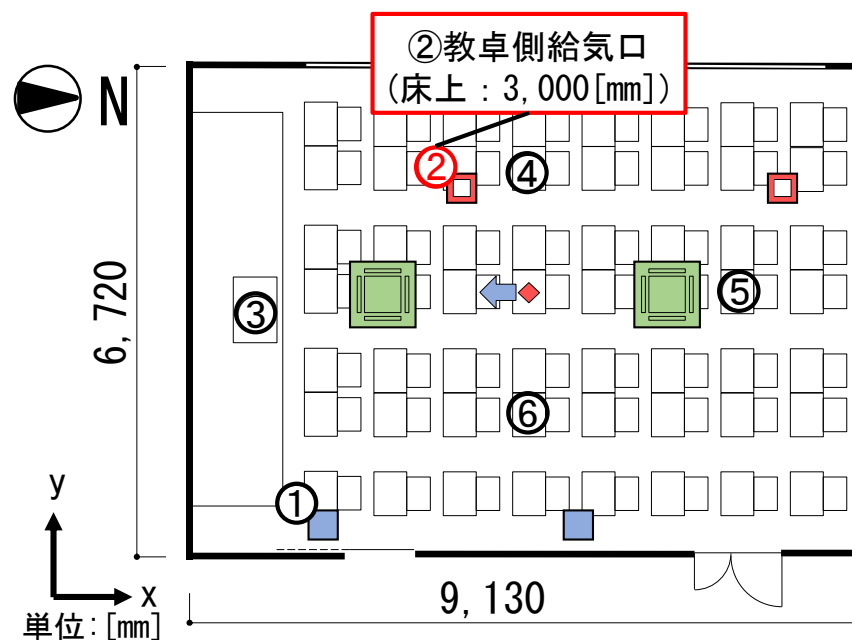


図 1 実測対象の教室平面

- ※3 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。
- ※4 重量濃度の算出において、粒径は球形、直径は代表粒径(表2)と仮定し、密度は食塩(2.16[g/cm³])を使用している。尚、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。

実測条件

濃度分布の評価には、①教卓側排気口の定常濃度※⁵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。

表 2 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)※ ³)	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]

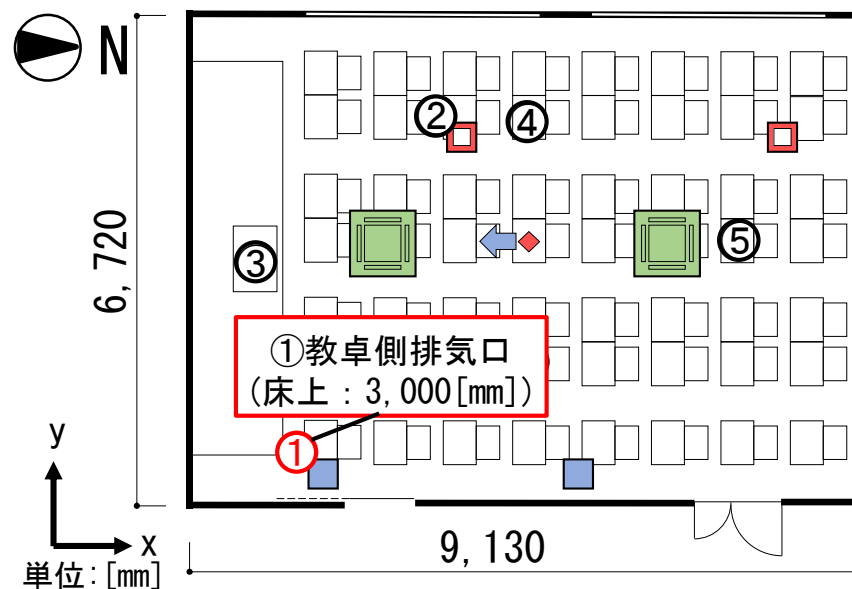


図 1 実測対象の教室平面

- ※³ 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。
- ※⁴ 重量濃度の算出において、粒径は球形、直径は代表粒径(表 2)と仮定し、密度は食塩(2.16[g/cm³])を使用している。尚、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。
- ※⁵ 本研究における定常濃度は、t=90から120[min]の平均重量濃度とする。

CFD解析条件

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

表 3 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※ ⁶	ネブライザ吹出風速	1.5[m/s]※ ⁷
		全熱交換換気扇	定格風量 (表 1)
		天井カセット型エアコン	
	表面境界	床	壁面对数則
		モデル面	
	熱境界	断熱	
輻射境界	輻射率0.9		
温度	25[°C]		
飛沫	代表粒径(表 2)		

※6 粒子画像流速測定法(PIV: Particle Image Velocimetry)を用いてネブライザ、全熱交換器、空調機の風向・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[%]、空調機の飛沫除去率を0[%]とする。

※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。

CFD解析条件

解析領域は 9.13[m] (x) × 6.72[m] (y) × 3.00[m] (z)、流入境界※⁶はネブライザの吹出風速を1.5[m/s]、全熱交換換気扇及びエアコンをそれぞれの定格風量とする。

表3 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※ ⁶	ネブライザ 吹出風速	1.5[m/s]※ ⁷
		全熱交換 換気扇	定格風量 (表1)
		天井カセット 型エアコン	
	表面境界	床	壁面对数則
		モデル面	
	熱境界	断熱	
	輻射境界	輻射率0.9	
温度	25[°C]		
飛沫	代表粒径(表2)		

表1 実測及びCFD解析条件

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	
case1	強 (650[m ³ /h])	普通 (熱交換無)	無		
case2		全熱交換			
case3		普通 (熱交換無)	急 (1,470[m ³ /h])	水平	
case4		普通 (熱交換無)		下向き	
case5		全熱交換		水平	
csae6				下向き	

※⁶ 粒子画像流速測定法 (PIV : Particle Image Velocimetry) を用いてネブライザ、全熱交換器、空調機の風向・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[%]、空調機の飛沫除去率を0[%]とする。

※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。

CFD解析条件

尚、粒子画像流速測定法 (PIV) を用いてネブライザ、全熱交換器、空調機の風向・風速測定を行い、測定結果を境界条件に設定した。

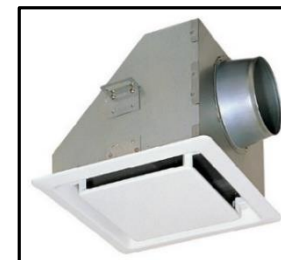


図 給気グリル

表 3 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※6	ネブライザ 吹出風速	1.5[m/s]※7
		全熱交換 換気扇	定格風量 (表1)
		天井カセット 型エアコン	
	表面境界	床	壁面对数則
		モデル面	
	熱境界	断熱	
	輻射境界	輻射率0.9	
温度	25[°C]		
飛沫	代表粒径(表2)		

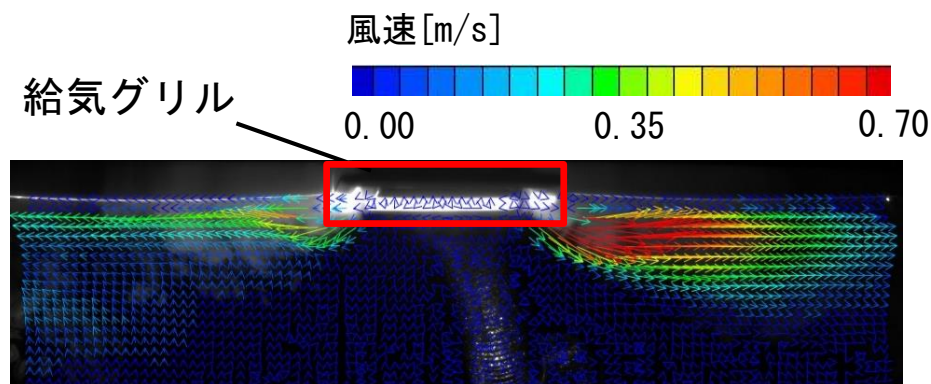


図 給気グリル周辺の平均風速ベクトル分布(鉛直断面・吹出面中心)

- ※6 粒子画像流速測定法 (PIV : Particle Image Velocimetry) を用いてネブライザ、全熱交換器、空調機の風向・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[%]、空調機の飛沫除去率を0[%]とする。
- ※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。

CFD解析条件

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2)をネブライザから発生させる。

表3 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※6	ネブライザ 吹出風速	1.5[m/s]※7
		全熱交換 換気扇	定格風量 (表1)
		天井カセット 型エアコン	
	表面境界	床	壁面对数則
		モデル面	
	熱境界	断熱	
	輻射境界	輻射率0.9	
温度	25[°C]		
飛沫	代表粒径(表2)		

表2 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))	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]	

- ※6 粒子画像流速測定法(PIV: Particle Image Velocimetry)を用いてネブライザ、全熱交換器、空調機の風向・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[%]、空調機の飛沫除去率を0[%]とする。
- ※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。

実測及びCFD解析結果

各測定点における実測結果

排気口基準濃度は、case1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。

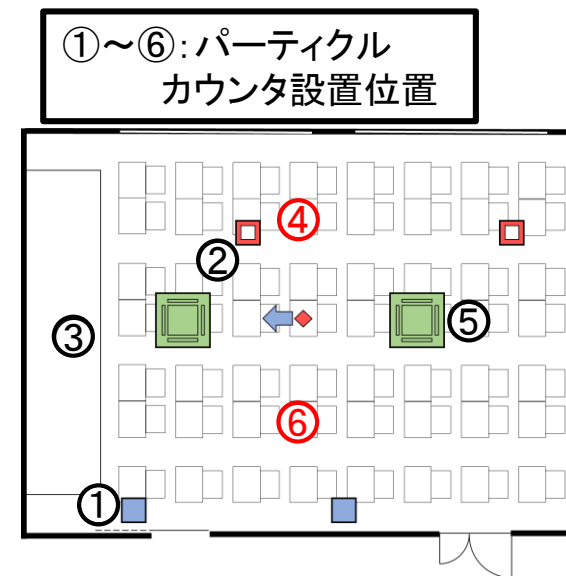
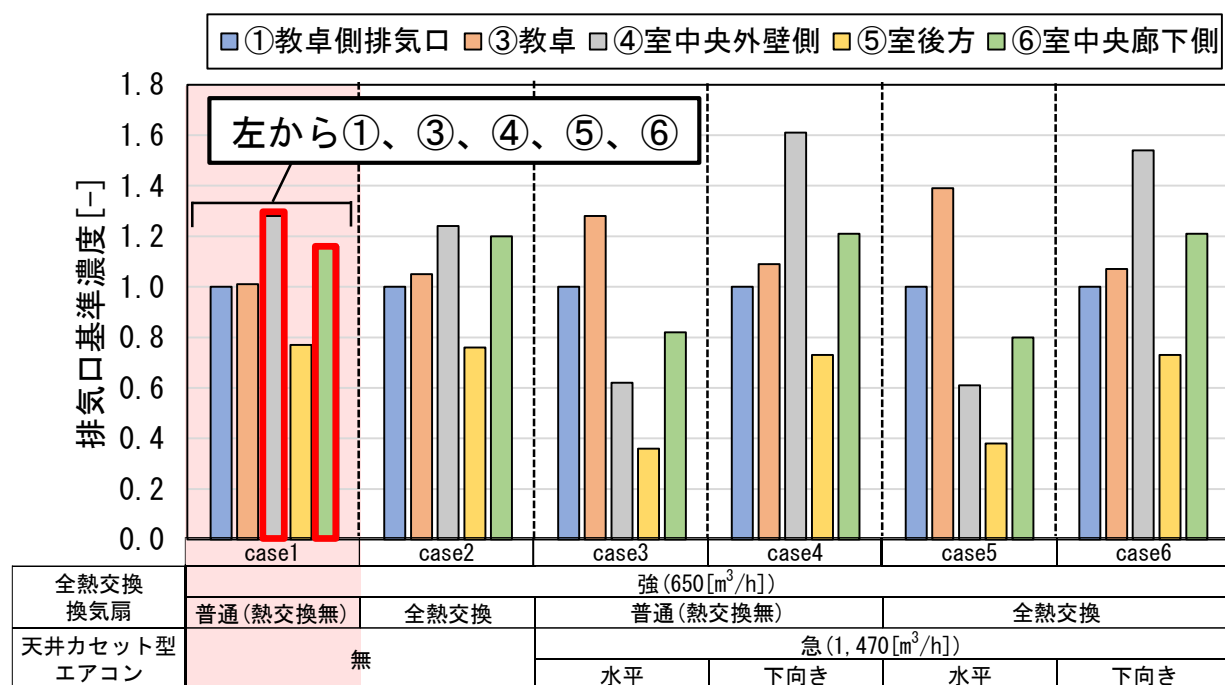


図1 実測対象の教室平面

図2 各caseにおける排気口基準濃度(実測)

各測定点における実測結果

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**case3**では**③教卓**で**1.3**程度、

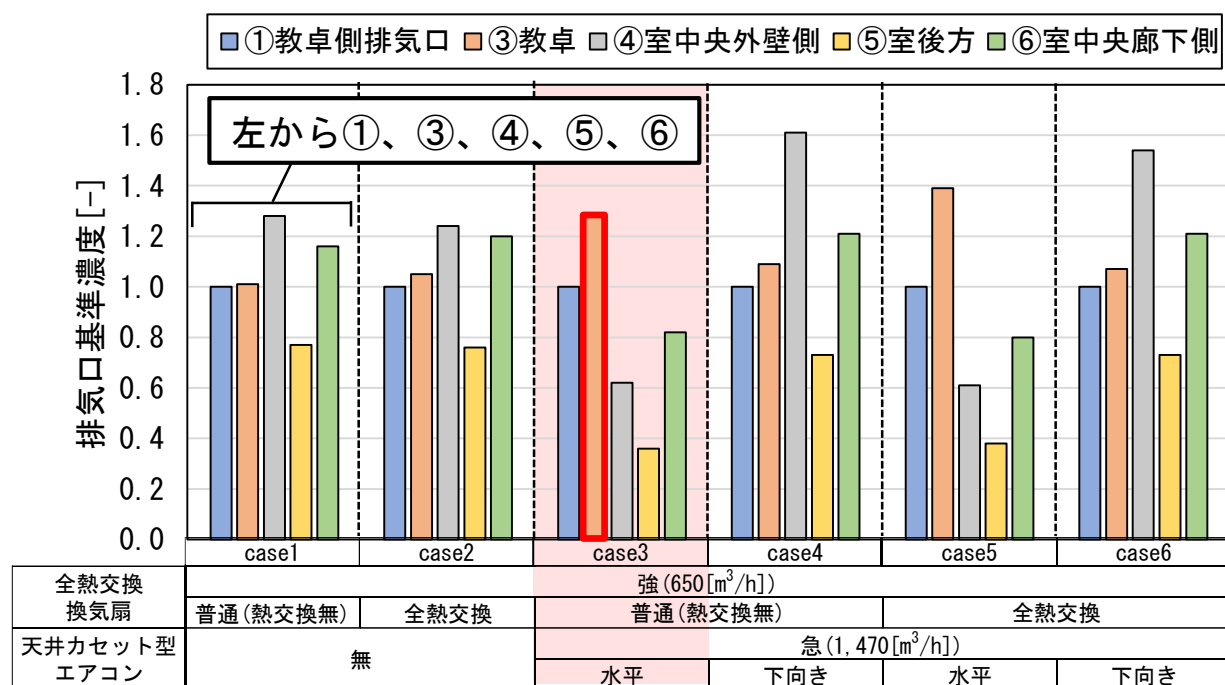


図2 各caseにおける排気口基準濃度(実測)



図1 実測対象の教室平面

各測定点における実測結果

風向を下向きとした**case4**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**がある。

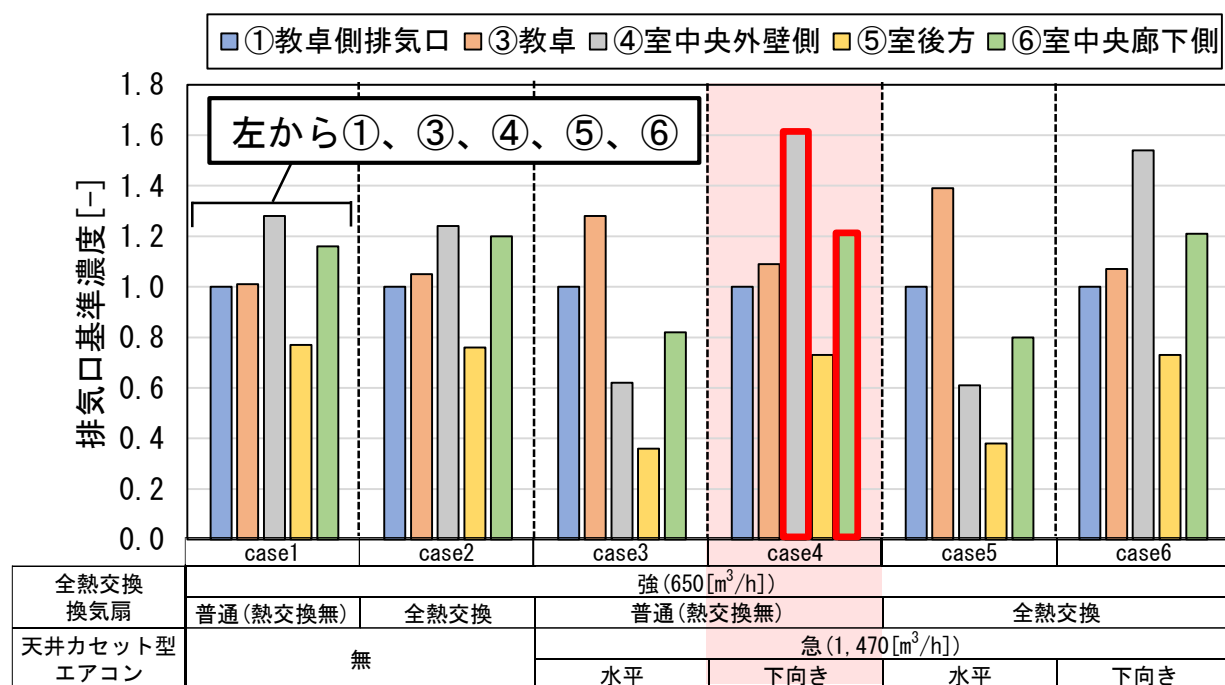


図2 各caseにおける排気口基準濃度(実測)



図1 実測対象の教室平面

各測定点における実測結果

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。

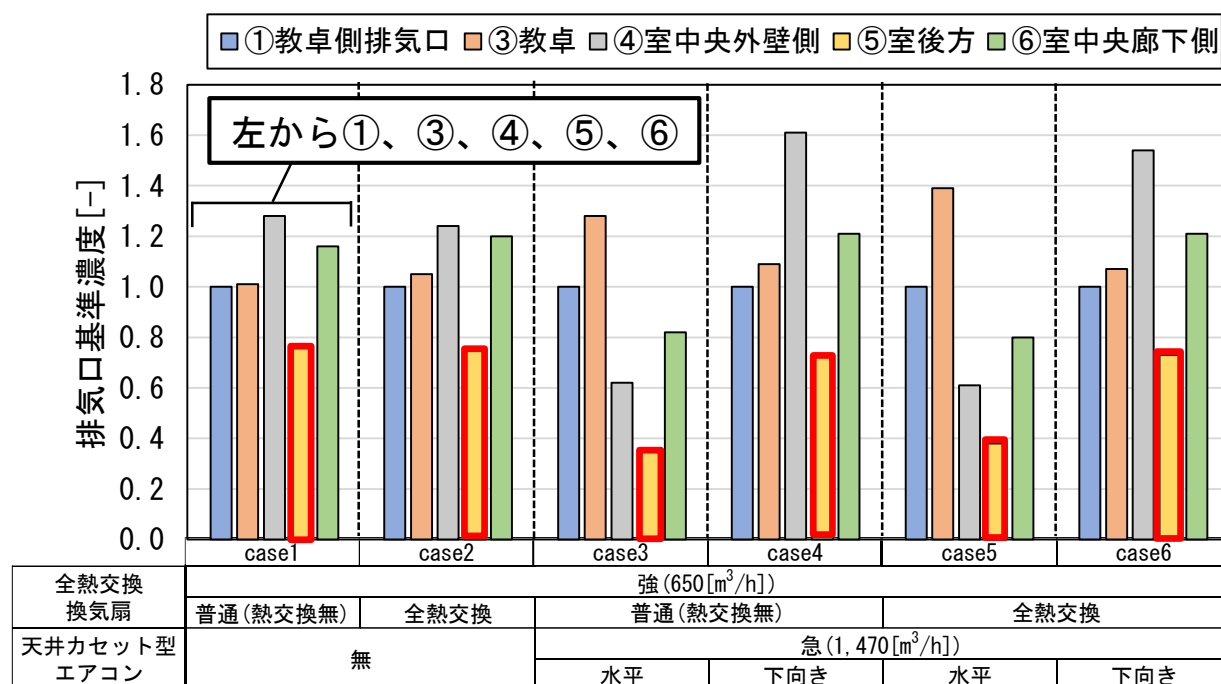


図2 各caseにおける排気口基準濃度(実測)



図1 実測対象の教室平面

各測定点における実測結果

全熱交換換気扇を熱交換換気としたcaseと普通換気のcaseを比較すると、濃度分布の差異は殆どみられない。

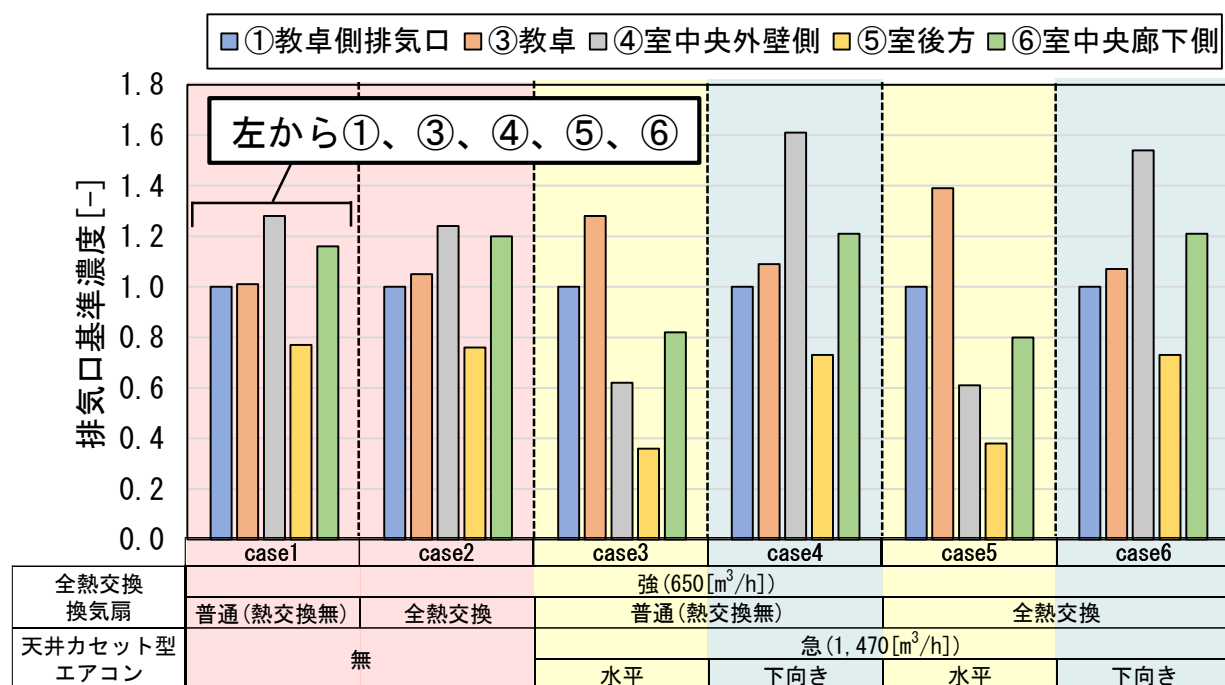


図2 各caseにおける排気口基準濃度(実測)



図1 実測対象の教室平面

各測定点における実測結果

これは室内外の温度差が小さいためと考えられる※⁸。

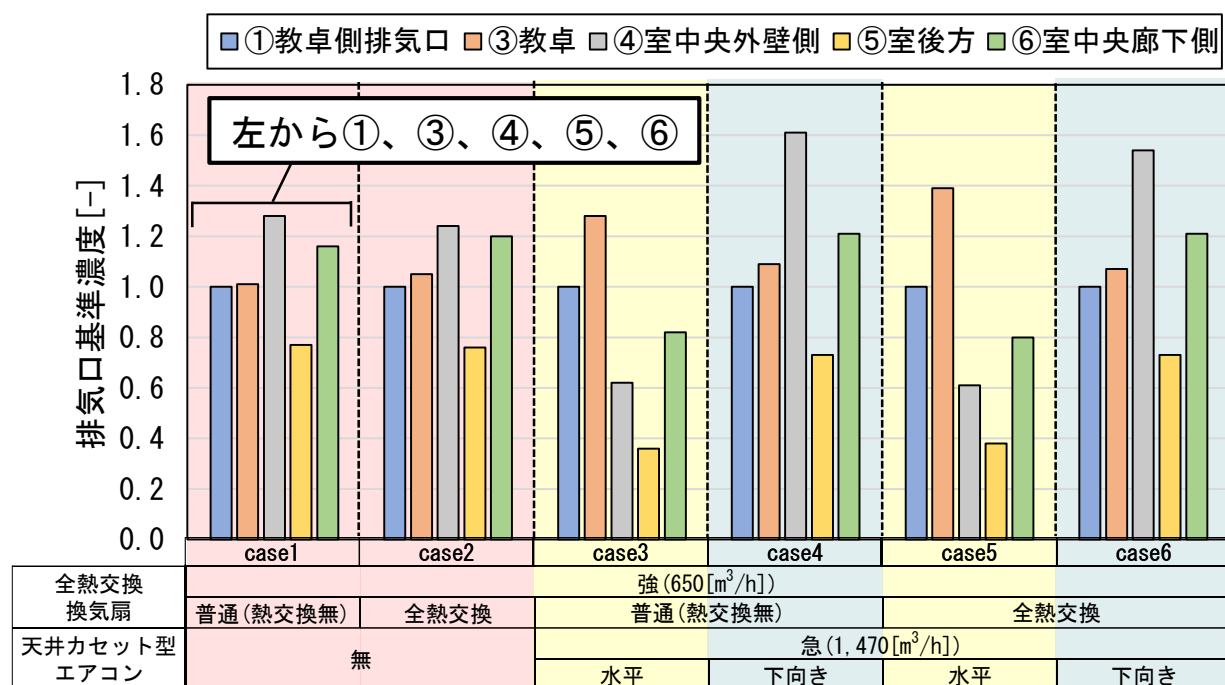


図2 各caseにおける排気口基準濃度 (実測)



図1 実測対象の教室平面

※⁸ t=0～120 [min]における平均室温は、case1では25.5 [°C]、case2では24.2 [°C]、平均外気温はcase1では23.9 [°C]、case2では20.5 [°C]である。

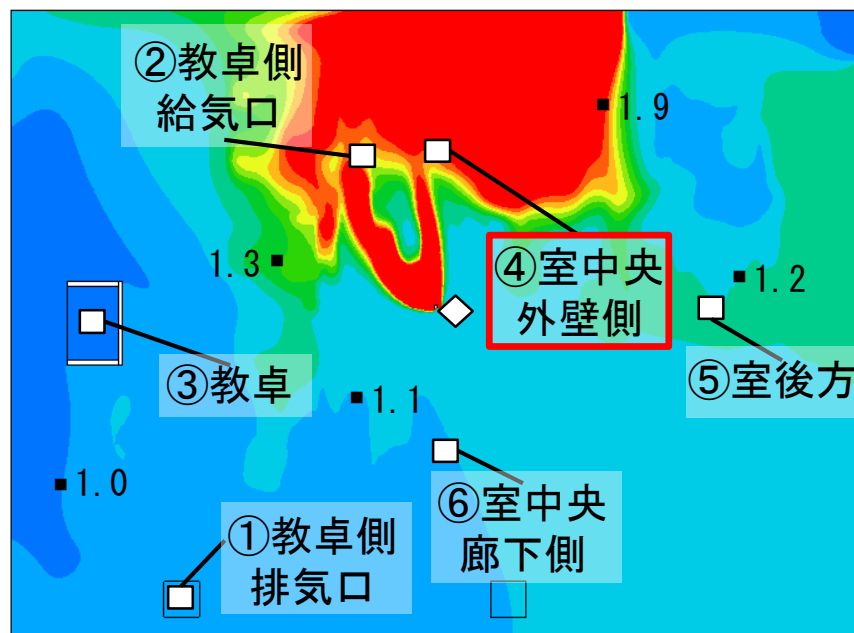
実測結果とCFD解析結果の比較

case1において排気口基準濃度は、④室中央外壁側が高く、case3においては④室中央外壁側と⑤室後方が低い傾向となり、これらは実測結果と同様となる。

- ◇ : ネブライザ
- : パーティクルカウンタ設置位置

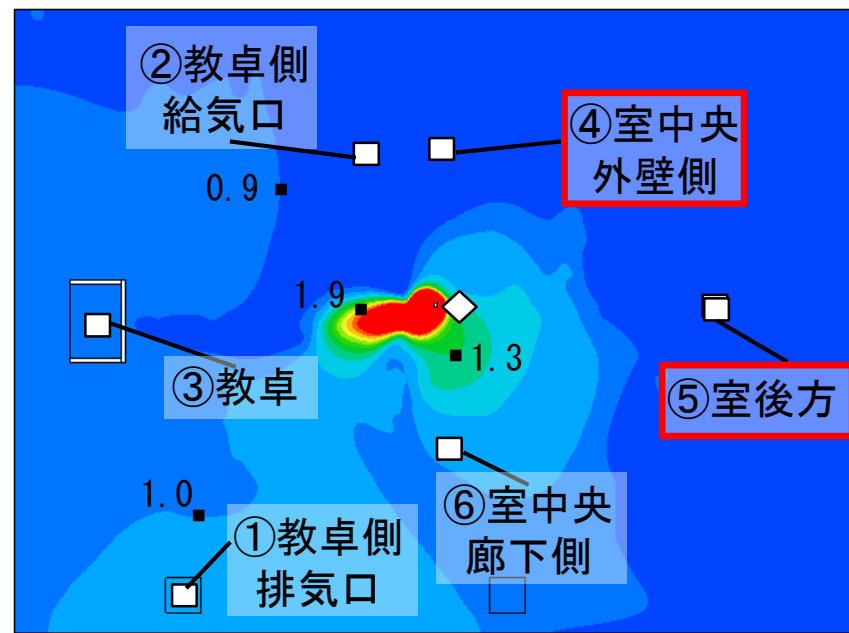
排気口基準濃度 [-] ■ ■ ■ ■ ■ ■

0.8 1.4 2.0



水平断面 (z=850 [mm])

(a) case1 (普通換気、エアコン無)



水平断面 (z=850 [mm])

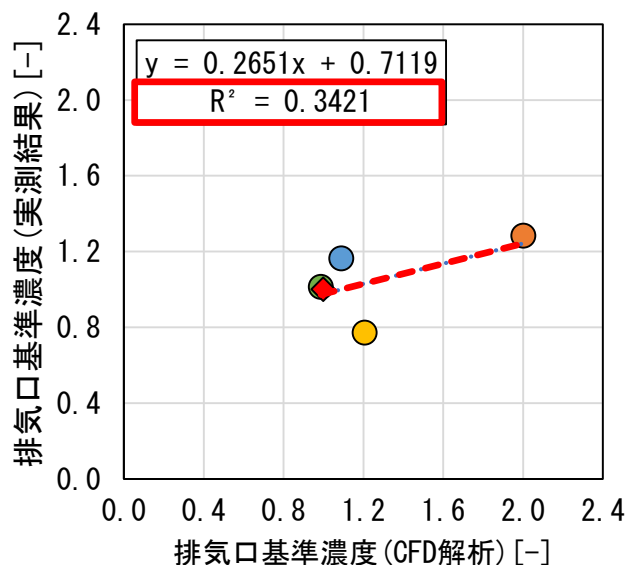
(b) case3 (普通換気、エアコン風向水平)

図3 代表caseにおける定常時の排気口基準濃度分布 (CFD解析)

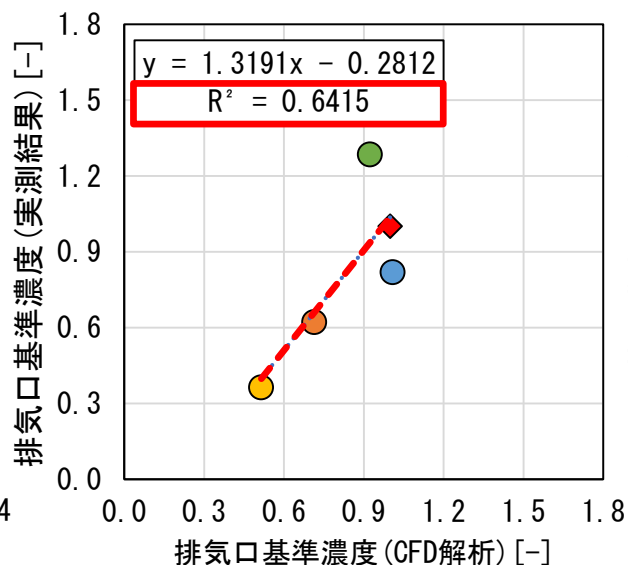
実測結果とCFD解析結果の比較

実測結果とCFD解析結果を比較すると、エアコンを稼働した case3、case4では決定係数が0.6以上と比較的高く、case1では0.34となる。

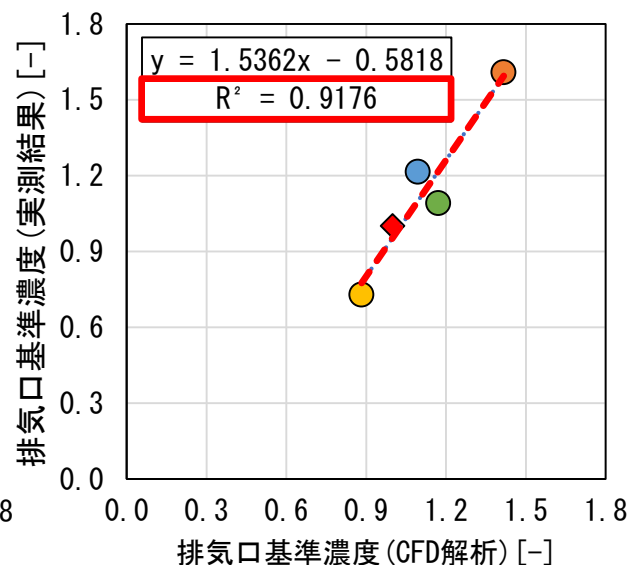
◆ : ①教卓側排気口 ● : ③教卓 ● : ④室中央外壁側
 ● : ⑤室後方 ● : ⑥室中央廊下側



(a) case1 (普通換気、エアコン無)



(b) case3 (普通換気、エアコン風向水平)



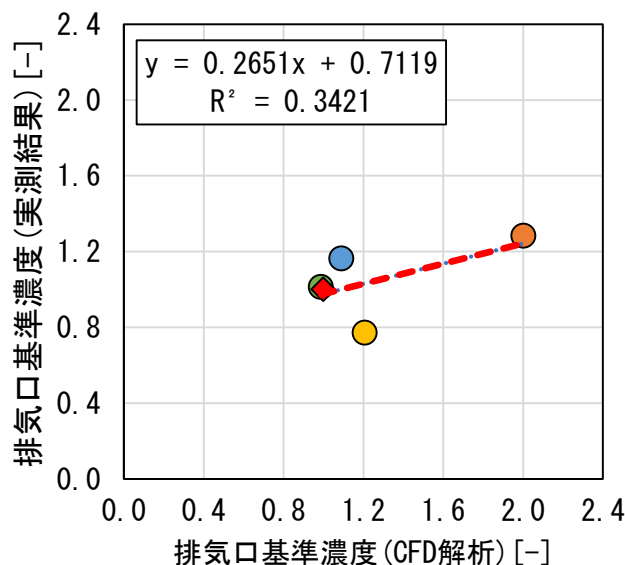
(c) case4 (普通換気、エアコン風向下向き)

図4 実測結果とCFD解析結果における濃度分布の比較

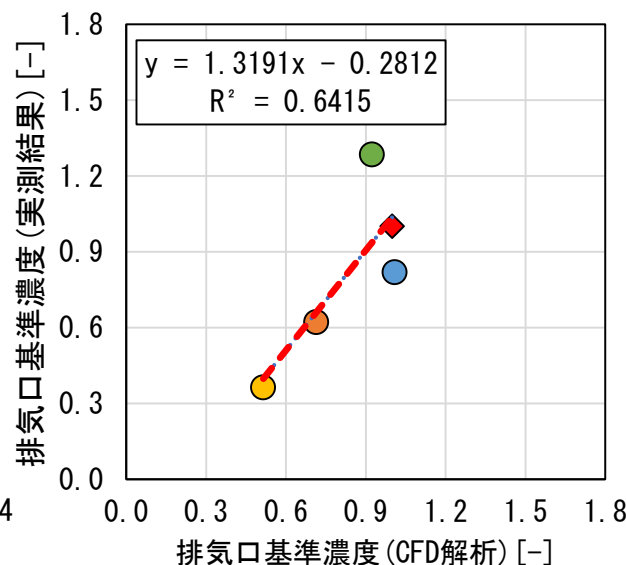
実測結果とCFD解析結果の比較

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解析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。

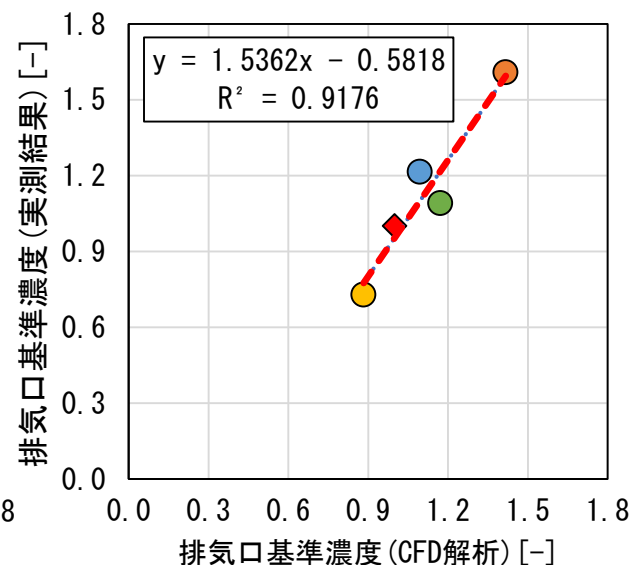
◆ : ①教卓側排気口 ● : ③教卓 ● : ④室中央外壁側
● : ⑤室後方 ● : ⑥室中央廊下側



(a) case1 (普通換気、エアコン無)



(b) case3 (普通換気、エアコン風向水平)



(c) case4 (普通換気、エアコン風向下向き)

図4 実測結果とCFD解析結果における濃度分布の比較

まとめ

- ①排気口基準濃度は、case1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。
- 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caseと比較して濃度分布の差異は殆どみられない。
- ③実測結果とCFD解析結果を比較すると、エアコン稼働したcase3、case4では決定係数が0.60以上と比較的高く、case1では0.34となる。
- ④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解析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。