

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

Numerical Analysis of Ventilation Effectiveness in Occupied Zones for Various Industrial Ventilation Systems

正会員 菊池世欧啓(東京工芸大学大学院) 正会員 小林信行(東京工芸大学) 正会員 伊藤一秀(東京工芸大学)

Seohiro KIKUCHI*¹ Nobuyuki KOBAYASHI*² Kazuhide ITO*²

*¹Graduate School Tokyo Polytechnic University *²Tokyo Polytechnic University

When the generation of pollutants is assumed locally in industrial workspaces, such as factories or industrial plants, there is a legal obligation in Japan to set up local exhaust systems of a hood and a push-pull type. In this paper, CFD simulations are carried out in order to confirm the performance of a push flow type local ventilation system for industrial workspaces, which are characterized by a large enclosure with specific pollutants generation in local areas.

1. 序

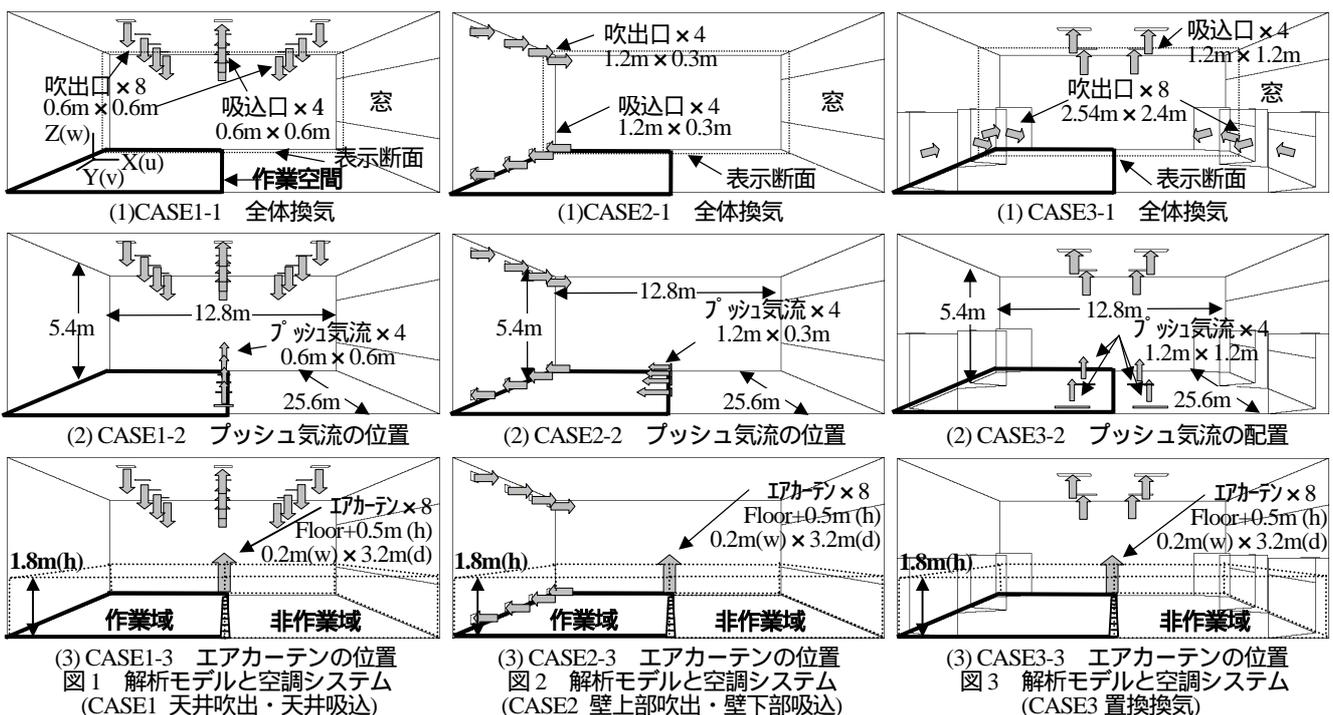
一般に大規模の空間容積を有するホール、体育館および工場等における換気システムは全体換気システムの設置の他、居住域・作業域・呼吸域をターゲットに局所的な換気システムの導入が検討される場合が多い。特に、大規模工場等の労働環境下で局所的な汚染質発生が想定される場合には、フード型の局所排気システムの導入やプッシュ・プル型の排気システムの設置が法的に義務付けられている^{文1)}。

汚染質の発生位置近傍で捕集し、汚染質拡散を抑制する局所排気システムは、「場」の汚染質濃度管理を行う上で大変有効な方法であり、厨房換気を始め、局所排気システムを設置した場合のその有効性の検討例は比較的多く見受けられる。しかし、プッシュ・プル型の局所排気システムを除き、特に労働環境を対象として、汚染質の

移流方向を制御し、直接的な汚染質希釈が可能なプッシュ気流のみを採用した場合の検討はほとんど行われていない。

本研究では比較的局所排気システムの設置が困難であると予想される、汚染質発生位置がある程度の広がりを持つ作業空間を対象として、局所的にプッシュファンならびにエアカーテンを設置した場合の作業域ならびに非作業域の空気質制御性に関して検討を行う。

特に、必要最小限の全体換気システムが設置されている工場を対象として、大規模なダクト工事等を必要としない設置型のファンを導入し、全体換気システムの排気口に向けてプッシュ気流を与えた場合、ならびに作業域および非作業域の境界線上にエアカーテンを設置した場合の検討を行い、その換気性状を規準化居住域濃度を用いて評価する^{文2)}。



2. 規準化居住域濃度による作業環境評価

一般環境、労働環境を問わず、換気設計においては汚染質の不完全混合状態を積極的に活用し、換気効率の概念を取り入れることで換気量の最適化を行うことが省エネルギーの観点からも重要となる。

空気調和・衛生工学会規格である HASS 102 換気規準・同解説²⁾では、一般環境を対象とした換気設計を行う上で、室内の局所領域である居住域の平均濃度を環境基準濃度レベル以下に保持することを前提として、「規準化居住域濃度 C_n 」を用いた換気設計を推奨している。ここで、規準化居住域濃度は完全混合濃度(排気口濃度)と居住域平均濃度の比として(1)式のように定義される(外気濃度は0と仮定する)。

$$C_n = \frac{C_a}{C_p} \quad (1)$$

ここで、 C_n は規準化居住域濃度、 C_a は居住域平均濃度、 C_p は排気口濃度を示す^{注1)}。

本研究では空間的な移動が考えられる作業者の個人暴露量を最小化するとの観点から、作業域の汚染質濃度レベルをマクロに評価することが可能な規準化居住域濃度 C_n を評価指標として用いる。

3. 解析対象空間

3.1 解析対象空間

図1~3に比較的空間容積の大きい工場を模擬した解析対象空間を示す。対象空間は幅 12.8m (X) 奥行 25.6m (Y) , 高さ 5.4m (Z)の空間スケールを有し、汚染質が発生する作業空間と居住スペースである非作業空間より構成されると仮定する^{注1)}。対象空間の全体換気システムは3種類設定する。CASE1 が一般的にみられる天井吹出・天井吸込型、CASE2 が循環流の形成を意図した壁上部吹出・壁下部吸込型、CASE3 が置換換気型システムである。吹出口は、CASE1 の吹出口形状は 0.6m×0.6m のスロット型、CASE2 は幅 1.2m×高さ 0.3m のスロット型、CASE3 は幅 2.54×高さ 2.4m の多孔パネル型面状吹出口を想定する。

3.2 解析条件

全体換気システムならびにプッシュ気流、エアカーテンの境界条件を表1~表3に示す。全体換気システムによる換気回数は Min. OA を仮定し、全ケースで 2.5 回/h とする。プッシュ気流、エアカーテン共に吹出風速 0.5m/s を与えるが、エアカーテンの場合は作業域・非作業域を分割するよう、ライン状に吹出風速を与える。

流れ場と濃度場の解析は対称性を考慮し空間の Y 方向に関し半分の領域について行う。また、一般に大空間では温度成層の形成等、温度場の解析が不可欠であると考えられるが、ここでは局所換気システムの効果を検討する基礎的な条件を想定し、等温条件の下で解析を行う。

計算条件を表4に示す。流れ場は低 Re 型 k- モデル

表1 全体換気システムの条件

CASE	空調方式	吹出速度 U_{in} [m/s]	吹出口の Re 数 ^(注2) ($\times 10^5$)	プッシュ気流	エアカーテン
1-1	天井吹出 ・天井吸込	0.425	1.6	-	-
1-2				-	-
1-3				-	-
2-1	壁上部吹出 ・壁下部吸込	0.855	3.3	-	-
2-2				-	-
2-3				-	-
3-1	置換換気	0.025	0.1	-	-
3-2				-	-
3-3				-	-

表2 プッシュ気流の条件

	CASE1	CASE 2	CASE 3
プッシュ気流の方向	Z 方向 (鉛直方向)	X 方向 (水平方向)	Z 方向 (鉛直方向)
プッシュ気流の吹出面積	0.6×0.6m	1.2×0.3m	1.2×1.2m
プッシュ気流の吹出速度	$U_p=0.5\text{m/s}$		
乱流エネルギー(k_{in})	$k_{in} = 3/2(U_p \times 0.05)^2$		

表3 エアカーテンの条件

	CASE1	CASE2	CASE3
エアカーテン気流の方向	Z 方向 (鉛直方向)		
エアカーテン気流の吹出面積	3.2m×0.2m×8 個		
エアカーテン気流の吹出速度	$U_a=0.5\text{m/s}$		
乱流エネルギー(k_{in})	$k_{in} = 3/2(U_a \times 0.05)^2$		

表4 計算条件

メッシュ	CASE 1 : 78(x)×72(y)×35(z) = 196,560 CASE 2 : 72(x)×68(y)×51(z) = 249,696 CASE 3 : 64(x)×64(y)×27(z) = 110,592
乱流モデル	低 Re 型 k-model(Abe・Nagano モデル)
吹出条件	U_{in} : 表1参照, $k_{in} = 3/2(U_{in} \times 0.05)^2$, $\dot{m}_{in} = C_u \times k_{in}^{3/2} / L_{in}$, $C_u = 0.09$, $L_{in} = 1/7$ (吹出幅)
吸込条件	U_{out} , k_{out} : $out = \text{free slip}$
壁境界	No slip
汚染質	Passive, 作業域の床面一様発生

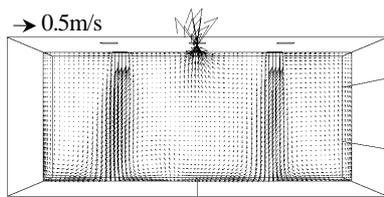
(Abe-Nagano model)に基づく3次元解析を行っている。汚染質拡散場の解析では、作業域のみ床面一様に Passive Contaminant を仮定した汚染質を発生させる。非作業域の床面ならびに全体空調吹出空気中では汚染質発生は0とする。また、プッシュ気流、エアカーテン共に室内空気の攪拌のみを意図し、新鮮外気は導入されていない。

4. 流れ場の解析結果

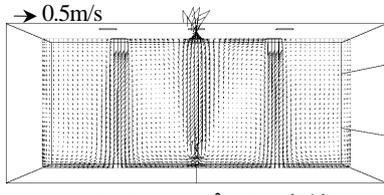
図4~6に気流分布の解析結果を示す。結果の表示断面は図1~3に示す。CASE1 と CASE2 は表示断面に吹出口と吸込口およびファンの吹出面を含む。CASE3 は吹出口を含まない。

4.1 CASE1 の気流分布 (図4)

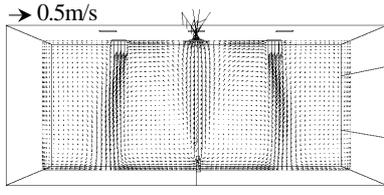
CASE1-1(全体換気のみ)では、天井の吸込口に向かう明確な気流はなく吸込口は典型的なポテンシャル流の状態である。CASE1-2(プッシュ気流)や CASE1-3(エアカーテン)では、吸込口に向う明確な流れが形成される。プッシュ気流とエアカーテンの気流の一部は吸込口の縁から天井面に沿って周囲に拡散する。吹出気流の周囲には循環流が形成される。



(1) CASE 1-1(全体換気のみ)

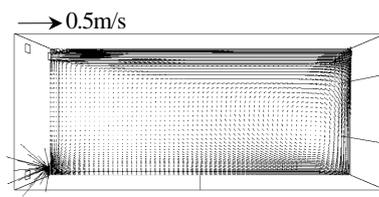


(2) CASE 1-2(プッシュ気流)

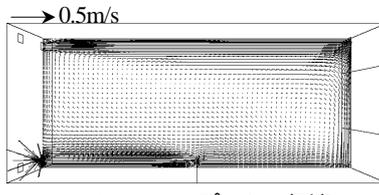


(3) CASE 1-3(エアカーテン)

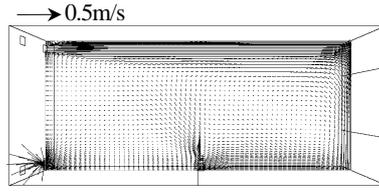
図4 気流分布 CASE 1



(1) CASE 2-1(全体換気のみ)

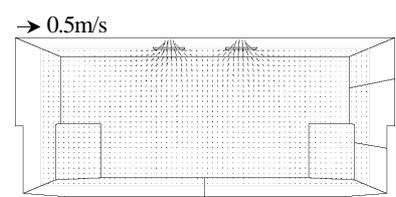


(2) CASE 2-2(プッシュ気流)

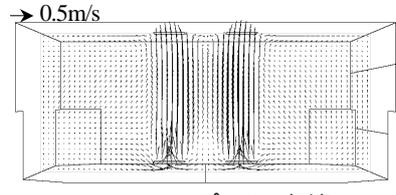


(3) CASE 2-3(エアカーテン)

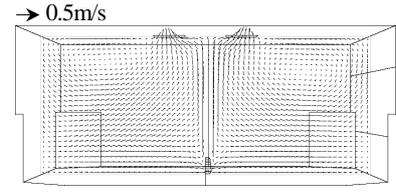
図5 気流分布 CASE 2



(1) CASE 3-1(全体換気のみ)



(2) CASE 3-2(プッシュ気流)



(3) CASE 3-3(エアカーテン)

図6 気流分布 CASE 3

4.2 CASE2の気流分布 (図5)

CASE2-1(全体換気のみ)では、室内に大循環流があり吸込口の周囲には明確な移流が確認されない。CASE2-2(プッシュ気流)では、作業域の床面に沿って吸込口に向う明確な流れが形成される。プッシュ気流の一部は吸込口上部の壁に沿い天井に向かって流れる。CASE2-3(エアカーテン)では、エアカーテンが斜め上方に流れている。吸込口に向かう明確な流れはない。

4.3 CASE3の気流分布 (図6)

CASE3-1(全体換気のみ)では、室内全体の気流は0.1m/s以下と極端に遅い。吹出気流は床面に沿って並行に流れ、室の中央で衝突し天井の吸込口に向かって上向きに流れる。CASE3-2(プッシュ気流)では、吸込口に向う明確な流れが生じる。プッシュ気流の一部は吸込口の縁から周囲に拡散していく。CASE3-3(エアカーテン)では、エアカーテンの気流は天井下部に達し吸込口に向かって流れる。作業域と非作業域にはエアカーテンにより、循環流が形成される。

5. 汚染質濃度場の解析結果

図7~9に濃度分布の解析結果を示す。結果の表示断面は図1~3に示す。汚染質の濃度は排気濃度(完全混合濃度)で無次元化している。居住域は床上1.8mとする。

5.1 CASE1の濃度分布 (図7)

CASE1-1(全体換気のみ)では、作業域の無次元濃度が0.9であり、非作業域は0.7~0.8である。室内の無次元濃度が1.0に近ことから汚染質は室内全体に拡散している。

CASE1-2(プッシュ気流)では、プッシュ気流部分の等濃度線が乱れていないことから、プッシュ気流は汚染質を制御し移流方向に輸送している。またプッシュ気流は作

業域の濃度を1.4~1.9に高めるが、非作業域のプッシュ気流近傍の濃度を0.2程度低下させている。

CASE1-3(エアカーテン)では、エアカーテンの気流部分の等濃度線が乱れず、プッシュ気流と同様に汚染質を移流方向に輸送する。また非作業域ではエアカーテン近傍の濃度が全体換気のみ比べて僅かに低下している。

5.2 CASE2の濃度分布 (図8)

CASE2-1(全体換気のみ)では、作業域の床近傍に無次元濃度2.0以上の高濃度領域があるが、非作業域の無次元濃度は0.1と極端に低い。CASE2-2(プッシュ気流)では、プッシュ気流が作業域の高濃度領域を解消するが、室全体の無次元濃度は0.5に上昇している。CASE2-3(エアカーテン)では、作業域と非作業域が分断され、非作業域は無次元濃度が0.4、作業域は0.7~1.2となる。

5.3 CASE3の濃度分布 (図9)

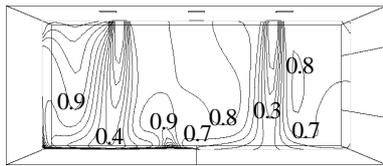
CASE3-1(全体換気のみ)では、置換換気の気流により空間が分断され、作業域では汚染質が拡散し無次元濃度は2.0以上となる。非作業域では無次元濃度が0.1以下となる。CASE3-2(プッシュ気流)では、作業域の濃度は低くなるが非作業域の濃度は0.3~0.5となる。CASE3-3(エアカーテン)では、空間は分断されるが無次元濃度は作業域が0.9~1.0であり、非作業域は0.8であり両方の領域に汚染質が拡散している。

6. 規準化居住域濃度による換気性状評価

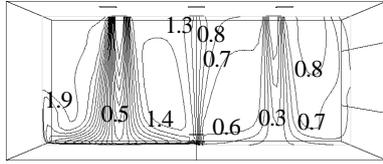
表5と図10に規準化居住域濃度 C_n の解析結果を示す。

6.1 CASE1(天井吹出・天井吸込)の場合

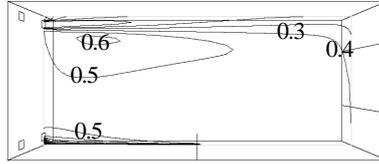
全体換気の場合の C_n は作業域および非作業域とも1.0前後であり室内は完全混合に近い状態であるが、プッシュ気流の設置により非作業域の C_n は約0.5となり換



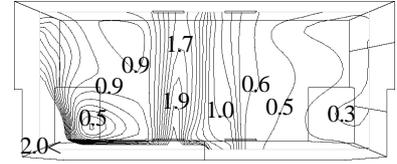
(1) CASE 1-1(全体換気のみ)



(1) CASE 2-1(全体換気のみ)



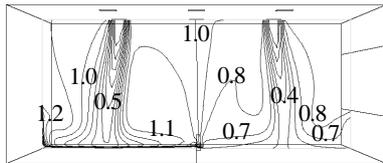
(1) CASE 3-1(全体換気のみ)



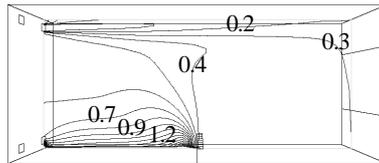
(2) CASE 1-2(プッシュ気流)

(2) CASE 2-2(プッシュ気流)

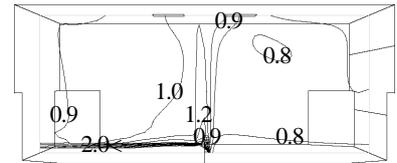
(2) CASE 3-2(プッシュ気流)



(3) CASE 1-3(エアカーテン)
図7 無次元濃度分布 CASE1



(3) CASE 2-3(エアカーテン)
図8 無次元濃度分布 CASE2



(3) CASE 3-3(エアカーテン)
図9 無次元濃度分布 CASE3

気効率が上がる。作業域は1.0を上回り換気効率、即ち汚染質の希釈効率が低下している。またエアカーテンの場合の C_n はプッシュ気流と同様な傾向を示し、全体換気の場合の C_n よりも作業域の C_n は小さく非作業域は大きい C_n となるが、その差はプッシュ気流よりも小さい。

6.2 CASE2 (壁上部吹出・壁下部吸込) の場合

全体換気の場合の C_n は作業域および非作業域とも0.5以下であり換気効率は非常に高い。プッシュ気流やエアカーテンを設置した場合の C_n はこれよりも大きくなり換気効率が低い印象を受けるが、全体換気の場合の作業域に高濃度領域があったことから室の換気性状を評価するには換気効率指標の C_n の他、よりミクロな指標を用いて確認する必要があると考えられる。

6.3 CASE3 (置換換気) の場合

全体換気の場合の場合は作業域の C_n が1.0を大きく上回るがプッシュ気流の設置により作業域の C_n が1.0を下回り発生汚染質の希釈効率が向上する。またエアカーテンの設置により作業域および非作業域の C_n は小さくなり、CASE3の中で最小値となる。

7. まとめ

プッシュ気流およびエアカーテンを設置することによる作業域・非作業域の空気質制御の可能性をCFDにより検討した結果、本解析条件下では以下の結果を得た。

- (1) プッシュ気流を適用した場合にはCASE1の非作業域とCASE3の作業域の C_n が改善された。
- (2) エアカーテンを適用した場合にはCASE1とCASE3の非作業域、CASE3の作業域の C_n が改善された。
- (3) プッシュ気流およびエアカーテンの気流の一部が吸込口の縁から周囲に拡散していたことからプッシュ気流の大きさや配置について検討する必要がある。

表5 規準化居住域濃度 C_n

CASE	作業域	非作業域
CASE 1-1 (全体換気のみ)	1.01	0.81
CASE 1-2 (プッシュ気流)	1.46	0.53
CASE 1-3 (エアカーテン)	1.18	0.74
CASE 2-1 (全体換気のみ)	0.55	0.08
CASE 2-2 (プッシュ気流)	0.94	0.51
CASE 2-3 (エアカーテン)	0.85	0.32
CASE 3-1 (全体換気のみ)	3.91	0.49
CASE 3-2 (プッシュ気流)	0.94	0.51
CASE 3-3 (エアカーテン)	0.85	0.32

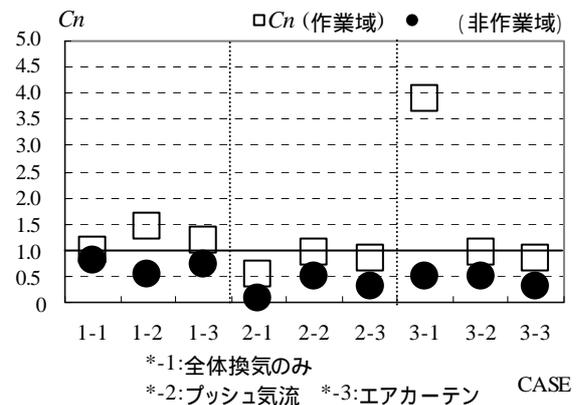


図10 規準化居住域濃度 C_n

注

- (1) 作業域の C_n は作業空間の床から床上1.8mの空間を居住域と仮定し居住域平均濃度 C_a を求めて C_n を算出している。同様に、非作業域の C_n は非作業空間の床から床上1.8mを居住域として C_n を算出している。
- (2) Re 数= UL/L の代表長さ L は室の高さ(5.4m)である。

参考文献

- (1) 空調調・衛生工学会:工場換気の理論と実践 1995.3
- (2) 空調調・衛生工学会規格 HASS102-1997, 換気基準・同解説(1997)