

屋内における飛沫の拡散に関する研究 飛沫の沈着及び漏気を考慮した数値シミュレーション

山田 瑞季 指導教員 有波 裕貴 助教

1 研究目的

2019年11月から、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、既往の研究^{文1)}の実測結果よりある程度の飛沫が室内に沈着^{*2}することが示唆され、沈着が室内の飛沫の拡散性状に影響を与えていると考えられる。

本研究では、既往の研究^{文1)}で実測及びCFD解析（RANS^{*3}）を行った教室を対象に、室内の表面に飛沫が沈着する面（以下沈着面）を設定してCFD解析（解析①）を行う。更に、実際の教室には漏気が存在すると考えられるため、沈着に加えて漏気による換気量を簡易的に考慮した解析（解析②）を行う。それぞれにおいて実測結果と解析結果を比較し、飛沫の沈着及び漏気の影響を考慮した場合のCFD解析結果と実測結果の検討を行う。

表1 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)		
流入 ^{*4}	ネブライザ吹出風速[m/s] (流量[m ³ /h])	1.5(1.08) ^{*5}	
	全熱交換換気扇	風量[m ³ /h]	650
		顕熱交換効率[%]	case1:68.7
		case2:66.0	
天井カセット型エアコン風量[m ³ /h]	case1:1,470	case2:960	
表面	壁面対数則		
輻射	輻射率0.9		
境界条件	熱貫流率 [W/(m ² ・K)]	外壁	0.87
		床	1.87
	室内発熱	窓	2.80
		天井	0.88
		間仕切り壁	1.62
温度[°C]	外気温	case1:0.5	case2:4.6
		case3:1.9	case1:6.9
		case2:7.4	case3:7.3
	廊下	case1:6.9	case2:7.4
		case3:7.3	case1:6.9
	隣室	case2:7.4	case3:13.0
		白熱灯(100[W]) × 29カ所	

表2 解析 case

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] (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
解析①	case1	650[m ³ /h] (定格風量・強)	全熱交換換気	急 (1,470[m ³ /h])	水平から 53[°]下向き
	case2			弱 (960[m ³ /h])	
	case3			停止	
解析②	case1	1,300[m ³ /h] (給気口及び排気口面積は 解析①の2倍)	全熱交換換気	急 (1,470[m ³ /h])	水平から 53[°]下向き
	case2			弱 (960[m ³ /h])	
	case3			停止	

2 沈着面を室内に分散させたCFD解析（解析①）

2.1 解析概要：表1に解析方法、表2に解析 case を示す。解析方法及び解析 case は既往の研究^{文1)}と同様とする。RANS 解析には汎用数値流体解析ソフト STREAM ver.2022 を使用する。流入条件^{*4}は、ネブライザの吹出風速を1.5[m/s]^{*5}、全熱交換換気扇、天井カセット型エアコンでは定格風量とする。本報で発生させる飛沫は各粒径区分の代表粒径^{*6}とし、既往の研究^{文1)}と同様の濃度測定点（教卓側排気口（①）、教卓側給気口（②）、教卓（③）、室中央外壁側（④）、室後方（⑤））で実測結果と比較を行う。CFD解析における重量濃度は、各粒径区分の重量濃度を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。また、給気口における飛沫の流入量^{*7}は実測結果から算出したものを使用する。

図1に解析対象モデル（解析①、case1）、図2に解析対象平面、表3に各 case の沈着面積率と沈着率を示す。

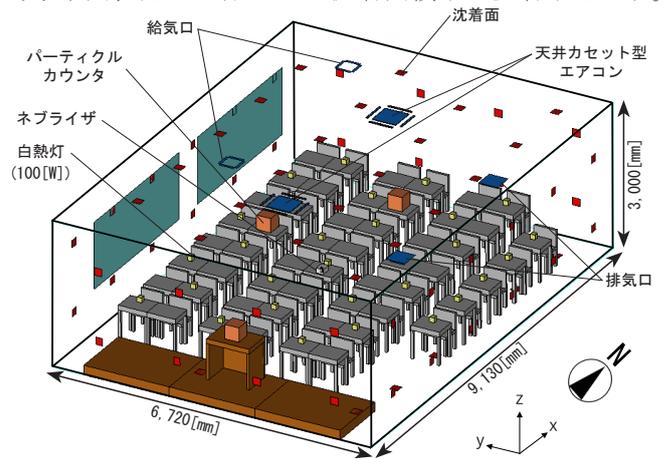


図1 解析対象モデル（解析①、case1）

■ : 給気口 ■ : 排気口 ◆ : ネブライザ
● : 白熱灯(29個) ①~⑤ : 濃度測定点

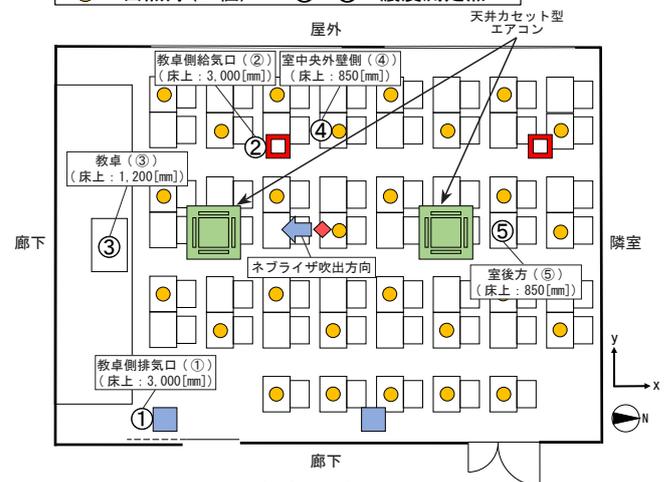


図2 解析対象平面

室内で沈着する場所が不明なため、沈着面は既往の研究^{文1)}で用いた解析モデルの天井・床・壁面に、均等に分散させて配置する。天井・床・壁面においてそれぞれの面積に対する沈着面積の割合（以下沈着面積率）を変化させて解析を行い、実測における沈着率とほぼ同様の沈着率となるように沈着面を設定する（表3）。沈着率は（1）式を用いて算出する。

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

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]

2.2 汚染質到達齢^{※8}の算出 : 図3に汚染質到達齢の算出方法の例(case1、教卓側排気口(①))を示す。解析結果と実測結果の比較において、ステップアップ法及びステップダウン法で算出した汚染質到達齢で評価する。ステップアップ法において本研究では、濃度上昇過程において、濃度が初めて定常濃度に達するまで各測定点の定常濃度と時刻tでの濃度の差を積算し（図3(a)の斜線部）、定常濃度で除して計算する（式(2)）。ステップダウン法においては、濃度減衰過程において、時刻tでの濃度を積算し（図3(b)の斜線部）定常濃度で除して計算する（式(3)）。

$$\tau_r = \int_0^{t_{s1}} \left\{1 - \frac{C_p(t)}{C_s}\right\} dt \quad \dots (2)$$

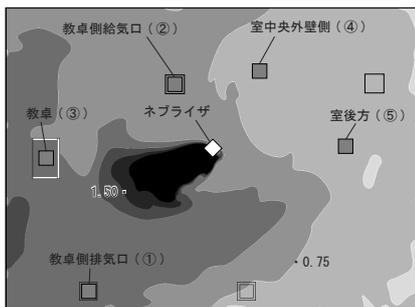
τ_r : 汚染質到達齢(ステップアップ法)[s] t_{s1} : 濃度が初めて定常濃度に達する時刻[s]
 $C_p(t)$: 時刻tの算出点Pでの濃度[-] C_s : 算出点Pでの定常時における濃度[-]

$$\tau_r = \int_{t_s}^{\infty} \left\{\frac{C_p(t)}{C_s}\right\} dt \quad \dots (3)$$

τ_r : 汚染質到達齢(ステップダウン法)[s] t_s : ネブライザ停止時刻[s]
 $C_p(t)$: 時刻tの算出点Pでの濃度[-] C_s : 算出点Pでの定常時における濃度[-]

表3 各 case の沈着面積率と沈着率

case		沈着面積率[%]	沈着率[%]
case1	実測		37.9
	解析①	0.96	37.8
	解析②	1.81	37.2
case2	実測		54.4
	解析①	7.25	54.5
	解析②	7.72	54.8
case3	実測		26.2
	解析①	0.40	26.1
	解析②	0.50	26.1



(a) case1 (エアコン稼働 風量急)



(b) case2 (エアコン稼働 風量弱)

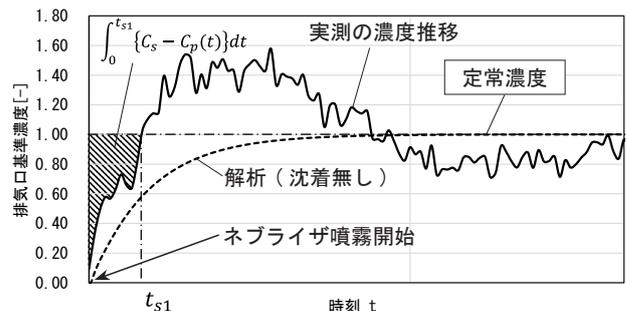


(c) case3 (エアコン停止)

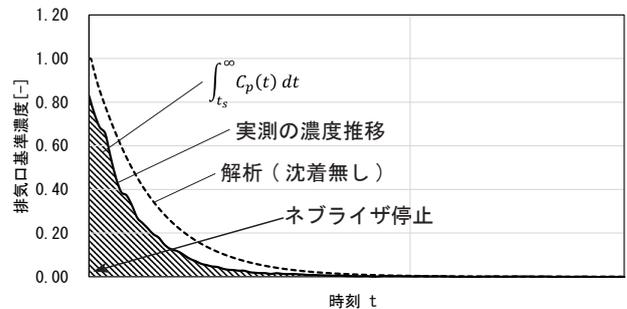
図4 各 case における定常時の排気口基準濃度分布（解析①、z=850[mm]（机上高さ））

2.3 実測結果と解析結果の比較 : 図4に各 case における定常時の排気口基準濃度分布（解析①、z=850[mm]（机上高さ））を示す。排気口基準濃度は、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で相対的に高くなる。

図5に各 case における汚染質到達齢（ステップアップ法）、図6に各 case における汚染質到達齢（ステップダウン法）、図7に実測結果と解析①における汚染質到達齢の比較（ステップアップ法）、図8に実測結果と解析①における汚染質到達齢の比較（ステップダウン法）を示す。それぞれの図中の薄い色のプロットは、既往の研究^{文1)}で求めた沈着を考慮しない場合の結果である。エアコンを風量急で稼働した case1 において、ステップアップ法で算出した汚染質到達齢を実測結果と CFD 解析結果で比較すると、沈着面を設定した解析①では沈着を考慮しない解析より汚染質到達齢が実測結果に近くなる。またステップダウン法で算出した場合は、実測結果と概ね一致する。一方、エアコンを風量弱で稼働した case2 に



(a) ステップアップ法



(b) ステップダウン法

図3 汚染質到達齢の算出方法の例 (case1、教卓側排気口(①))

排気口基準濃度 [-] 0.00 1.00 2.00

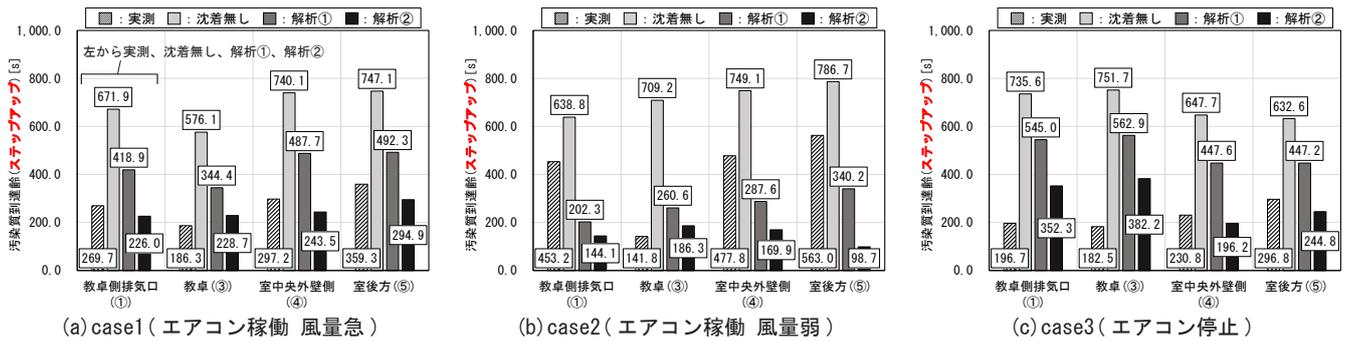
において汚染質到達齢を比較すると、ステップアップ法、ステップダウン法のどちらで算出した場合でも実測結果と解析結果に差がある。エアコンを停止した case3 においては汚染質到達齢の算出方法に関わらず実測結果と解析結果は負の相関関係となる。これは、エアコンを風量弱で稼働または停止した場合は、室内に比較的低速な気流のみ存在するため複雑な気流場が生じ、実測時の気流性状を再現することが難しいためと考えられる。

次に、より実測時の状況を再現するため、全 case に対して漏気を考慮した解析（解析②）を行う。

3 漏気を考慮した CFD 解析（解析②）

3.1 解析概要：表 4 に換気口の解析条件を示す。実測時の漏気による換気量は不明であるため、換気扇の定格風量 (650[m³/h]) と同等と仮定する。また漏気位置も不明のため、換気扇の風量に漏気による換気量を加算して設定する。この際、解析①に対して吹出及び吸込風速が変化しないよう、給気口及び排気口面積を 2 倍に拡大する。

解析①と同様に、実測における沈着率と近い沈着率となるよう沈着面積率を変化させて解析し（表 3）、得られた汚染質到達齢を実測結果及び解析①と比較する。

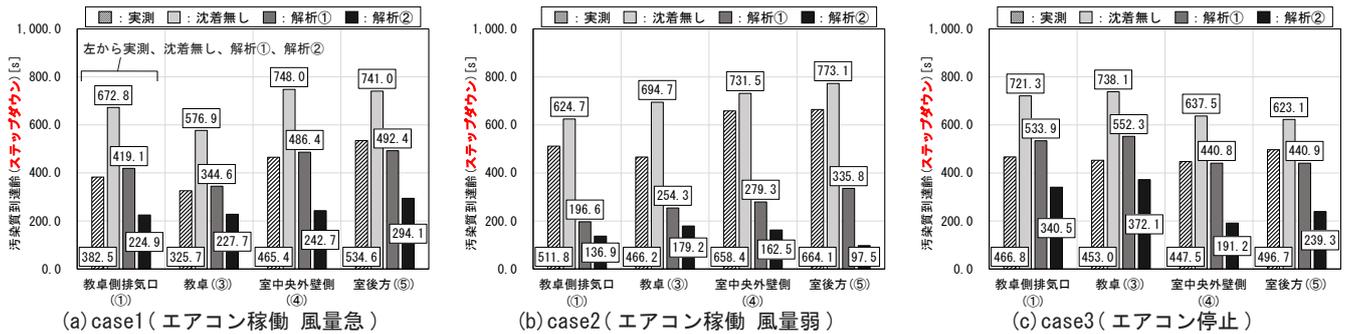


(a) case1 (エアコン稼働 風量急)

(b) case2 (エアコン稼働 風量弱)

(c) case3 (エアコン停止)

図5 各 case における汚染質到達齢（ステップアップ法）

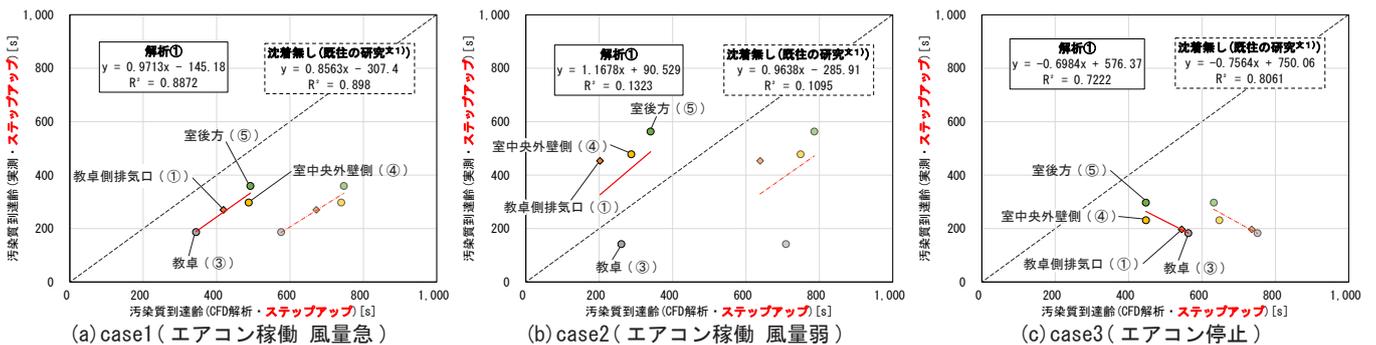


(a) case1 (エアコン稼働 風量急)

(b) case2 (エアコン稼働 風量弱)

(c) case3 (エアコン停止)

図6 各 case における汚染質到達齢（ステップダウン法）

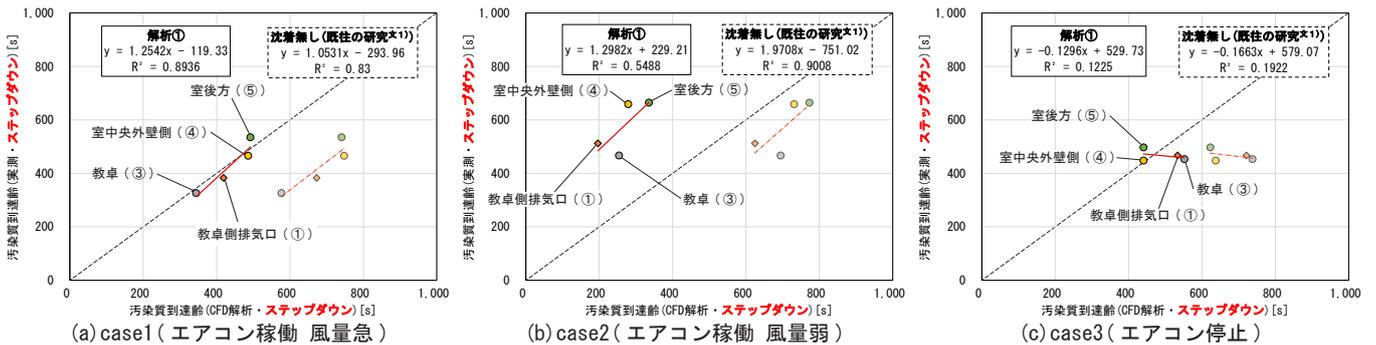


(a) case1 (エアコン稼働 風量急)

(b) case2 (エアコン稼働 風量弱)

(c) case3 (エアコン停止)

図7 実測結果と解析①における汚染質到達齢の比較（ステップアップ法）



(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8 実測結果と解析①における汚染質到達齢の比較（ステップダウン法）

3.2 実測結果と解析結果の比較：図9に実測結果と解析②における汚染質到達齢の比較（ステップアップ法）、図10に実測結果と解析②における汚染質到達齢の比較（ステップダウン法）を示す。それぞれの図中の薄い色のプロットは、解析①の結果である。エアコンを風量急で稼働した case1 において、ステップアップ法で算出した汚染質到達齢を実測結果と CFD 解析結果で比較すると、漏気を考慮した解析②では沈着面の設定のみを行った解析①に比べて実測に近い結果となる。一方でステップダウン法で算出した場合、解析①では実測結果と概ね一致していたが、漏気を考慮した解析②では実測結果と差が大きくなる。また、エアコンを風量弱で稼働した case2 及びエアコンを停止した case3 の汚染質到達齢においては、解析①と同様にステップアップ法、ステップダウン法のどちらで算出した場合でも実測結果との差が大きい。沈着及び漏気の影響を考慮するだけでなく、比較的低速で複雑な気流場においても実測時の気流性状を再現することが課題であると考えられる。

4 まとめ

4.1 沈着面を室内に分散させた CFD 解析（解析①）

①エアコンを風量急で稼働した case1 において、沈着面を室内に分散させた場合、ステップアップ法で算出した汚染質到達齢は実測結果と近い値となり、ステッ

表4 換気口の解析条件

換気口	解析条件	面積	吹出及び吸込風速	風量
給気口	解析①	0.06[m ²]	3.0[m/s]	650[m ³ /h]
	解析②	0.12[m ²]	3.0[m/s]	1,300[m ³ /h]
排気口	解析①	0.16[m ²]	1.1[m/s]	650.54[m ³ /h] ^{※5}
	解析②	0.32[m ²]	1.1[m/s]	1,300.54[m ³ /h] ^{※5}

プダウン法で算出した汚染質到達齢は実測結果と概ね一致する。

② case2 の解析による汚染質到達齢は実測の値との差が大きく決定係数も小さい。case3 においてはステップアップ法、ステップダウン法のどちらの算出方法でも実測結果と解析結果は負の相関となる。

4.2 漏気を考慮した CFD 解析（解析②）

① case1 において、汚染質到達齢をステップアップ法で算出した場合、漏気を考慮した解析結果は沈着面の設定のみを行った解析①に比べて実測結果と近い結果となる。一方でステップダウン法で算出した場合、解析①では実測結果と概ね一致していたが、漏気を考慮した解析②では実測結果との差が生じる。

② case2 及び case3 の汚染質到達齢において、ステップアップ法、ステップダウン法のどちらで算出した場合でも実測結果との差が大きい。比較的低速で複雑な気流場においても実測時の気流性状を再現することが課題であると考えられる。

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 粒子画像流速測定法 (PIV: Particle Image Velocimetry) を用いてネブライザ、全熱交換換気扇の風向・風速測定を行い、測定結果を境界条件に設定した。エアコンの飛沫除去率は [%] とする。
- ※5 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 0.04 ~ 0.08 [%] である為、影響は極めて少ないと考えられる。
- ※6 実測において、各粒径区分の個数濃度から帰直線算出し、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である。重力による沈降を考慮するため各粒径に応じた終端速度を設定する。
- ※7 実測結果における定常時の教卓側排気口 (①) に対する教卓側給気口 (②) の重量濃度の割合を飛沫の流入率とする。流入率と排気口濃度により給気口からの飛沫の流入量を設定する。
- ※8 汚染質到達齢は、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、局所領域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と定義する。

参考文献

文1) 前田：「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」、新潟大学大学院自然科学研究科環境科学専攻社会基盤・建築学コース（建築系）修士論文、2023年

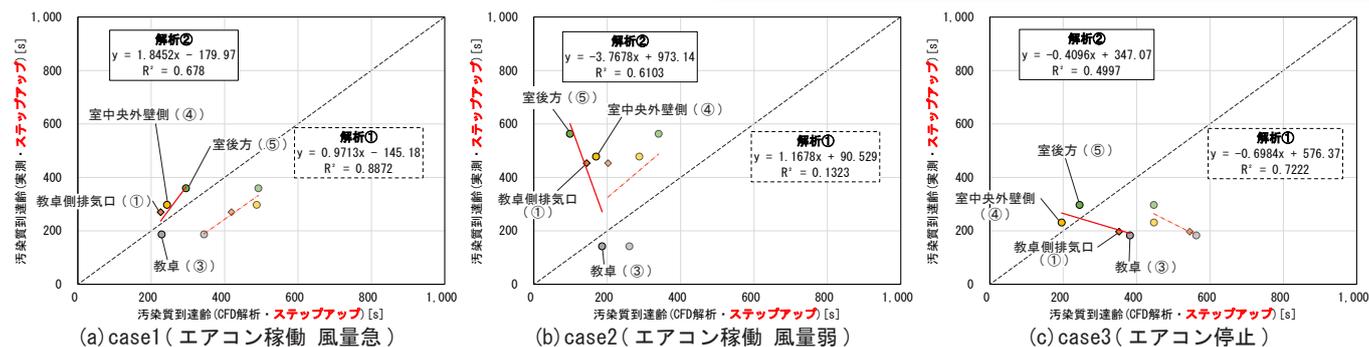


図9 実測結果と解析②における汚染質到達齢の比較（ステップアップ法）

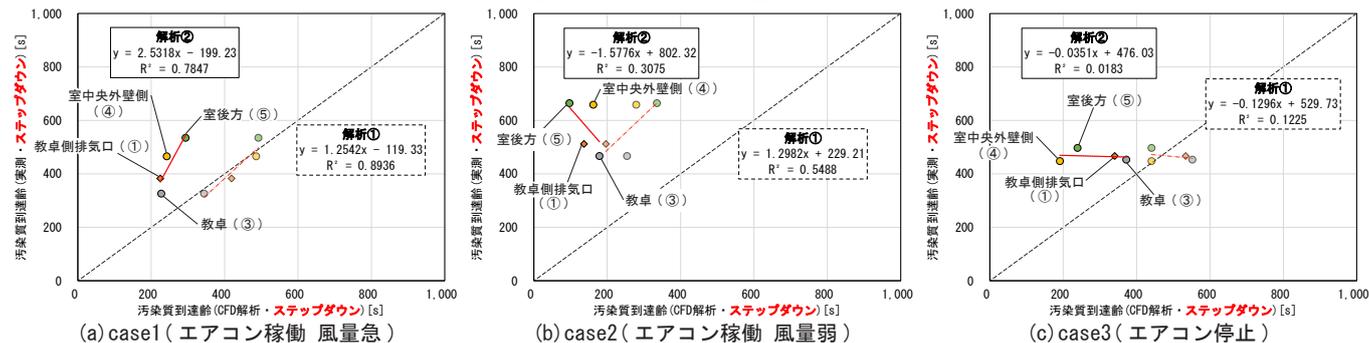


図10 実測結果と解析②における汚染質到達齢の比較（ステップダウン法）