

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

レイノルズ効果 数値解析 Purging Flow Rate

正会員 ○伊藤一秀*1 同 村上周三*2
同 加藤信介*3 同 小林 光*4

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 LES 解析の予備解析として、前報で示した精密模型実験に対応した標準 k-ε 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。室内気流で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²⁾。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も再現するモデルが必要となる。(2)拡散場解析 PFR の解析は、仮想領域で発生した汚染質の平均滞在時間、仮想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ず、LES 等が必要とされる²⁾。

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。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。

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 2 次元及び 3 次元の数値解析を標準 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。

(1)流れ場の 2 次元性 模型実験では噴流が天井に沿って流れ、拡散する過程で気流分布に 3 次元性が見られた。この 3 次元性は、吹出噴流と天井面の成す僅かな角度変化に強く影響を受けることを実験的に確認している³⁾。前報 CASE1 で観察された流れ場に関し、標準 k-ε モデルにより 3 次元性の強い流れ場が再現されるか否かを検討する。

(2)居住域汚染質平均濃度と PFR 前報で検討した室内流れ場において床面から一様に汚染質を発生させ、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。流れの 2 次元性の検討には 3 次元解析、居住域汚染質平均濃度と PFR の解析には 2 次元解析を用いた。

5. 実験及び 3 次元数値解析結果と考察 5.1 CASE1 実験結果²⁾ 図 1~3 に平均風速の測定値(□:吹出風速 3m/s, ▽:吹出風速 0.4m/s)及び数値解析結果(●:吹出風速 3m/s)を示す。これらの値は何れも吹出風速で無次元化している。測定高さが噴流中心より下側に位置し、噴流に誘引される流れ領域である測定ライン1(図 2)では、吹出し風速 3m/s の場合³⁾分布は 3 次元性を示し、中心(Y=150mm)で風速が大きくなる凸型の分布となった。吹出風速 0.4m/s の場合は、ほぼ 2 次元的となり一様な風速分布となり、流れ場のレイノルズ数依存性効果が現れた。また吹出風速 0.4m/s の場合の風速は 3m/s の場合に比べ大変小さい値となった。測定ライン2においては、吹出し風速 3m/s 及び 0.4m/s の両者ともにほぼ一様な風速分布となった。

5.2 数値解析結果 (1)風速分布(図 2~5) 標準型 k-ε モデルによる天井付近の Y 方向風速分布は、壁面近傍で風速が大きくなり、実験結果とは大きく異なる傾向を示す。床付近では風速分布はほぼ一様で実験・計算の傾向は一致するが、風速の大きさに差が現れた。測定ライン3,4 では両者は概ね一致しているが、壁面近傍で差が見られる。

(2)乱流エネルギー k の分布⁵⁾(図 6,7) 実験結果は、x, z 方向の乱流変動 u'^2, w'^2 の測定値より算出した。測定値の無い y 方向については $v'^2 = (u'^2 + w'^2) / 2$ と仮定した。測定ライン3,4 の分布において計算は実験に概ね一致しているが、計算値が実験に比べやや小さい。(3)渦動粘性係数 ν_t の分布(図 8,9)⁵⁾ 測定ライン3,4 で実験結果は共に壁面近傍で大きくなるのに対し、数値解析では全域でほぼ一様で且つ小さな値を示す。 5.3 考察 標準 k-ε

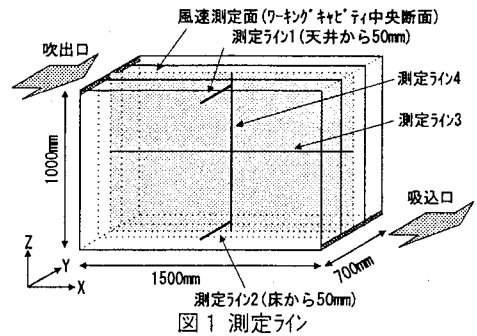


図 1 測定ライン

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	3次元計算
解析ケース	CASE1, 2, 3	CASE1
メッシュ分割	50(X)×1(Y)×50(Z)	77(X)×24(Y)×69(Z)
差分システム	移流、拡散項共に HYBRID	移流、拡散項共に SFCD
境界条件	流入 $U_{in}=3\text{m/s}$, $k_{in}=3/2 \cdot (U_{in} \times 0.0115)^2$, $\epsilon_{in}=C_{\epsilon} \cdot k_{in}^{3/2}/l_{in}$, 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 $U_{out}=\text{mass flow boundary}$, k_{out} , ϵ_{out} は7-スリップ
壁面	速度は一般化対数則、キヤビティ中央断面は対称面	
その他	汚染質床面一様発生で濃度 Y 方向は空間の対称性を考慮し、半分の領域のみ生=換気流量)解析	

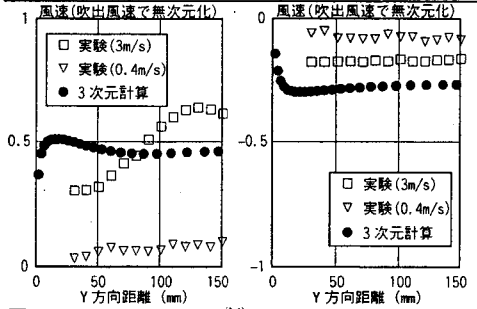


図 2 噴流域水平風速分布 (u 方向、測定ライン1) 図 3 噴流域水平風速分布 (u 方向、測定ライン2)

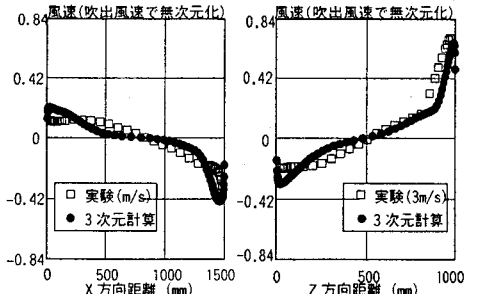


図 4 室中央水平風速分布 (v 方向、測定ライン3) 図 5 室中央鉛直風速分布 (u 方向、測定ライン4)

Study on Evaluation of Ventilation Effectiveness of Occupied Space in Room (part 2)

Preriminary Analysis of Contamination Distribution and PFR in Model Room

ITO KAZUhide, MURAKAMI SHUZO and KATO SINSUKE and KOBAYASHI HIKARU

モデルを用いた解析では今回の実験条件^{注1)}で測定された噴流の拡散領域での3次元の性状を示さず、壁近傍を除き2次元性の高い性状を示す。しかし、実験で噴流を多少上向きに吹出した場合、実験とk-εは良く対応する。今後、実験及び対応するCFDに基づき、より詳しく解析する予定である。

6. 2次元計算結果とPFRの試算(CASE1~3に対応するk-ε解析) (1)風速分布 ここには示さぬが各ケース共に大きな右回りの循環を形成し、隅各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は一致した。(2)濃度分布 図10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ある。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を示している。(3)ブロック間の流量^{注6)} 図11に、室を4分割した際の、ブロック間の空気の流量を、吹出し風量を1.0として示した。計算結果は実験に比べ流量が小さくなっているが、これは実験では3次元流が生じていることや、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。(4)PFRの試算 居住域(領域③+④)の汚染質平均濃度及びPFRを図11下欄に示す。濃度値は完全混合濃度で無次元化して表示してある。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7)}。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の汚染質平均濃度が最も低くなっている。またPFRで見るとCASE2の場合の値が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8)}。

また、CASE1では換気流量1に対しその4.64倍の循環流量が発生しているにもかかわらず居住域PFRは0.72で、換気流量の7割程度しか希釈効果がない。CASE3も同様の傾向である。

7. 結論 (1)今回の実験では、吹出し風速を変化させると模型内の流れ場も変化し、レイノルズ効果が現れた。(2)吹出風速が3m/sの場合、天井面に平行に吹出した場合、吹出噴流は下流で凸型となり、3次元性を示した。(3)吹出風速を3m/sとした場合の実験と標準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、噴流拡散域水平方向風速分布及び風速の大きさに関しては差が現れた。(4)居住域のPFRを試算した結果、①居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た。(5)今後より正しく流れ場を再現し、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。室内に家具等がある場合等についても検討を加える。

[注] 注1: 前報で報告した実験ケースは、吹出ノズル中心軸を天井面に平行にセットした場合に得られた結果である。なお、噴流衝突域の流れ場は吹出ノズル中心軸を天井面と平行ではなく、僅かに天井面に向かってセットすると2次元性が高くなる傾向を示した。しかしその詳細は今後検討の予定である。注2: 実験は前報のCASE1。吹出風速を3m/sと0.4m/sの2種類で行った。他の条件は前報と同様。測定ラインは図1参照。測定ライン1及び測定ライン2はウキングキャピティのみ測定。注3: 吹出し幅を代表長さとして、吹出し風速3m/sの場合のレイノルズ数は4200、0.4m/sの場合は560である。また、0.4m/sはDr. Blayらのスポット吹出しを用いた実験とキャピティX方向長さを代表長さとしてレイノルズ数を一致させたときの風速。また吹出し風速3m/sの場合、吹出し角度を少し上向きにとると2次元性流れ場となるが確認されている。注4: 図7・8は図の上側がウキングキャピティとガードキャピティ境界面(か)断面、下側がウキングキャピティ中心断面。注5: 実験のk及びνは以下のように算出 $k=1/2 \cdot \langle u'u' \rangle = 1/2 \cdot \langle u'^2 + w'^2 + 1/2 \cdot (u' + w')^2 \rangle$ 、 $\nu = -\langle u'u \rangle / (dW/dX)$ 。測定ライン3では $dU/dZ=0$ と仮定 $\nu = -\langle u'u \rangle / (dU/dZ)$ 。測定ライン4では $dW/dX=0$ と仮定。注6: 換気流量を1として基準化して表示。注7: $PFR=q/C$ 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8: 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。CASE2の場合、発生した汚染質は室へ拡散する前に排出されるためPFRが大きくなる。**[記号]** U, V, W: x, y, z方向の瞬間風速(前報図1参照) u, v, w: x, y, z方向の風速変動成分 k: 乱流エネルギー ε: 乱流分散係数 ν: 渦動粘性係数 l: 乱れの長さスケール **[参考文献]** 文1)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2), D. Mergui, S. Sand Niculae, C., 1992, Confidence Turbulent Mixed Convection in the Presence of a Horizontal Buoyant Wall Let. HTD, Vol.213, Fundamentals of Mixed Convection, ASME

[謝辞] 本研究は Sandberg 氏との共同研究の一環として行われている。同氏のご助言に対し記して謝意を表する。

*1 東京大学大学院
*2 東京大学生産技術研究所教授・工博
*3 東京大学生産技術研究所助教授・工博
*4 大成建設(株)・工博

Graduate School, University of Tokyo
Prof., Institute of Industrial Science, University of Tokyo, Dr. Eng.
Assoc. Prof., Institute of Industrial Science, University of Tokyo, Dr. Eng.
Taisei Corporation, Dr. Eng.

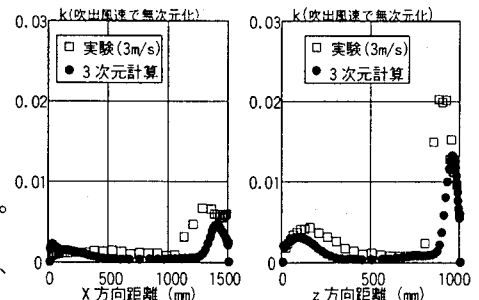


図6 kの水平分布 (測定ライン3)

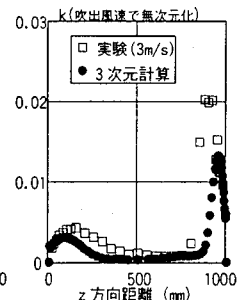


図7 kの鉛直分布 (測定ライン4)

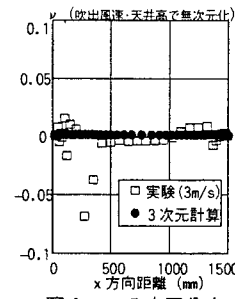


図8 νの水平分布 (測定ライン3)

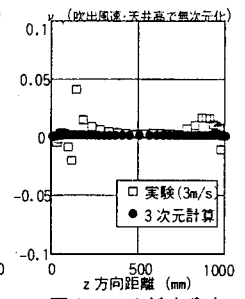


図9 νの鉛直分布 (測定ライン4)

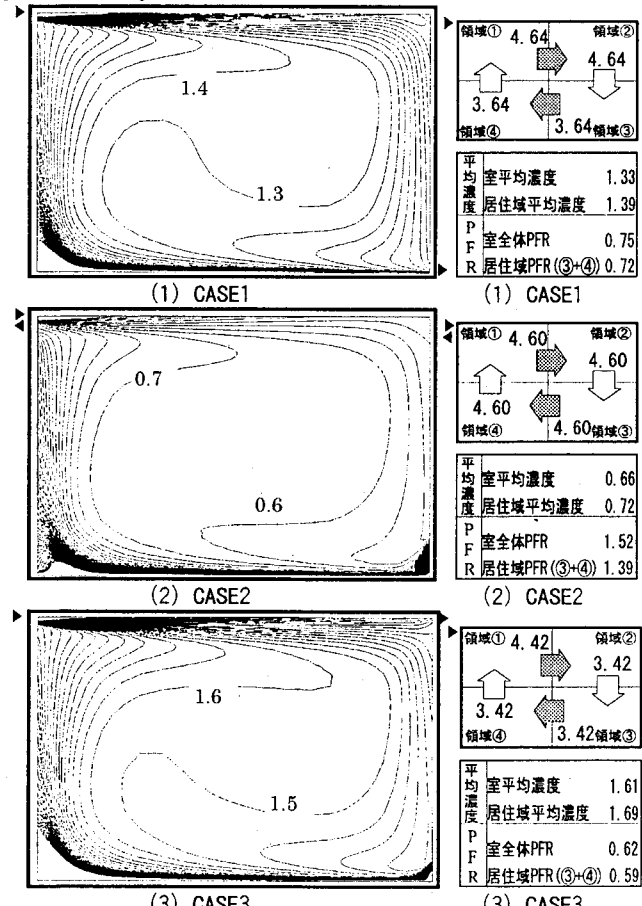


図10 汚染質濃度分布図 (CFDによる、完全混合濃度により無次元化)

領域①	4.64	領域②	4.64
領域③	3.64	領域④	3.64
平均濃度	1.33		
居住域平均濃度	1.39		
P			
F	0.75		
R	居住域PFR(③+④) 0.72		

(1) CASE1

領域①	4.60	領域②	4.60
領域③	4.60	領域④	4.60
平均濃度	0.66		
居住域平均濃度	0.72		
P			
F	1.52		
R	居住域PFR(③+④) 1.39		

(2) CASE2

領域①	4.42	領域②	3.42
領域③	3.42	領域④	3.42
平均濃度	1.61		
居住域平均濃度	1.69		
P			
F	0.62		
R	居住域PFR(③+④) 0.59		

(3) CASE3

図11 ブロック間流量