

1. 研究の背景と目的

ウイルスや臭気などの汚染物質は、換気により除去されるが、換気量を最小に抑えつつ、換気のを達成し、空調による消費エネルギーを抑えることが、コロナ禍以降、喫緊の課題となっている。人体由来の汚染質を想定して、給気と排気の方法（給気口、排気口の位置、大きさ、向き）を最適化することが課題である。

本研究では、オフィスや教室など複数人が共有する室内空間で実際に生じている換気性状を測定し、それを解析モデル内で再現し、その具体的な改善策を理論的に検討し、人体から発生する汚染質に特化して、効率よく汚染質濃度を下げる換気方法を検討することを本研究の目的とする。

2. 研究方法

人が椅座で滞在している空間の代表例として、講義中の大学の教室を対象とし、人の呼気からの汚染物質を考慮し、その濃度分布を評価指標として、換気性状を評価する。典型的な一つの教室を対象として、中間期の冷暖房無しの場合について、換気（排気扇を用いた第3種機械換気）運転時における教室内の気流性状、人の呼気から発生した二酸化炭素の濃度分布を数値流体解析により求め、換気性状を明らかにする。次に、換気扇による排気位置、給気位置、空調機による室内空気の攪拌の有無を変数とした複数の条件について数値流体解析を行い、それぞれの場合の換気効率の評価を行う。また、現場での二酸化炭素濃度分布の測定を行い、数値計算結果との比較を行う。

3. 数値流体解析による講義室の換気性状の検討

3.1 解析方法（基準条件）

90名程度の学生が講義を受けているという想定で、講義室の数値流体解析を行い、ヒトから発生する二酸化炭素の室内での濃度分布の計算結果を得る。天井面に設置された換気扇による第3種換気、廊下側の2か所のドアの下部ガラリから新鮮空気を給気することを想定する。空調無し、窓開け無しを基準条件とする。

解析対象室は、講義中の大学の教室（128m²、幅7.8m、奥行き16.0m、天井高3.1m、第3種換気、廊下側より給気、廊下と反対側に窓）を対象とし、滞在者90名の場合を想定して二酸化炭素濃度分布を計算した。室形状の概要を図1、図2に示す。

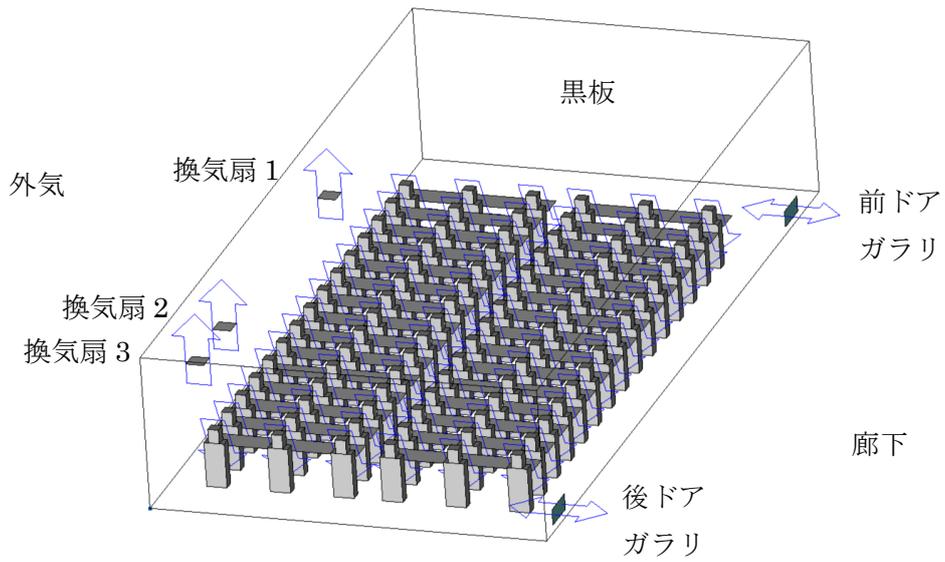


図1 対象室の概要 (立体図)

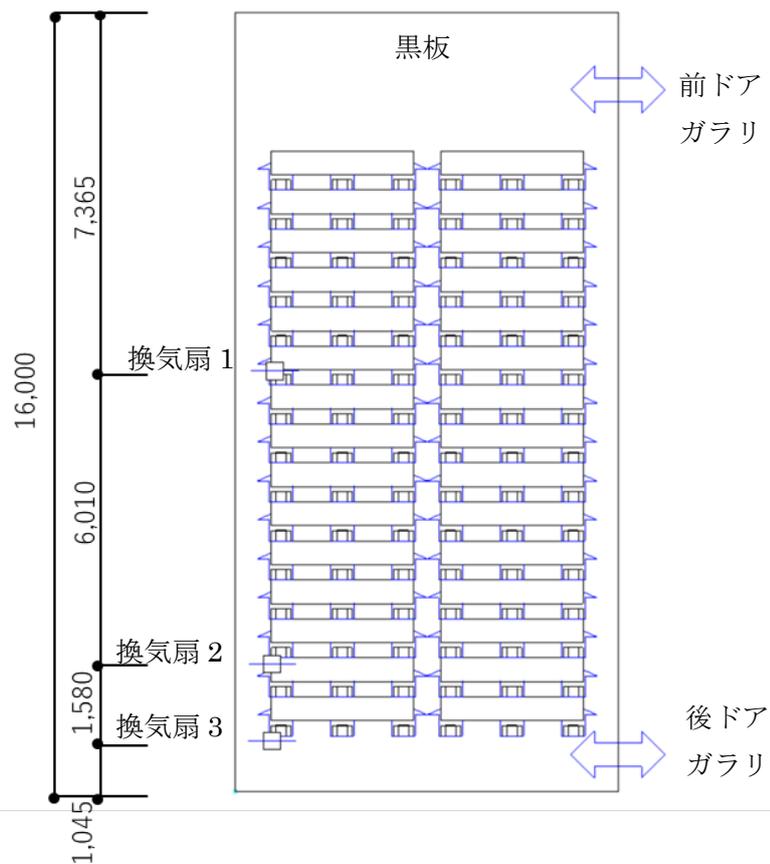


図2 対象室の概要 (平面図)

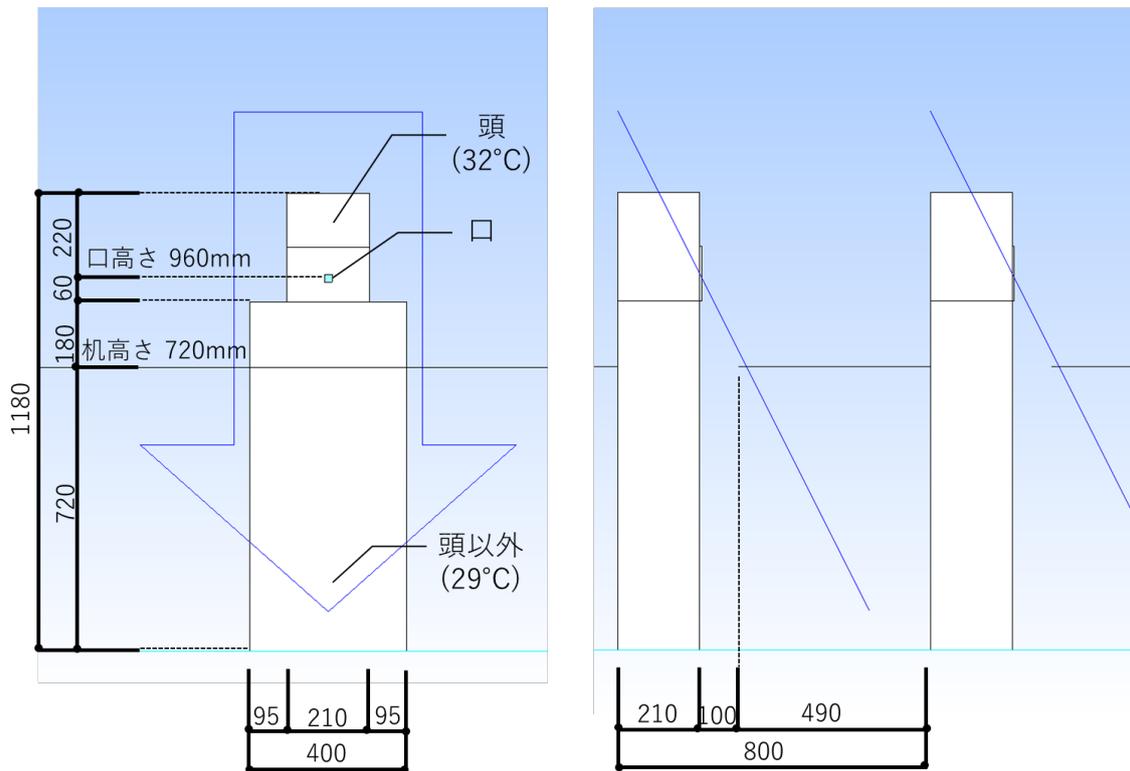


図3 人体周りの詳細図

天井面の換気扇の位置は、図1に示す通り、窓際の天井面（下がり天井となっており、ここは高さ2.63m）に3か所（部屋の長手方向の前寄りに1か所、後方に2か所）に分けて設置されており、それぞれの換気量は500m³/h（強運転時を想定）とする。換気量は教室全体で、1500 m³/hである。3か所にある換気扇の位置は、6列目の座席上部、14列目の机上部、15列目の座席上部に位置している（図2）。

温度に関しては、中間期を想定し、等温条件とした。

室内気流の解析については、 $k-\epsilon$ の乱流モデルを用い、流体力学の基礎方程式を、SIMPLE法（1次精度風上差分）を用いて数値的に解いた。基本的な空間分割幅は80 mmとし、壁際や人体近傍も同様に空間分割幅を80 mmとして分割とした。メッシュの総数は約90万である。解析は流体解析ソフトウェアSTREAMを用いて行った。

本研究では、室内の在室者から呼気により二酸化炭素が発生することを想定し、室内における二酸化炭素濃度分布、平均濃度から評価を行う。

人体モデルは椅座位時を想定し、口の高さは床から高さ0.96mとした（図3）。

表 1 解析条件

壁	速度境界層	対数則
口	大きさ	20×20 mm
	呼気量 ^{注1)}	吹き出し風量 0.451 m ³ /h
	呼気の風向	前方下向き (角度 63.4°)
	呼気の風速の大きさ	0.313m/s
	二酸化炭素発生量	0.0178m ³ /h
吹出口 (2つ) (ドアガラリ)	大きさ	725×320 mm
	開口条件	自由流出入
	流入空気温度	23℃
	流入空気二酸化炭素濃度	400ppm
吸込口 (3つ)	大きさ	350×350 mm
	風量	500 m ³ /h
	風向	鉛直上向き
	風速の大きさ	1.13m/s

注1) 呼気量は、成人の安静時を想定し、一回換気量 500mL に呼吸数 15.02 回/h を乗じた値として計算した。

3.2 解析結果

(1) 基準条件

基準条件の、室内の各断面（断面位置を図4に示す）における気流分布と二酸化炭素の濃度分布を図5～20に示す。

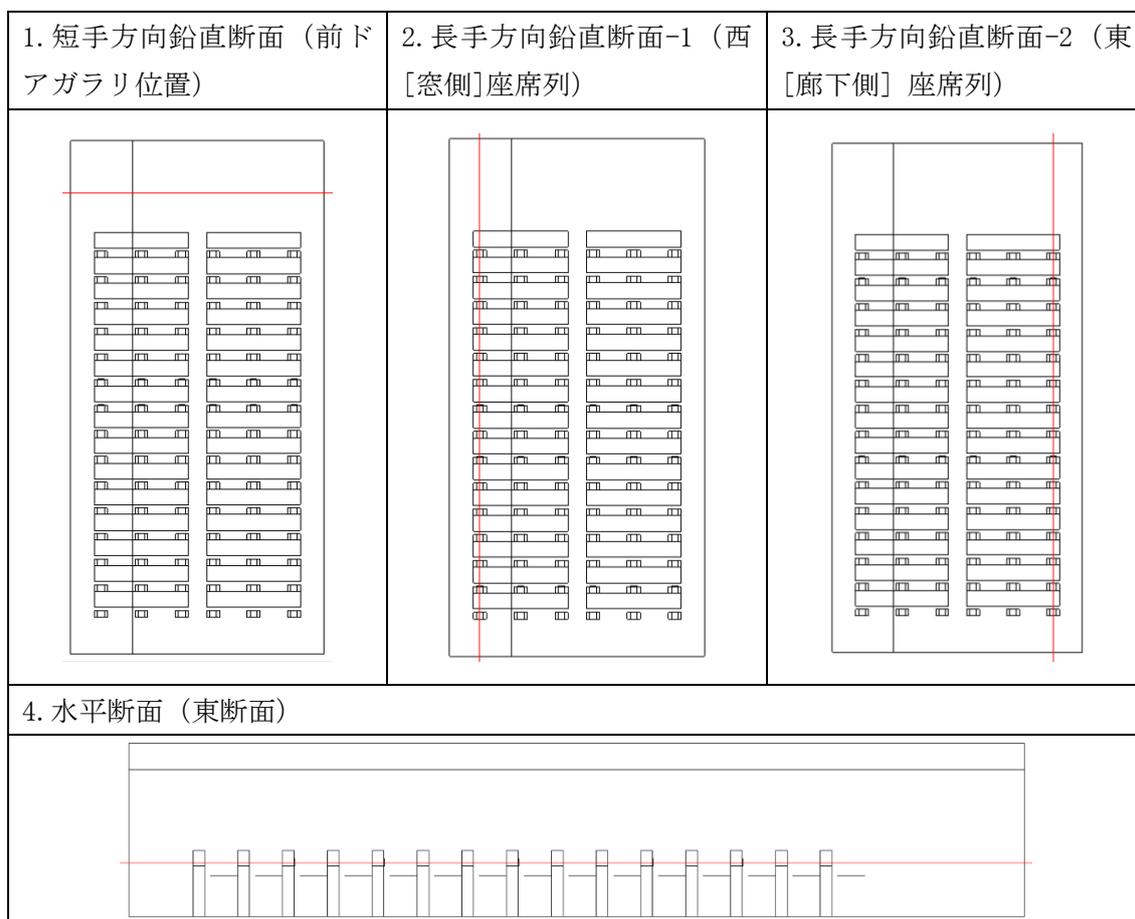


図4 流体解析の結果を示す断面位置（赤線）

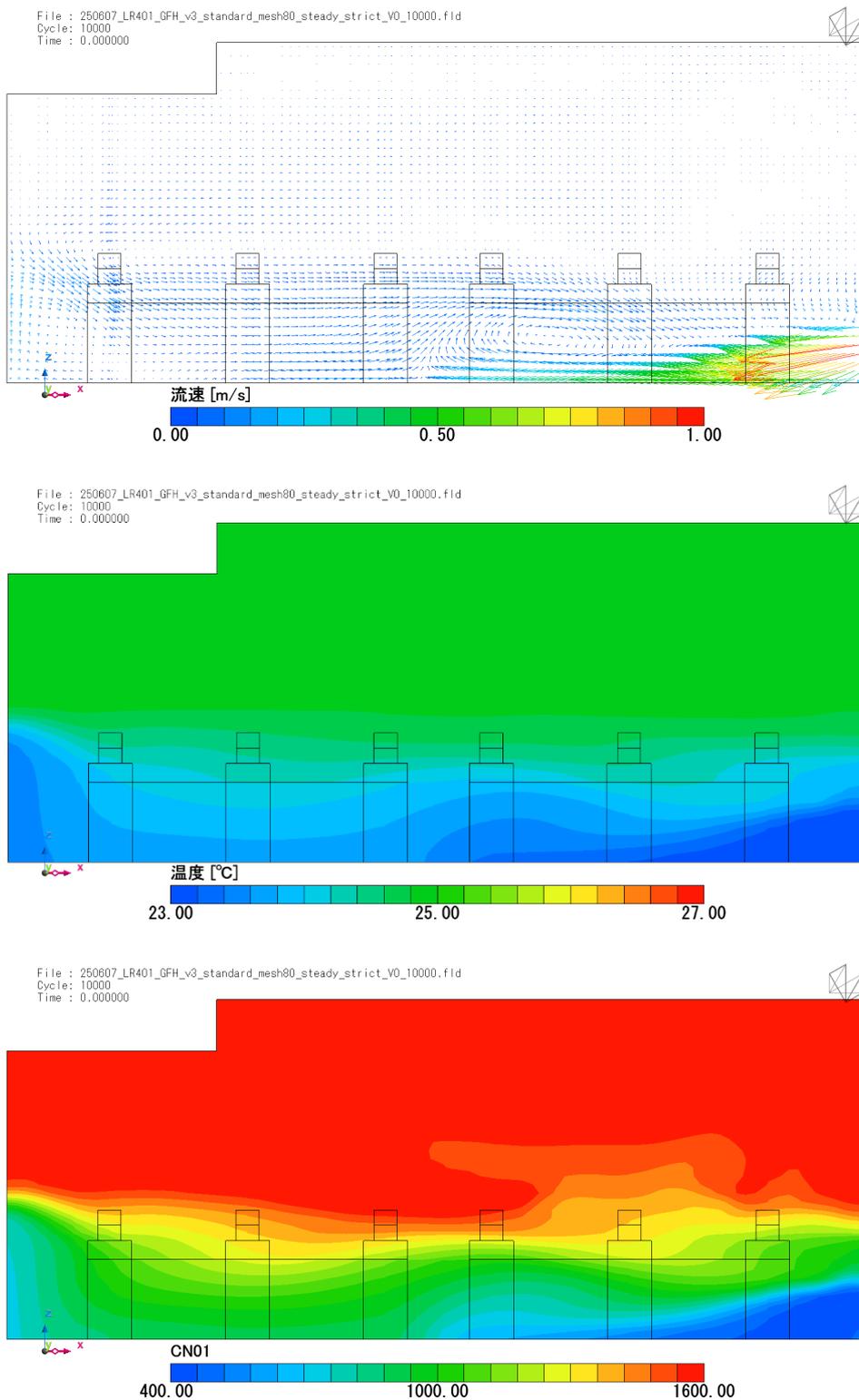
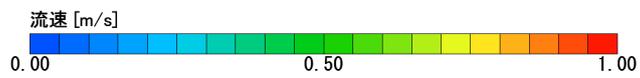
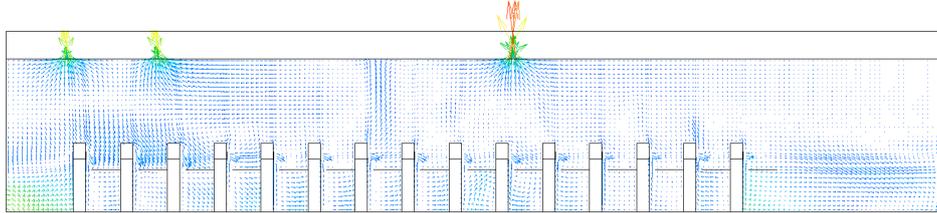
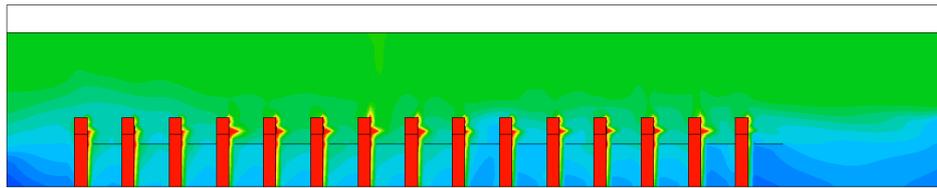


図 5 部屋の短手方向の鉛直断面における気流分布、温度分布および二酸化炭素濃度分布 [ppm] (前ドアガリ位置、基準条件)

File : 250607_LR401_GFH_v3_standard_mesh80_steady_strict_V0_10000.fld
Cycle: 10000
Time : 0.000000



File : 250607_LR401_GFH_v3_standard_mesh80_steady_strict_V0_10000.fld
Cycle: 10000
Time : 0.000000



File : 250607_LR401_GFH_v3_standard_mesh80_steady_strict_V0_10000.fld
Cycle: 10000
Time : 0.000000

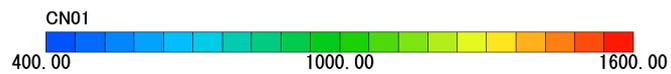
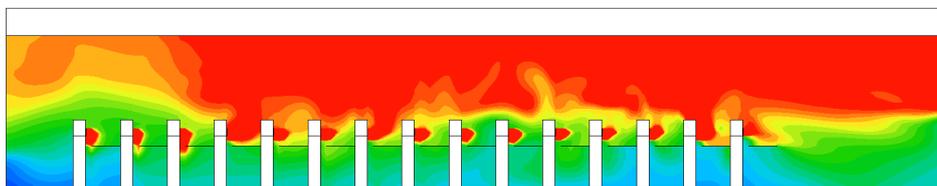
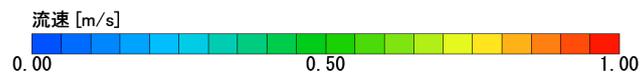
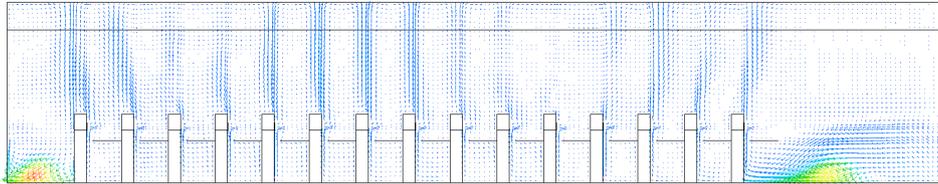
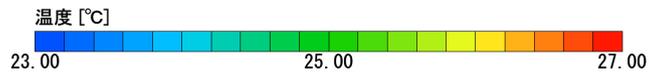
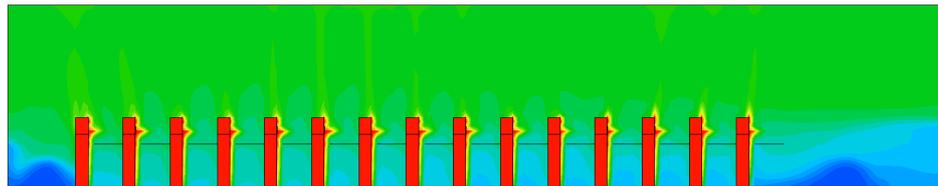


図 6 部屋の長手方向の鉛直断面における気流分布、温度分布および二酸化炭素濃度分布 [ppm] (西(窓)側座席列、基準条件)

File : 250607_LR401_GFH_v3_standard_mesh80_steady_strict_V0_10000.fld
Cycle: 10000
Time : 0.000000



File : 250607_LR401_GFH_v3_standard_mesh80_steady_strict_V0_10000.fld
Cycle: 10000
Time : 0.000000



File : 250607_LR401_GFH_v3_standard_mesh80_steady_strict_V0_10000.fld
Cycle: 10000
Time : 0.000000

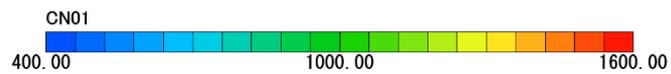
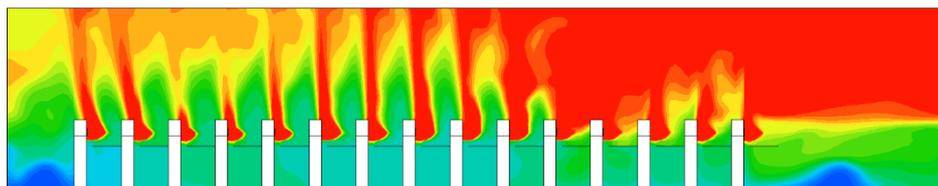
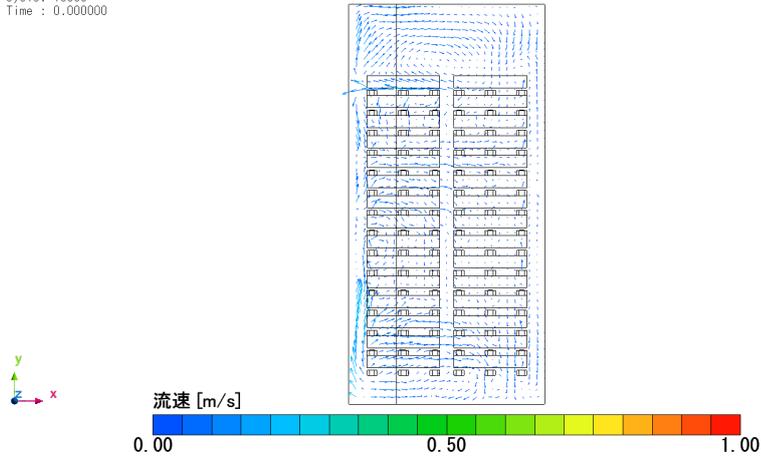
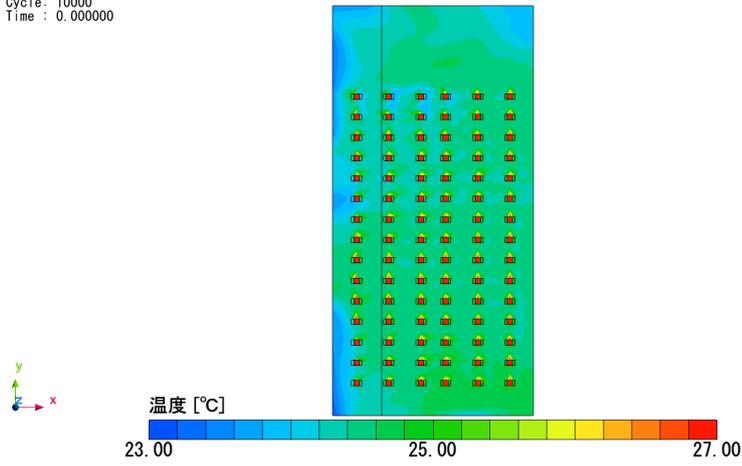


図 7 部屋の長手方向の鉛直断面における気流分布、温度分布および二酸化炭素濃度分布 [ppm] (東 (廊下) 側座席列、基準条件)

File : 250607_LR401_GFH_v3_standard_mesh80_steady_strict_V0_10000.fld
Cycle: 10000
Time : 0.000000



File : 250607_LR401_GFH_v3_standard_mesh80_steady_strict_V0_10000.fld
Cycle: 10000
Time : 0.000000



File : 250607_LR401_GFH_v3_standard_mesh80_steady_strict_V0_10000.fld
Cycle: 10000
Time : 0.000000

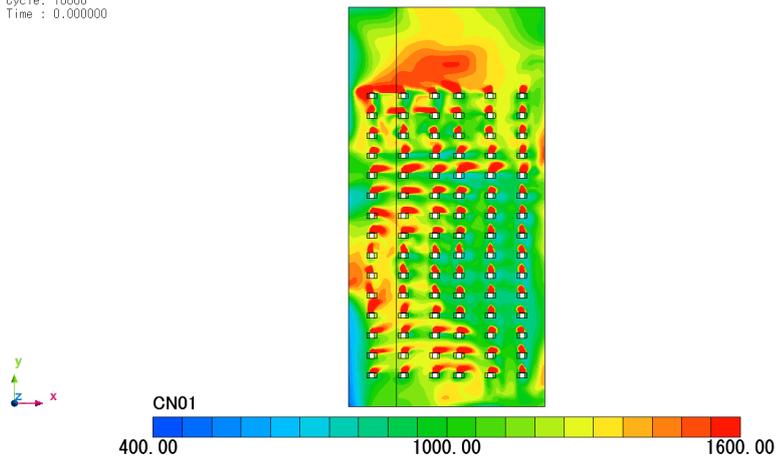


図 8 水平断面における気流分布、温度分布および二酸化炭素濃度分布[ppm] (呼吸域、高さ 0.96m、基準条件)

<基準条件>

教室内では、人体発熱により人体周りで上昇気流が生じている（図 7）。東（廊下）側壁面のガラリより流入した空気は、床面から 0.5m 程度までの低い位置を西（窓）側壁面に向かって直進するため、教室東側の人体顔周りの上昇気流にはほとんど影響を与えない（図 7）。一方、教室西側では、その気流が壁面で折り返す際、北向き（前方教壇側）に流れる気流と、南向きに（換気扇へと）流れる気流に分かれる。前方へ流れる気流は、教室の前半分の呼吸域から天井の間の空間で循環する（図 8 および図 6）。換気扇に直接向かう気流は、基本的に天井付近のみで確認されるが、ドアのガラリの正面に 2 つの換気扇が集中する教室後方の窓際（南西部）においては、西側壁面において上昇気流が確認でき、後方ドアのガラリより流入した空気が呼吸域を通過して天井に到達し、直接換気扇より排気されている（図 8）。

在室者から呼出された二酸化炭素は、人体周りの上昇気流により上方へ移動している。また、前方ドアのガラリからの流入した空気が西側の外壁で折り返し、呼気の上昇を妨げつつ（図 6）、折り返した地点から南北方向に広がるように呼吸域を移動する。その折り返し気流が北側（教室前方）に移動する影響で、教室前方の呼吸域高さ以上の空間で二酸化炭素濃度が高くなっている（図 6、7、8）。また、その折り返し気流が南側へ移動する影響で、教室西側では二酸化炭素濃度が高くなっている（図 8）。また、後方ドアのガラリからの流入気流が壁沿いに上昇している教室南西部では、局所的に二酸化炭素濃度が 400ppm 程度と低い。

(2) 窓を開けた条件

西側壁面に4か所の開口面（幅0.4m, 高さ区間0.95~1.295m, 1.395~2.64m（図9））を均等に配置した際の二酸化炭素濃度と気流の分布を示す。流体解析において、開口では自由流出入条件とし、風圧の影響は考慮しないものとする。窓の外の外気の状態は、気温23℃、二酸化炭素濃度400ppmとする（前後のドアのガラリから流入する空気と同じ条件）。

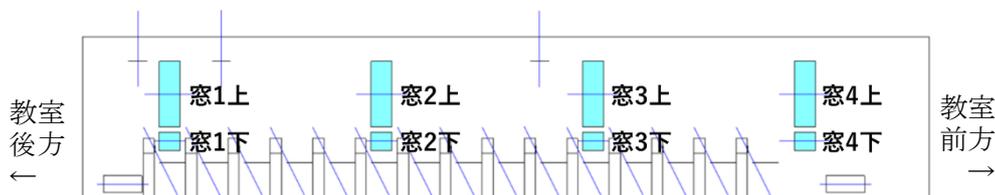


図9 教室内の窓開け位置

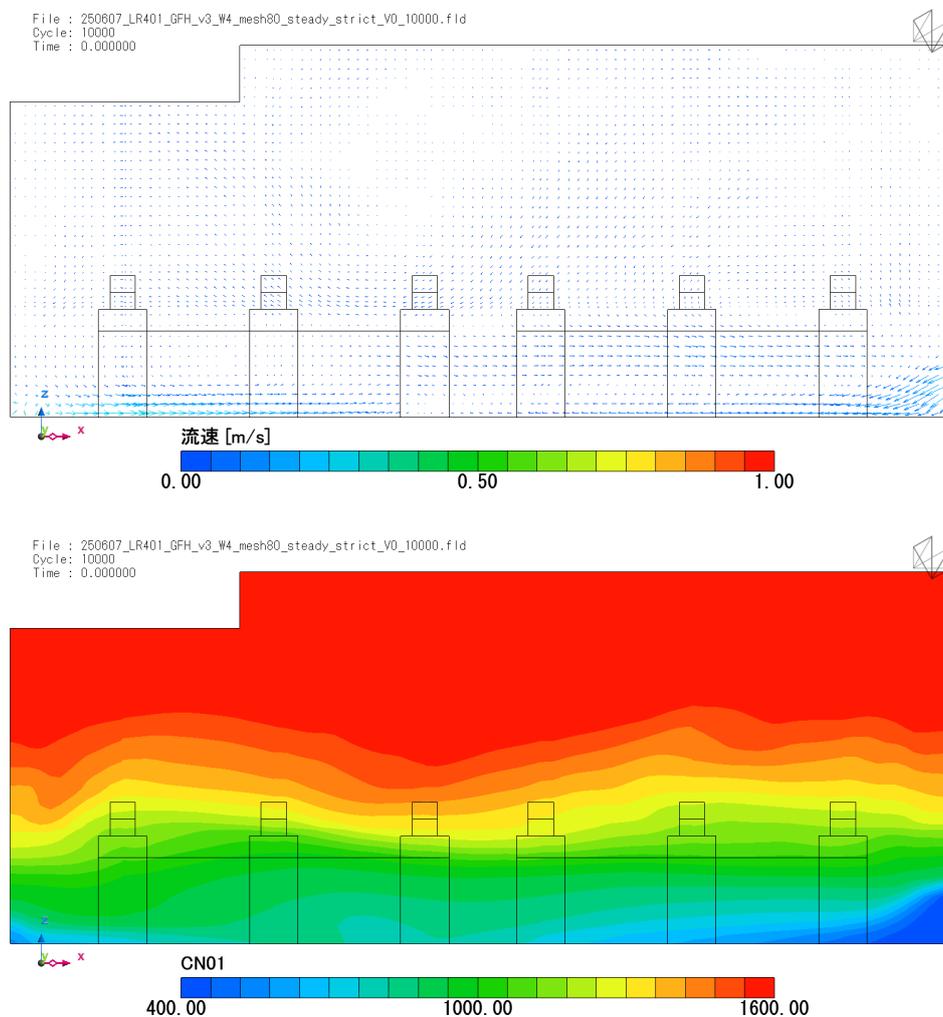


図10 部屋の短手方向の鉛直断面における気流分布と二酸化炭素濃度分布[ppm]（前ドアガラリ位置、窓開放の場合）

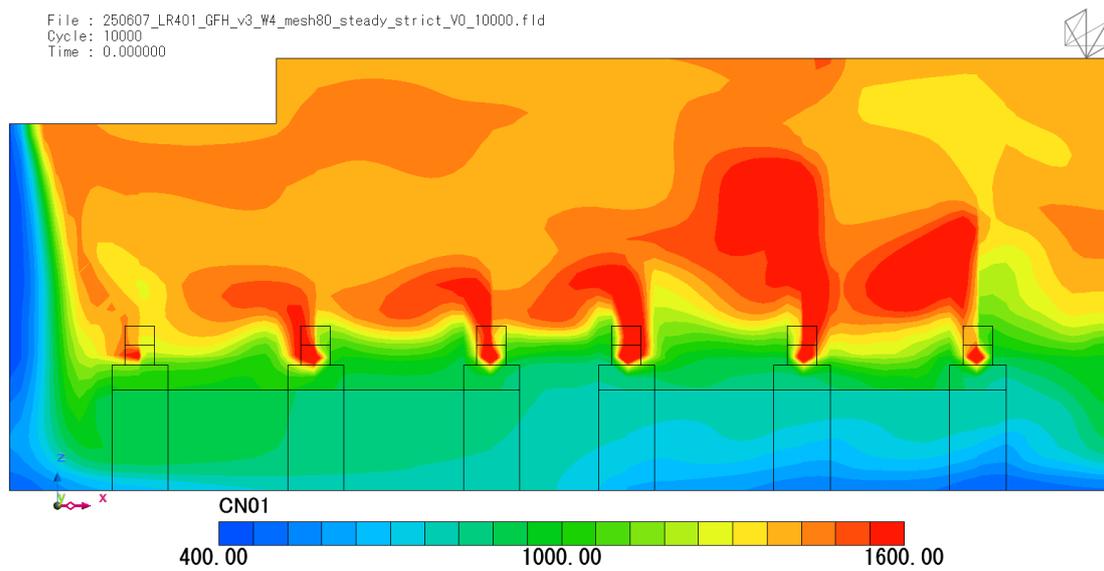
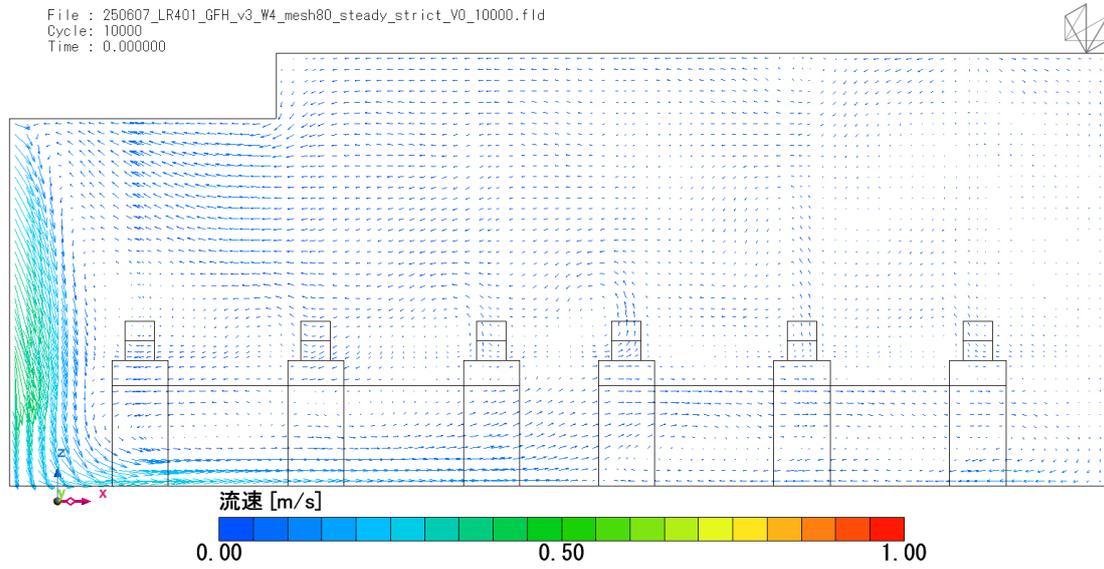
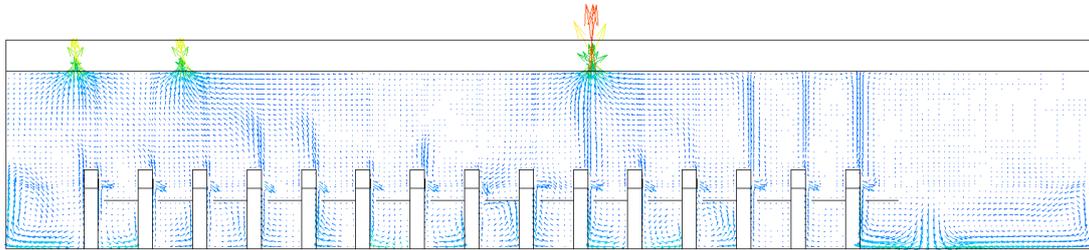


図 11 部屋の短手方向の鉛直断面における気流分布と二酸化炭素濃度分布[ppm] (教室後方・窓 1 の位置、窓開放の場合)

File : 250607_LR401_GFH_v3_W4_mesh80_steady_strict_V0_10000.fld
Cycle: 10000
Time : 0.000000



File : 250607_LR401_GFH_v3_W4_mesh80_steady_strict_V0_10000.fld
Cycle: 10000
Time : 0.000000

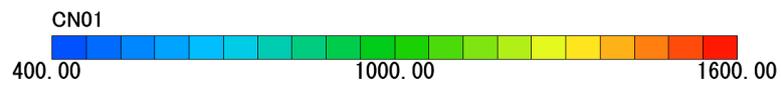
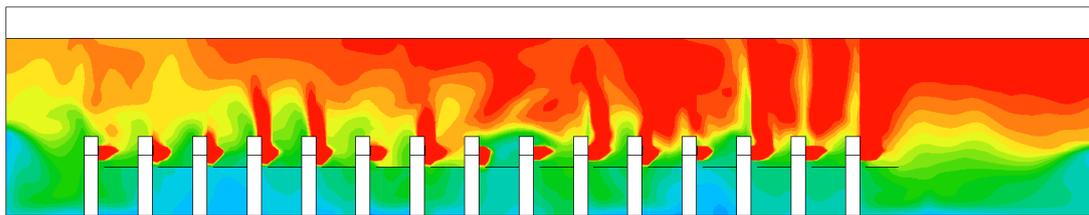
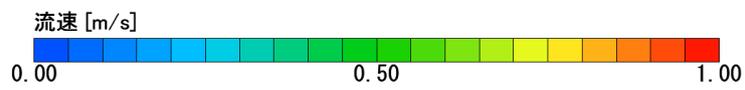
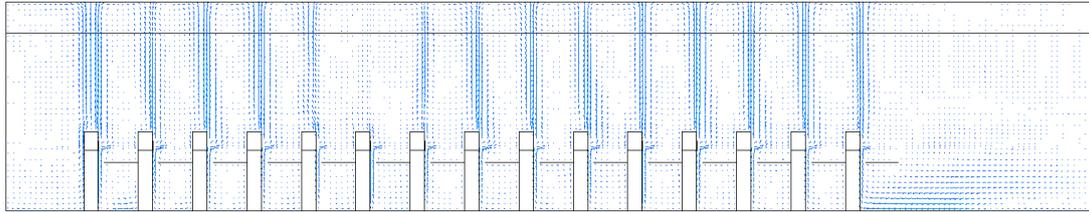


図 12 部屋の長手方向の鉛直断面における気流分布と二酸化炭素濃度分布[ppm] (西(窓)側座席列、窓開放の場合)

File : 250607_LR401_GFH_v3_W4_mesh80_steady_strict_V0_10000.fld
Cycle: 10000
Time : 0.000000



File : 250607_LR401_GFH_v3_W4_mesh80_steady_strict_V0_10000.fld
Cycle: 10000
Time : 0.000000

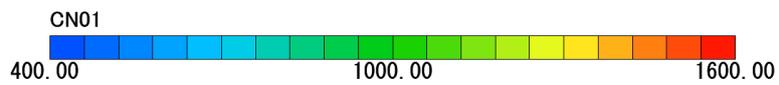
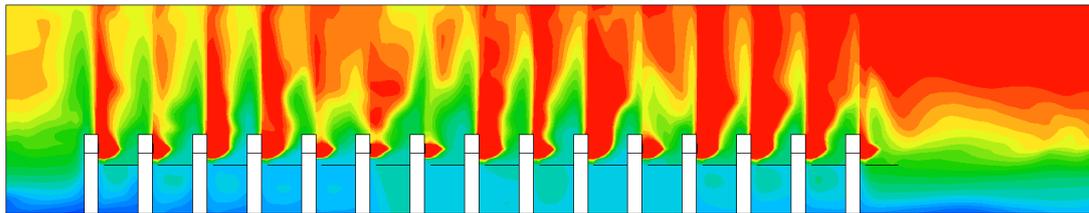
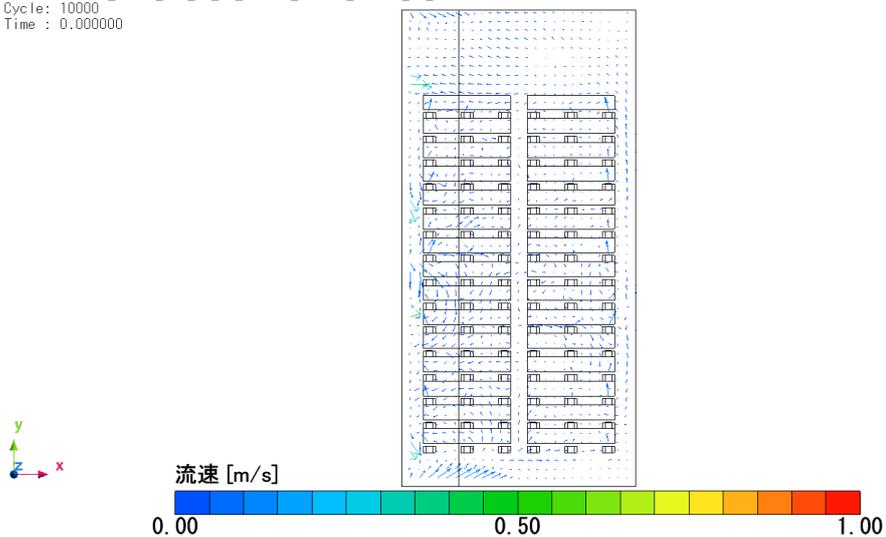


図 13 部屋の長手方向の鉛直断面における気流分布と温度分布および二酸化炭素濃度分布 [ppm] (東 (廊下) 側座席列、窓開放の場合)

File : 250607_LR401_GFH_v3_W4_mesh80_steady_strict_V0_10000.fld
Cycle: 10000
Time : 0.000000



File : 250607_LR401_GFH_v3_W4_mesh80_steady_strict_V0_10000.fld
Cycle: 10000
Time : 0.000000

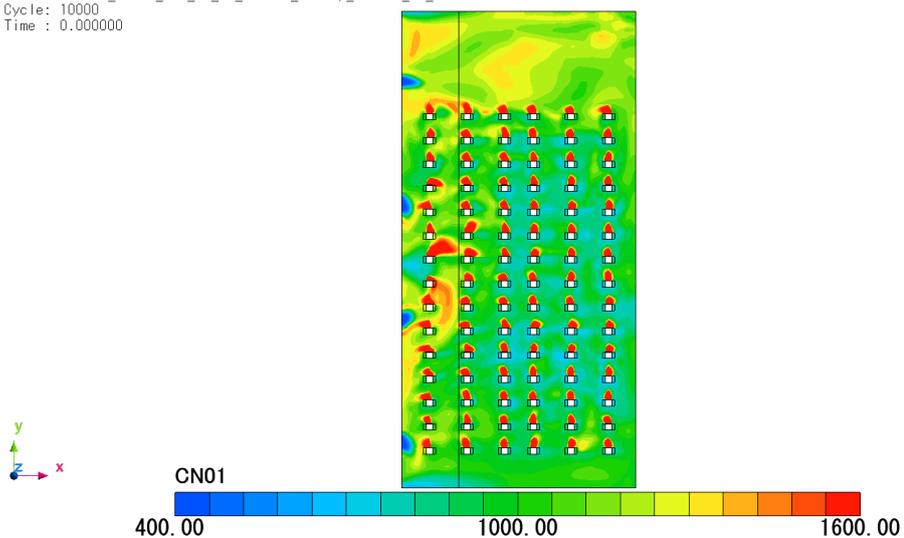


図 14 水平断面における気流分布と二酸化炭素濃度分布[ppm] (呼吸域、高さ 0.96m、窓開放の場合)

<窓開放の場合>

窓全面から外気が流入する結果となった（窓からの流出量はゼロ）。窓を開けたことで前後にあるドアのガラリからの空気流入量が減少し、西側壁周辺の呼吸域における折り返し気流の影響は見られなくなっている。代わりに窓面から在室者に向かう気流が生じているが、流入温度が室温より少し低いため、窓から流入してすぐに下部へ流れ、上昇気流をほとんど乱さない（図 11）。

窓を開けたことで、西側壁周辺の呼吸域における濃度が基準条件と比較して低い（図 8, 14）。外気を取り込む開口部を教室の長手方向にまんべんなく設けることによって、流入速度が低く、人体周辺の上昇気流の乱れが少なくなり、人体から発生した二酸化炭素が比較的高い濃度で換気扇付近に到達している。基準条件でみられたドアのガラリからの気流が対向する壁面で折り返す際の気流による空気の攪拌がほとんど無くなっている。

(3) 空調あり条件

基準条件を基本として、空調ありの場合を想定し、東側壁側の天井付近に4つの空調機（吹き出し温度23℃、風量：1200 m³/h、風向：水平面に対し45度下向き）を教室の長手方向に均等に配置した際の二酸化炭素濃度、気流分布を示す（図15）。

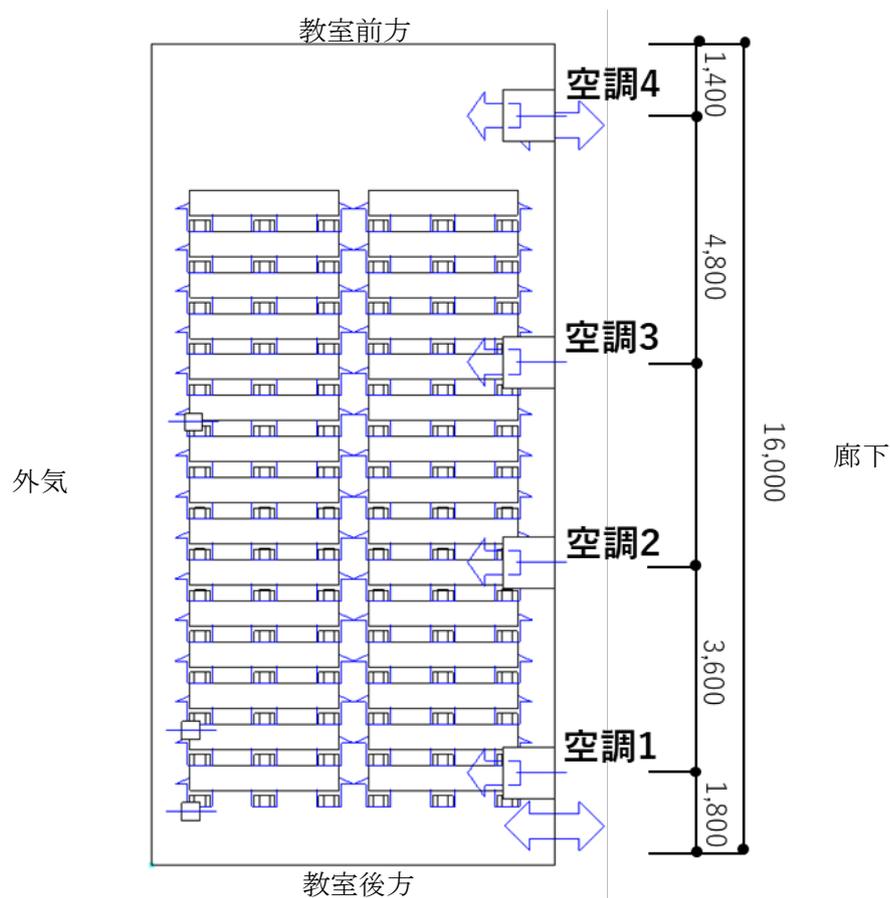


図15 空調機の設置位置（平面図、廊下側天井面近傍に4基設置、吹き出し口は空調機の外気側の鉛直断面にあり、吸い込み口は空調機の底面の一部にある。窓は閉じた状態。）

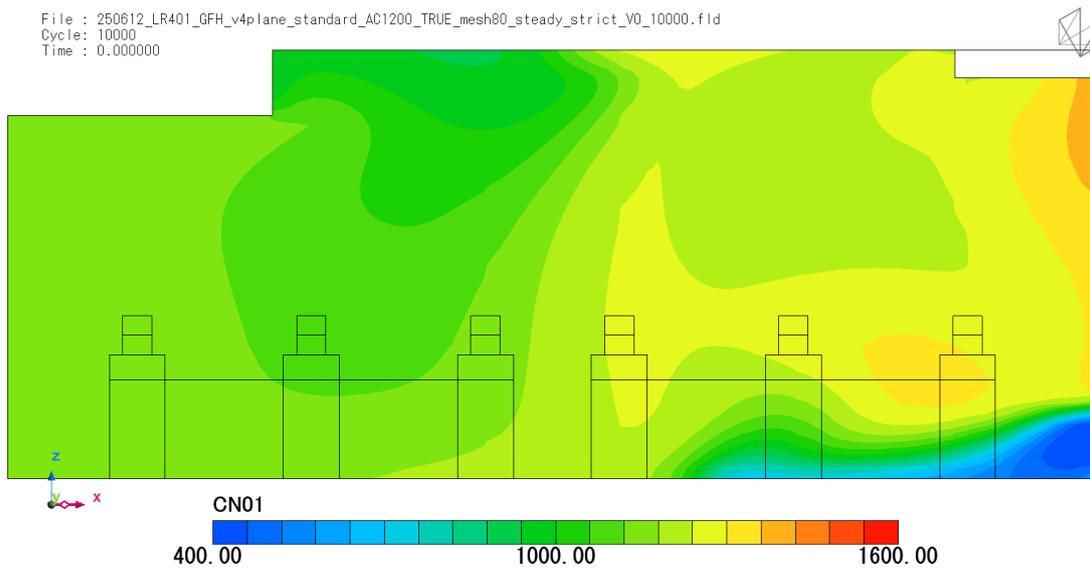
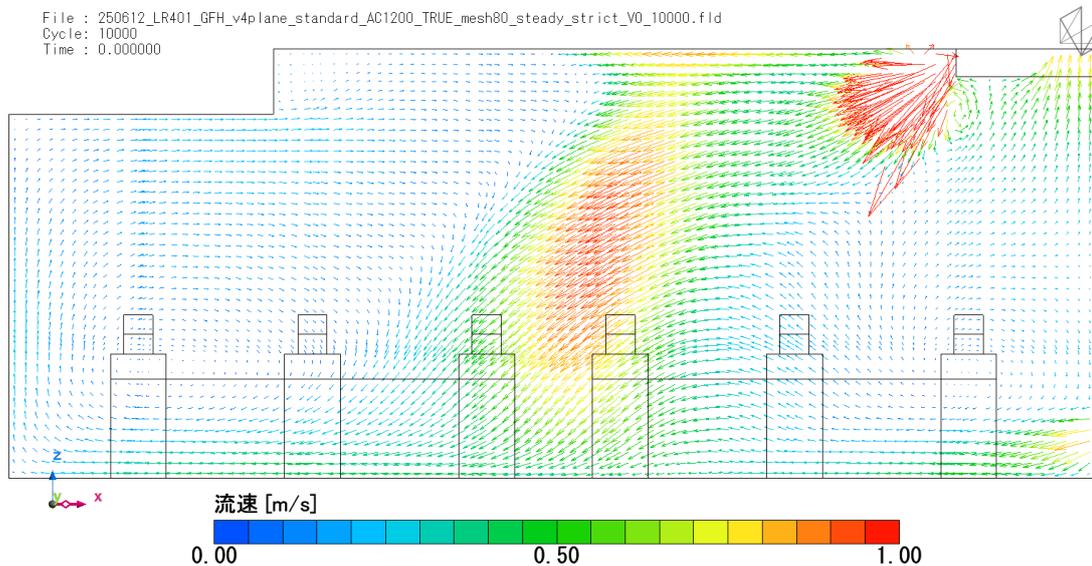
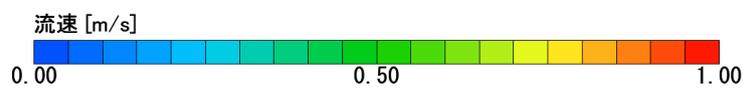
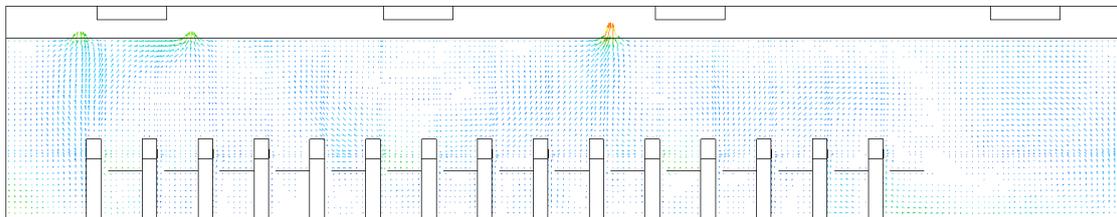


図 16 部屋の短手方向の鉛直断面における気流分布と二酸化炭素濃度分布[ppm] (前ドアガ
 ラリ位置、空調ありの条件)

File : 250612_LR401_GFH_v4plane_standard_AC1200_TRUE_mesh80_steady_strict_V0_10000.fld
Cycle: 10000
Time : 0.000000



File : 250612_LR401_GFH_v4plane_standard_AC1200_TRUE_mesh80_steady_strict_V0_10000.fld
Cycle: 10000
Time : 0.000000

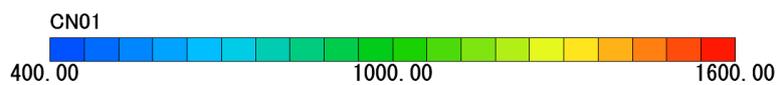
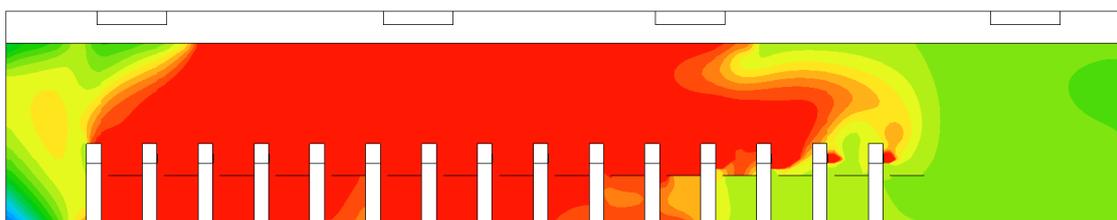
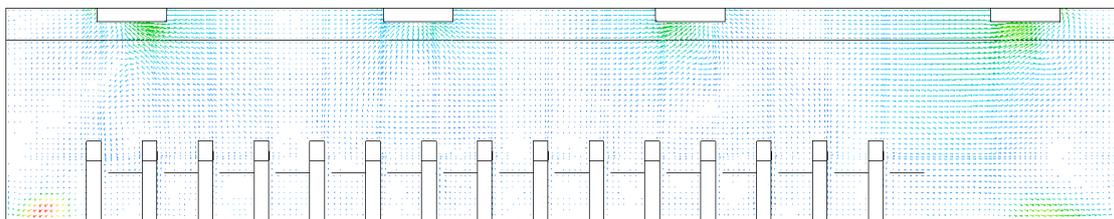


図 17 部屋の長手方向の鉛直断面における気流分布と二酸化炭素濃度分布[ppm] (西(窓)側座席列、空調ありの条件)

File : 250612_LR401_GFH_v4plane_standard_AC1200_TRUE_mesh80_steady_strict_V0_10000.fld
Cycle: 10000
Time : 0.000000



File : 250612_LR401_GFH_v4plane_standard_AC1200_TRUE_mesh80_steady_strict_V0_10000.fld
Cycle: 10000
Time : 0.000000

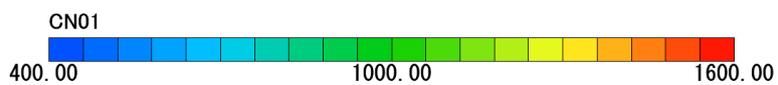
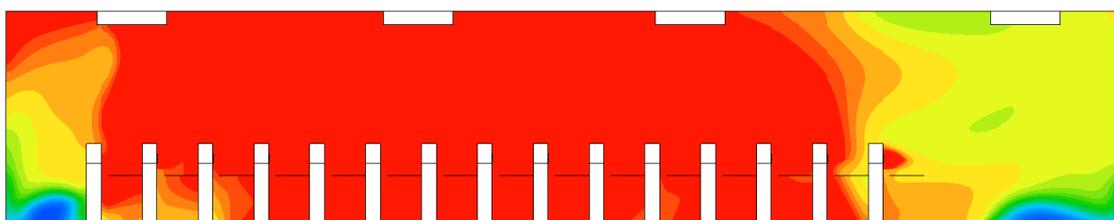
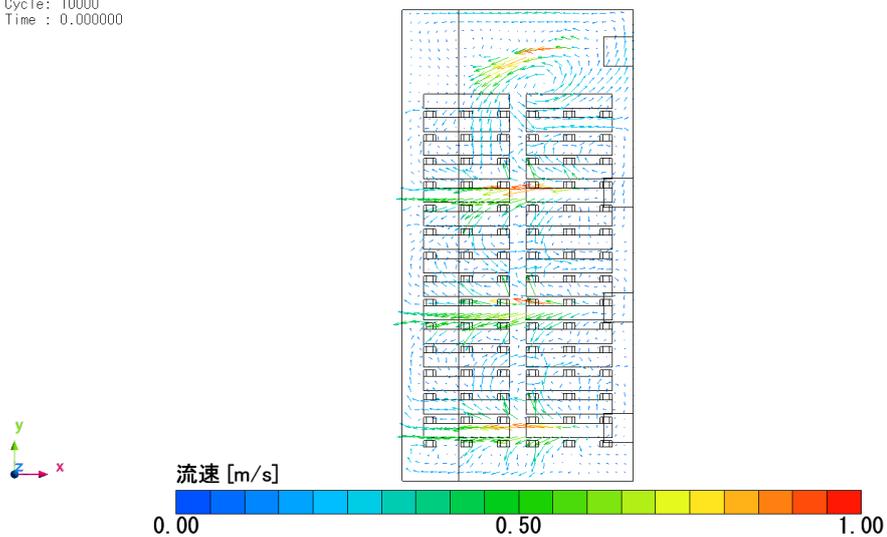


図 18 部屋の長手方向の鉛直断面における気流分布と二酸化炭素濃度分布[ppm] (東(廊下)側座席列、空調ありの条件)

File : 250612_LR401_GFH_v4plane_standard_AC1200_TRUE_mesh80_steady_strict_V0_10000.fld
Cycle: 10000
Time : 0.000000



File : 250612_LR401_GFH_v4plane_standard_AC1200_TRUE_mesh80_steady_strict_V0_10000.fld
Cycle: 10000
Time : 0.000000

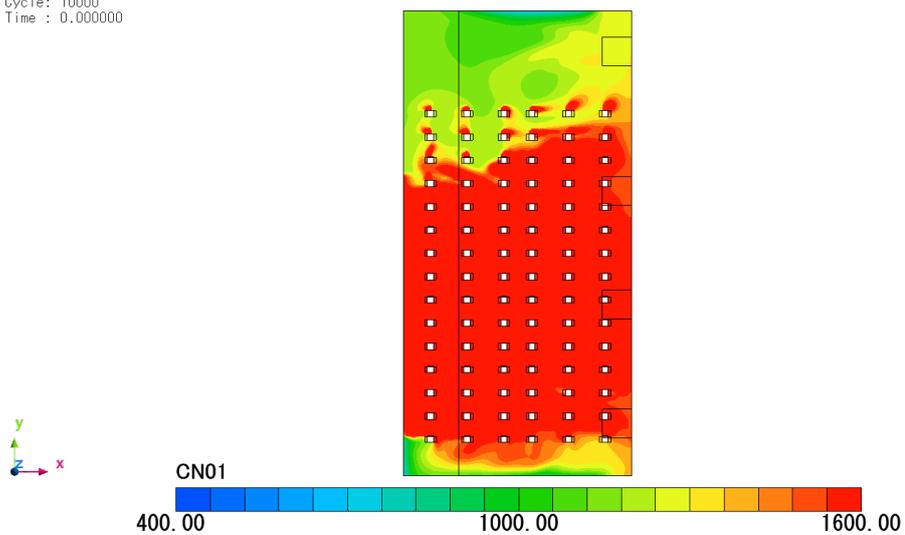


図 19 水平断面における気流分布と二酸化炭素濃度分布[ppm] (呼吸域、高さ 0.96m、空調ありの条件)

<空調ありの条件>

前後のドアのガラリからの空気流入、天井換気扇への吸い込みという流れは、基準条件と同様にあるものの、気流分布としては、空調の吹き出しによる影響が支配的となる。空調機の正面では東から西（廊下側から外気側）に向けて吹き下ろす強い気流が生じ、教室全体において平面・高さ方向共に空気が攪拌されている。特に、最前列の座席から前の空間（教壇のあたり）は、その側面上にある空調機からの吹き出し風の影響で、気流速度が大きくなり、攪拌されている（基準条件では教壇あたりの風速が小さかった）。

空調の吹き出し気流が天井付近から床付近まで広い範囲で空気を攪拌し、汚染空気を広げるため、二酸化炭素濃度は教室の大部分で1600～2000ppmと非常に高い。空調機による攪拌の影響で、基準条件において濃度の高かった教室前方の呼吸域における二酸化炭素濃度が比較的低くなる。

(4) 換気扇を均等に配置した条件

換気扇が教室の南北方向に均等に分布している場合を想定し、基準条件の換気扇を東西方向の位置はそのまま、南北方向に概ね均等に配置した場合の、二酸化炭素濃度と気流の分布を示す。換気扇の配置を図 20 に示す (3 か所にある換気扇の位置は、1 列目の机前方上部、6 列目の座席上部、13 列目の座席上部に位置している)。

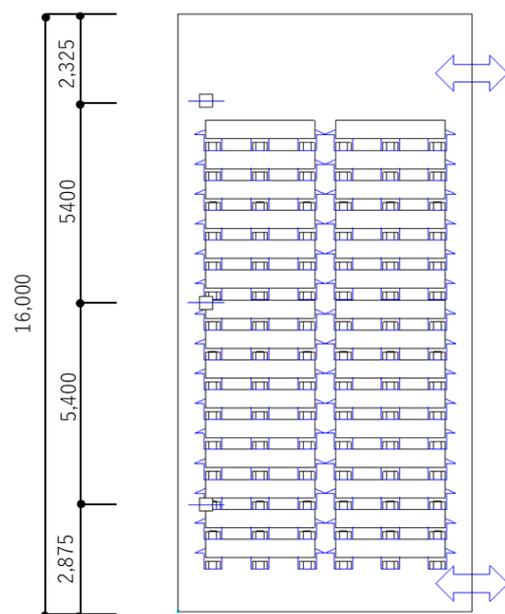


図 20 換気扇の位置 (基準条件では、真ん中あたりに 1 つ、後ろに 2 つ配置していたが、この条件では、後ろの 1 つを前に移動させた。)

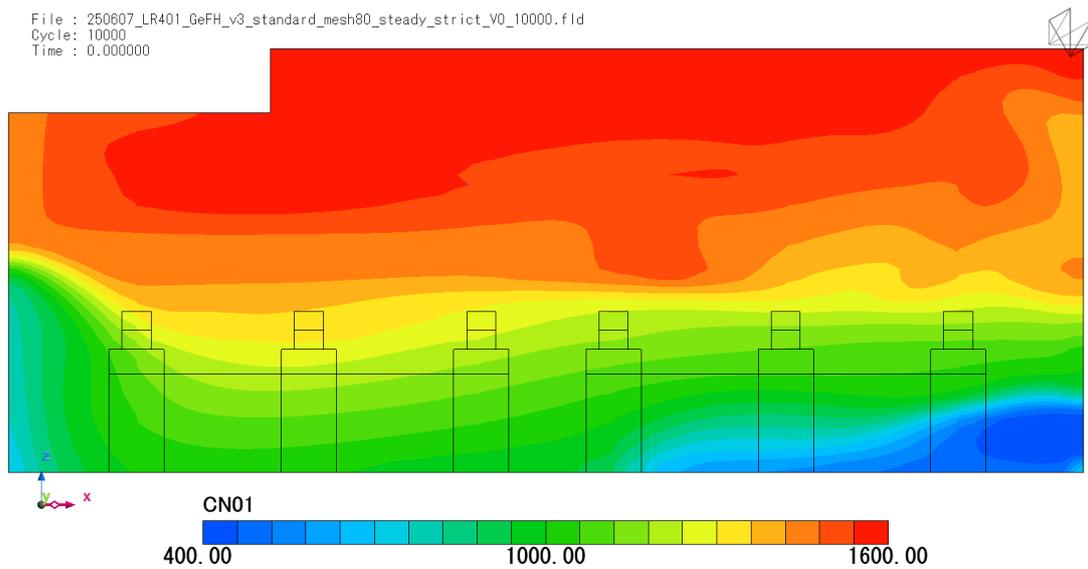
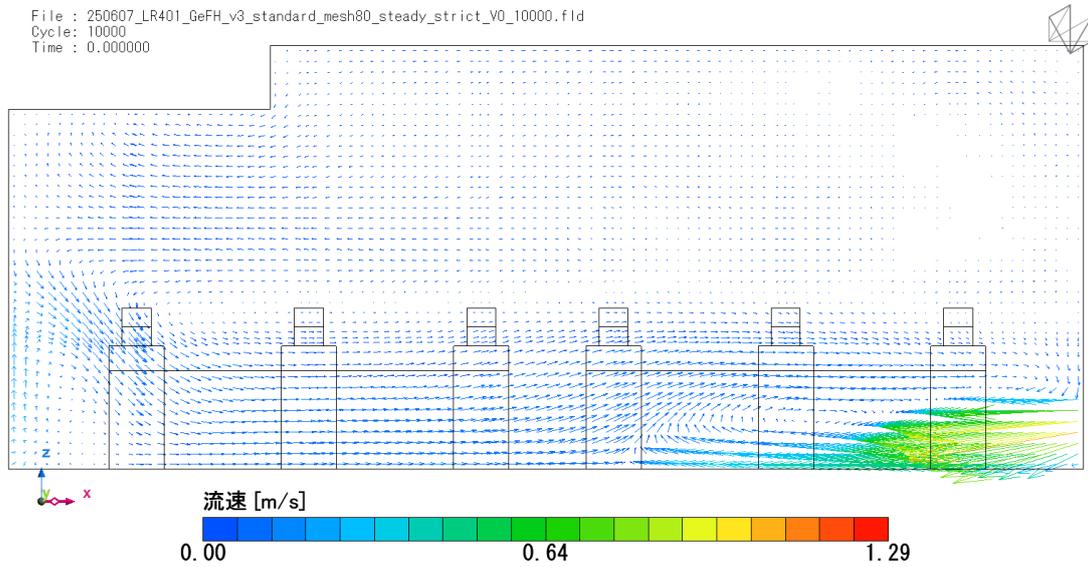
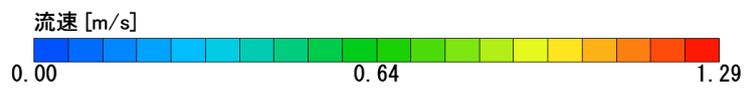
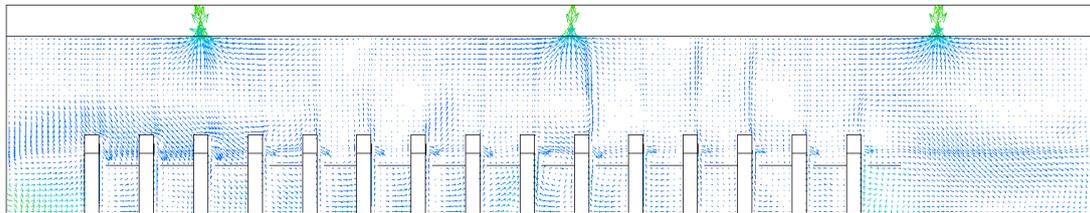


図 21 部屋の短手方向の鉛直断面における気流分布と二酸化炭素濃度分布[ppm] (前ドアガ
 ラリ位置、換気扇を均等に配置した場合)

File : 250607_LR401_GeFH_v3_standard_mesh80_steady_strict_V0_10000.fld
Cycle: 10000
Time : 0.000000



File : 250607_LR401_GeFH_v3_standard_mesh80_steady_strict_V0_10000.fld
Cycle: 10000
Time : 0.000000

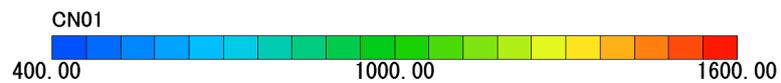
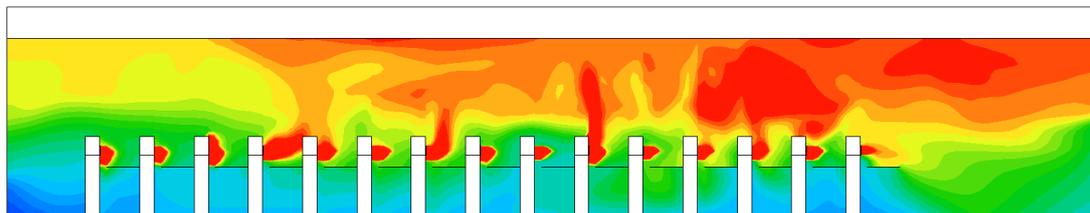
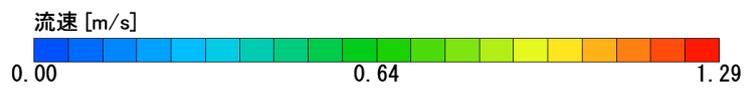
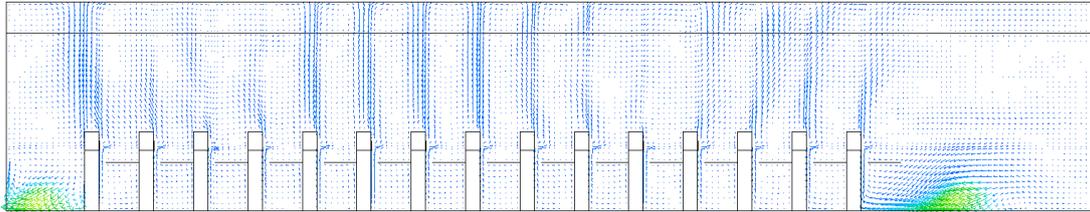


図 22 部屋の長手方向の鉛直断面における気流分布と二酸化炭素濃度分布[ppm] (西(窓)側座席列、換気扇を均等に配置した場合)

File : 250607_LR401_GeFH_v3_standard_mesh80_steady_strict_V0_10000.fld
Cycle: 10000
Time : 0.000000



File : 250607_LR401_GeFH_v3_standard_mesh80_steady_strict_V0_10000.fld
Cycle: 10000
Time : 0.000000

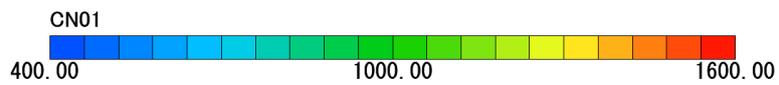
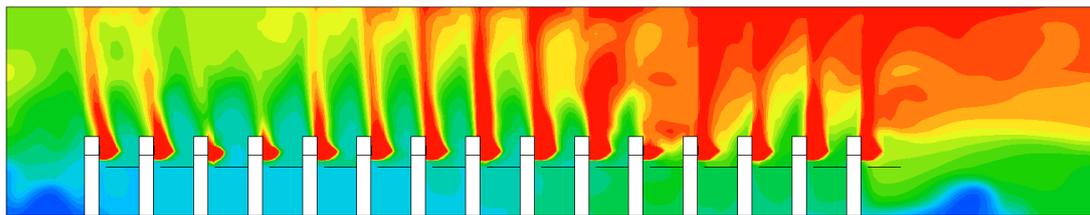
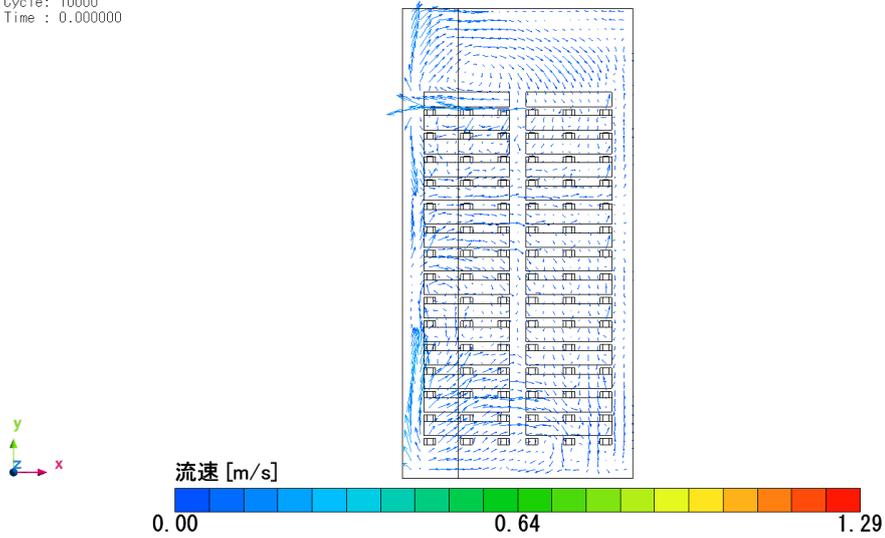


図 23 部屋の長手方向の鉛直断面における気流分布と二酸化炭素濃度分布[ppm] (東(廊下)側座席列、換気扇を均等に配置した場合)

File : 250607_LR401_GeFH_v3_standard_mesh80_steady_strict_V0_10000.fld
Cycle: 10000
Time : 0.000000



File : 250607_LR401_GeFH_v3_standard_mesh80_steady_strict_V0_10000.fld
Cycle: 10000
Time : 0.000000

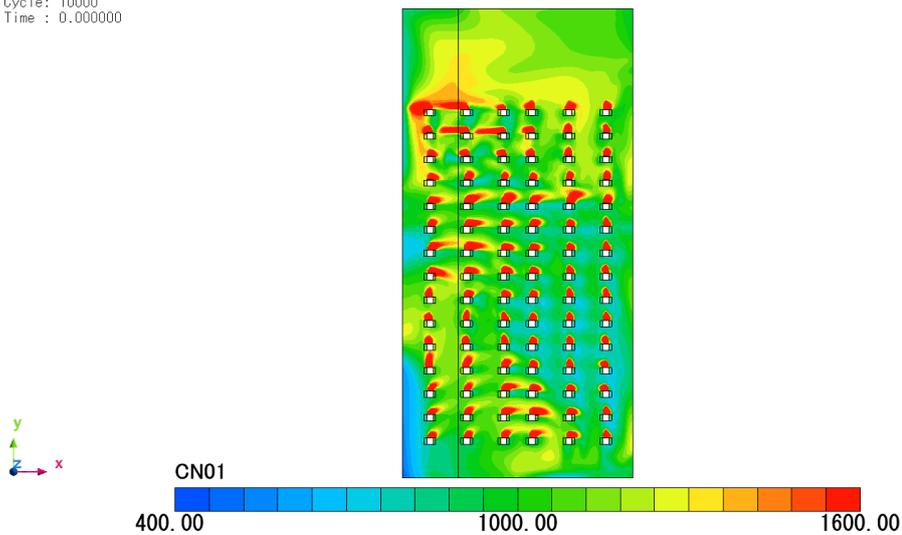


図 24 水平断面における気流分布と二酸化炭素濃度分布[ppm]（呼吸域、高さ 0.96m、換気扇を均等に配置した場合）

<換気扇を均等に配置した場合>

換気扇を南北方向に均等に設けたことにより、教室前方の天井付近で生じていた滞留が解消されている。呼吸域での気流性状は基準条件とほとんど同じである。

基準条件と比較して、部屋全体で二酸化炭素濃度が低下しており、教室西側の特に前方における二酸化炭素濃度が低下している。

(5) 平均値による評価

CFD 解析で求められた室内平均濃度と、完全混合を仮定した場合の室内平均濃度を比較する。

完全混合を仮定した場合、室内の二酸化炭素の収支式は式(1)となり、定常状態において二酸化炭素濃度は式(2)のようになる。

$$\frac{dC}{dt} = Q\{C_o(t) - C_i(t)\} + M \quad (1)$$

$$C_i = C_o + \frac{M}{Q} \quad (2)$$

ただし、 $C_i(t)$ は室内の平均二酸化炭素濃度 $[\text{m}^3/\text{m}^3]$ 、 $C_o(t)$ は外気の二酸化炭素濃度 $[\text{m}^3/\text{m}^3]$ 、 Q は換気量 $[\text{m}^3/\text{h}]$ 、 M は室内の二酸化炭素発生量 $[\text{m}^3/\text{h}]$ 、 t は時間 $[\text{h}]$ である。

対象の講義室を想定し、 $C_o(t)$ を 400ppm、 M を 0.4506 m^3/h (90 人分の二酸化炭素発生量を想定)、 Q を 1500 m^3/h (強制換気量) と与えると、 $C_i(t)$ は 1471ppm となる。これは、完全混合を仮定した場合の、室内二酸化炭素濃度の平均値ということになる。

次に、計算を行った 4 条件について、室全体、居住域、呼吸域の 3 領域における二酸化炭素濃度の平均値 (CFD による計算値) を図 25 に示す。

空調を想定した条件のみが、完全混合を仮定した計算値を上回った(1528ppm)。その他の空調無し条件では、完全混合の計算値を下回った。ドアの下部のガラリから新鮮空気を導入し、天井面での換気扇で回収する場合 (基準条件) は 1304ppm であった。ドア下部のガラリから室内に流入する空気は、座位の人の口から発生する二酸化炭素濃度の高い空気が人体発熱による上昇気流を直接乱すことなく、床近傍を伝って、ドアに対面する壁 (西壁) まで到達することが主な要因と考えられる。ただし、ドアガラリからの空気は西壁に当たった後、人体近傍の上昇気流と混合するため、その影響は含まれた形となっている。窓開け条件の場合、1204ppm と室平均濃度はさらに低くなる。窓から流入する外気の温度が室温より低い設定であるため、人体近傍の上昇気流を乱す度合いはさらに低くなるためである。3 つある換気扇を前後に均等に配置した条件では、これら 2 条件よりもさらに室内平均濃度が低くなった (1194ppm)。室前方での滞留が解消されたこと (図 8, 14) によって、室平均二酸化炭素濃度が低下した。なお、呼吸域に注目すると 窓開け条件(1011ppm)の方が、均等換気条件(1028ppm)と比較し、平均二酸化炭素濃度がわずかに低かった。

室平均温度について図 26 に示す。23°Cの空気の吹き出し口が存在した空調条件を除き、(1)基準条件、(2)窓開け条件、(4)均等換気条件の間にほとんど違いが見られなかった。

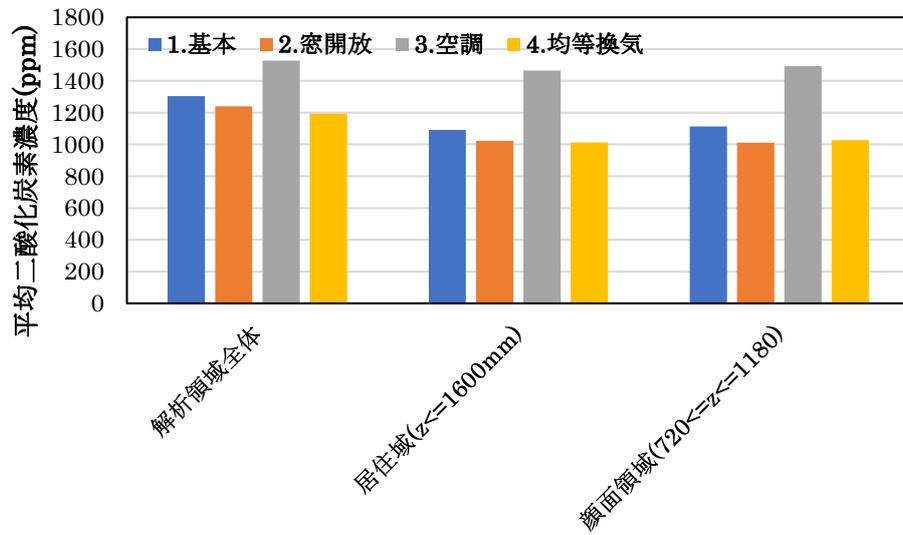


図 25 各領域における平均二酸化炭素濃度

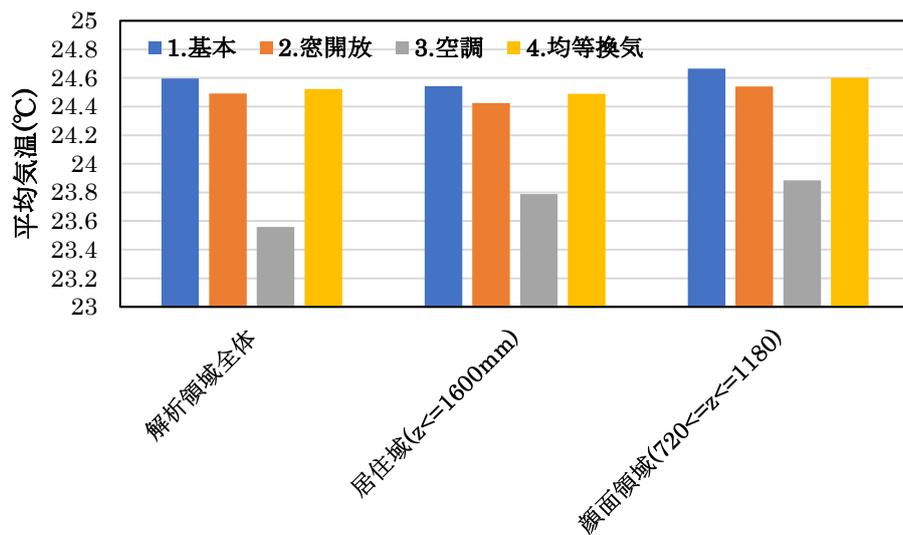


図 26 各領域における平均気温

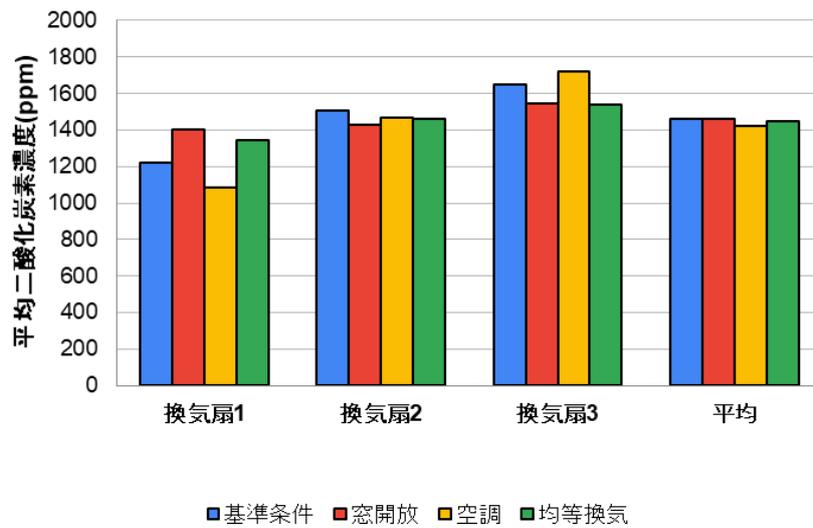


図 27 各換気扇における排気のコ二酸化炭素濃度 [ppm]

表 1 各開口における空気の流れ流量 (単位 [m³/h], 正の値は室内への流入を示す)

	(1)基準条件	(2)窓開け条件	(3)空調条件	(4)換気扇均等配置条件
後方ガラリ	759	118	821	739
前方ガラリ	701	123	639	720
口(90名)	41	41	41	41
窓1上		230		
窓2上		234		
窓3上		228		
窓4上		266		
窓1下		63		
窓2下		64		
窓3下		62		
窓4下		73		
AC1吸い込み口			-1200	
AC2吸い込み口			-1200	
AC3吸い込み口			-1200	
AC4吸い込み口			-1200	
AC1吹き出し口			1200	
AC2吹き出し口			1200	
AC3吹き出し口			1200	
AC4吹き出し口			1200	
合計	1500	1500	1500	1500

3.3 まとめ

在室者の呼気から発生する二酸化炭素は、人体の発熱による人体周りの上昇気流に乗って室の上方へと移動し、天井面にある排気扇により室外へと放出される。給気や空調からの吹き出しによりこの流れが乱されない場合、比較的効率よく換気がなされる。対象とした講義室の場合、前後に一か所ずつあるドアの下部ガラリからの給気であり、基本的に、呼気の上昇流を大きく乱すことは無いが、ドアのガラリから室内に入った気流が対向する壁に当たった後の流れが、呼気の上昇流を多少巻き込む形となる。特に、前方の教壇付近で呼気の巻き込み流が滞留する傾向にあり、空調無しの場合では、教壇付近および最前列付近の二酸化炭素濃度が高い。一方、教室全体で見ると、換気扇が西側に集中していることから教室の東側の在室者から発生した二酸化炭素は西側へ移動する。一方、東側のドアのガラリから進入し西側の壁に当たって拡散する気流の影響で、西側の人体周り上昇流が乱される傾向にある。これらより教室の西側での二酸化炭素濃度は全般に東側より高い。これらの傾向は、教室西側の窓を開放した場合も変わらないが、給気面積が大きい場合を想定すると、給気の流れが遅くなり、人体周りの上昇流が乱されにくくなり、換気効率が上がる。天井の換気扇の配置を前後に均等にした場合も、同様に、換気効率が上がる。一方、空調機からの吹き出し風を考慮した場合、この影響が支配的となり、全般に二酸化炭素が攪拌され、一様に近づく。このため、換気効率は、空調運転無しの場合より低くなる。

4. 講義室の二酸化炭素濃度分布の実測結果

4.1 方法

講義中の大学の教室（128m²、天井高 3.1m、第 3 種換気、廊下側より給気、廊下と反対側に窓）を対象とし、滞在者 90 名の場合を想定して二酸化炭素濃度分布を測定した（エスペック THC02）。測定位置は図 28、および表 2 の通りとした。

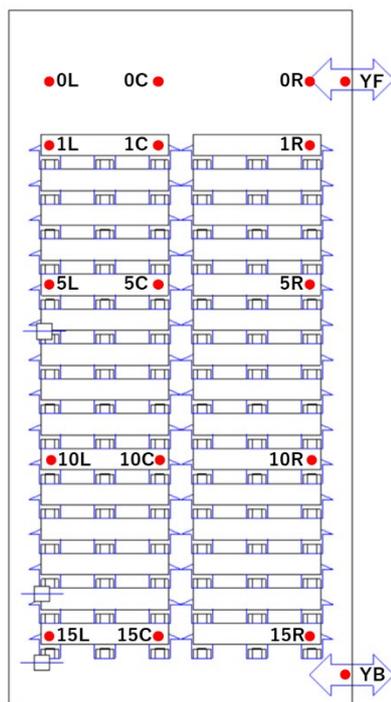


図 28 測定点の位置

表2 測定点の座標（教室南西端の床面上の点を原点とし、X軸を教室の短手方向（西から東へ）、Y軸を長手方向（南から北へ）、Z軸を鉛直上向きとする）

	測定位置名称	位置コード	座標 X[mm]	座標 Y[mm]	座標 Z[mm]
1	前ドアガラリ室内側（北側）	YF	7800	887.5	310
2	後ドアガラリ室内側（南側）	YB	7800	14362.5	310
3	教室前部左	0L	6890	14400	650
4	教室前部中	0C	3430	14400	860
5	教室前部右	0R	930	14400	750
6	1列目座席左	1L	6890	12910	720
7	1列目座席中	1C	3430	12910	720
8	1列目座席右	1R	930	12910	720
9	5列目座席左	5L	6890	9710	720
10	5列目座席中	5C	3430	9710	720
11	5列目座席右	5R	930	9710	720
12	10列目座席左	10L	6890	5710	720
13	10列目座席中	10C	3430	5710	720
14	10列目座席右	10R	930	5710	720
15	15列目座席左	15L	6890	1710	720
16	15列目座席中	15C	3430	1710	720
17	15列目座席右	15R	930	1710	720



図29 ガラリへのCO2ロガー設置の様子

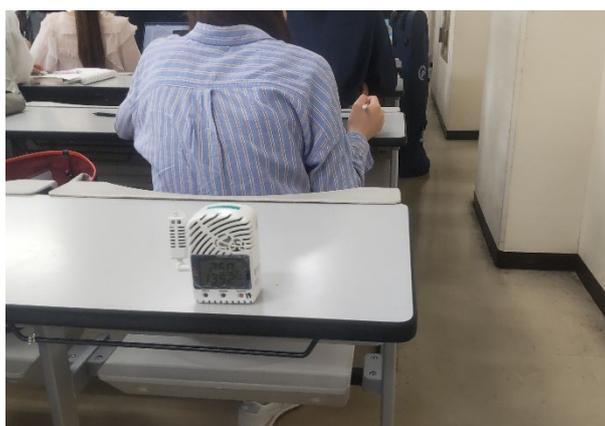


図 30 机面上への CO2 ロガー設置の様子

4.2 測定結果

実測は、講義中に行った。外気温は 22.7℃、58%RH、天候は晴れであった。150 人収容可能な教室であったが、受講者数は 87 名であった。5 人掛けの机が東西に 2 列、南北に 15 列あるが、実測時には、5 人掛けの机に 3 人ずつ座るよう教示した。指定した座席がほぼ埋まる程度であった。室内には、学生の他、教員 1 名と測定者 3 名が滞在した。

各測定点における二酸化炭素濃度の時間変化を図 30、各条件終了前 5 分間の平均値を図 31 に、また風速を図 32 に示す。

① 基準条件

二酸化炭素濃度については、条件内における濃度の変化がほとんど見られなかった(図 31)のに対し、測定点の位置による濃度の差は、約 400ppm と大きかった。二酸化炭素濃度が最大となった測定点は、右側(廊下側)列の教室前方、またガラルの前方上方にあたる点(0R)であり、最小となったのは、左側(窓側)列の後方 10 列目の点であった。前後(南北)の位置が等しい測定点を比較すると、二酸化炭素濃度は左側(窓側) < 中央 < 右側(廊下側)となった。左側測定点と右側測定点における値の差は教室後方の 10 列目で最も大きく、1 列目で最も小さかった。左右(東西)の位置が等しい測定点における二酸化炭素濃度を比較すると、各列 0, 1, 5 列目を含む教室前方の測定点で、10, 15 列目を含む教室後方の測定点よりも高い傾向が見られたが、右側(廊下側)の列では、10 列目における二酸化炭素が、教室前方と同程度となった。

室内の風速は全般に 0.1m/s 以下と小さかった。

② 窓開け空調 OFF

条件開始から終了まで、二酸化炭素濃度はガラルを除くすべての測定点で急速に減少し続けた。減少幅は、教室左側(窓側)で大きくなったため、条件変更後も測定点の位置と二酸化炭素濃度の大小関係は、基準条件から概ね変わらなかった。

風速は 15R を除くすべての測定点で基準条件よりも速くなり特に、座席最前列窓際の 1L で最大となった。

③ 窓開け空調 ON

条件開始後、右側（廊下側）の列では前条件から継続して二酸化炭素濃度が低下する一方、中央列・左側（窓側）列の多くの測定点で、二酸化炭素濃度が上昇したことで、条件開始後 10 分が経過し、濃度が安定した際には、教室内の位置による濃度差がほとんどみられなくなった。

空調の吹き出し気流により、基準条件や窓開け条件において、風速が小さく教室右側（廊下側）に滞留していた汚染空気が窓側へと移動したことで、教室全体で空気の混合が進み、位置によらず一様な二酸化炭素濃度が得られたと考えられる。

空調からの吹き出し気流により、他の位置と比較して中央列において風速が大きくなった。

④ 窓閉め空調 ON

条件開始から終了まで、二酸化炭素濃度は緩やかに上昇を続ける。③窓開け空調 ON にて教室内の濃度が一樣になったのに対し、本条件では、前後（南北）方向について 5, 10 列目を含む中央付近で濃度が高くなった。

風速に着目すると空調運転時に 5、10 列目の座席において風速が大きくなる傾向が見られており、空調の吹き出し気流が強く呼気の攪拌が進んだ場所ほど二酸化炭素濃度が上昇したと考えられる。

ドアのガラリにおける風速は、窓を開けた条件では、窓を閉めた 2 条件よりも風速が低く、二酸化炭素濃度は大きく変動しながら増加した。これは窓からの空気流入により、ガラリからの空気流入量が減少したことを示している。測定点付近に教室内の二酸化炭素濃度の高い空気の滞留が多く発生したためと考えられる。前方ガラリ・後方ガラリにおける二酸化炭素濃度は、③窓開け空調 ON 条件を除く 3 条件で、前方ガラリが後方ガラリをやや上回る傾向がみられた。

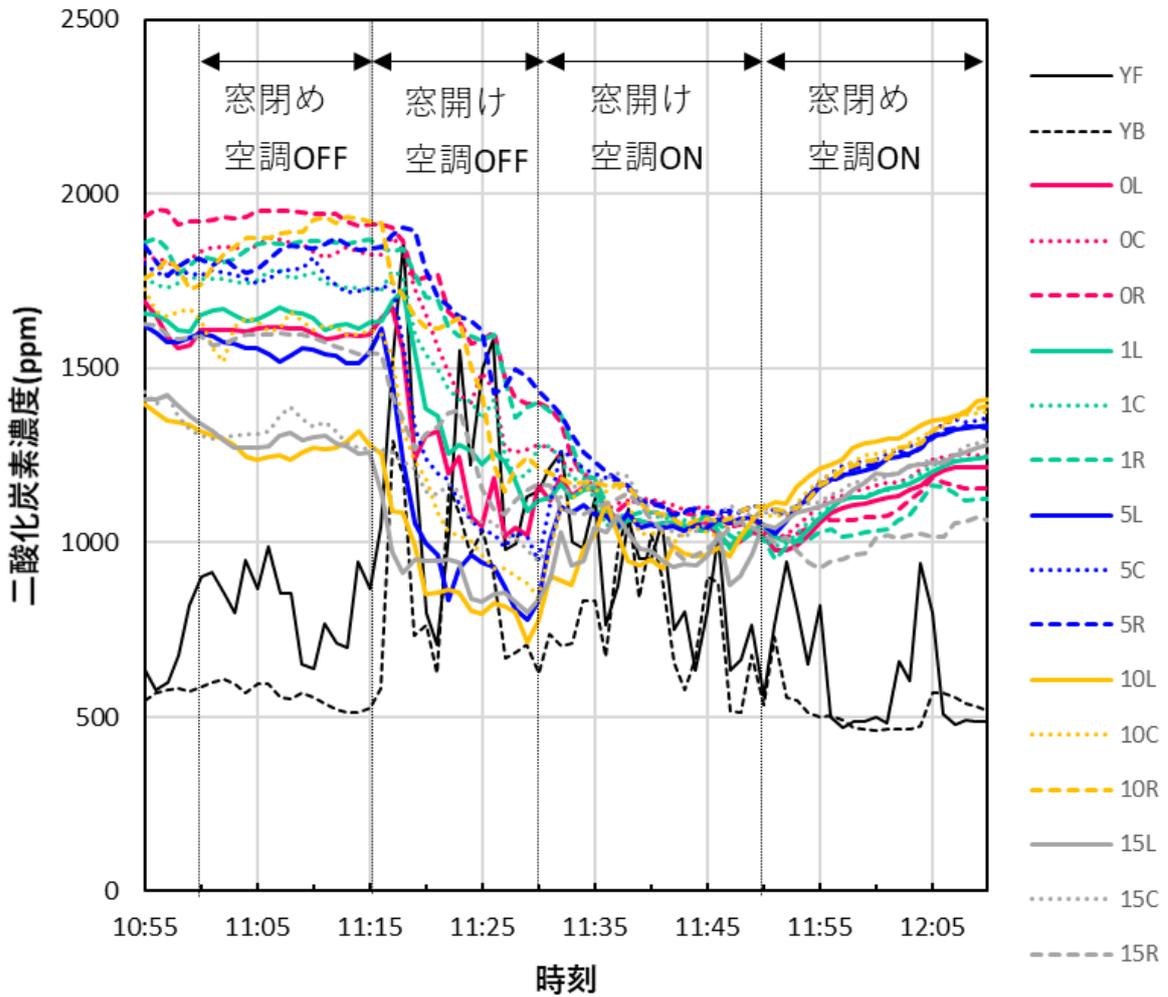


図 31 各測定点における二酸化炭素濃度の変化

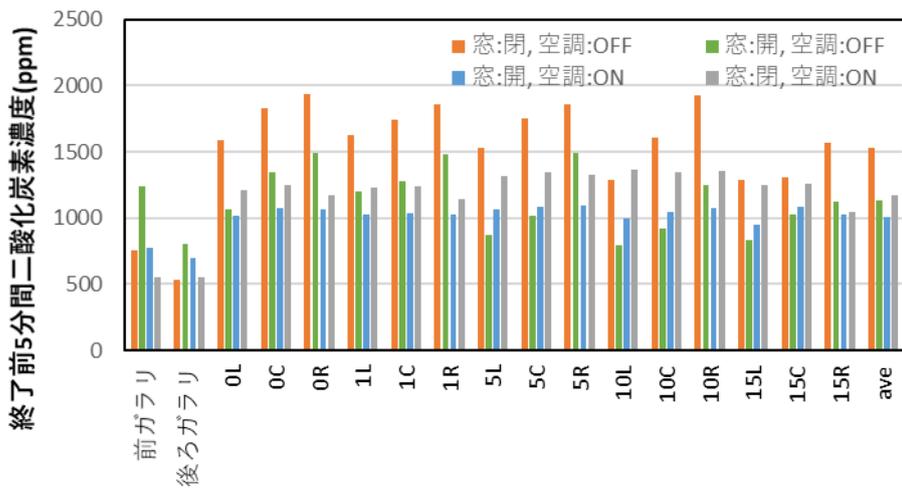


図 32 各測定点における条件終了前 5 分間の平均二酸化炭素濃度

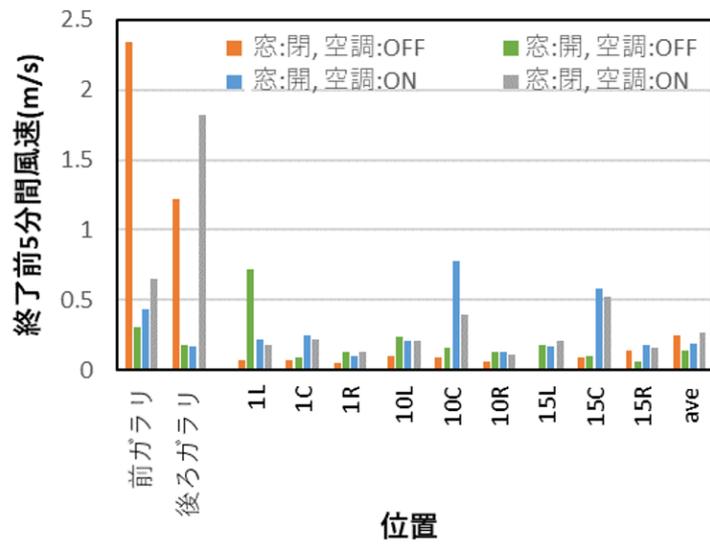


図 33 各測定点における風速 (0L, 0C, 0R, 5L, 5C, 5R は欠測)

5. まとめ

講義中の大学の教室（128m²、天井高 3.1m、第 3 種換気、廊下側より給気、廊下と反対側に窓）を対象とし、滞在者 90 名の場合を想定して二酸化炭素濃度分布を計算した。給気がドア下部のガラリで、換気扇による排気が教室後方窓際の天井面という条件であった。窓を閉め切った場合と窓を開放する場合（複数の開放パターンを想定）とで、換気効率の変化を数量的に示し、呼吸域での二酸化炭素濃度分布を示した。

空調機が OFF の場合、人体発熱の影響により、上昇気流が形成され、呼吸により発生する汚染空気は、上方へと移動し、天井面に設置された排気ファンにより除去される。2 か所のドアの下部ガラリから給気する場合、窓面から給気する場合ともに、給気された気流が、呼吸の上昇流を大きく乱すことなく流れるため、給気された空気と汚染空気の混合が比較的少ないことが、換気効率を高くしている。ただし、前方のドアの下部から給気された空気が対向する壁に当たった後に形成する循環流の影響で、教室前方の教壇付近の二酸化炭素濃度が高くなることが示された。この傾向は、天井の排気換気扇を前方にも配置することや給気をより面積の広く取ることで緩和される。

一方、空調機を想定した上部からの吹き出しを伴う条件では、呼気から出る二酸化炭素が攪拌され、床付近から天井までの領域でほぼ一様な濃度分布が形成され、空調による吹き出しを想定しない条件と比べると換気効率は下がる。

これらの傾向は現場実測でも概ね再現された。