

不完全混合室内の居住域換気効率の評価に関する研究 (その4) CFD 解析による居住域平均濃度・PFR の検討

学生会員 ○伊藤一秀 (東京大学大学院)
正会員 加藤信介 (東京大学生産技術研究所)
同 村上周三 (東京大学生産技術研究所)
同 小林 光 (大成建設 (株))

1. 序

居住域の局所領域の Purging Flow Rate (以後 PFR) を汚染質の排出特性に基づき詳細に検討するには、汚染質輸送のラグランジュ解析の可能性を有す LES などの精密な CFD 解析が有効となる。また、各種の室条件により PFR がどのように変化するかを系統的に検討するには簡便な CFD による方法が有効である。ここではこれらの予備解析として前報^{1,2)}で示した精密模型実験に対応した標準 $k-\epsilon$ モデルに基づく流れ場の解析結果及び PFR 解析結果を示す。

2. PFR の数値シミュレーション解析

本研究では PFR に関し、その性状を詳細に検討する基礎解析と実際問題の適用を考慮する応用解析の2種類行う計画である。基礎及び応用解析で必要とされるシミュレーションの条件を以下に示す。

2.1 基礎 PFR 解析

(1) 流れ場解析 LES を基本とする。室内気流は流線が曲率を持つなど乱れの非等方的構造が平均流の性状に明確に影響する流れ場である³⁾。高精度の模型実験に対応するシミュレーションはこの乱れの非等方性を再現する必要がある。

(2) 拡散場解析 PFR は前報で解説したように評価対象領域から汚染質が気流に乗ってどのように排出されるかを評価する。即ち、評価対象領域で発生した汚染質の平均滞在時間、対象領域から排出された後再び領域に戻る確率(再帰率)等、汚染質のラグランジュ輸送解析が有効となる。これは RANS モデルでは対応できない⁴⁾。LES でこれを行えば、平均濃度その他、極大値等、濃度の時間変化・空間変化に係わる詳細な解析も可能となる。

2.2 応用 PFR 解析

LES は莫大な計算量を必要とする。LES 計算実行前の予備検討や室内条件が変化した場合の影響を系統的に検討する応用解析には、簡便な CFD 解析が有効となる。PFR は前報(その3)式(1)で示したように、汚染質発生量、評価対象領域内の平均汚染

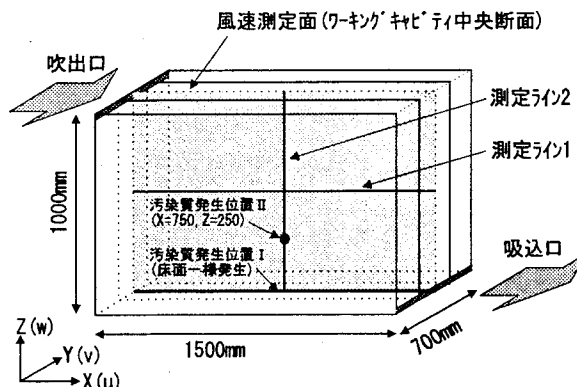
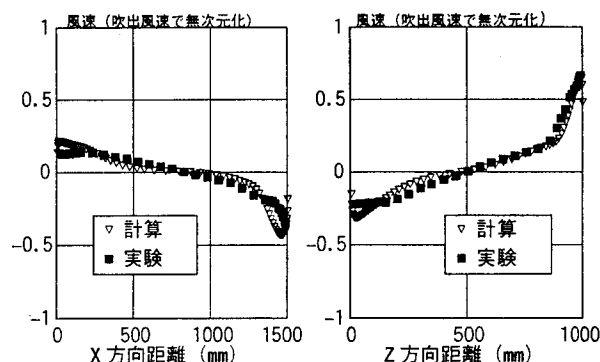


図1 2次元居室模型

表.1 計算及び解析条件 (ケース番号は前報と一致)

	2次元計算
解析ケース	CASE1, 2, 3 (実験に対応)
メッシュ分割	50(X)×1(Y)×50(Z)
差分スキーム	移流、拡散項共に SFCD ^{注2)}
流入境界	$U_{in}=3\text{m/s}$, $k_{in}=3/2 \cdot (U_{in} \times 0.0115)^2$, $\epsilon_{in}=C_u \cdot k_{in}^{3/2}/l_{in}$, 吹出し気流の乱れは実験結果と一致、 $l_{in}=0.002857\text{m}$ (吹出しスリット幅の1/7)
流出境界	$U_{out}=\text{mass flow boundary}$, k_{out} , ϵ_{out} はフリースリップ
壁面境界	速度は一般化対数則、



(1) w成分のX方向分布 (測定ライン1、図1) (2) u成分のZ方向分布 (測定ライン2)

図2 室中央風速分布

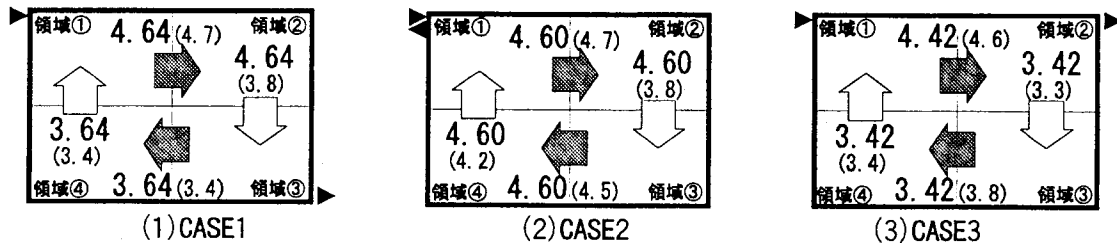


図3 ブロック間流量^{注4)}
(領域③+④を居住域と仮定、カッコ内は実験値)

質濃度で定まる。評価対象領域内の平均濃度がある程度の精度で算出されれば、これにより PFR を評価することも有効となる。今回は標準 k-ε モデルに基づく流れ場解析を用いて PFR 解析を行う。今回対象とした評価領域は充分大きく、室半分の居住域としている。

3. 予備 CFD 解析

LES による解析に先立ち、基本的な実験ケースに対応する数値解析を標準 k-ε モデルによって行い、流れ場・拡散場の解析精度や実験と比較検討する際の問題点等を確認する^{注1)}。特に本報では前報^{文1,2)}で検討した室内流れ場において、①床面から一様に汚染質を発生させた場合(汚染発生位置 I、図1)、②居住域の中心(X=750,Z=250mm の点)から汚染質を発生させた場合(汚染質発生位置 II)、の2種類の汚染質発生に関して各ケースの居住域平均濃度及び居住域 PFR を評価する。

4. 数値解析概要

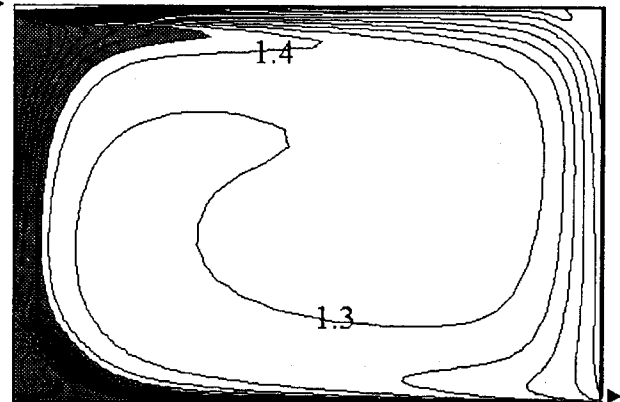
模型実験に対応する条件で流れ場を標準 k-ε モデルにより解析する。計算条件及び境界条件は表.1 参照。

5. 計算結果と PFR の試算

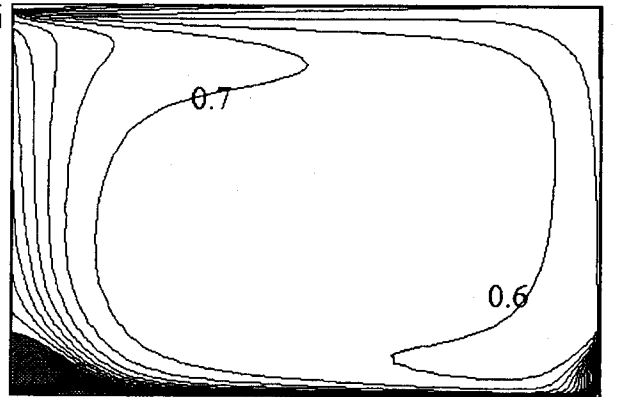
5.1 風速分布(図2) ここには示さないが各ケース共に大きな右回りの循環を形成し、隅角部において左回りの二次渦が確認され、前報に示した実験結果と大局的に一致した。また、室中央における w 成分の X 方向分布(測定ライン 1)及び u 成分の Z 方向分布(測定ライン 2)に関し、実験^{注3)}と計算は室の中央部分では比較的良く一致しているが、壁近傍において差異が多少大きくなっている(図2)。今後 LES により更に改良を加えていく予定である。

5.2 ブロック間の流量^{注4)}

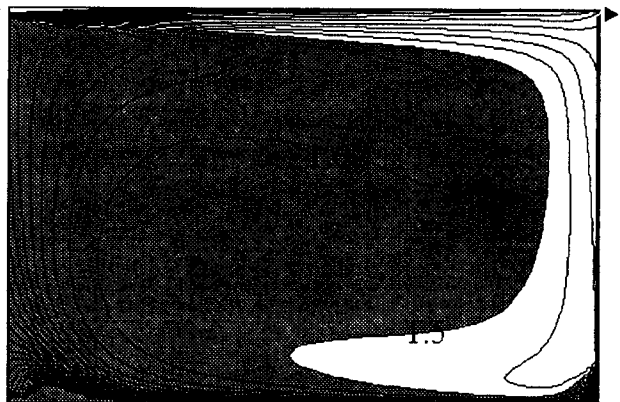
図3に、室を4分割した際の、ブロック間の空気の流れを、吹出風量を1.0として示した。ここでは領域(③+④)を居住域と設定している。計算では吹出・吸込流量を考慮すると当然領域間の流量収支は完全に保たれる。領域①→②間では、計算結果は実験に比べやや流量が小さくなっているが、これは実験では多少3次元性が残っていること、及



(1) CASE1



(2) CASE2



(3) CASE3

図4 汚染質濃度分布(汚染発生位置 I)
(汚染質床面一様発生、完全混合濃度により無次元化、濃度1.5以上をグレーで着色)

び流量算出の際の台形則による補間誤差や、k-εモデルが非等方性に起因する乱流輸送を再現できないため、循環流量に多少の誤差があることなどに起因すると思われる。

5.3 濃度分布

(1) 汚染質を床面一様発生させた場合

(発生位置 I) 図 4 に汚染質を床面一様発生させた場合の濃度分布を、完全混合濃度で無次元化して表示している。CASE3 が最も室内汚染質平均濃度が高く、CASE2 が最も低い。これは CASE3 は新鮮空気が床面に達する前に対向壁の吸込口より排出されるショートサーキット的傾向を有する流れ場であるのに対し、CASE2 は新鮮空気が室内を循環する傾向の強い流れ場であることに由来している。また、吹出気流が天井等への付着噴流となって室内を循環するため、室中央部に比べ、天井・壁・床面の近傍において風速の大きい流れ場となっている。そのため、床面から一様に発生した汚染質は床面近傍の循環流により比較的効果的に室外に排出されている。

(2) 汚染質を居住域中心から発生させた場合

(発生位置 II) 図 5 に汚染質を居住域中心 ($X=750, Z=250\text{mm}$) から発生させた場合の濃度分布を完全混合濃度で無次元化して表示する。(発生位置 I) の場合と同様に、CASE2 の室内汚染質平均濃度が最も低くなっており、この換気システムが最も効率よく汚染質を排出する。しかし、全てのケースでその室内平均濃度は(発生位置 I)の場合に比べ、上回っている。これは、壁面近傍と比較して、室中央部の風速が小さいため、壁から離れた位置 ($Z=250\text{mm}$) において発生している汚染質は、(発生位置 I) の場合ほど効果的に室外に排出されないためである。

5.4 PFR の試算

(1) 汚染質を床面一様発生させた場合

(発生位置 I) 居住域(領域③+④)の汚染質平均濃度及び PFR を表.2 に示す。濃度値は完全混合濃度で無次元化して表示している。ここで、汚染質発生量を 1 としているため PFR は汚染質平均濃度の逆数となる^{注5)}。各ケースとも室全体の PFR と居住域 PFR は近い値となっているが、これは居住域を通過して室全体を循環する流量が換気量の 3~4 倍あり汚染質が十分に攪拌されているからである。居住域では CASE2 の PFR が 1.39 と 1 を越えており、換気流量 1 以上の希釈(排出)効果があることを示している^{注6)}。また、CASE1 では換気流量 1 に対しその 4.64 倍の循環流量(図 3)が居住域に発生しているにもかかわらず居住域 PFR は 0.72 で、換気流

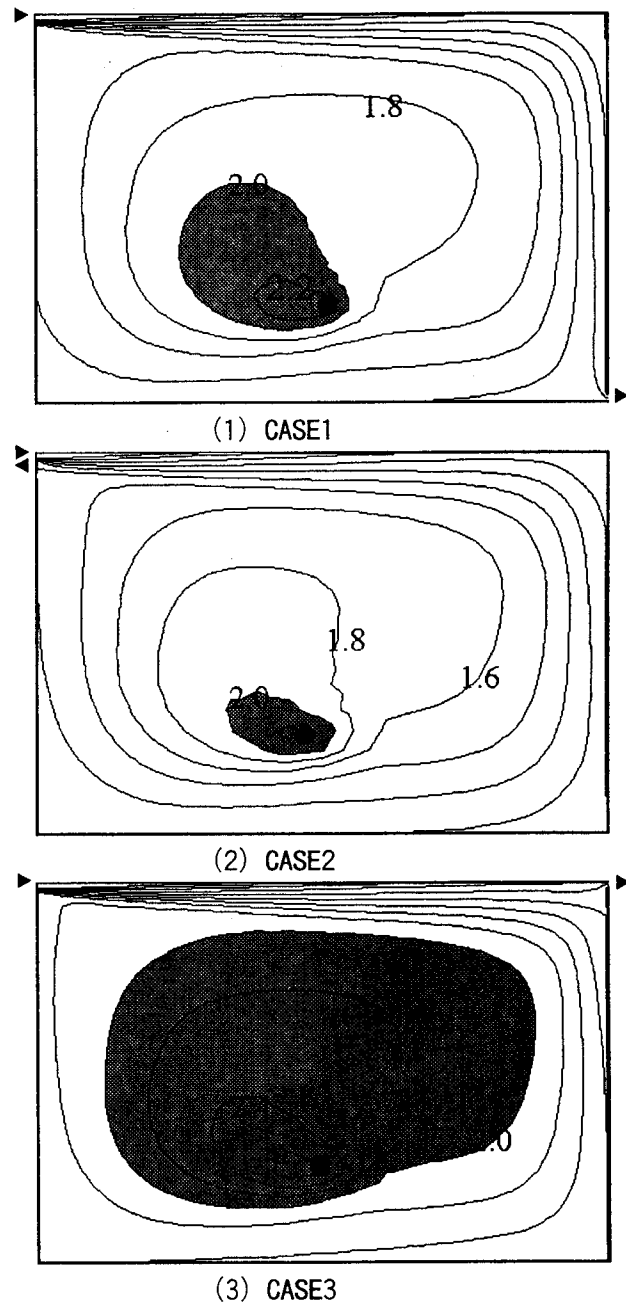


図 5 汚染質濃度分布 (汚染発生位置 II)

(汚染質居住域中心発生(●位置), 完全混合濃度により無次元化 濃度 2.0 以上をグレーで着色)

量の 7 割(居住域循環流量の 2 割)程度しか希釈効果がない。CASE3 も同様の傾向を示す。

(2) 汚染質を居住域中心から発生させた場合

(発生位置 II) 居住域(領域③+④)の汚染質平均濃度及び PFR を表.2 に示す。(発生位置 I)と同様に各ケースとも室全体の PFR と居住域 PFR は近い値となる。しかし床面一様発生に比べ、汚染質の発生位置 ($Z=250\text{mm}$) が室内循環流の中心に近づき、風速が緩やかなため汚染質の効果的な排出が行われない。そのため全てのケースで PFR が低下して

いる。これは室内循環流の相対位置でその点の換気性能が大きく異なり、発生した汚染質の排出能力が大きく異なっていることを示す。PFR は居住域・室全体に関わらず、全てのケースで1を下回っており、換気流量1に対して、その5~7割程度の希釈(排出)効果しかもたない。CASE2の換気システムは(発生位置1)の条件ではPFRが1を越え、効果的に汚染質を排出したが、(発生位置II)の条件ではCASE1, CASE3の換気システムと大差ない結果となった。また、CASE1では換気流量1に対し居住域を循環する流量はその3.64倍発生しているにもかかわらず、居住域PFRは0.62で、換気流量の6割程度しか希釈効果がない。CASE3も同様の傾向である。CASE2では換気流量1に対し居住域循環流量が4.60倍と大きくなっているのにも関わらず、居住域PFRはCASE1, CASE3とほとんど変わらない結果となった^{注7)}。

5.5 考察 CASE2における床面の汚染質発生を除けば、試算された居住域PFRは汚染質発生位置によりそれ程大きな差異を示すものではなく、0.63±0.10の範囲に収まる。居住域全体の換気性状を評価する場合、様々な汚染質発生状況をカバーする代表性の高い換気効率指標が必要とされる。そのため、①汚染質発生位置の差異が居住域PFRの評価に与える影響を検討すること、②代表性の高い汚染質発生位置の考察、が必要となる。汚染質発生位置を居住域全体一様と仮定することなどを含め、今後検討を進めたい。

6. 結論

- (1) 精密実験と標準k-εモデルを用いた数値解析では、中央鉛直断面での風速分布は概ね一致するが、壁、床面近傍では多少差が生じた。
- (2) 数値解析に基づき居住域のPFRを試算した結果、汚染質を床面一様発生させた場合では、①居

表.2 平均濃度・PFR

(1) CASE1

平均濃度	床面一様発生	居住域中心発生
室平均濃度	1.33	1.58
居住域平均濃度	1.39	1.62
PFR	床面一様発生	居住域中心発生
室全体 PFR	0.75	0.63
居住域 PFR	0.72	0.62

(2) CASE2

平均濃度	床面一様発生	居住域中心発生
室平均濃度	0.66	1.43
居住域平均濃度	0.72	1.45
PFR	床面一様発生	居住域中心発生
室全体 PFR	1.52	0.70
居住域 PFR	1.39	0.69

(3) CASE3

平均濃度	床面一様発生	居住域中心発生
室平均濃度	1.61	1.90
居住域平均濃度	1.69	1.94
PFR	床面一様発生	居住域中心発生
室全体 PFR	0.62	0.53
居住域 PFR	0.59	0.52

住域を室内循環流の全てが通過し、②居住域の高濃度が効率的に排出される、CASE2の換気システムが最も効率よく居住域の汚染質を排出し、吹出風量基準のPFRは1.5となった。(3)居住域中心位置(X=750, Z=250mm)で汚染質を発生させた場合もCASE2が最も効率的に汚染質を排出したが、吹出風量基準のPFRは1を下回り、汚染質の希釈(排出)効果は小さくなった。(4)居住域PFRは居住域内の汚染質発生位置により異なる値を示し、空間分布を持つ。しかし、局所排気効率が効果的に機能する例外的ケース(CASE2, 床面一様発生)を除けば、その変化は1のオーダー以下である。

(5) 今後空間の各位置におけるPFRの構造をより詳細に解析するため、LESによる解析を行う予定である。

[注] 注1: 前報²⁾で標準k-εモデルを用いた3次元解析を行っている。風速分布に関しては、室中央においてかなり良く一致するが、壁面近傍では比較的大きな差異が観察された。また、乱流エネルギーkは実験値に比べ計算値はやや小さい値となった。渦動粘性係数 ν_t は実験では壁近傍で大きくなるが、計算では全領域にわたって一様な結果となった。注2: 流体解析ソフトSTAR-CDにおける改良型中心差分で、Self-Filtered Central Differencingの略。局所的に中心差分と風上差分のHYBRIDを用いている。注3: 実験は前報のCASE1。ガットキャビティに比べ、ワキングキャビティ内の静圧をやや高めにし、より2次元性を確保した状態で測定した結果と比較する。他の条件は前報と同様。測定ラインは図1参照。注4: 換気流量を1として基準化して表示。注5: $PFR=q/C$ と定義される。ここで、汚染質発生量を1としているので、PFRは汚染質平均濃度Cの逆数と等しくなる。注6: PFRが希釈を表すのではなく汚染質の排出効率を示すため値が1を越えることは不合理ではない。CASE2の場合、発生した汚染質は下流の吹出口より室へ拡散する前に排出されるためPFRが大きくなる。注7: 流れ場が与えられている場合、居住域PFRは居住域を与えれば自動的にその値が定まるのではなく、居住域を与え更に汚染質発生位置を与えると対応するPFRが定まる。居住域全体のPFRという概念は居住域内で汚染質一様発生という概念に対応するものとなる。

[記号] U, V, W : x, y, z 方向の瞬間風速(m/s, 前報図1参照) u, v, w : x, y, z 方向の風速変動成分 (m/s)

k : 乱流エネルギー(m²/s²) ε : 乱流エネルギー散逸率(m²/s³) ν_t : 渦動粘性係数(m²/s) l_m : 乱れの長さスケール(m)

[参考文献] 文1) 小林光、村上周三、加藤信介、伊藤一秀: 不完全混合室内の居住域換気効率の評価に関する研究(その1)、Purging Flow Rate 検討用精密室内気流模型実験、建築学会年次大会、1996.9 文2) 伊藤一秀、村上周三、加藤信介、小林光: 不完全混合室内の居住域換気効率の評価に関する研究(その2)、流れ場・濃度場の予備CFD解析と居住域PFRの検討、建築学会年次大会、文3) 数値流体力学編集委員会編、3乱流解析、東京大学出版会 文4) D., Mergui, S. and Niculae, C., 1992, Confidence Turbulent Mixed Convection in the Presence of a Horizontal Buoyant Wall Jet, HTD, Vol.213, Fundamentals of Mixed Convection, ASME