

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

指導教員 山田 瑞季
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※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、CFD解析による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

既往の研究^{文1)}では、**等温時の教室**において**飛沫濃度の実測とCFD解析**を行った。

本研究では、**暖房時の教室**を対象に**飛沫濃度の実測とCFD解析 (RANS※²)**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ことで、**CFD解析の妥当性を検討**する。

文1) 前田：「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」、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、2022年

※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。

研究概要

実測概要

実測場所は、新潟大学工学部D棟207号室である。

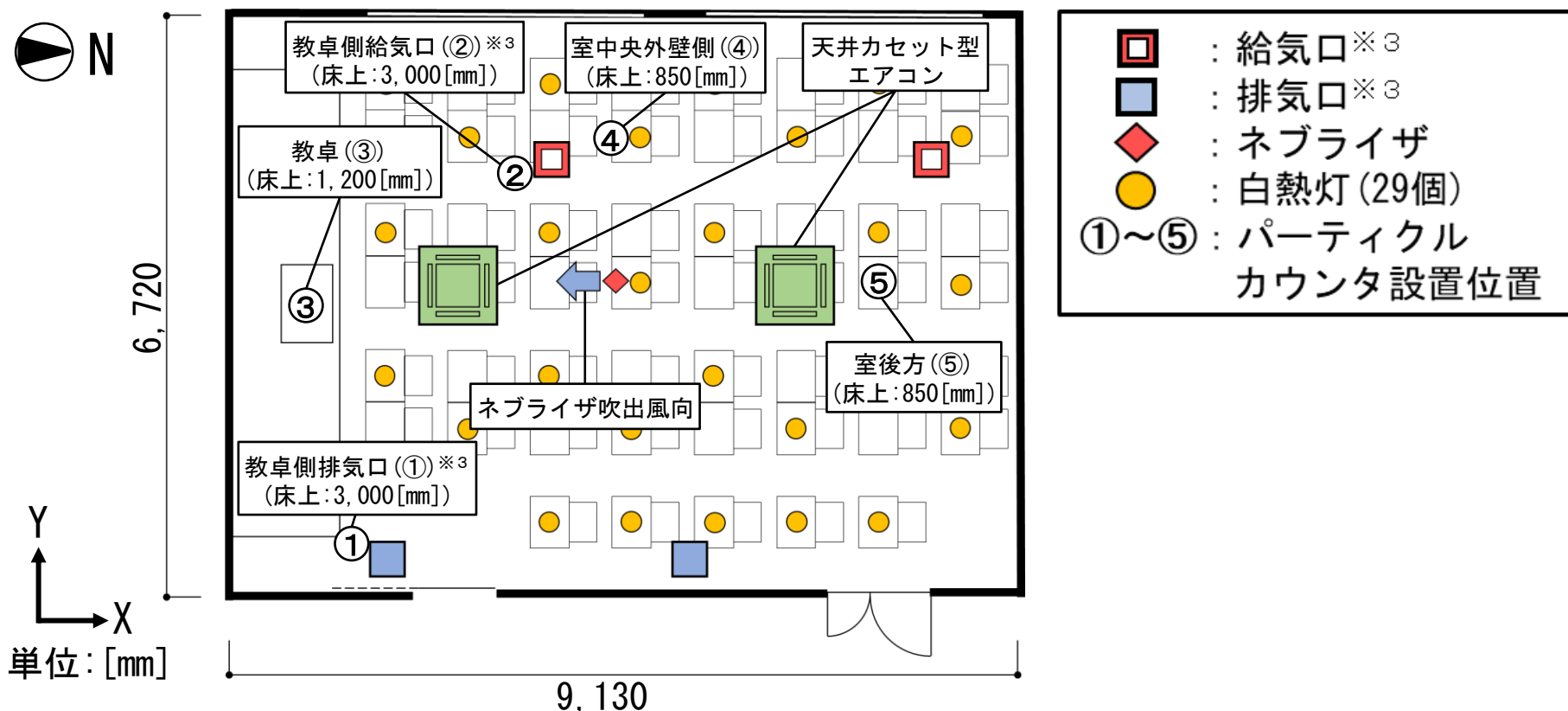


図1 実測及びCFD解析対象の教室平面

※3 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

実測時の外気温は概ね $0 \sim 5 [^{\circ}\text{C}]$ であり、床面積は約 $61 [m^2]$ 、室容積は約 $184 [m^3]$ である。

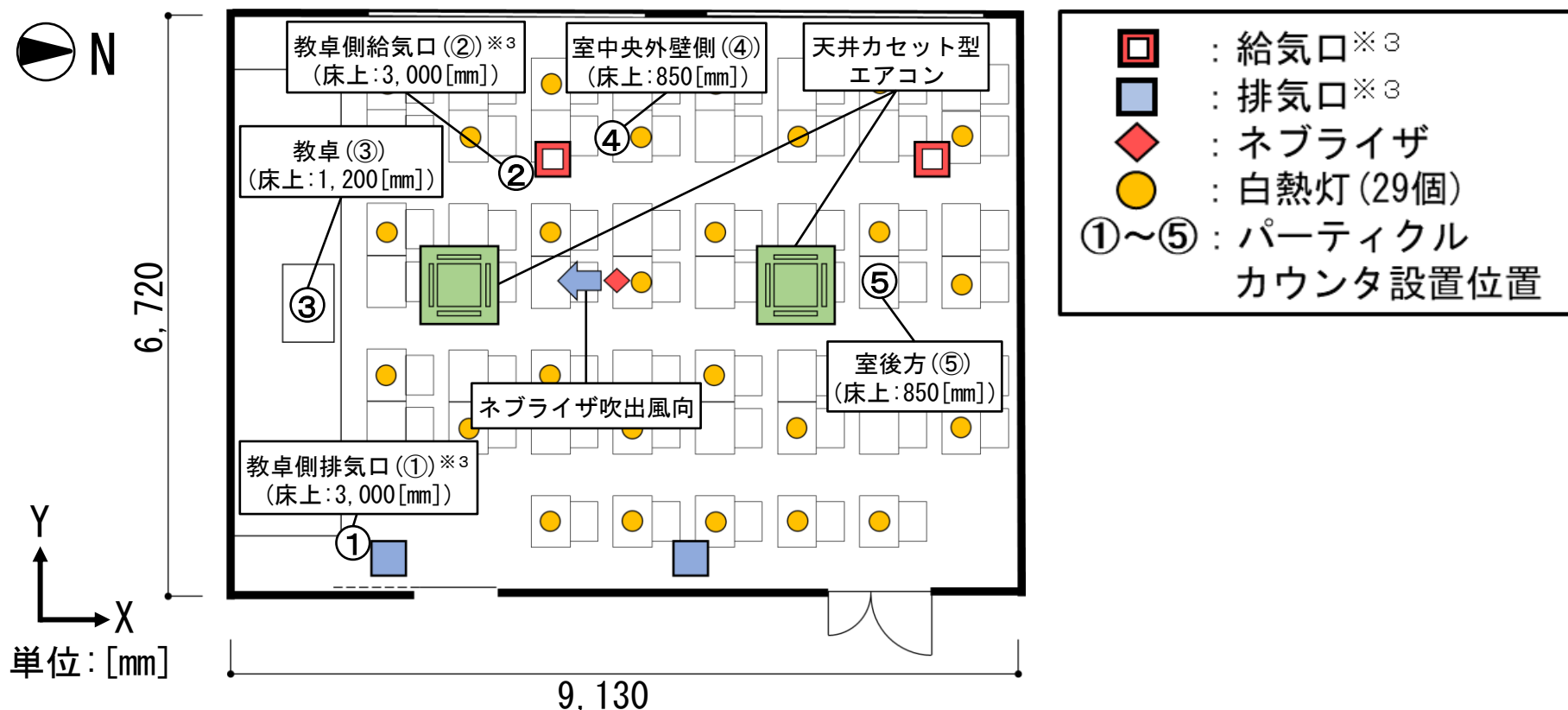


図1 実測及びCFD解析対象の教室平面

※3 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**、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。

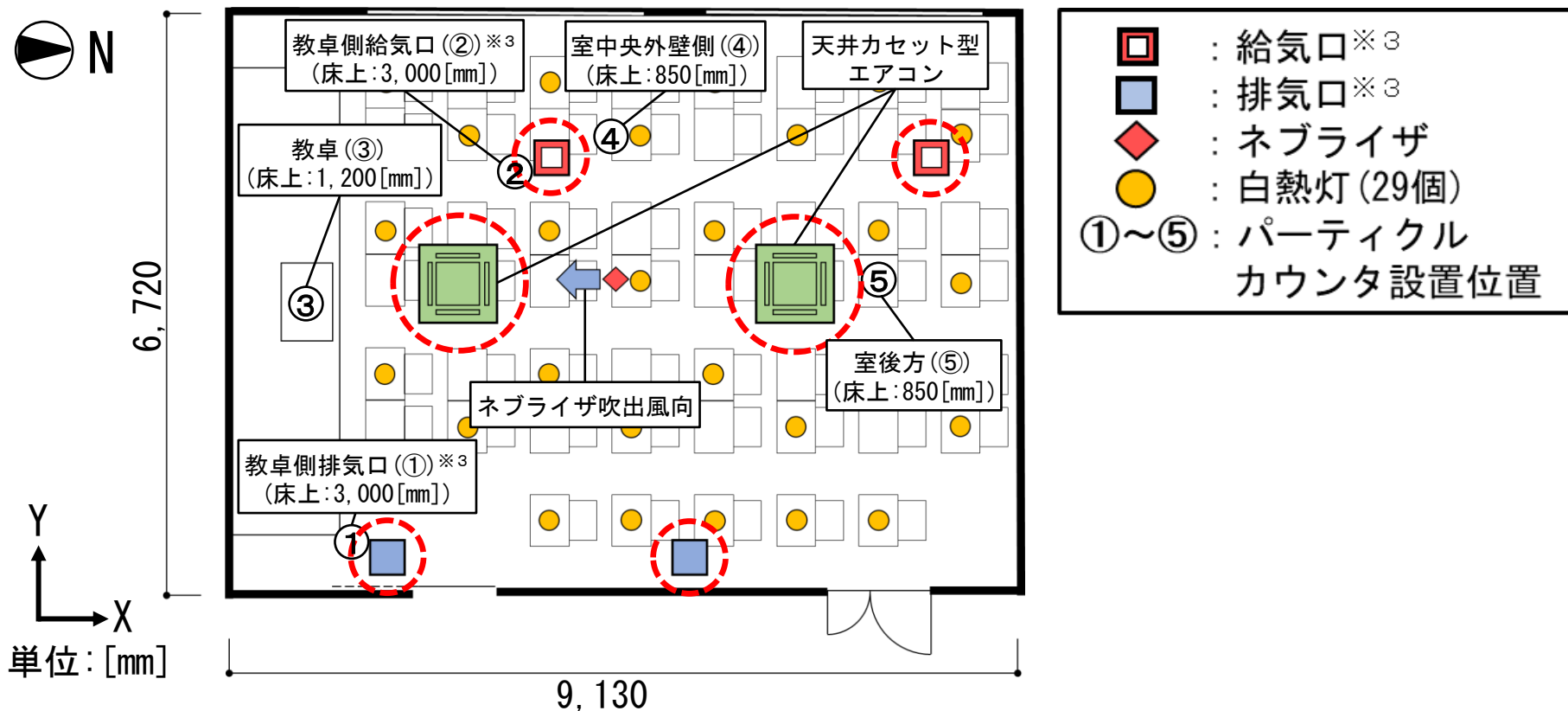


図1 実測及びCFD解析対象の教室平面

※3 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（リオン社製：KC-52）5台を教室内に配置して行う。

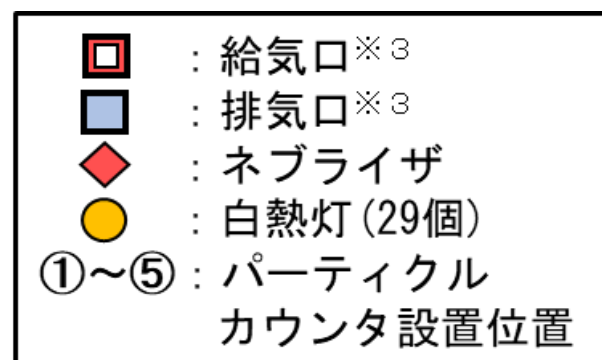
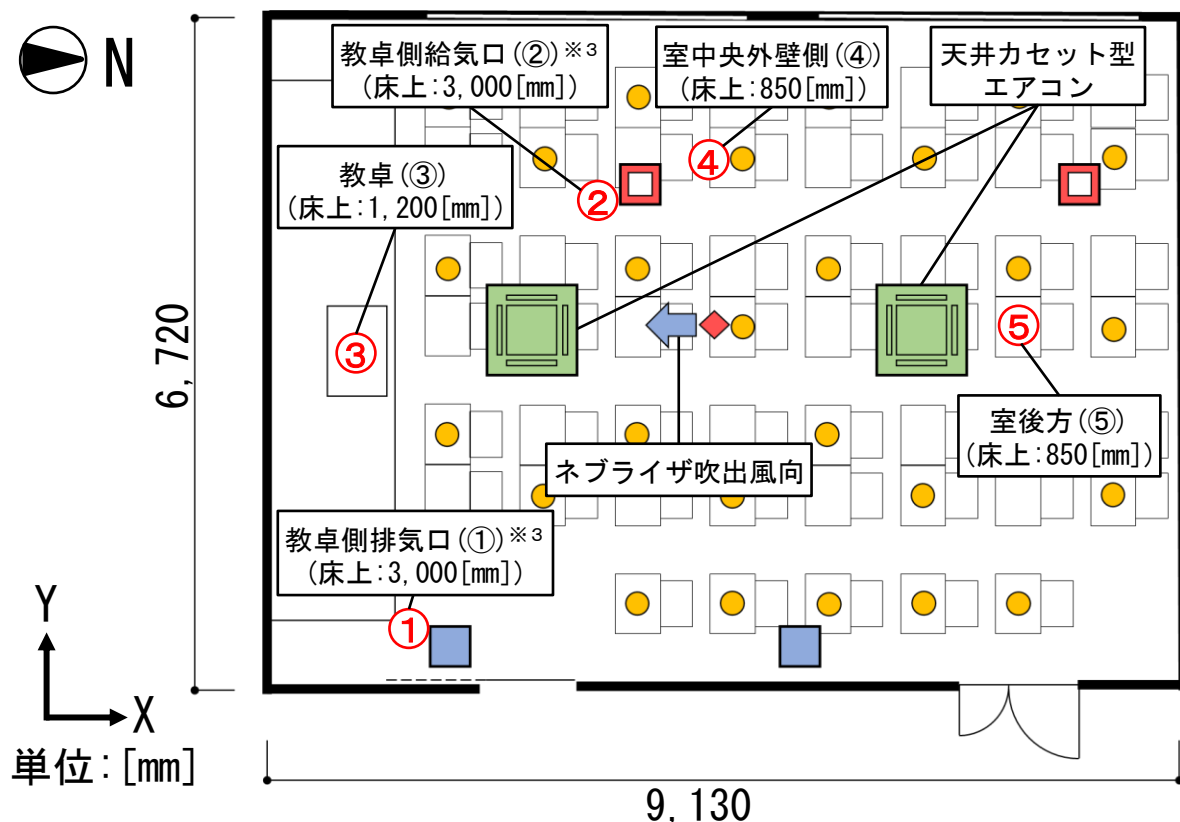


図 1 実測及びCFD解析対象の教室平面

図 パーティクルカウンタ

※3 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

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。

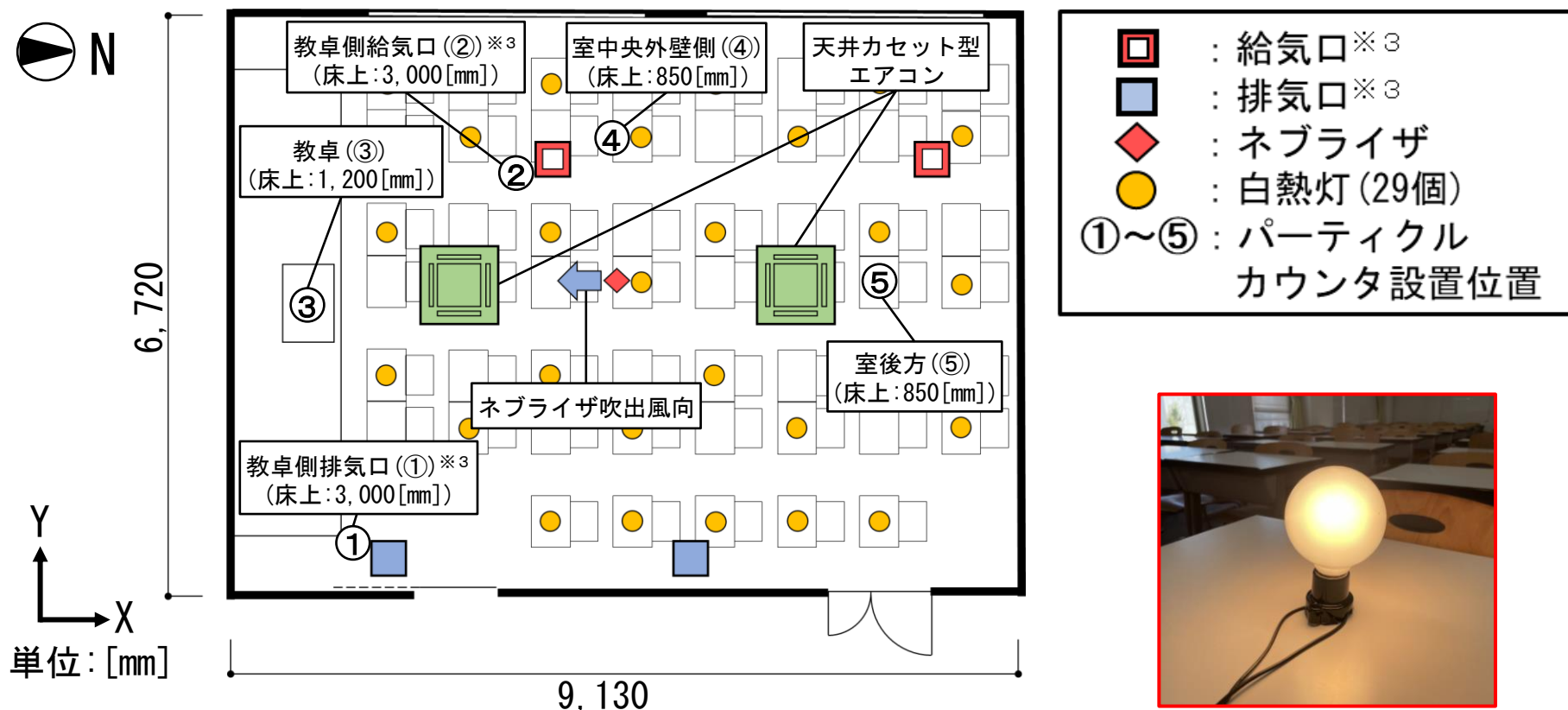


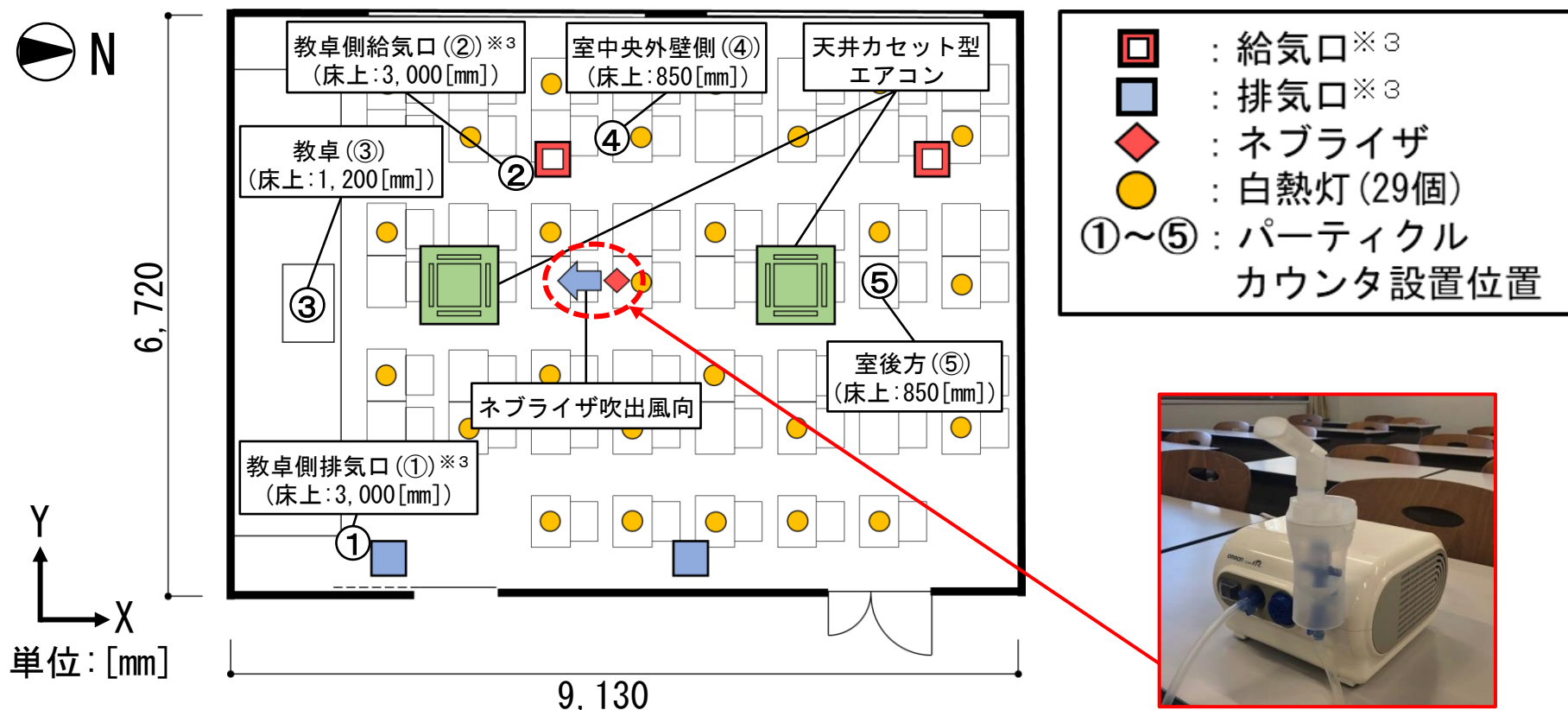
図 白熱灯

図1 実測及びCFD解析対象の教室平面

※3 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**生理食塩水**を噴霧することによって**模擬**する。



※3 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の上に設置し、**教卓側**に向かって噴霧する。

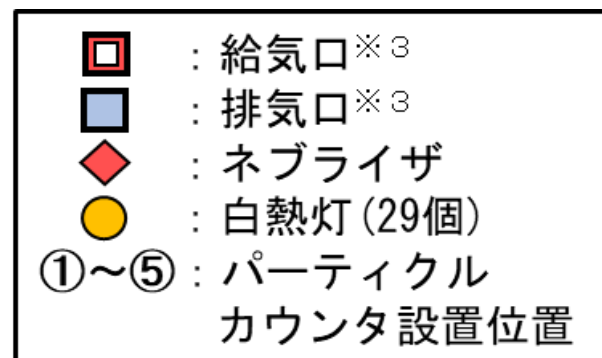
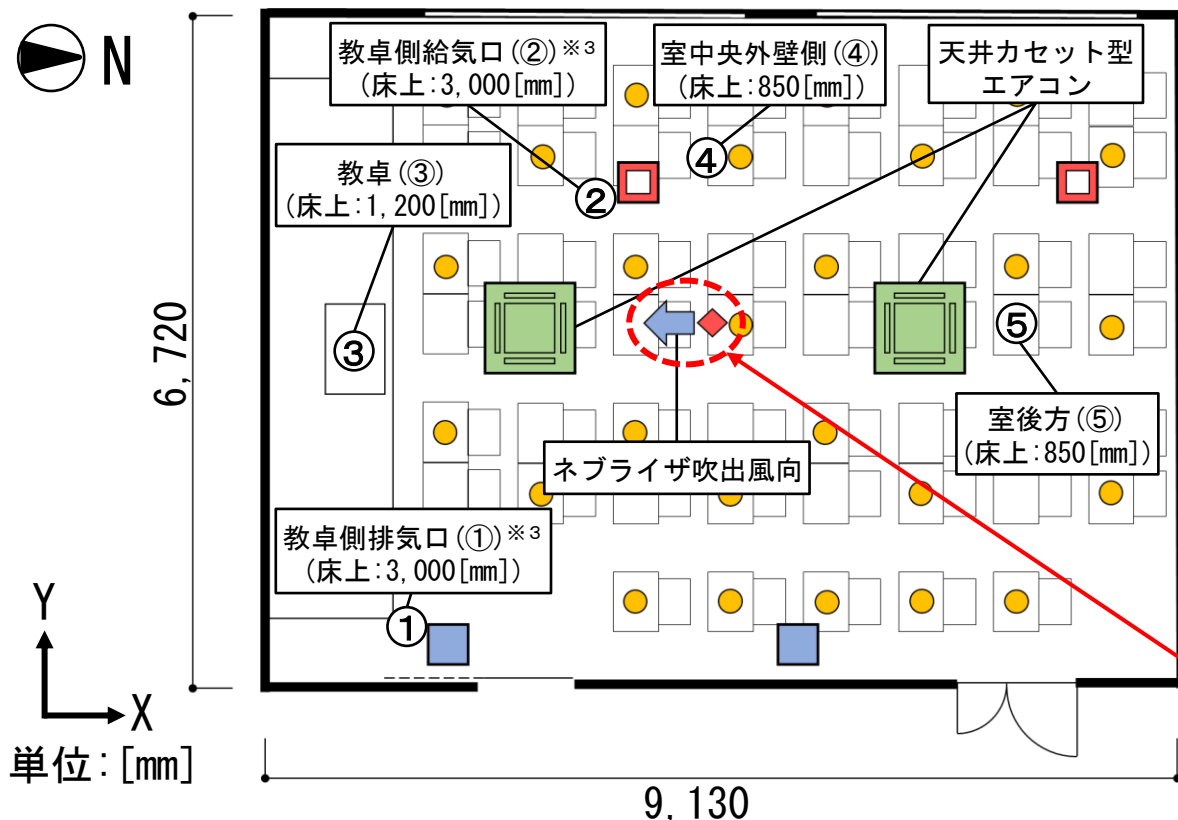


図2 ネブライザ

※3 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 として、 $t=0\sim 120$ [min]は噴霧を行い、 $t=120\sim 240$ [min]は停止し、飛沫濃度の測定を行う。

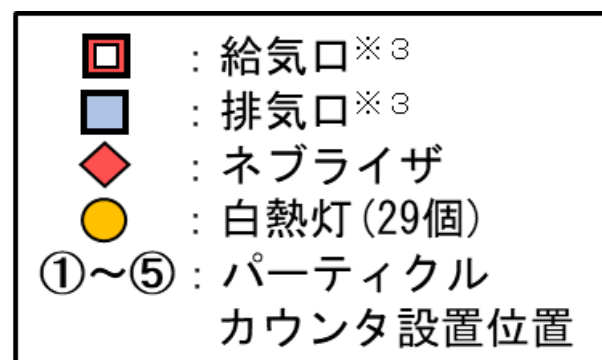
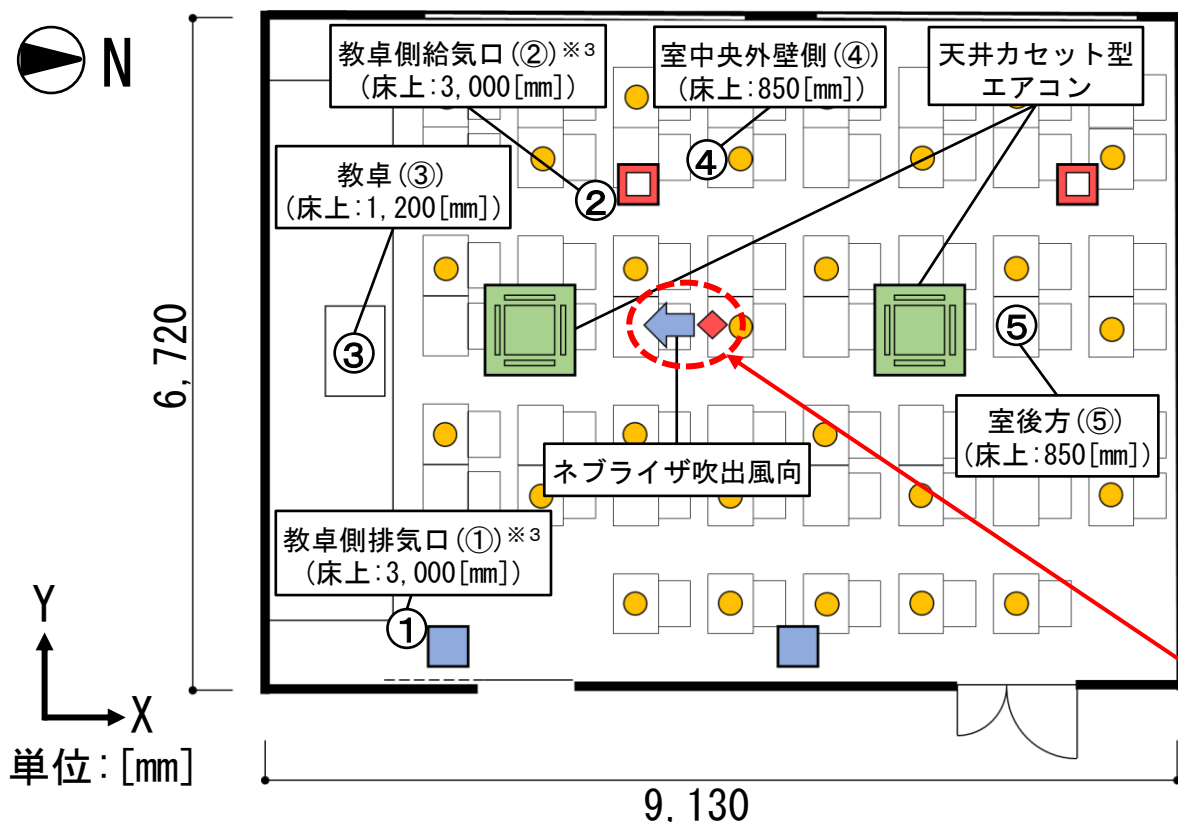


図1 実測及びCFD解析対象の教室平面

図 ネブライザ

※3 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。

実測及びCFD解析条件

case1、case2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。

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	

実測及びCFD解析条件

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。

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	

case3ではエアコンを**停止**する。

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	

実測及びCFD解析条件

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。

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	

実測及びCFD解析条件

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※⁵。

表2 パーティクルカウンタの概要

粒径区分 (代表粒径 ^{※4} (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]

※4 各粒径区分の体積を個数濃度で加重平均し、その体積から算出した粒径。

※5 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、粒形は球形、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。

実測及び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)			
境界条件	流入出境界	流速規定 [m/s]	ネブライザ吹出風速	1.5 ^{※8}
		流量規定 [m ³ /h]	全熱交換換気扇	650
			天井カセット型エアコン	case1 : 1,470 case2 : 960
	表面境界	壁面对数則		
	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個		
	温度 [°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		

※6 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。

実測及びCFD解析条件

解析は実測対象教室をモデル化して行う。

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)		
境界条件	流入出境界	流速規定 [m/s]	ネブライザ吹出風速 1.5 ^{※6}
		流量規定 [m ³ /h]	全熱交換換気扇 650
			天井カセット型エアコン case1 : 1,470 case2 : 960
	表面境界	壁面对数則	
	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個	
	温度 [°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	

※6 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。

実測及びCFD解析条件

流入出境界は、ネブライザ吹出風速を1.5[m/s]^{※6}、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。

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)		
境界条件	流入出境界	流速規定 [m/s]	ネブライザ吹出風速 1.5 ^{※8}
		流量規定 [m ³ /h]	全熱交換換気扇 650
			天井カセット型エアコン case1 : 1,470 case2 : 960
	表面境界	壁面对数則	
	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個		
温度 [°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	

※6 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。

実測及びCFD解析条件

発生させる飛沫は各粒径区分の代表粒径とする。

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))	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]

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)		
流入出境界	流速規定 [m/s]	ネブライザ吹出風速	1.5 ^{※6}
	流量規定 [m ³ /h]	全熱交換換気扇	650
		天井カセット型エアコン	case1 : 1,470 case2 : 960
境界条件	表面境界	壁面对数則	
	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個	
	温度 [°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	

※6 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。

分析方法

濃度分布の評価は、**教卓側排気口(①)の定常濃度^{※7}**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^{※8}。

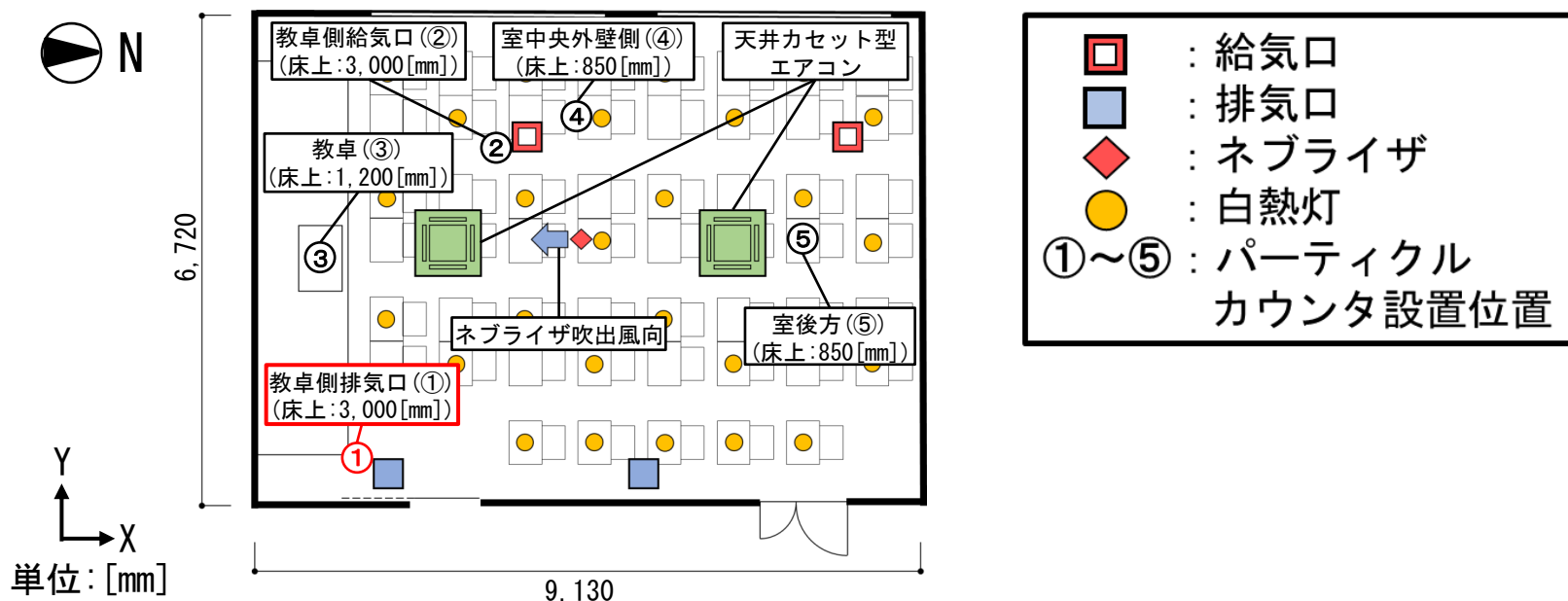


図1 実測対象の教室平面

※7 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=104~112 [min]、case2: t=79~87 [min])、エアコンを停止したcase3ではt=90~120 [min]の平均重量濃度とする。

※8 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。またCFD解析における排気口基準濃度は、実測結果の各粒径区分の重量濃度で加重平均して算出する。

実測結果及び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**全てのcase**において、**教卓(③)**で**1.05~1.23**と**最も高く**、**室後方(⑤)**で**0.41~0.50**と**最も低くなる**。

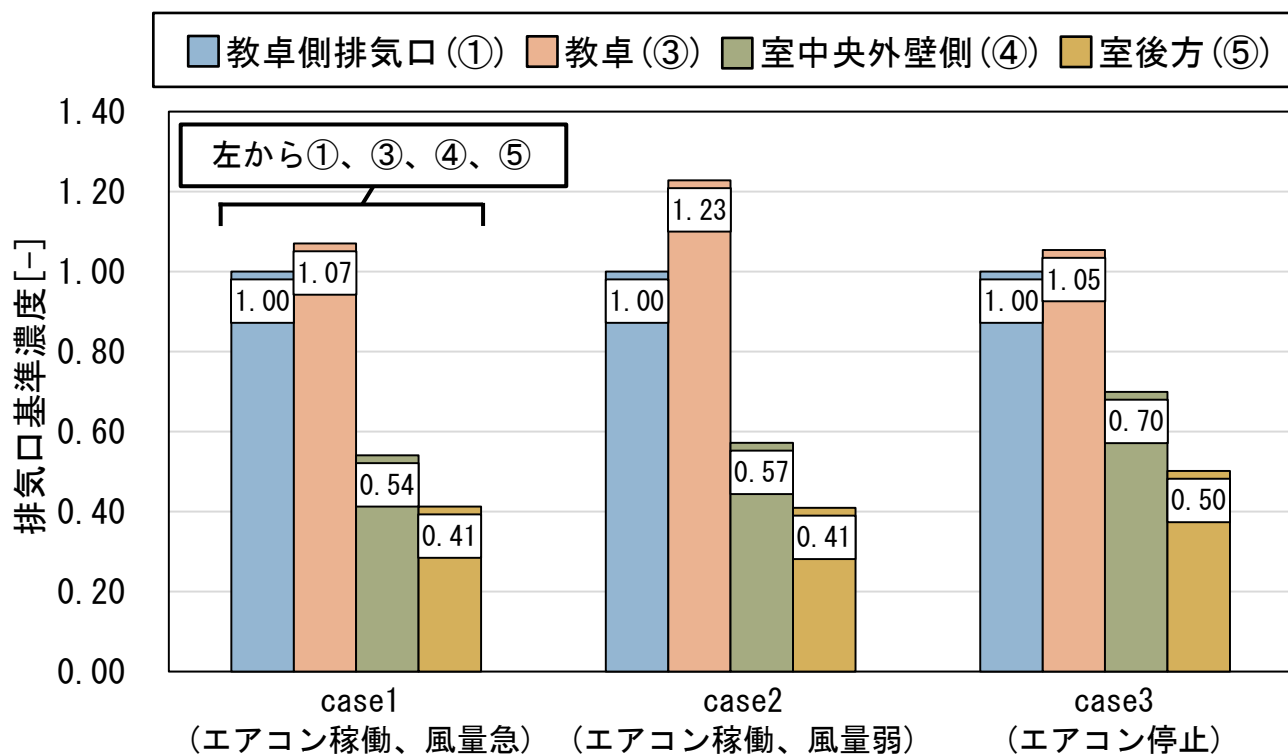


図2 各caseにおける排気口基準濃度(実測)

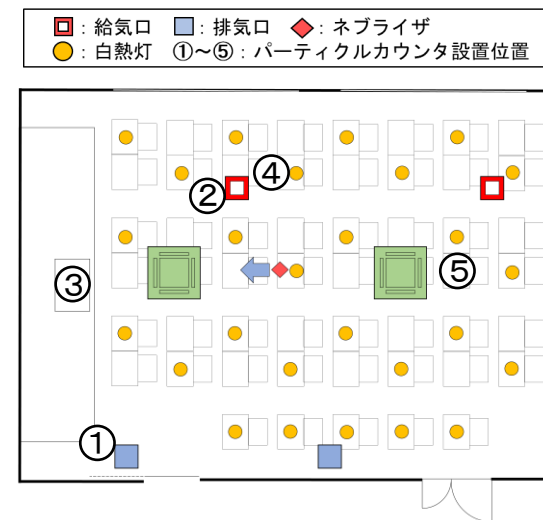


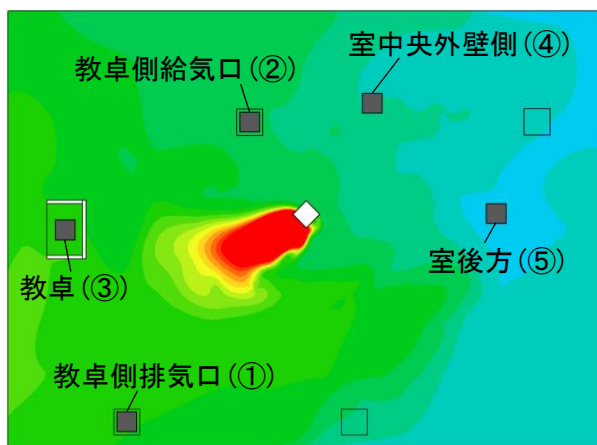
図1 実測及びCFD解析対象の教室平面

実測結果とCFD解析結果の比較

CFD解析の結果、**case1**では**ネブライザ前方**、**case2**では**後方廊下側**、**case3**では**ネブライザ周辺**の排気口基準濃度が相対的に高くなる。

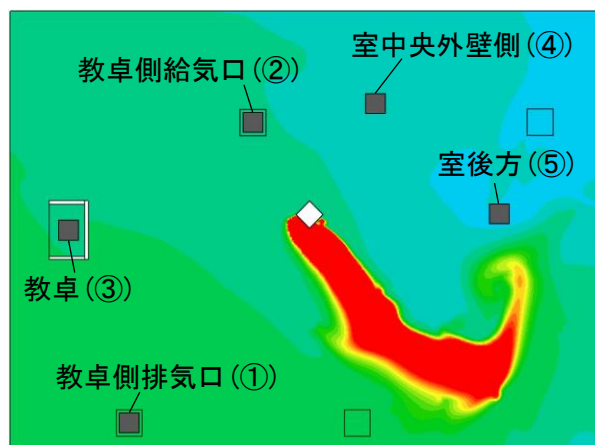
- ◇ : ネブライザ
- : パーティクルカウンタ設置位置

排気口基準濃度[-] 



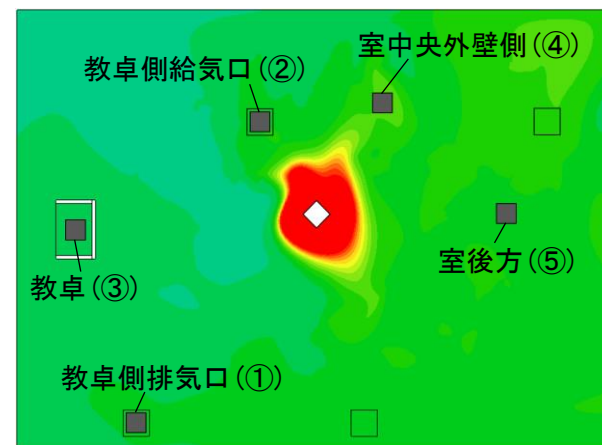
水平断面 (z=850 [mm])

(a) case1 (エアコン稼働、風量急)



水平断面 (z=850 [mm])

(b) case2 (エアコン稼働、風量弱)



水平断面 (z=850 [mm])

(c) case3 (エアコン停止)

図3 各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

エアコンを稼働し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case1及びcase2は、実測結果とCFD解析結果が概ね一致している。

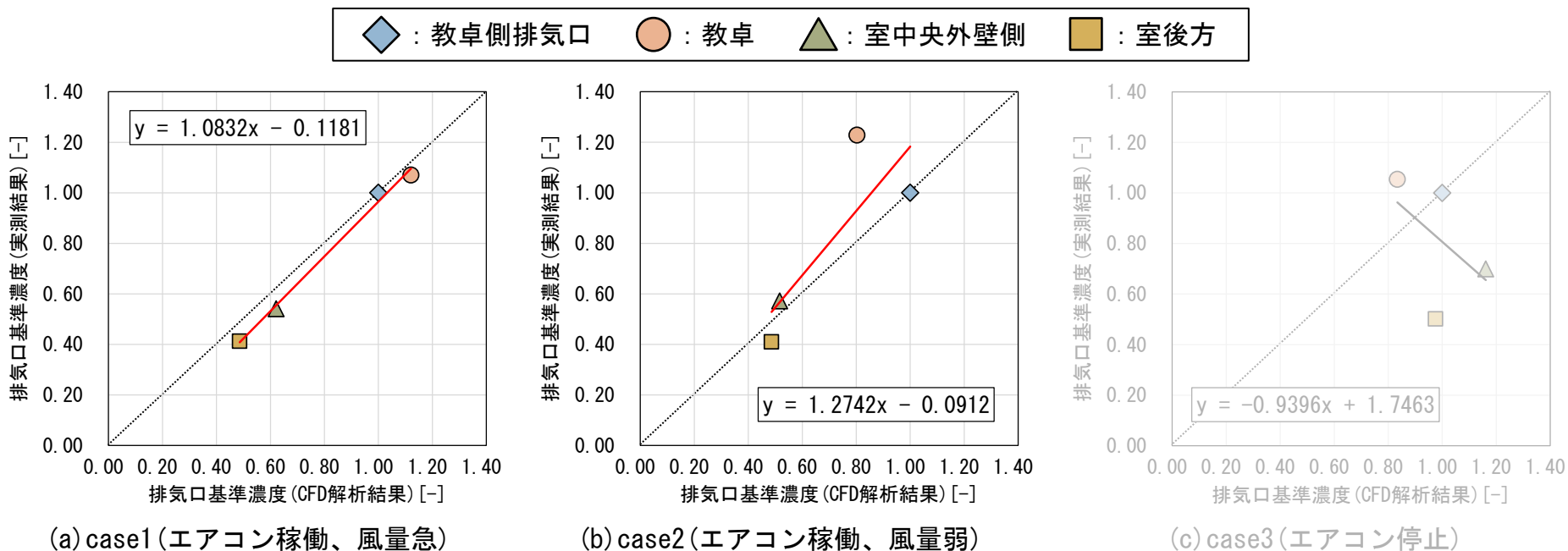


図4 実測結果とCFD解析結果における排気口基準濃度の比較

実測結果とCFD解析結果の比較

空調稼働時を対象としたCFD解析による濃度分布は概ね妥当であると考えられる。

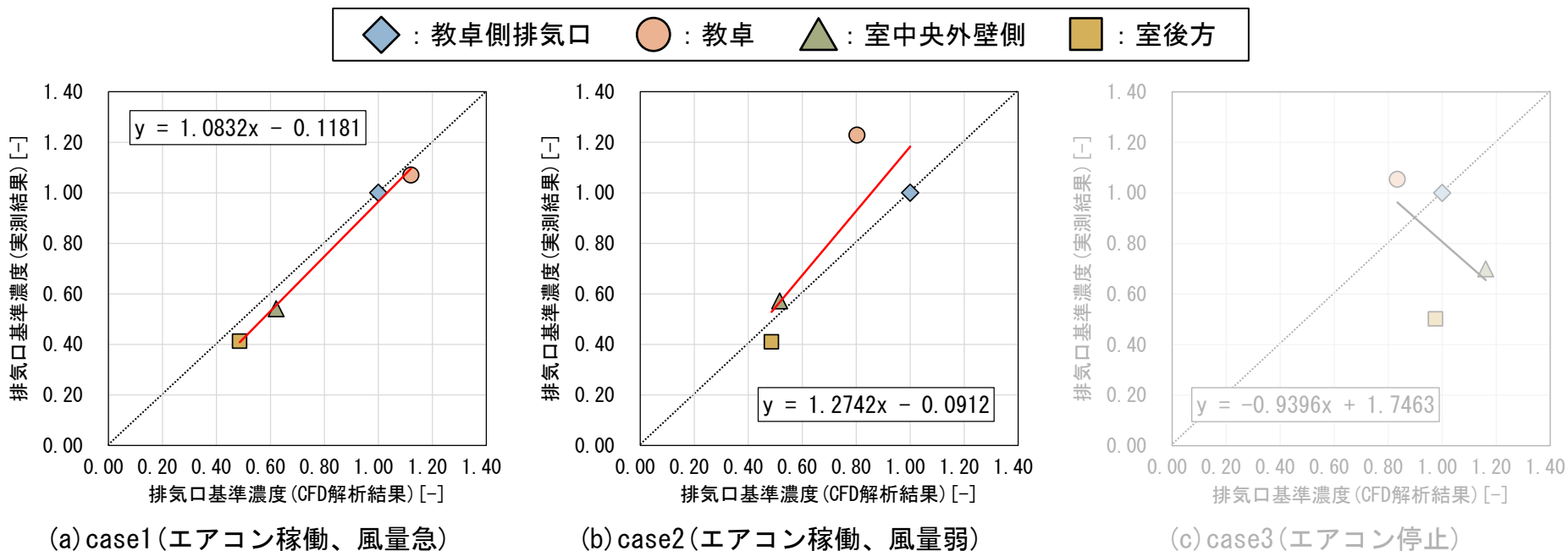


図4 実測結果とCFD解析結果における排気口基準濃度の比較

実測結果とCFD解析結果の比較

一方、エアコンを停止し比較的低速な気流場が生じていると考えられるcase3においては、実測結果とCFD解析結果は負の相関となる。

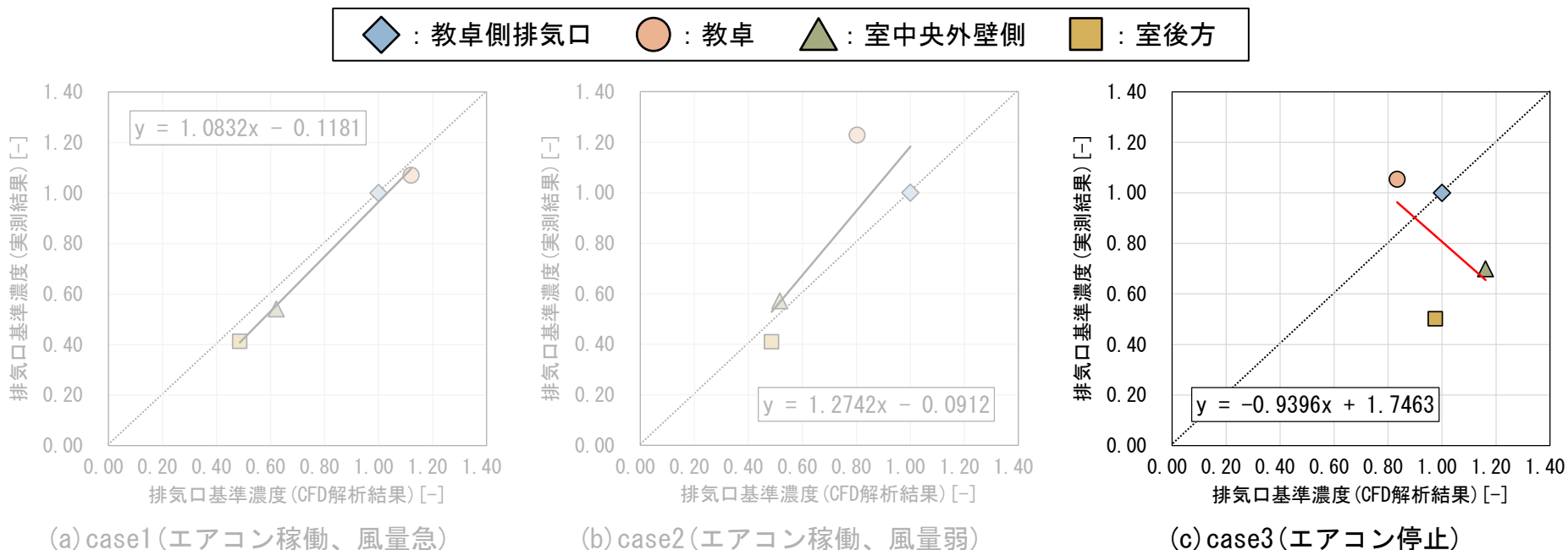


図4 実測結果とCFD解析結果における排気口基準濃度の比較

実測結果とCFD解析結果の比較

強制的な気流場が発生しない場合のCFD解析では、形状再現性や解析条件の更なる検討が必要であると考えられる。

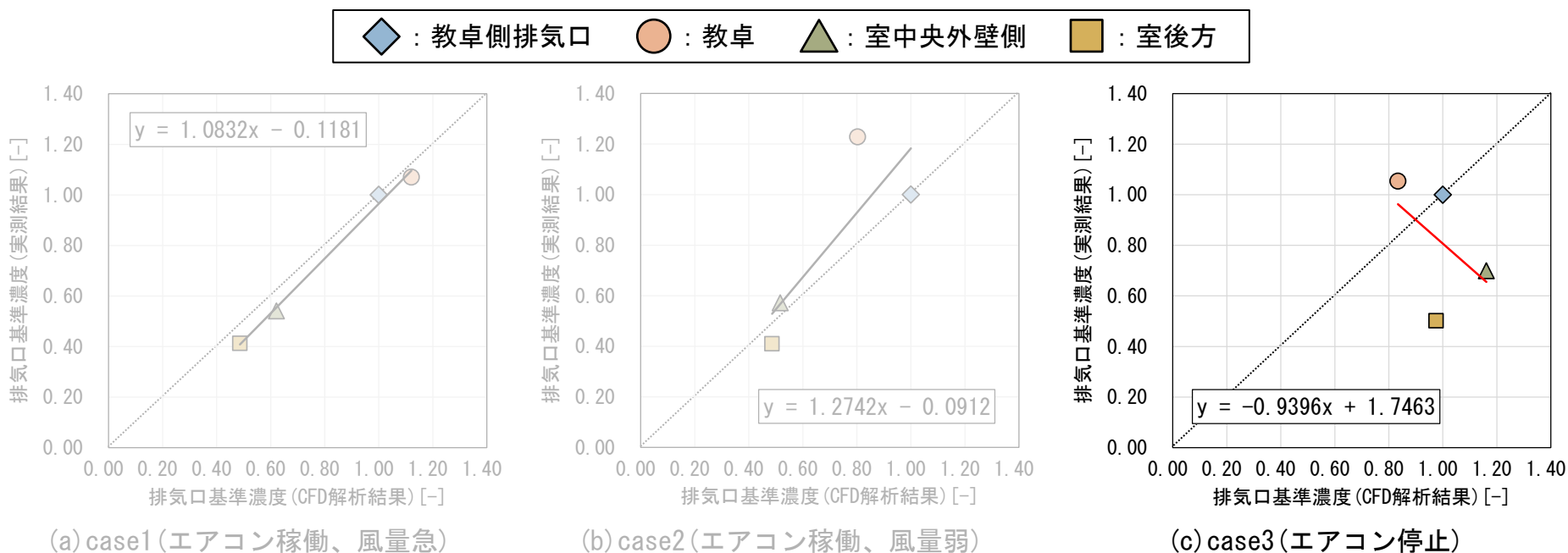


図4 実測結果とCFD解析結果における排気口基準濃度の比較

まとめ

- ① 今回の対象においては、エアコンを稼働したcase1及びcase2では実測結果とCFD解析結果が概ね一致していることから、強制対流場が支配的となる条件でのCFD解析結果は概ね妥当であると考えられる。
- ② case3のように強制的な気流場が発生しない条件でのCFD解析においては、形状再現性や解析条件をさらに詳細に検討すべきであると考えられる。