

高濃度短期曝露時の経気道曝露リスク低減に向けた 新たな換気・空気質制御法の提案と性能評価

一宮, 駿
九州大学総合理工学府環境エネルギー工学専攻

<https://hdl.handle.net/2324/4372227>

出版情報：九州大学, 2020, 修士, 修士
バージョン：
権利関係：

令和2年度

修士論文

高濃度短期曝露時の経気道曝露リスク低減に向けた
新たな換気・空気質制御法の提案と性能評価

九州大学大学院総合理工学府

環境エネルギー工学専攻

熱環境システム研究室

一宮 駿

指導教員 伊藤 一秀

提出年月日 令和3年2月8日

目次

第1章 序論.....	3
第2章 方法.....	5
2.1 解析モデル.....	5
2.2 CSP の設定.....	6
2.3 液体化学物質からの気相放出.....	7
2.4 置換換気(DV)システム.....	7
2.5 ハイブリッド緊急換気システム(EVS).....	8
2.6 光触媒モデル.....	9
2.7 照度分布.....	10
2.8 CFD の品質管理.....	13
第3章 結果・考察.....	14
3.1 流れ場解析結果.....	14
3.2 濃度場解析結果.....	15
3.3 CSPトルエン吸入濃度.....	17
3.4 室内トルエン体積平均濃度.....	18
3.5 PCO におけるトルエン分解量 Flux 分布.....	19
第4章 結論.....	22
参考文献.....	23

第1章 序論

屋外および屋内の大気汚染は急性下気道感染症,慢性閉塞性肺疾患,肺がん,虚血性心疾患,および脳卒中などの原因となる危険因子である¹⁻¹⁾.屋内で90%以上の時間を過ごす現代では,汚染物質の濃度は屋外よりも屋内で数倍から数百倍高くなる.そのため,室内空気による汚染物質への曝露は人間の90%を占めるといわれており,室内空気質と健康は深く関係していると考えられている¹⁻²⁾.特に化学物質を扱う産業現場では高濃度の汚染物質が生成される可能性が高く,労働者の健康を損なう危険性が高い.そのため工場室内での空気質の制御は,労働者の健康を維持し,生産性を高めるために重要である.

置換換気(DV)方式は,人が活動する床付近の換気を効率よく行う換気方式である.置換換気方式では床面から給気し,室内に温度成層を形成し,汚染物質を上昇気流に乗せて搬送することで床付近に発生した汚染物質を天井面の排気口から排出する換気方法である.置換換気方式は作業域のみを換気対象領域とし,特に天井が高い建築物では室容積に占める作業域の割合が小さく省エネルギー化が期待できる¹⁻³⁾.しかし,置換換気システムはオフィスなどでの適応例が多く,工場空間での適応例は少ない.

また,現代の持続可能社会への関心の高まりから,いかに住宅の管理コストを抑えつつ快適な空間を維持するかが重要視されてきており,室内空気中の汚染物質の希釈に対しても,自然エネルギーを使用し建築物の管理コストを減らすパッシブコントロールと呼ばれる手法が取り入れられている¹⁻⁴⁾.例えば,光触媒建材は可視光型の光触媒を建材に担持させることにより,光触媒反応による空気清浄作用を狙った機能性建材であり,光を受けた光触媒は揮発性有機化合物などの汚染物質を水と二酸化炭素に分解する反応を起こす.近年では蛍光灯などの紫外光よりも低いエネルギーで有機化合物を分解する可視光応答型光触媒の研究が行われており,光触媒建材を室内に設置することで,エネルギーコストを抑えて空気質を改善することが可能である.¹⁻⁵⁾

しかしながら,化学物質の漏洩や粉塵発生が予想される工場では汚染物質濃度が急激に上昇する可能性があり,緊急時にはこれらの空気質制御法のみでは不十分である.置換換気方式では,換気率を上げると空気質は改善されるがエネルギー消費が大きいことが問題点である¹⁻⁶⁾.また,光触媒建材のようなパッシブコントロールは効果が環境に依存するため,エネルギー消費は抑えられるが緊急時の空気質制御としては十分な性能ではない.

そこで,汚染物質の発生位置を事前に特定可能な空間においては,一般に置換換気や全体換気の他,発生汚染物質の拡散を抑制し効率的な汚染物質排出を目的とする局所排気システムの併用が一般的である.汚染物質の発生位置が特定可能な室内空間に設置される局所排気システムとしては,厨房等を対象としたフード型の局所排気システム,工場に設置されるプッシュプル型の局所排気システムが代表例である¹⁻⁷⁾.しかし,汚染物質の発生源が事前に予測できない場合でのプッシュプル型局所排気システムの使用事例はなく,全体換気や置換換気で換気を行った場合,換気率増加によるエネルギー消費量は莫大である.

そこで本研究では,緊急時の換気における省エネルギー化を期待して,汚染物質の発生源を事前に予測不能である工場内空間を対象に,置換換気方式とプッシュプル型の局所排気システム併用したハイブリッド緊急換気システム(EVS)を提案する.

局所排気システムを導入する際には,置換換気のパフォーマンスおよび,置換換気システムに局所排気システムを併用したハイブリッドEVSのパフォーマンスを設計段階で定量的に評価することが不可欠である.また,パッシブコントロールによる空気質制御とEVSを併用する場合には,それぞれの換気システム下でのパッシブコントロールのパフォーマンス評価を行い,換気システムの出力へ反映させる必要がある.そこで,数値流体力学(CFD)は,比較的lowコストで計算速度が速く,その定量的および視覚的な結果により,複雑な流れ場や汚染物質の分布を評価する方法として適切である.また,ハイブリッドEVSを設計する場合,実際の測定は倫理的な問題により制約を受ける可能性が

あるが、CFD ではそのような制約を受けずに換気システムの最適化のための計算が可能である。

この様な背景のもと本研究では、化学物質の漏洩源が事前に予測できない工場室内を対象に、これまでの工場の換気方式として適応例の少ない置換換気方式の適応可能性を検討したうえで、緊急時の補助的な換気方法として、置換換気とプッシュプル型の局所排気を併用した新しい換気方式として EVS を提案する。さらにパッシブ制御として光触媒建材を EVS に適応した空気質制御法を提案する。また、CFD により解析を行い、DV、EVS および光触媒を適応したそれぞれのケースでの結果を比較することで、緊急時の空気質制御法としての EVS および光触媒建材の性能を明らかにする。

特に本研究では、対象とする化学物質としてトルエンに着目し、室内全体の濃度場および平均濃度を求めるとともに、コンピューターシミュレーション人物(CSP)を工場モデルに統合し、CSP 鼻孔から吸入されるトルエン濃度を比較することで、換気システムおよび光触媒建材の濃度低減性能の評価を行う。

第2章 方法

2.1 解析モデル

今回使用した工場の解析モデルのレイアウトを Fig.1 に示す.工場は $31.0\text{m}^{(x)} \times 9.0\text{m}^{(y)} \times 4.0\text{m}^{(z)}$ の長方形であり,室内空間はドアを備えた壁により部屋 1(R1)と部屋 2(R2)に分割されている.ドアは通路として開放された状態で設置された.工場内の形状の複雑さを再現するために作業台の形状が決定され,R1 には 6 つの均一に分散された作業台を設置し,R2 には部屋中央に複雑な形状の作業台を1つ設置した.また CSP を R1 のドア付近に設置した.

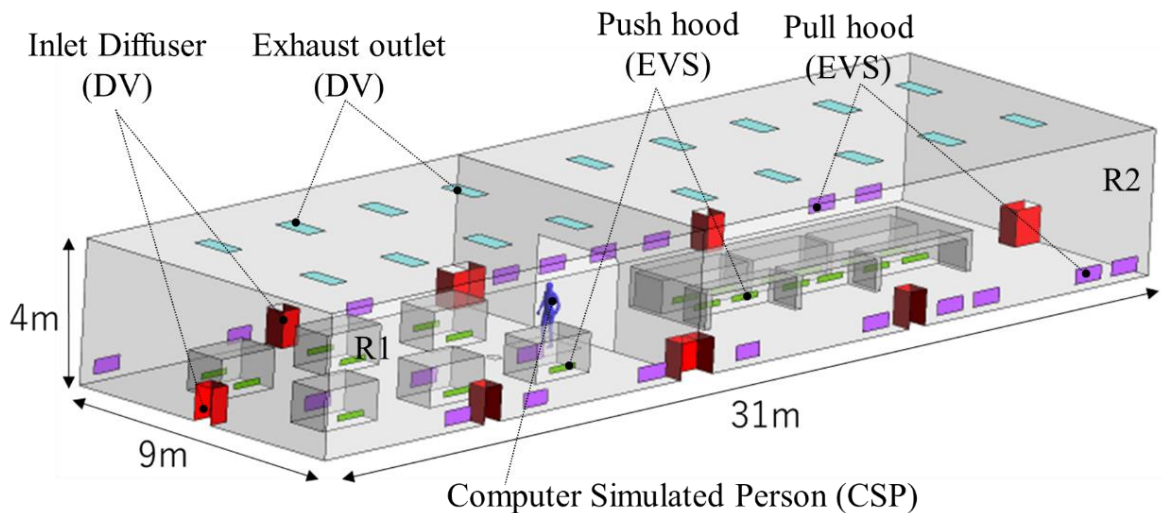


Fig.1 Layout of industrial workshop

CSP および作業台の表面に 3 層のプリズムを作成した.さらに,床・壁面・天井の近傍において壁座標 $y^+ < 1$ の領域に 1 メッシュ以上を確保するよう調整し,6 層のプリズムを作成した.また,室内空気は六面体コアを備えた多面体メッシュを使用して離散化を行った.

漏洩源の位置に対する EVS の性能を評価するために 2 つのケースを作成し,それぞれ別の位置に漏洩源を設定し Case1, Case2 とした. Case1 では,漏洩源を CSP の 2m 前方の床面に設定し,漏洩源 A とした. Case1 のメッシュ分割(x-z 平面)を Fig.2-1 に示し,漏洩源の位置を Fig.3-1, Fig.4-1 に示す. Case2 では,漏洩源を CSP から離れた R1 の床面に設定し,漏洩源 B とした. Case2 のメッシュ分割(x-z 平面)を Fig.2-2 に示し,漏洩源の位置を Fig.3-2, Fig.4-2 に示す.

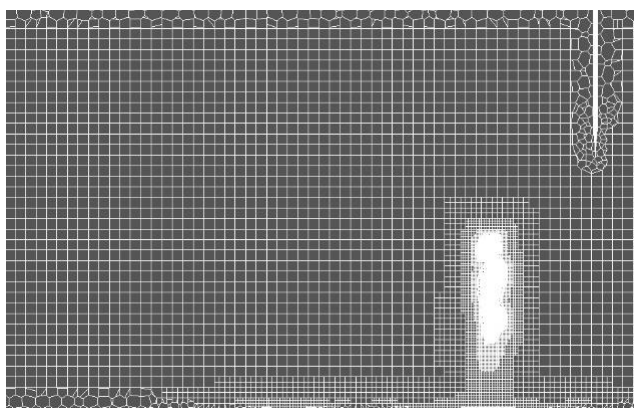


Fig2-1 Grid design of Case1(x-z plane)

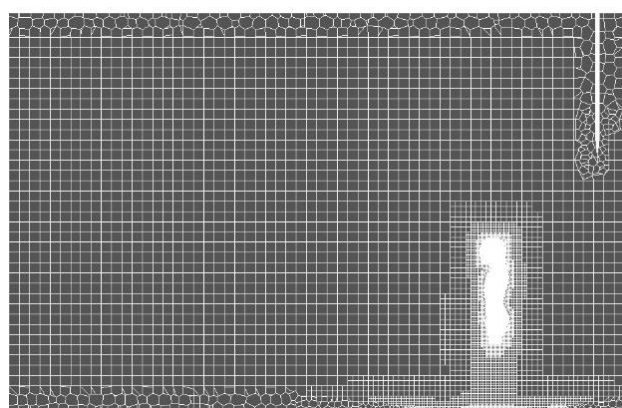


Fig2-2 Grid design of Case2(x-z plane)

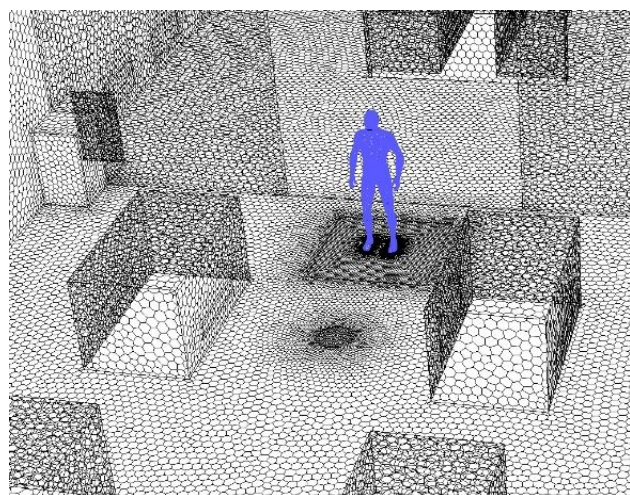


Fig.3-1 Around the Leakage source A

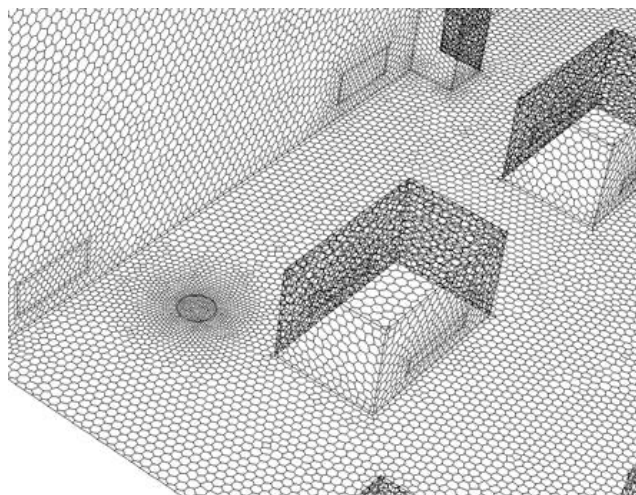


Fig.3-2 Around the Leakage source B

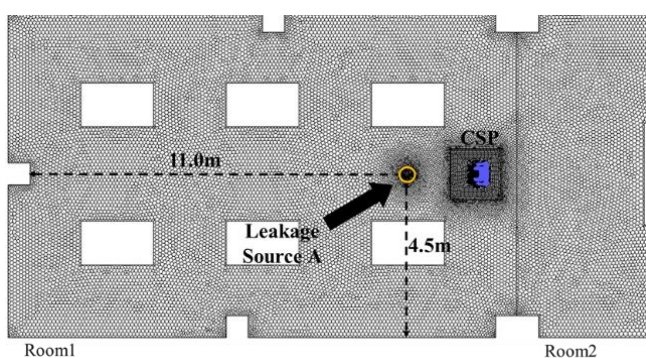


Fig.4-1 position of leakage source A(Case1)

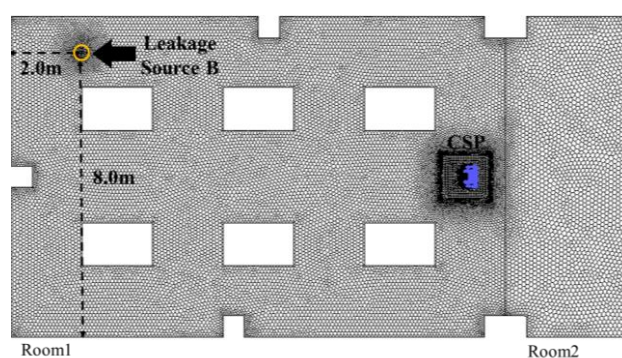


Fig.4-2 position of leakage source B(Case2)

2.2 CSP の設定

工場モデルに設置したコンピューターシミュレートされた人物(CSP)は,成人男性の体型をもとに開発されたモデルを使用した²⁻¹⁾.CSP の拡大図を Fig.5 に示す.この CSP には,45,000 の表面要素があり,表面積は 1.716m²,高さは 1.736m である.

本研究では左右の鼻孔を吸い込みの境界条件とした.CSP の呼吸数は標準的な安静状態に従っ

て、 1.25×10^{-4} [m³/s]で一定に設定した。皮膚表面温度は、単純な温度条件を維持するために 34[°C]で一定に設定した。

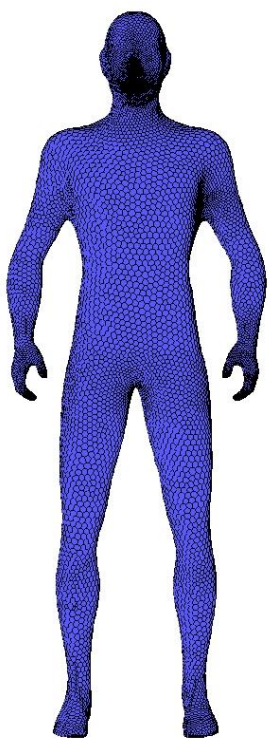


Fig.5-1 CSP model

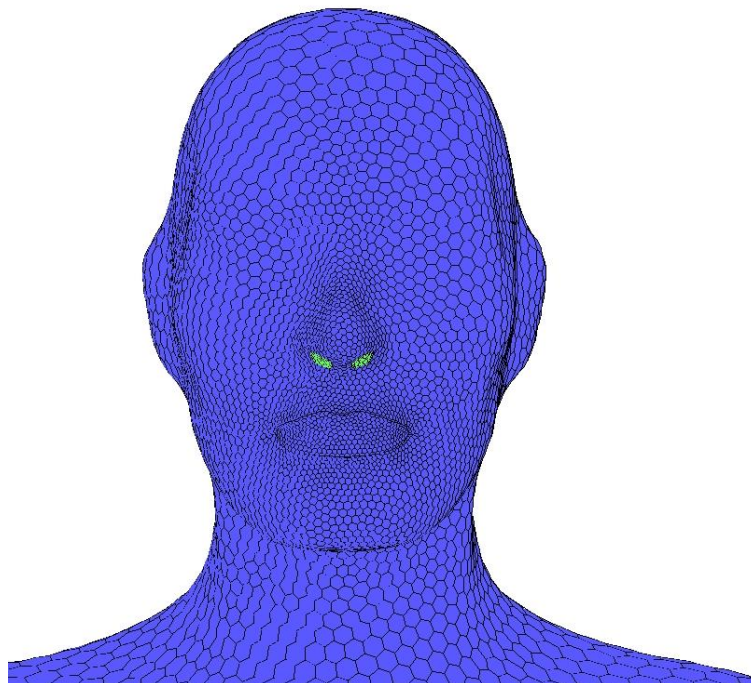


Fig.5-2 Enlarged view of the CSP face

2.3 液体化学物質からの気相放出

本研究の対象物質はトルエンである。液体トルエンが誤って床に漏洩し、気相トルエンが漏洩場所の液面から蒸発・放出されたと仮定した。漏洩を想定した面は液体の内部を解析から除外し、ディリクレ型の境界条件として設定した。気液平衡理論に基づいた飽和気相濃度は、気体の状態方程式、式(1)より導出される。

$$C_s = \frac{mP}{RT} \quad (1)$$

ここで C_s は飽和気相濃度[kg/m³]、 m はモル質量[kg/mol]、 P は 25[°C]での分圧[Pa]、 R は気体定数 8.31×10^3 [Pa·m³ /k.mol]であり、 T は絶対温度である。絶対温度 T は 25[°C]で固定した。

溶液から放出された気相トルエンは、空間のある点におけるトルエン濃度を C とすると、スカラー輸送方程式式(2)により拡散される。

$$\frac{\partial \bar{C}}{\partial t} + \frac{\partial \bar{U}_j \bar{C}}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\left(D + \frac{v_t}{\sigma_t} \right) \frac{\partial \bar{C}}{\partial x_j} \right) + S \quad (2)$$

式(2)はアンサンブル平均された方程式系であり、オーバーバー(¯)はアンサンブル平均値を、 D はトルエンの分子拡散係数[m²/s]、 U_j は風速[m/s]を、 v_t は渦動粘性係数[m²/s]、 σ_t は乱流シュミット数[-]、 S はソース項[kg/m³/s]を示す。ここで、トルエンの分子拡散係数 D は 7.71×10^{-6} [m²/s]である。

漏洩源を 2 か所設定し、それぞれ Case1 と Case2 とした。

2.4 置換換気(DV)システム

DV システムの性能を分析するために、工場モデルの壁面に接する位置に 10 個のディフューザーを設置し、漏洩源 A の場合を Case1-1、漏洩源 B の場合を Case2-1 として解析ケースに追加した。

ディフューザーの寸法は横 0.6m×奥行き 0.6m×高さ 1.0m の長方形である。ディフューザーの設置場所を Fig.1 に赤色で示す。また、寸法 1.2m×0.6m の排気口を天井に 2m ごとの等間隔で 18 個追加した。排気口の設置場所を Fig.1 に水色で示す。

一般的な産業規制に従い、換気回数 25[回/h]を想定し、流入速度を 0.5 [m/s] (ディフューザーの1つの面につき換気量 0.3[m³/s]) に設定した。また、排気口は圧力境界として設定した。DV システム下での工場全体の換気率は 8.11 [m³/s]である。DV システムの数値解析に使用される数値条件と境界条件を Table1 に示す。

Table1 Numerical and boundary conditions of Case 1-1 and Case 2-1.

Component	Condition
Turbulence Model	SST k- ω Model (steady)
Algorithm	Coupled (pressure-based coupled solver)
Scheme	Convection term: 2nd Order Upwind
Inflow Boundary	ACH = 25; Vdiff = 0.5 m/s; TI = 10%; l = (1/7)hdiff; Tin = 26.85° C; Cin = 0 (Gas-phase Toluene)
Outflow Boundary	Pressure outlet
Contaminant	Toluene, Csurf = 0.2135 kg/m ³ (liquid temperature condition: 25° C)
Wall Boundary	Velocity: No Slip, Temperature and Toluene: Gradient zero

2.5 ハイブリッド緊急換気システム(EVS)

DV システムとプッシュプル型の局所排気を併用したハイブリッド緊急換気システム(EVS)の性能を評価するために、プッシュ/プルフードを工場モデルに設置し、漏洩源 A の場合を Case1-2、漏洩源 B の場合を Case2-2 として解析ケースに追加した。

プッシュフードの寸法は 1.0m×0.2m であり、R1 の作業台に 9 か所、R2 の作業台に 12 か所設置した。プッシュフードは Fig.1 に緑色で示す。また、寸法 1.0m×0.4m のプルフードを、工場の壁面に 18 か所、R1 の 3 つの作業台に1つずつ設置した。プルフードは Fig.1 に紫色で示す。プッシュフードとプルフードは、システムの有効性のために互いに向かい合った位置に設置された。

供給プッシュジェットの流れ速度は、換気回数1[回/h]を想定し、0.1 [m/s] (0.02[m³/s])に設定した。プルフードは流出速度 0.05 [m/s] (0.02[m³/s])に設定した。EVS の換気量は 8.43 [m³/s]であり、DV と比較して換気量は 4%増加した。EVS の数値解析に使用される数値条件と境界条件を Table2 に示す。

Table2 Numerical and boundary conditions of Case 1-2 and Case 2-2.

Component	Condition
Turbulence Model	SST k- ω Model (steady)
Algorithm	Coupled (pressure-based coupled solver)
Scheme	Convection term: 2nd Order Upwind
Inflow	DV system: Vdiff = 0.5 m/s; TI = 10%; l = (1/7)hdiff; Tin = 26.85° C; ACH=25
Boundary	Hybrid EVS: Vpush = 0.1 m/s; TI = 10%; l = (1/7)hdiff; Tin = 26.85° C; ACH=1
Outflow	DV system: Pressure outlet

Boundary	Hybrid EVS: $V_{pull} = -0.05$ m/s
Contaminant	Toluene, $C_{surf} = 0.2135$ kg/m ³ (liquid temperature condition: 25° C)
Wall Boundary	Velocity: No Slip, Temperature and Toluene: Gradient zero

2.6 光触媒モデル

壁面に光触媒建材を設置した場合の濃度低減効果を評価するため、Case1-1,1-2(漏洩源 A)に光触媒建材を適応したケースを Case1-3,1-4として解析ケースに追加した。また Case2-1,2-2(漏洩源 B)に光触媒建材を適応したケースを Case2-3,Case2-4として解析ケースに追加した。

本研究で使用するモデルは、Langmuir-Hinshelwood 型の吸着モデルをもとに、水と汚染物質の建材上での競争吸着を考慮し、反応モデルをCFDに組み込めるようにモデリングされたものである²⁻²⁾。光触媒酸化反応による濃度低減(PCO)のモデル式を式(3)に示す。

式(3)における r はトルエン低減反応量[kg/m²/s]を表しており、 r_1 (式(4))と r_2 (式(5))をそれぞれ酸化チタン被覆率で重みづけして足し合わせた形である。ここで r_1 [kg/m²/s]は、光触媒建材表面の酸化チタンで被覆されている領域に、トルエンが吸着し分解されて起こるトルエン濃度低減反応量を表している。一方 r_2 [kg/m²/s]は、光触媒建材表面で基材であるセラミックタイルが露出した領域上にトルエンが吸着し内部拡散して起こるトルエン濃度低減反応量を表している。

$$r = \zeta r_1 + (1 - \zeta) r_2 \quad (3)$$

$$r_1 = (aE + b) \frac{K_T C_T}{1 + K_T C_T + K_W C_W} \quad (4)$$

$$r_2 = b' \frac{K'_T C_T}{1 + K'_T C_T + K'_W C_W} \quad (5)$$

ここで K_T は、トルエン吸着平衡定数[m³/kg]、 K_W は水蒸気吸着平衡定数[m³/kg]、 a は反応速度定数[kg/m²/s/lx]、 b は反応速度定数[kg/m²/s]を表している。

またPCOモデルの変数は、トルエン気相濃度 C_T [kg/m³]、酸化チタン被覆率 ζ [-]、壁面照度 E [lx]、水蒸気気相濃度 C_W [kg/m³]の4つである。本研究では、被覆率を既往研究でモデリングの際に対象としていた建材と同一の値である0.44[-]で固定した²⁻²⁾。壁面照度は600[lx]と1000[lx]を基準に2種類の照度分布を工場の形状をもとに作成し、それぞれのケースで固定した。水蒸気気相濃度については、光触媒の最大の効果を確認するために0[kg/m³]とした。

式(3)を粘性底層内の仮想空間($y+<1$)での体積反応としてモデル化すると式(6)となる。工場モデルの床面・壁面・天井(漏洩源、作業台、流入口、排気口は除く)に光触媒建材の設置を想定し、建材表面に接する第一セルのみに式(6)の S_{PCO} を、式(2)のスカラー輸送方程式のソース項として与えることで光触媒現象および物理吸着現象をCFD上に再現した。

$$\frac{\partial C}{\partial t} = S_{PCO} = \frac{\partial}{\partial x}(-r) \quad (6)$$

光触媒を適応したケースでのトルエンの移流・拡散方程式の計算を行う際には、ソース項の条件以外は光触媒を適応していないケースと統一した。Case1-3 および Case2-3 の数値条件と境界条件を Table3 に示す。また Case1-4 および Case2-4 の数値条件と境界条件を Table4 に示す。

Table3 Numerical and boundary conditions of Case 1-3 and Case 2-3.

Component	Condition
Turbulence Model	SST k- ω Model (steady)
Algorithm	Coupled (pressure-based coupled solver)
Scheme	Convection term: 2nd Order Upwind
Inflow Boundary	ACH = 25; Vdiff = 0.5 m/s; TI = 10%; l = (1/7)hdiff; Tin = 26.85° C; Cin = 0 (Gas-phase Toluene)
Outflow Boundary	Pressure outlet
Contaminant	Toluene, Csurf = 0.2135 kg/m ³ (liquid temperature condition: 25° C)
Wall Boundary	Velocity: No Slip, Temperature: Gradient zero, Source term: PCO Model

Table4 Numerical and boundary conditions of Case 1-4 and Case 2-4.

Component	Condition
Turbulence Model	SST k- ω Model (steady)
Algorithm	Coupled (pressure-based coupled solver)
Scheme	Convection term: 2nd Order Upwind
Inflow Boundary	DV system: Vdiff = 0.5 m/s; TI = 10%; l = (1/7)hdiff; Tin = 26.85° C; ACH=25
Boundary	Hybrid EVS: Vpush = 0.1 m/s; TI = 10%; l = (1/7)hdiff; Tin = 26.85° C; ACH=1
Outflow Boundary	DV system: Pressure outlet
Boundary	Hybrid EVS: Vpull = -0.05 m/s
Contaminant	Toluene, Csurf = 0.2135 kg/m ³ (liquid temperature condition: 25° C)
Wall Boundary	Velocity: No Slip, Temperature: Gradient zero, Source term: PCO Model

2.7 照度分布

照度は部屋の幾何形状や照明の種類・設置場所により分布が変化する。そのため、3次元照明計算ソフトを用いて、照度分布の計算を行い、照度分布を工場モデルの壁面へ適応させた。各面を 23×7 に分割し、床面の照度の平均値が 600 [lx] および 1000 [lx] となる照明の条件を基準として、2種類の照度分布を作成した。

床面照度 600[lx]を基準とした場合は、光束が 7023[lm]の照明を天井に 5×7 で 35 個、均等に天井に設置した。1000[lx]を基準とした場合は、光束が 13410[lm]の照明を 5×6 で 30 個、均等に天井に設置した。反射率は一般的な工場内での照度基準に従い、床 20%、壁面と天井は 70%とした。

600[lx]基準の照度の等高線分布を Fig.6 に示す.また,1000[lx]基準の照度の等高線分布を Fig.7 に示す.また,各面の照度分布に関する数値を Table5,Table6 に示す.

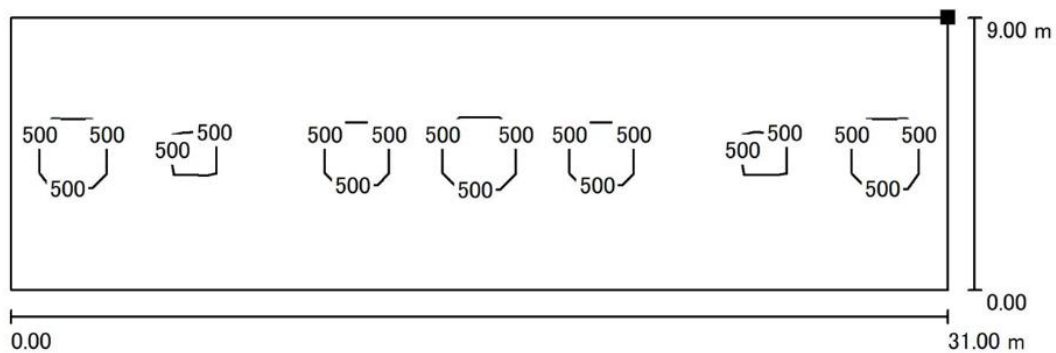


Fig.6-1 Illuminance contour distribution[lx] (ceiling, 600[lx])

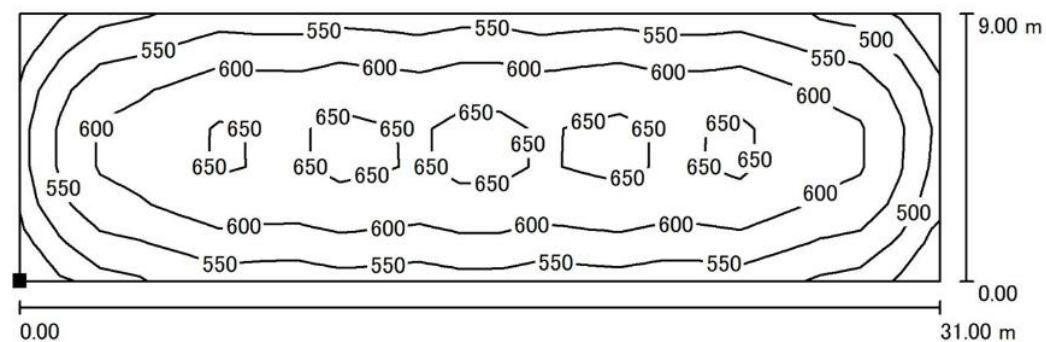


Fig.6-2 Illuminance contour distribution[lx] (floor, 600[lx])

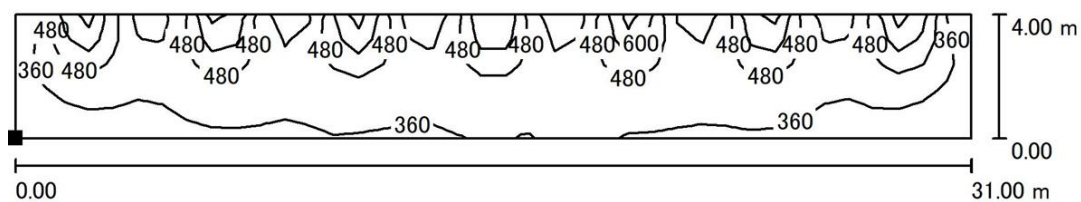


Fig.6-3 Illuminance contour distribution[lx] (wall(x-z), 600[lx])

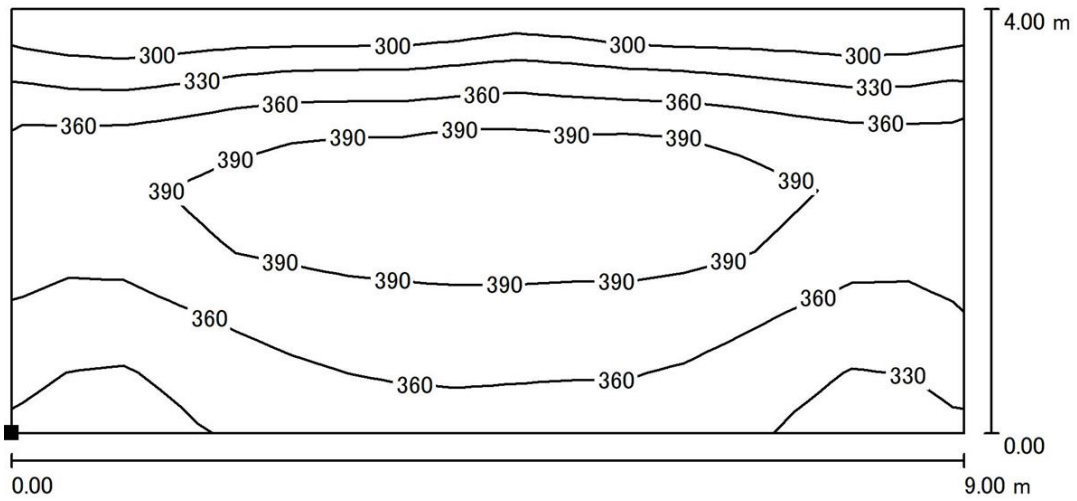


Fig.6-4 Illuminance contour distribution[lx] (wall(y-z), 600[lx])

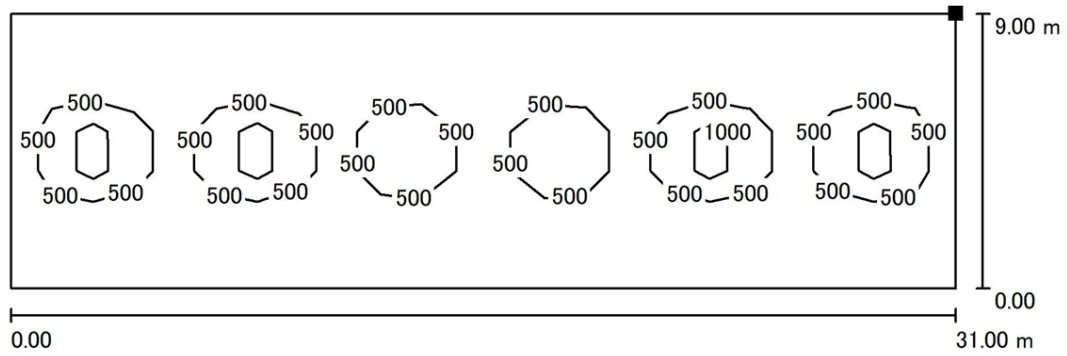


Fig.7-1 Illuminance contour distribution[lx] (ceiling, 1000[lx])

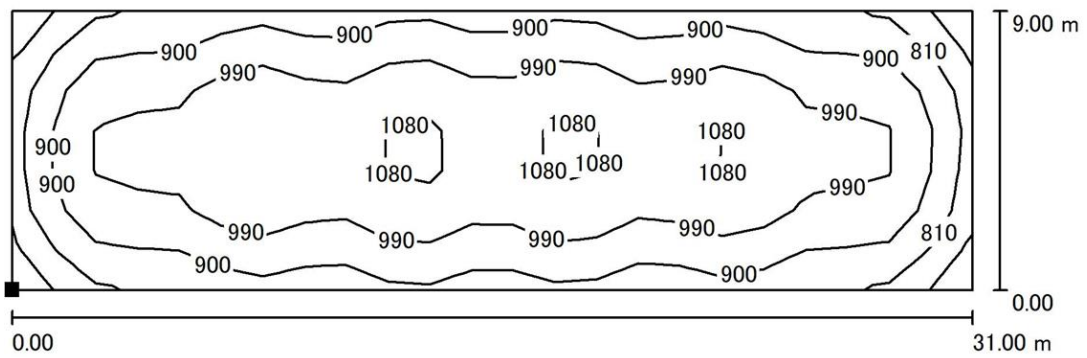


Fig.7-2 Illuminance contour distribution[lx] (floor, 1000[lx])

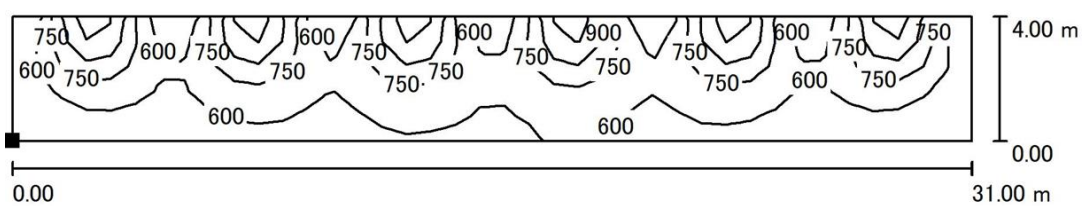


Fig.7-3 Illuminance contour distribution[lx] (wall(x-z), 1000[lx])

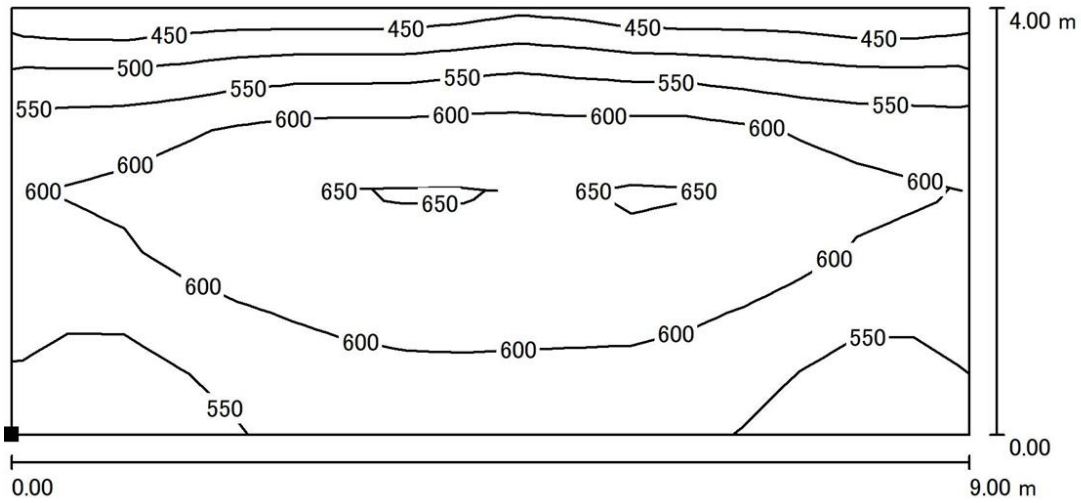


Fig.7-4 Illuminance contour distribution[lx] (wall(y-z), 1000[lx])

Table5 Value of illuminance (600lx)

	E_ave[lx]	E_mim[lx]	E_max[lx]
ceiling	243	146	2549
floor	589	427	673
wall(x-z)	427	269	838
wall(y-z)	361	275	413

Table6 Value of illuminance(1000lx)

	E_ave[lx]	E_mim[lx]	E_max[lx]
ceiling	390	232	2550
floor	960	700	1113
wall(x-z)	691	460	1165
wall(y-z)	582	442	661

2.8 CFD の品質管理

本研究では、流れのパターンを考慮し、乱流モデルとして SSTk- ω モデルを選択した。SSTk- ω モデルは、剥離予測に優れており、粘性底層の流れをシミュレートするのに適したモデルであるため、壁近傍の濃度プロファイルを正確に予測可能である。

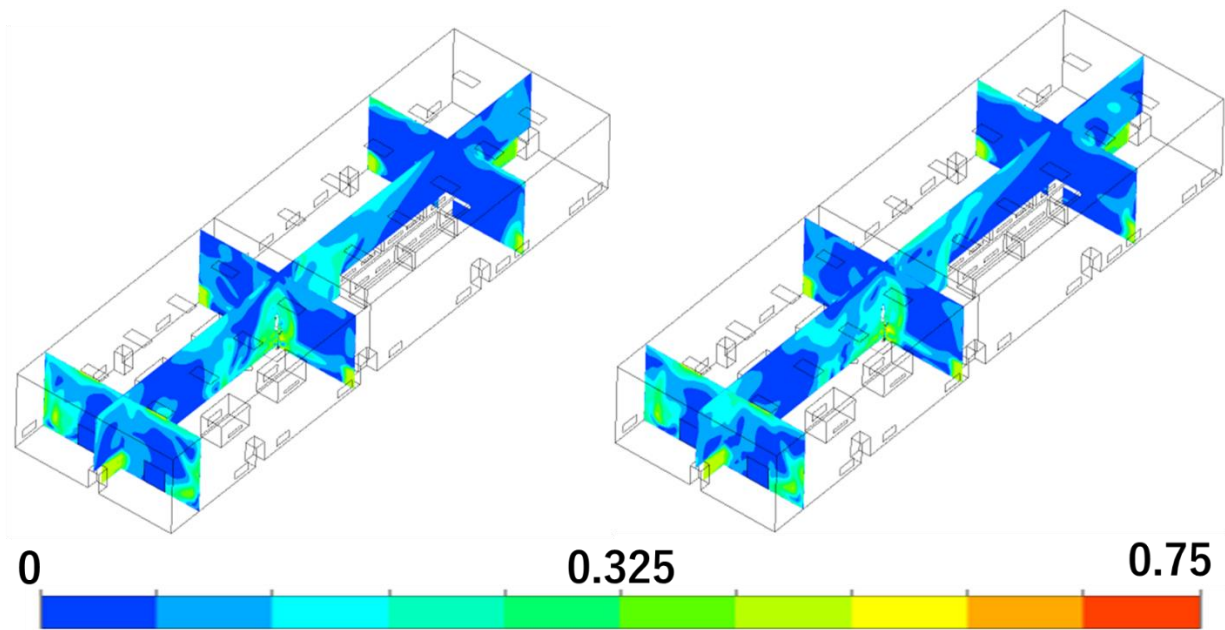
液体トルエン表面からの蒸発については、以前に報告された境界条件を設定するための小さなガラスチャンバーでの実験・数値シミュレーションを参考にした²⁻³⁾。液面からの化学物質放出モデルの検証作業を通じて、気液平衡理論に基づく化学物質放出モデルを数値解析に組み込むことにより、液面からの化学物質放出特性に関する実験結果を合理的に CFD 上に再現できることを確認した²⁻³⁾。

第3章 結果・考察

3.1 流れ場解析結果

Fig.8 に Case1-1,1-2,2-1,2-2 のワークショップにおける室内の風速分布を示す。また、人体周りの流れを強調するため、Fig.9 に人体周辺を拡大した風速分布を示す。光触媒を適応した Case1-3,1-4,2-3,2-4 の解析では、それぞれの光触媒建材適応前のケースと同一の流れ場を使用した。

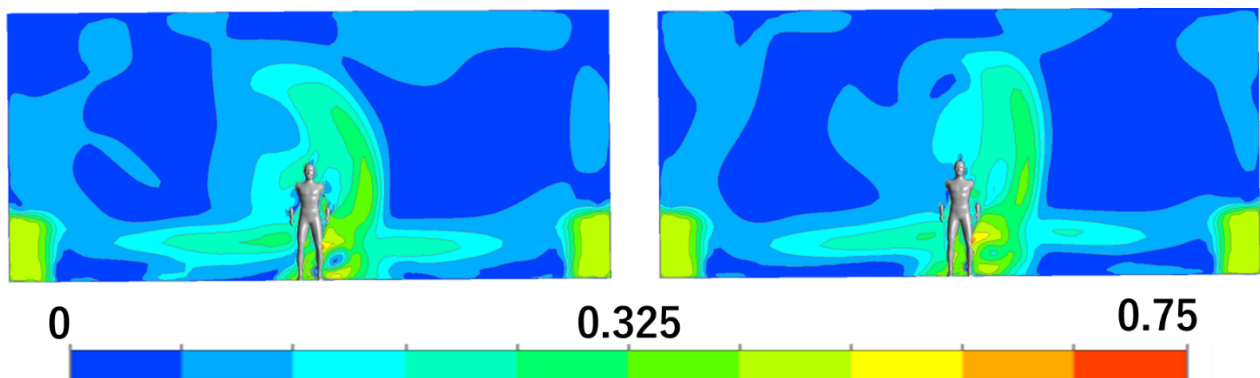
DV システムにより換気を行った Case1-1,Case2-1 では、ワークショップの中央、ディフューザーの届かない場所での停滞した空気の流れが見られる。EVS を適応させた Case1-2,Case2-2 では、床付近でより多くの空気の動きが見られる。CSP 周辺の流れについては、壁ディフューザーのジェットが衝突するため、複雑な流れが高さ1メートル未満の膝付近に形成された。



(8-1) DV system(Case1-1,Case2-1)

(8-2) EVS(Case1-2,Case2-2)

Fig.8 velocity magnitude distribution [m/s]



(9-1) DV system(Case1-1,Case2-1)

(9-2) EVS(Case1-2,Case2-2)

Fig.9 velocity magnitude distribution around the human body [m/s]

3.2 濃度場解析結果

Fig.10 に室内全体のトルエンの3D 濃度分布を示す.Fig.10 では室内空間全体の汚染物質の動きを明らかにしている.すべてのケースにおいて,R2 のトルエン濃度は低く,漏れが発生した部屋に汚染物質を封じ込める換気システムの有効性が確認された. Case1-1 では広範囲に高濃度の汚染物質の分布が確認されたが,Case1-2 では汚染物質の拡散が抑えられ,濃度も低下しており,EVS は室内トルエン濃度の低下に効果的であった.Case2-1,Case2-2 については,濃度の下降傾向はあるものの,EVS の有効性はそれほど顕著では無かった.

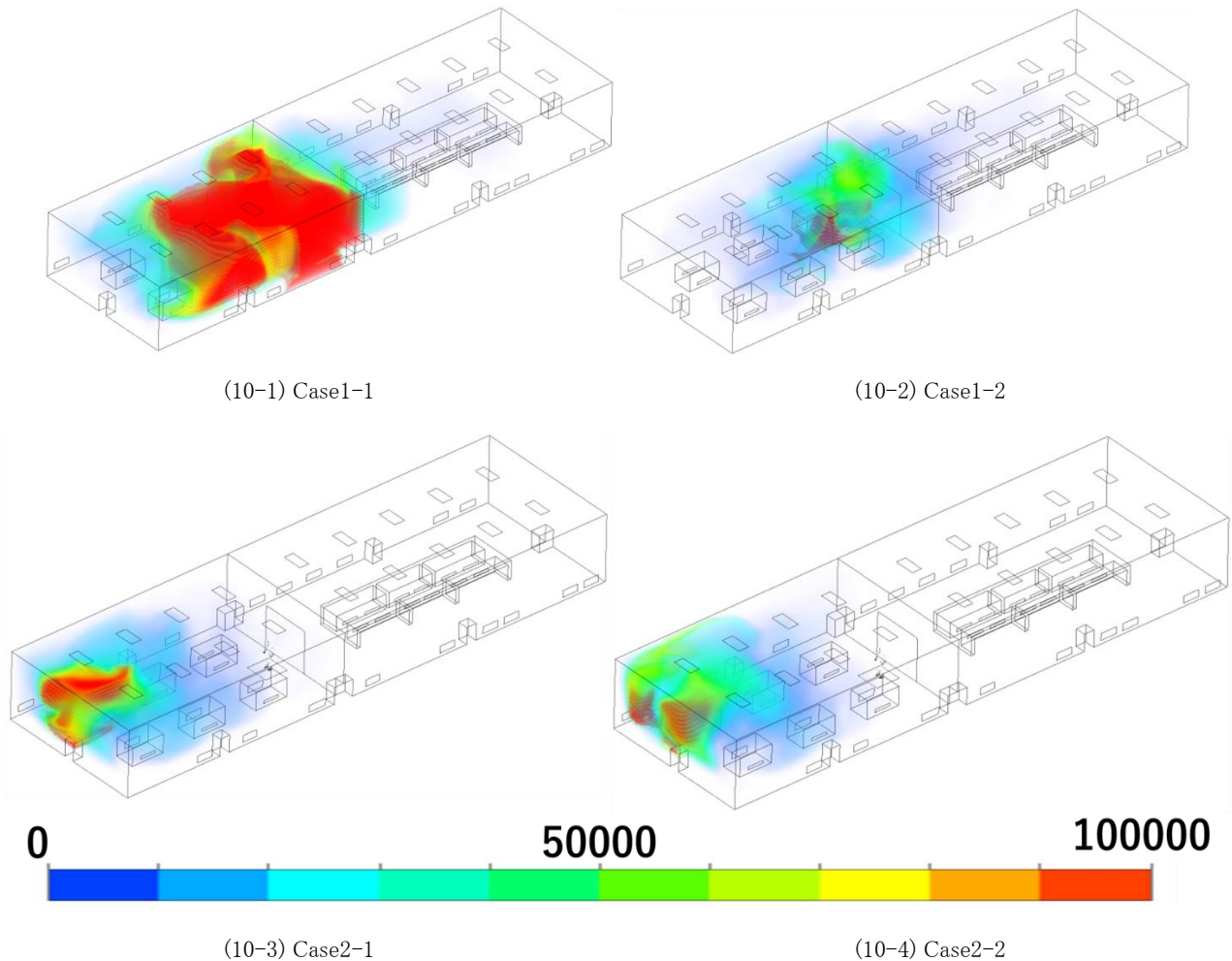


Fig.10 3D toluene concentration distribution [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]

Fig.11 に CSP 設置位置の断面における濃度分布を示す.Fig.11 では,濃度場を PCO 適応前と適応後のケースで比較しており,人体周辺の濃度分布および PCO の濃度減少効果を確認することが出来る. Case1 について,EVS で換気を行った Case1-2 では Case1-1 と比較して濃度減少が確認できる.しかし Case2 については,Case2-1 と Case2-2 の間で濃度の変化は少なく,EVS の効果が低い事が確認された.しかし,Case1 では EVS を適応することで,濃度場の形状が変わり CSP の鼻孔付近に高濃度分布が形成された.この結果より,EVS により室内平均濃度が下がった場合でも CSP の位置によっては,高濃度トルエンを吸入する危険性がある事が示された.

光触媒建材を適応したケースでは,適応前のケースと同一の流れ場を使用している為,濃度場の形状の変

化は見られなかったが、光触媒建材の適応前と適応後の濃度場を比較すると、わずかではあるがすべてのケースで光触媒建材の適応による濃度減少を空間全体で確認した。

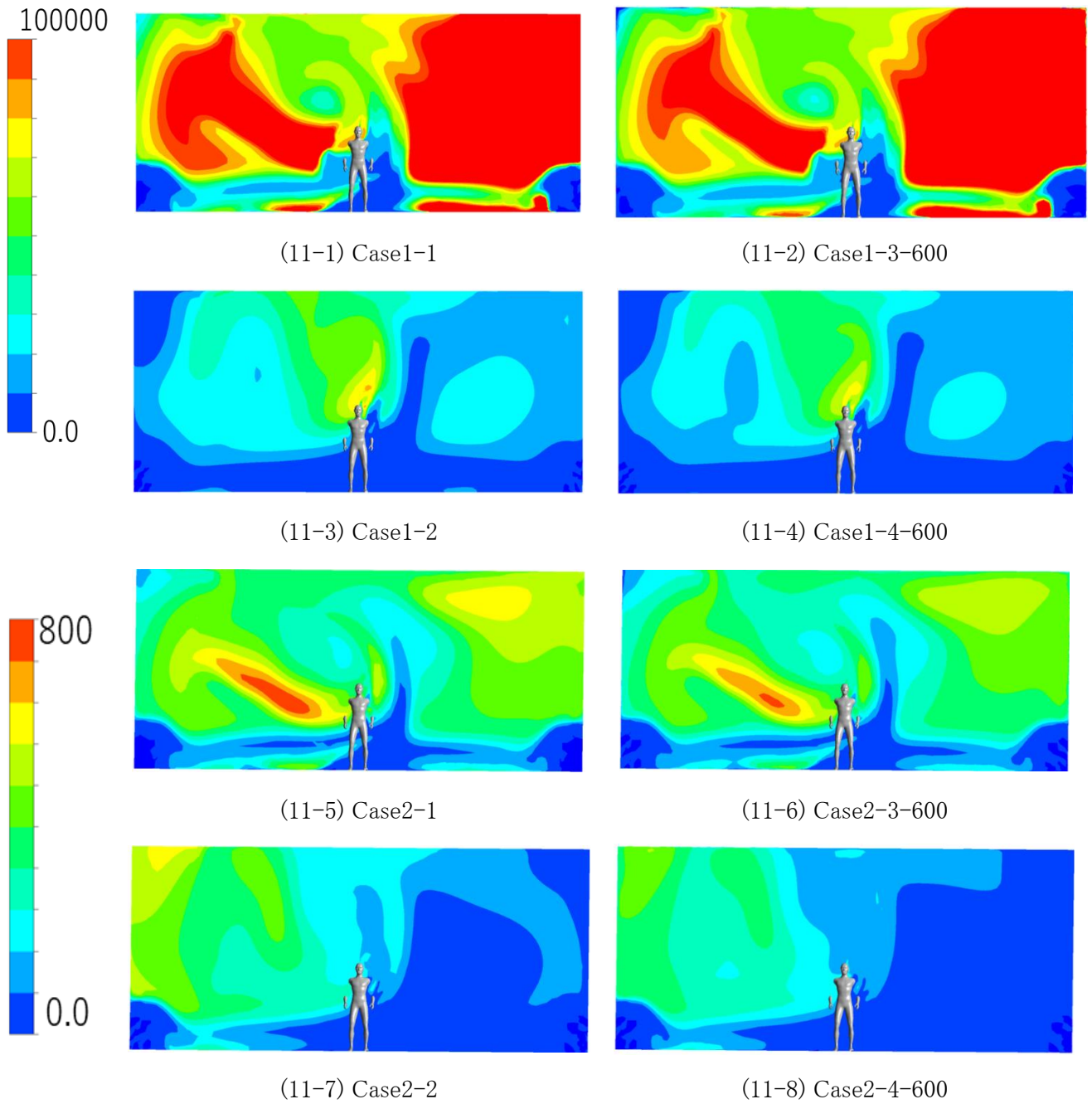


Fig. 11 Concentration distribution in cross section of CSP installation position [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]

3.3 CSPトルエン吸入濃度

Table7 に Case1 (漏洩源 A) の鼻孔における表面トルエン濃度の解析結果および、Case1-1 と比較した各ケースの濃度減少率を示す。Table8 に Case2 (漏洩源 B) の鼻孔における表面トルエン濃度の解析結果および、Case2-1 と比較した各ケースの濃度減少率を示す。Fig.12 に鼻孔における表面トルエン濃度をまとめた棒グラフを示す。

漏出源が CSP の足元にある場合 (LeakageA, Case1), EVS の適応による吸入トルエン濃度の減少率は 0.6% であり, EVS の効果が低い事が確認された。(Case1-2)。また漏出源が CSP から離れた部屋の隅にある場合 (LeakageB, Case2), EVS の適応による吸入トルエン濃度の減少率は 52.5% であり, EVS の有効性が示された (Case2-2)。EVS の適応により流れ場が変化し, Case1-2 では CSP の鼻孔周辺で高濃度の分布が形成されたためこのような結果になったと考える。

次に, 光触媒建材の効果について, Case1-1 に光触媒を適応させた Case1-3-1000 では, 2.1% 濃度が減少した。EVS により換気を行った Case1-2 に光触媒を適応させた Case1-4-1000 では, PCO により Case1-2 の減少率に +14.7% の濃度低減効果があり, 合計 15.37% の濃度が減少した。Case2 での光触媒の効果は, DV 方式により換気を行った Case2-3-1000 では, 10.5% 濃度が低下した。EVS で換気を行った Case2-2 に光触媒を適応させた Case2-4-1000 では 61.8% (Case2-2 の減少率 + 9.3%) 濃度が低下し, 吸入濃度制御に対しての光触媒建材の有効性が確認された。

室内は不均一の濃度場となっているため, 吸入濃度は CSP の設置位置に対する依存が大きく, 換気システムの強化では一定の濃度低減効果は得られない。しかしながら PCO の効果としては, 濃度場の形状を変化させず, 空間全体の濃度を下げる効果がある為, 安定した吸入濃度の減少効果を発揮し, 特に EVS での濃度減少効果が低かった Case1-4 では, 光触媒建材が換気システムよりも吸入濃度を多く減少させる結果となった。

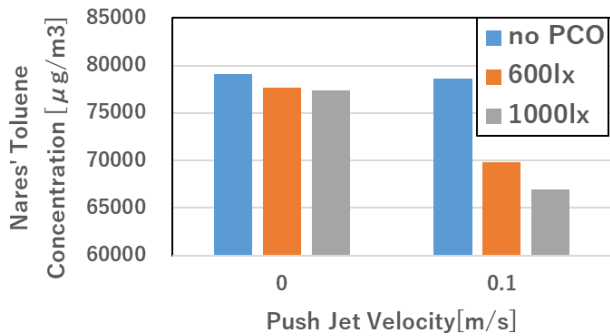
Table7 Case1(LeakageA), Nares Toluene Concentration [$\mu\text{g}/\text{m}^3$] and decrease rate[%]

case	leakage	PCO	EVS	Nares Toluene Concentration [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	decrease rate[%]
case1-1			no	79090	0.0
case1-2		no	yes	78584	0.6
case1-3-600	A	600lx	no	77652	1.8
case1-4-600			yes	69849	11.7
case1-3-1000		1000lx	no	77403	2.1
case1-4-1000			yes	66934	15.4

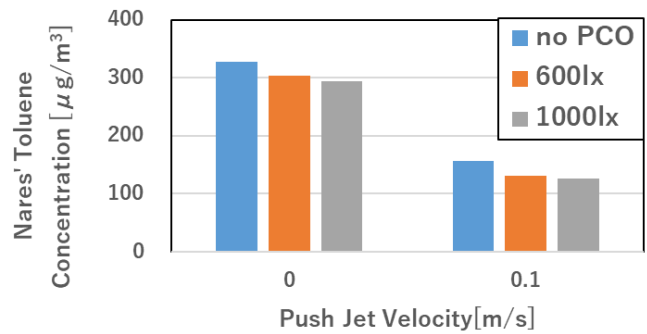
Table8 Case2(LeakageB), Nares Toluene Concentration [$\mu\text{g}/\text{m}^3$] and decrease rate[%]

case	leakage	PCO	EVS	Nares Toluene Concentration [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	decrease rate[%]
case2-1			no	328	0.0
case2-2	B	no	yes	156	52.5
case2-3-600			600lx	no	303

case2-4-600		yes	131	60.1
case2-3-1000		no	293	10.5
case2-4-1000	1000lx	yes	125	61.8



(12-1) Case1, LeakageA



(12-2) Case2, LeakageB

Fig.12 Nares Toluene Concentration [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]

3.4 室内トルエン体積平均濃度

Table9 に Case1 (漏洩源 A) の室内領域におけるトルエン体積平均濃度の解析結果および, Case1-1 と比較した各ケースの濃度減少率を示す. Table10 に Case2 (漏洩源 B) の室内領域におけるトルエン体積平均濃度の解析結果および, Case2-1 と比較した各ケースの濃度減少率を示す. Fig.13 にトルエン体積平均濃度をまとめた棒グラフを示す.

漏出源が CSP の足元にある場合 (LeakageA, Case1), EVS の適応による工場全体の平均トルエン濃度の減少率は 90.0% であり, EVS の有効性が確認された (Case1-2). また, 漏出源が CSP から離れた部屋の隅にある場合 (LeakageB, Case2), EVS の適応による工場全体での平均トルエン濃度の減少率は 14.2% であり, Case1 と比較して EVS による換気効果が低い事が確認された (Case2-2).

次に, 光触媒建材の効果については, DV により換気を行った Case1-1 に光触媒を適応させた Case1-3-1000 では, 11.0% 濃度が減少した. EVS により換気を行った Case1-2 に光触媒を適応させた Case1-4-1000 では, Case1-2 の減少率に +1.8% の濃度低減効果があり, 合計 91.8% の濃度が減少した. Case2 での光触媒の効果は, DV 方式で換気を行った Case2-3-1000 では 9.2% 濃度が減少した. EVS で換気を行った Case2-4-1000 では 28.4% (Case2-2 の減少率 + 14.2%) 濃度が低下し, 室内平均体積濃度に対しての光触媒建材の有効性が確認された. 特に Case2-4-1000 の結果では, PCO における濃度減少効果が, EVS のみの濃度減少効果 (Case2-2) を上回る結果となった.

EVS による室内平均濃度の減少について, Case1-1 と Case1-2 の室内平均濃度の差は, Case2-1 と Case2-2 の場合よりも有意に大きかった. これは, 汚染源の位置に対する, DV システムのディフューザーと局所排気のプッシュプルフードの設置位置による, 換気の有効性により説明できる. Case1 では, 漏出源がプッシュプルフードの直接経路にあり, 漏出源が直接的影響を受け効率よく排出されたため, EVS の適応により大きな濃度減少効果が得られたと考える. また, Case2 では, 漏出源が DV のディフューザーにのみ影響を受け, プッシュプルフードの直接経路上にないため, EVS を適応しても影響が少なく濃度低下効果が低かったと考える.

PCO の照度依存性について, 600lx のケースと 1000lx のケースを比較すると, 1000lx のすべてのケースで分

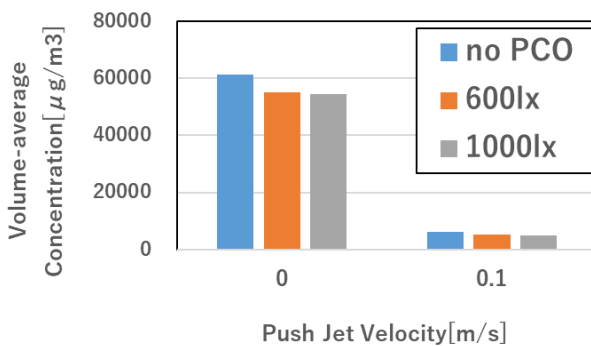
解量の上昇を確認した。1000lx では 600lx の場合より,Case1-3 で 1.0%,Case1-4 で 0.4%,Case2-3 で 2.6%,Case2-4 で 2.4%濃度減少率が上昇した。

Table9 Case1(LeakageA), Volume average concentration of Toluene [$\mu\text{g}/\text{m}^3$] and decrease rate[%]

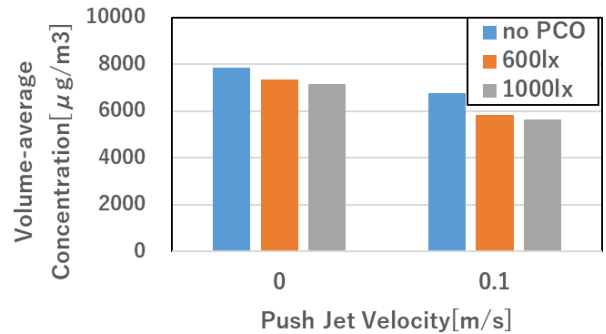
case	leakage	PCO	EVS	volume average concentration [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	decrease rate[%]
case1-1	A	no	no	61204	0.0
case1-2			yes	6125	90.0
case1-3-600		600lx	no	55044	10.1
case1-4-600		yes	5270	91.4	
case1-3-1000		1000lx	no	54445	11.0
case1-4-1000			yes	5038	91.8

Table10 Case2(LeakageB), Volume average concentration of Toluene [$\mu\text{g}/\text{m}^3$] and decrease rate[%]

case	leakage	PCO	EVS	volume average concentration [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	decrease rate[%]
case2-1	B	no	no	7869	0.0
case2-2			yes	6755	14.2
case2-3-600		600lx	no	7348	6.6
case2-4-600		yes	5828	25.9	
case2-3-1000		1000lx	no	7146	9.2
case2-4-1000			yes	5636	28.4



(13-1) Case1,LeakageA



(13-2) Case2,LeakageB

Fig.13 Volume average concentration of Toluene [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]

3.5 PCO におけるトルエン分解量 Flux 分布

Fig.14 に光触媒を適応したセルにおける,PCO による汚染物質分解量の Flux 分布 [$\text{kg}/\text{m}^2/\text{s}$] を示す。

PCO の汚染物質分解量の Flux 分布は Fig.10 で示した室内の3D 濃度分布と同じ傾向になっており,すべての場合において,R2 での分解量は低くなっていることが確認された.また,漏洩源を中心に高い Flux 分布が形成されており,特に漏洩源周辺と,漏洩場所の真上付近の天井ではすべてのケースで高い Flux の分布が見られる.

EVS による効果が大きかった Case1 では,EVS により汚染物質の拡散が抑えられ,Case1-3-600 と比較して Case1-4-600 では壁面での Flux 量が大きく減少している.しかしながら,Case2 では EVS を適応することにより,壁面での Flux が上昇している事が明らかになった.

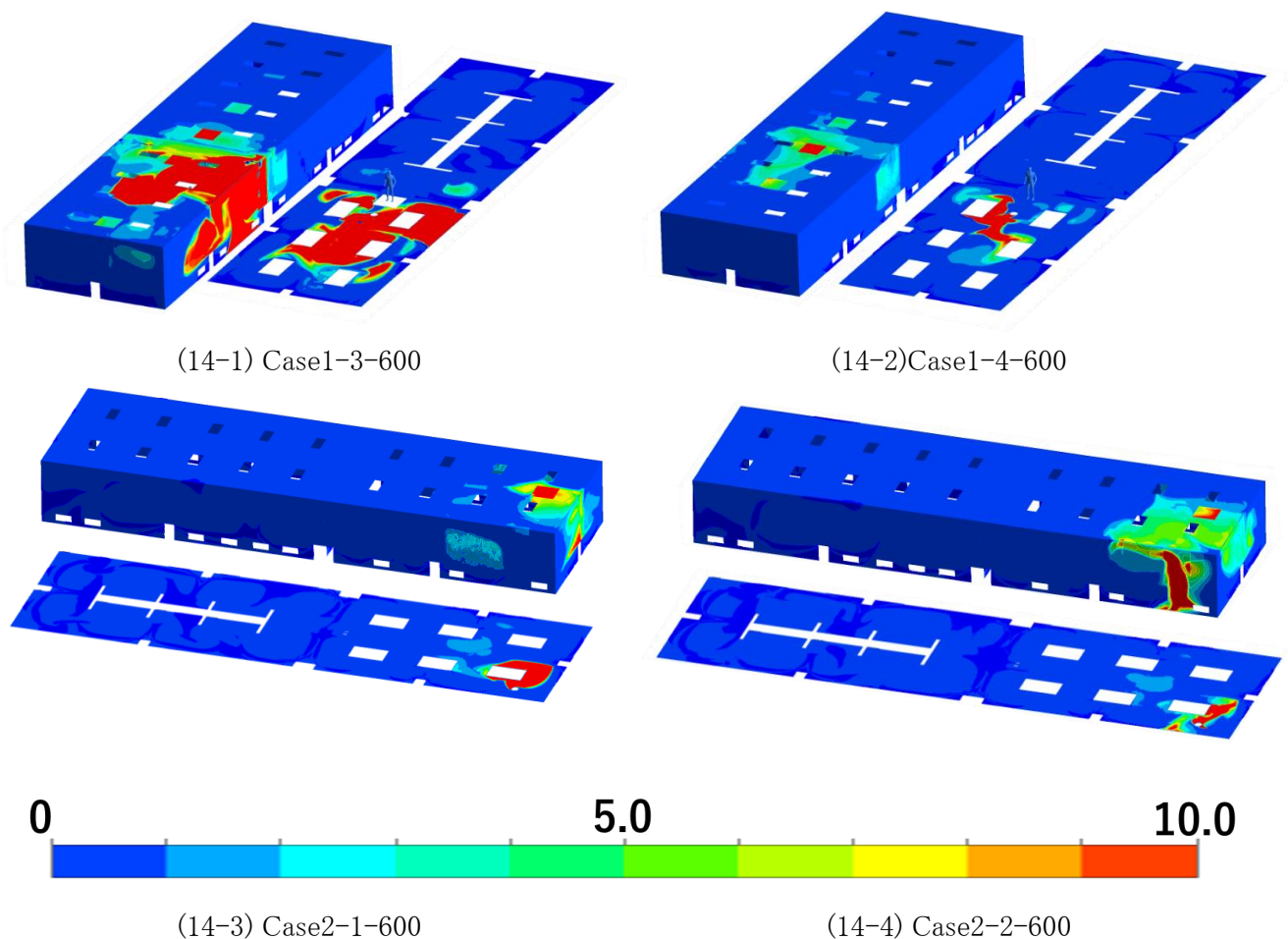


Fig.14 Flux distribution of pollutant decomposition by PCO[$\text{kg}/\text{m}^2/\text{s}$]

Table11 に PCO の面ごとの分解量および,各面の分解量の構成比を示す.室内の平均濃度が高いケースでは,式(3)に従って多くのトルエンが PCO により分解されており濃度依存性が確認された.ここで Case1-3 の室内平均濃度は Case1-4 の約 10 倍であるが,Case1-3 の分解量は $21507[\mu\text{g}/\text{s}]$ であり Case1-4 の分解量の約 3 倍となっている.これは,光触媒の分解量は濃度が大きくなるにつれ対数関数的に増えていくため,室内平均濃度の高い Case1-3 では高濃度域での分解が抑えられ,このような結果になったと推測できる.

また,EVS の適応による濃度分布が変化することにより,分解量も変化することも確認された.床面における分解量の構成比は, Case1-3 で 60.6%であるのに対し,Case1-4 では,92.4%となっており,壁と天井では大幅に分解量が減少している. Case1 では漏洩源に対して,EVS のプッシュジェットによる直接的な換気が行われ拡散が抑えられた.そのため壁面および天井での分解量が減り,相対的に床面の構成比が高くなったためこのよう

な結果になったと考える。EVS により濃度分布の変化があまり見られなかったCase2 では分解量および構成比の変化は少ない。

これらの事より、光触媒によるトルエン分解量は、室内のトルエン濃度などの変数だけではなく、換気システムによる汚染物質の拡散に依存して変化しており、換気システムにより汚染物質の拡散が抑えられなかった場合により大きい効果が得られるといえる。

Table11 Decomposition amount per surface [μ g/s] , Composition ratio of decomposition amount [%]

	Leakage	Ventilation system	PCO	Wall [μ g/s]	Floor [μ g/s]	Ceiling [μ g/s]	All [μ g/s]
Case1-3	A	DV	600lx	5605 (26.1%)	13042 (60.6%)	2860 (13.3%)	21507
Case1-4		EVS		214 (2.8%)	7034 (92.4%)	360 (4.7%)	7609
Case2-3	B	DV		209 (5.2%)	3556 (88.6%)	249 (6.2%)	4014
Case2-4		EVS		338 (8.6%)	3310 (83.8%)	303 (7.7%)	3951

第4章 結論

本研究では、ワークショップ内の労働者の吸入曝露を減らすことを目的として、置換換気(DV)システムとプッシュプル型の局所排気を併用した緊急換気システム(EVS)の提案および、解析モデルの壁面に光触媒反応による濃度低下効果が期待されている光触媒建材を適応した空気質制御システムを提案し、それぞれの濃度制御システムにおける濃度低減性能を CFD による解析結果を比較することで検証した。

本研究で得られた知見を以下にまとめる。

- 1) EVS では、プッシュジェットを風速 0.1[m/s]にした場合、換気率が DV より 4%増加し、床付近でより多くの空気の流れが確認された。汚染物質の漏洩源の場所により、EVS の換気効果は大きく異なり、漏洩源がプッシュ/プルフードに挟まれ、汚染源がプッシュジェットを直接受ける場合は、室内全体の平均濃度が 90.0% 減少した。しかし、漏洩源が部屋の隅にありプッシュフードからのジェットを漏洩源が直接受けない場合には濃度低減効果が低く、室内平均濃度は 14.2%の減少であった。
- 2) 光触媒建材を壁・床・天井に適応させることで、今回実施したすべての換気法・漏洩源のケースで濃度低減性能が強化されることを確認した。光触媒による空気質制御は、流れ場の形状を変化させず、室内全体の濃度を低下させた。PCO の汚染物質分解量は壁面近傍の汚染物質濃度に依存する。そのため、EVS による濃度低減率が 14.2%と低い場合には PCO は+14.2%の濃度減少率という比較的大きい効果を発揮した。それに対して、EVS による濃度減少効果が 90.0%と高い場合には、PCO を EVS に適応させることで+1.8%濃度減少率が上昇する結果となった。そのため PCO は、汚染物質の漏洩源が予測できず、EVS による換気効果が低い場合を想定して補助的に使用することが望ましいといえる。
- 3) また汚染物質の床面での漏洩を想定した本研究では、PCO は床面での分解量が他の面と比較して大きく、特に漏洩源周辺での分解量が大きい事が Flux 分布から明らかになった。また、プッシュジェットが漏洩源に直接影響を及ぼし効率の良い換気が EVS により行われた場合に、壁面及び天井での分解量が大幅に減ったことから、換気システムによる汚染物質の拡散に依存して PCO の分解量が変化していることが確認された。
- 4) CSP 鼻孔におけるトルエン吸入量は、EVS を適応させたすべてのケースで減少した。しかしプッシュジェットによる流れ場の変化により、鼻孔付近に高濃度域が形成される危険性も示された。室内は不均一の濃度場となっているため、吸入濃度は CSP の設置位置および汚染物質の漏洩源の位置に大きく依存しており、換気システムの強化では一定の吸入濃度低減効果は得られない。しかしながら PCO の効果としては、濃度場の形状を変化させず、空間全体の濃度を下げる効果がある為、安定した吸入濃度の減少効果を発揮し、特に EVS での濃度減少効果が低かった Case1-4 では、光触媒建材が換気システムよりも吸入濃度を多く減少させる結果となった。

参考文献

- 1-1) World Health Organization, Burden of disease from ambient air pollution for 2016,
https://www.who.int/airpollution/data/AAP_BoD_results_May2018_final.pdf?ua=1
- 1-2) A. Steinemann, P. Wargocki, B. Rismanchi, Ten questions concerning green buildings and indoor air quality, *Build. Environ.* 112 (2017) 351-358, doi:10.1016/J.BUILDENV.2016.11.010
- 1-3) 竹内仁哉, 吉野一, 萩田俊輔, 伊藤一秀, 中川則和, 高橋義弘, 近藤靖史: 置換換気方式を導入した食品工場における室内温熱環境の調査研究, 空気調和・衛生工学会論文集 No. 156, 2010年3月.
- 1-4) 環境省, 持続可能な開発のための2030アジェンダ, <http://www.env.go.jp/earth/sdgs/index.html>.
- 1-5) 橋本和仁, 藤嶋昭: 光触媒のすべて, 工業調査会, 2004.
- 1-6) G. Clausen, G. Beko, R.L. Corsi, L. Gunnarsen, W.W. Nazaroff, B.W. Olesen, T. Sigsgaard, J. Sundell, J. Toftum, C.J. Weschler, Reflections on the state of research: indoor environmental quality, *Indoor Air* 21 (2011) 219-230, doi: 10.1111/j.1600-0668.2010.00706.x.
- 1-7) 菊池世政啓, 小林信行, 伊藤一秀: プッシュ気流を用いた局所領域空気質制御と規準化居住域濃度の解析, 空気調和・衛生工学会論文集 No.92, 2004年1月.
- 2-1) S.J. Yoo, K. Ito, Assessment of transient inhalation exposure using in silico human model integrated with PBPK-CFD hybrid analysis, *Sustain. Cities Soc.* 40 (2018) 317- 325, doi: 10.1016/J.SCS.2018.04.023 .
- 2-2) K. Nakahara, M. Muttakin, K. ITO, Numerical modelling for photocatalytic oxidation of volatile organic compounds on TiO₂-doped indoor building material
- 2-3) E. Sumiyoshi , K. Sakai , H. Harashima , A. Murga , K. Ito , Numerical Model for Estimating Transient Air Emissions from Mixed Solution with multiple Chemical Components - Development of Numerical Tools for Health Risk Assessment of High Concentration and Short-Term Exposure -. IMAT 2019, in: The 11 th International Meeting on Advances in ThermoFluids, 2019, pp. 107-112 .

謝辞

本研究に関して、常にご指導ご鞭撻を頂きました九州大学院・伊藤一秀教授に心から深謝致します。研究が行き詰まったときのご助言だけでなく、研究に取り組む姿勢、論文の書き方に至るまで、日頃から研究者として非常に多くの事柄を学ばせていただきました。また、Sung-Jun YOO 准教授には研究を進めるにあたって懇切丁寧なご指導をいただきました。本研究室秘書の神田さんには様々な日常業務においてサポートして頂きました。感謝致します。研究室の皆にも、先輩後輩関係なく、研究生活や日常生活に刺激を与えてもらいました。

ここ一年はコロナ禍であったため苦しい時期もありましたが、最後までやり遂げることが出来たのは伊藤先生を始めとする助言をくださった諸先生方、先輩方、そして研究に限らず日常生活でも私の周囲にいてくれた友人たちのおかげに他なりません。輝かしい大学生活の思い出を授けてくれた全ての方々に深い謝意を表して、謝辞といたします。

令和3年2月
一宮 駿