

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5) 精密模型を用いた室内気流測定 - 居住域に障害物がある場合の検討

正会員 ○鈴木信夫¹⁾ 正会員 伊藤一秀²⁾
同 加藤信介³⁾ 同 小林 光⁴⁾
同 村上周三⁵⁾

1. 序

前報^{文1,2,3,4)}では、居住域の汚染質平均濃度を評価するための指標として Purging Flow Rate(以降 PFR)の概念を導入すると共に、室内の気流性状の変化が居住域の PFR に与える影響を検討する目的で精密室内気流模型実験を行い、吹出・吸込口位置を変化させた場合の気流測定結果を報告した。本報ではさらに居住域に障害物(Partition)がある場合、及び室内に温度差がある場合について気流測定を行ったので、その結果を報告する。

2. PFR の定義

既報^{文1,3)}で示したように、PFR とは、解析対象として局所的に設定された領域内(PFR の評価対象領域:室内に仮想的に設定される小又は中の閉空間)に対する実質的な換気空気の入流量(又は排出量)を示すもので、以下のように定義される。

$$PFR = \frac{q}{C} \quad (1)$$

PFR:対象領域の Purging Flow Rate[m³/s],
q :対象領域内の汚染質発生率[m³/s],^{文1)}
C :対象領域内の汚染質の平均濃度[-]

PFR は評価対象領域の大きさ・位置及び汚染質発生位置によりその値が変化する。PFR 評価対象領域の汚染質平均濃度は、その領域で発生した汚染質の平均滞在時間に比例する^{文6,7) 注1)}。即ち PFR は評価対象領域で発生した汚染質がどの程度その領域に滞在するか、また一度その領域から流出しても再び室内気流により対象領域に還流してくる割合はどの程度かを示す汚染質の排出効率を示す指標になっている。この観点より、LES 解析等の瞬時瞬時の流れの変動を扱うことの出来る CFD と汚染質の移流拡散を Lagrange 的に追跡することにより、室内に放たれた無数の粒子の追跡を行い、各瞬間の粒子の挙動の情報を得ることで PFR を計算することも可能である。このように粒子の挙動を用いて PFR の定義を再考すると、以下のようになる。

$$PFR = \frac{V}{VF \times T} \quad (2)$$

PFR:対象領域の Purging Flow Rate[m³/s],
V :対象領域の容積[m³]
VF:平均 Visitation Frequency (平均訪問率)[-]
T :対象領域内での粒子の平均滞在時間[s]

平均 Visitation Frequency(平均訪問率)とは、PFR 評価対象領域に入った粒子が平均的に対象領域に何回存在したかを示している。LES によれば個々の粒子の Visitation Frequency が解析できるため、

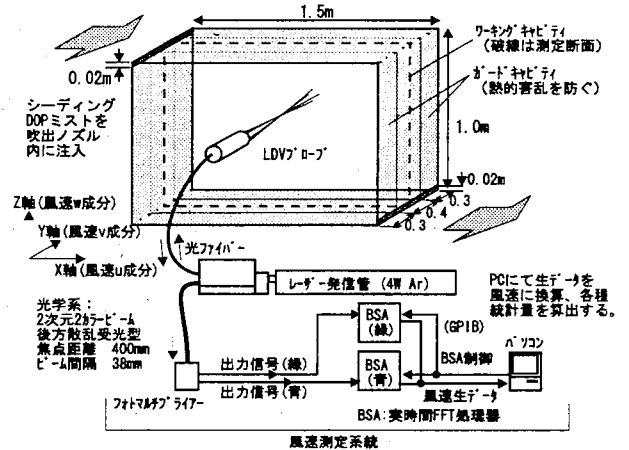


図1 居室模型の構成と LDV システム

表.1 CFD による Visitation Frequency 解析

Visitation Frequency は LES のみならず対象領域内での一様性を仮定すれば、RANS モデルでも解析が可能である。対象領域 V 内で汚染質が q[m³/s]だけ定常発生し、領域 V 内では完全拡散している状態を考える。流れ場が定常状態になっている時、領域 V に定常的に Δq[m³/s]の流入汚染質があると仮定する。

汚染質発生量 q の内、領域外に排出された後、常に α (α < 1)の確率で領域 V に戻ってくるものがあるとすると、以下の等式が成り立つ。

$$q\alpha + q\alpha^2 + q\alpha^3 + \dots + q\alpha^n = \Delta q \quad (1)$$

$$q\alpha(1 + \alpha + \alpha^2 + \dots + \alpha^{n-1}) = \Delta q \quad (2)$$

ここで、n→∞のとき

$$(1 + \alpha + \alpha^2 + \dots + \alpha^{n-1}) = 1 / (1 - \alpha) \text{ となり、発生汚染質}$$

が対象領域内で一様拡散する場合の平均 Visitation Frequency となる。

$$VF = 1 / (1 - \alpha) \quad (3)$$

(2)(3)式より

$$\alpha = \Delta q / (q + \Delta q) \quad (4)$$

(3)(4)式より

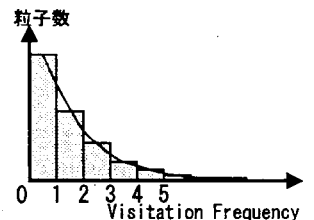
$$VF = (q + \Delta q) / q \quad (5)$$

対象領域 V での一様性を

仮定すれば RANS モデル等に

図2 VF 分布

によるシミュレーションでも Δq を評価することが可能なため、(5)式により平均 Visitation Frequency が求められる。実際の拡散場では汚染質が対象領域 V に再帰した場所により、再び V に戻ってくる確率 α は異なることが予想されるため、Visitation を(1)式のように簡単に仮定することは出来ず、発生汚染質を Lagrange 的に追跡できる LES シミュレーションが唯一、詳細な解析を可能とする。



その総合的な分布を調べることが可能である(表.1、図2)。この定義によれば汚染質発生源がPFR評価対象領域に含まれるという前提に依存しないことになり、一度の解析でPFR分布を求めることも可能となる。

3. 居住域換気効率の評価

居住域の換気効率は、居住域平均濃度もしくは居住域PFRにより実用的な評価が可能である。居住域PFRに着目した場合、(2)式で示した汚染質の平均Visitation Frequencyがどのようになるかは室内の換気設計を評価する上で重要となる。汚染質の平均Visitation Frequencyが高い場合は、居住域から排出された汚染質が円滑に室内から排出されず、再び環流してくることを示し、居住域のいわば下流側の換気設計に問題があることを意味する。平均Visitation Frequencyが低ければ、相対的に居住域は室内流れ場において風上側にあることを意味し、好ましい設計であるといえる。PFRの構造を調べる上で、Visitation Frequencyの分布に着目しどの汚染質発生位置でVisitation Frequencyが高くなるかを調べることは重要であり、これを精度良く解析するにはLESが唯一の方法となる(表.1)。なおRANSでは居住域で汚染質が発生する場合、居住域に流入する汚染質fluxが評価されるので、ある程度の精度で平均Visitation Frequencyを求めることが出来る(表.1)。

4. 実験概要

(1)実験目的 PFRの解析は上記したように発生汚染質のラグランジェ拡散過程の解析可能性を有するLES(Large Eddy Simulation)によることが期待される。LESによる気流解析の検証となり得る、また実験的なPFR解析の基礎となる精密な気流実験を行う。解析の便宜のため、できるだけ単純な流れ性状とするために2次元の室内気流を対象とし、また居住域のPFRに影響を与える各種要因(吹出・吸込口位置、室内障害物、温度差等)に対処する実験システムとする。

(2)模型概要(図1参照) 模型は居室をモデル化したもので $XY \times Z = 1.5m \times 0.3m \times 1.0m$ 。模型空間の下部半分を居住域と想定する。Y方向に均一な2次元の流れ場を形成することを意図し、キャビティ幅のスロット状吹出口と吸込口を備える。吹出口、吸込口は共に高さ20mmのスロット状である。この吹出、吸込口の取り付け位置は変更可能で、様々な換気性状を作ることができる。測定はこの長方形キャビティで行い、これをワーキングキャビティと称する。ワーキングキャビティを熱的にガードするため、そのY方向両脇に同じ構成のガードキャビティ(但しY方向幅0.2m)を設け、ワーキングキャビティを挟み込む。この構成によって、ワーキングキャビティ

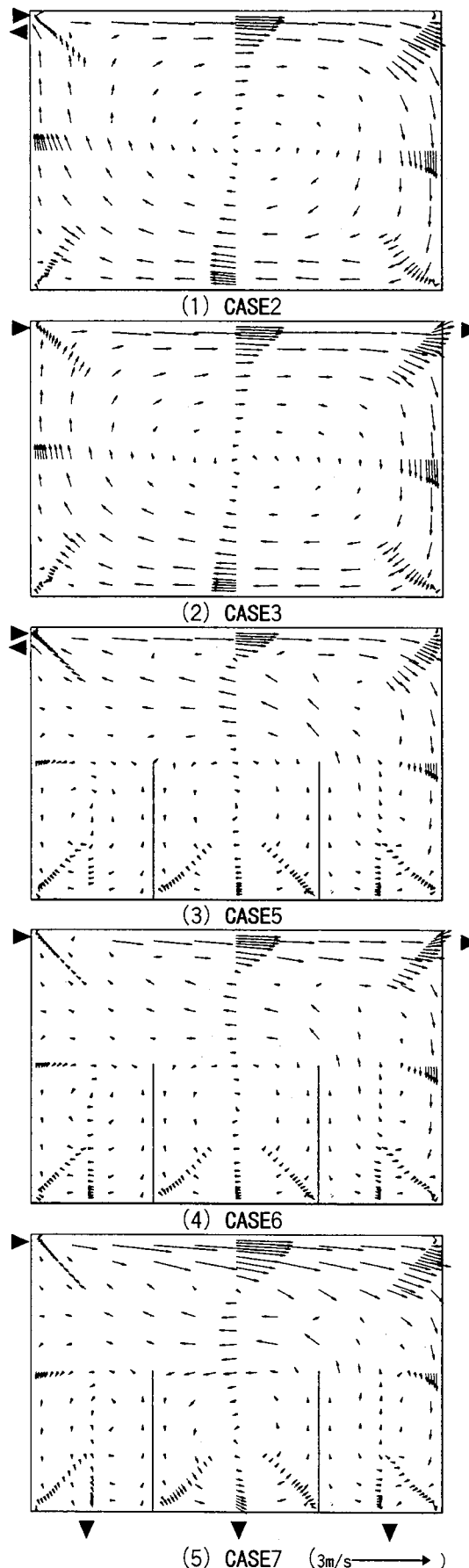


図3 室中央断面風速分布

ィのY方向の境界において、熱の勾配0の条件を作出する。また、天井・床・壁(2面)の各面は10枚のアルミ製通水パネルにより構成されており、温度制御されたブラインを送ることで模型内表面温度²⁾を制御する。通水パネルは組み合わせにより3系統でブラインが供給される(一系統当たり3l/min)。(3)風速測定 本研究では主に2次元のLDV(図1)を用いて風速を測定³⁾した。データ数は15000個以上を確保しているが、サンプリング間隔は不等間隔である。シーディング粒子にはフタル酸ジオクチル(DOP)ミストを用いた⁴⁾。

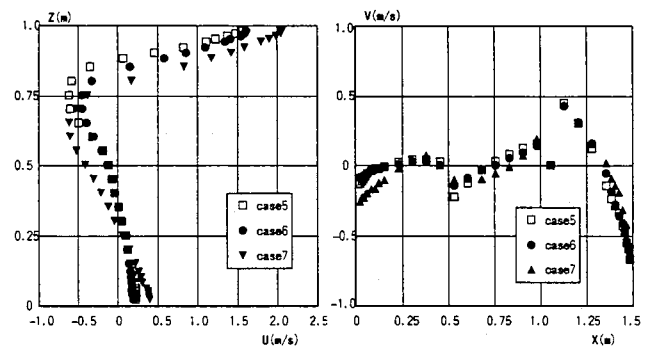
(4)測定ケース 居住域に2ヶ所障害物を設置し、吹出・吸込口位置を変えることにより3ケース設定(図3,5参照、CASE5,6,7)した。居住域の障害物に囲まれた空間は左より{居住域①、居住域②、居住域③}と定義する(図5参照)。天井面位置の吹出口に対し、CASE5は吹出口直下に吸込口を設置したケース、CASE6は吹出口対向壁の天井面位置に吸込口を設置したケース、CASE7は居住域①~③の各々に吸込口を設置したケースである。測定位置は何れもワーキングキャビティ中央断面(図1)である。また、気流分布のY方向の2次元性に関しては既報³⁾を参照。

(5)実験条件 吹出風速は約3m/sで、模型内は等温である。吹出空気及び模型内表面を約25℃に制御、吹出空気温度、表面温度測定結果のばらつきは最大でも1℃程度であった。

5. 実験結果、考察

(1)吹出噴流・流れの2次元性 吹出噴流、及びキャビティ内の流れは高い2次元性を示した。詳細は既報^{1,3)}参照。

(2)室内中央断面風速分布(図3,4) 障害物の無いケース(CASE2~3)、及び居住域に障害物があるケース(CASE5~7)のワーキングキャビティ中央断面における風速測定結果を示す。室内に障害物が無いケース(CASE2~3)では、各ケースとも右回りの大きな循環が観察され、キャビティ隅各部では大きな循環とは逆向きの二次渦が観察される(図3(1),(2))。また、居住域に障害物があるケース(CASE5~7)では、どのケースにおいても天井に付着し循環してきた気流が、吹出口対向壁に沿って{居住域③}に流入するため、{居住域③}では右回りの循環流が生じている。{居住域①、②}では、それとは逆の左回りの循環流が生じている。また、キャビティ隅各部、及び障害物の隅各部では二次渦も観察される。CASE5とCASE6を比較すると、全体の流れ場に大きな相違点は見られないが、吸込口を居住域①~③の各々に設けたCASE7では、障害物で囲まれた居住域



(1)u成分のZ方向分布 (2)w成分のX方向分布
(X=750, Z=0~1000mm) (Z=500, X=0~1500mm)

図4 室中央断面風速分布

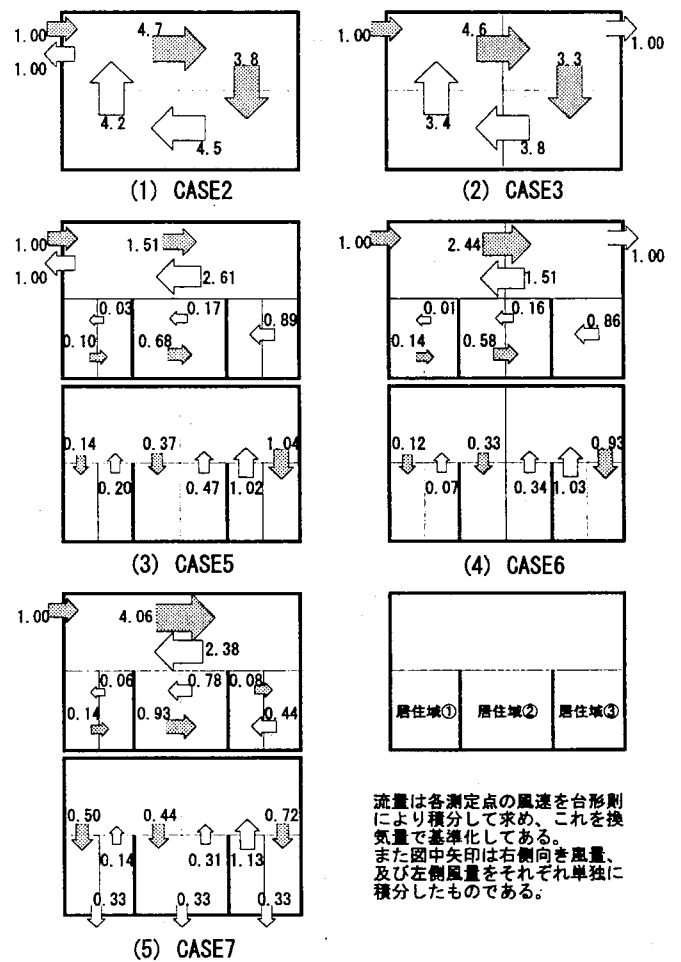


図5 ブロック間流量

内でCASE5、CASE6に比べ強い循環流が生じている。また、室上部での風速も大きくなっている。図4にu成分のZ方向分布を示す。CASE5とCASE6は同じ様な風速分布を示しているが、CASE7は天井面、及び床面付近での風速が他に比べ大きくなっており、強い循環流が生じていることが観察される。w成分のX方向分布に関してはどのケースも同じ様

な風速分布を示しているが、最も吹出気流が届きにくいと思われる吹出側壁面($X=0\text{mm}$)付近においてCASE7の風速が最も大きくなっている。

(3) ブロック間の流量(図5) 吹出口から流入する換気流量に対して、模型内でどの程度の循環流量が生じているか、特に模型空間の下部居住域に流入する流量を解析する。このため、模型の $Z=0\sim 500\text{mm}$ の領域を居住域と想定し、居住域と室上部空間の境界面における流入量を算出し、図5に示す。流量は各測定点の風速を台形則により積分して求め、これを換気量で基準化した。

(3-1) 障害物がある場合と無い場合の比較(図5(1)~(4))

CASE2及びCASE5を比較すると、障害物の無いCASE2では換気流量1.00に対し室上部に4.7の循環流量が生じているのにも関わらず、障害物のあるCASE5では室上部の循環流量が1.51となり、CASE2と比較し約1/3の流量となっている。居住域に流入する流量に着目すると、CASE2では4.0程度の循環流量があるが、CASE5では最も循環流量の大きい{居住域③}で1.00程度であり、CASE2に比べ1/4の循環流量となっている。居住域に流入する流量は吹出口側壁に近づくほど小さくなり、{居住域①}では約0.15と換気流量の1/10になっている。CASE3とCASE6の関係も同様である。(3-2) 吹出・吸込口位置を変化させた場合の比較(図5(3)~(5)) CASE5とCASE6を比較すると、室上部を循環する流量がCASE6では2.44とCASE5の1.5倍以上となっている。これはCASE6の場合、吸込口が吹出対向壁上部に設置してあるため、吹出噴流を効果的に誘引しているためと考えられる。居住域に出入りする流量はほぼ同様の傾向を示し、{居住域③}

では1.00程度と換気流量と同等の値を示すが、吹出口側壁に近づくにつれ流量が減少し、{居住域①}では換気流量の1/10程度となる。また、{居住域①}~{居住域③}の各々に吸込口を設置したCASE7では、室上部での循環流量が4.06と格段に大きくなり、居住域に流入する流量は、{居住域③}では1.00前後と余り変化しないが、{居住域①}では0.50程度になり、CASE5、CASE6に比べ5倍近くになっている。(3-3) 考察 居住域部がパーティション等で区切られた場合、居住域の循環流量が著しく低下するが、吸込口を設けることにより、ある程度回復する。

6. 結論

(1) 室内に放たれた粒子の平均 Visitation Frequency (平均訪問率)及びPFR評価対象領域内の平均滞在時間を用いた新たなPFRの定義を示した。

(2) 障害物の無いケースでは居住域に出入りする流量は4.0程度生じていたが、居住域にパーティション等をモデル化した障害物を設置すると、居住域に出入りする流量は大きいところで換気流量と同量の1.00程度で、少ないところでは換気流量の1/10にまで減少する。

(3) 居住域に障害物がある場合、障害物に囲まれた空間のそれぞれに吸込口を設置する(CASE7)と、居住域に出入りする循環流量が格段に大きくなり、吸込口を設けない場合に比べ5倍近くなる。

(4) 続報で、室内に温度差が生じている場合について考察する。

[注] 注1:PFRは対象領域内の汚染質発生方法を問題としない。汚染質発生量は純粹にその場所で発生したもの他に、他の場所で発生し移流により流入する量を考えることができる。但し移流により流入する汚染質を発生量と考える場合、対象領域で一度流入して排出された後、再び流入する汚染質は滞在時間の延長に寄与するもので発生に寄与するものではないので除外することになる。精密な模型実験との比較により信頼性を確保されたLESによる解析が有効になる。

注2:各パネルについては供給水温度 25.6°C 、雰囲気温度 46.2°C の条件で表面温度を測定した結果、最大温度差は 1°C 以内となった。測定には赤外線放射温度計を使用。注3:測定はトラバース装置によりLDVプロブを位置決め精度 0.1mm で移動させて行う。注4:DOPミストの発生にはIAPソノ発生装置を用いた。

[参考文献] (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 (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、1996,9 (3)鈴木信夫、伊藤一秀、加藤信介、村上周三、小林光、林立也：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3) Purging Flow Rate 検討用精密模型を用いた室内気流測定、空気調和衛生工学会講演論文集、1996,9 (4)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4) CFD解析による居住域平均濃度・PFRの検討、空気調和衛生工学会講演論文集、1996,9 (5) Standard Method of Measuring Air Change Efficiency: ASHRAE SPC129P Second Public Review, 1995.2 (6) Sandberg and Sjoberg: The use of moments for assessing air quality in ventilated rooms, Building and Environment, 18, pp. 181-197, 1983 (7) M.Sandberg "Ventilation Effectiveness and Purging Flow Rate" ISRAE ASHRAE pp-17, 1992.7

*1 東京大学生産技術研究所 受託研究員 (静岡ガス(株))

*2 東京大学 大学院

*3 東京大学生産技術研究所 助教授

*4 大成建設(株)

*5 東京大学生産技術研究所 教授