

CFDを用いた居住空間の換気効率評価手法の開発 と検証に関する研究

主査 加藤 信介*¹
委員 村上 周三*² 大岡 龍三*³

キーワード：1) 換気効率, 2) CFD, 3) 模型実験, 4) Purging Flow Rate, 5) Visitation Frequency

1. 研究の背景・目的

本研究は、室内の不均一性を積極的に活用して合理的な室内換気設計を行うための手法を開発することを目的としている。即ち、室内全体全てを一様に制御するのではなく、人間の呼吸域周辺、発熱機器、あるいは調理機器周辺といったような局所領域に着目し、その換気性状の構造を解明し、局所領域換気効率を評価する新たな指標を開発する。

また、建築空間の設計段階における有効なツールとしての換気効率の評価法を確立するため、瞬時の流れ場を刻々シミュレーションする乱流モデルであるLES (Large Eddy Simulation) を用いる換気効率評価手法の開発を行う。

2. 研究方法

本研究では、建築空間の設計段階における有効なツールとしての換気効率評価法を確立し、これを事前に予測する手法を開発することを目的としている。室内の換気効率分布の評価を行うためには、第1段階として、室内の流れ場を正確に予測し、第2段階として、その流れ場をもとに汚染質等の拡散場解析を行い、濃度場を詳細に解析することが必要となる。

本研究では、局所領域換気効率を評価する新たな指標を開発するツールとして、数値シミュレーション・CFD (Computational Fluid Dynamics: 計算流体力学) の手法を用いる。また、その数値シミュレーションの精度を検証し、実験的に換気効率を評価するために、精密な室内気流模型実験を行う。

3. 具体的研究成果

本研究で得られた成果を箇条書きに述べる。

(1) 実際の換気設計においては、室内空気質の制御を

行う際、吹出口換気量を制御することにより、居住者1人当たりの換気量を確保することが多くある。しかし、吹出口換気量が居住域に的確に配分されているか否かは不明である。本研究では、居住域等の局所領域の換気量を定めるPurging Flow Rateを導入している。Purging Flow Rateは、局所領域の空気質(汚染質平均濃度)を直接制御・評価する変数であり、この指標を用いることで居住域、もしくは居住者周辺の換気量を適切に評価することが可能となる。

(2) Purging Flow Rateは、局所領域の平均濃度を定める局所領域(汚染質排出)換気量を示すが、本研究では、更に局所領域平均濃度の構造を示すVisitation Frequencyを定義している。Visitation Frequencyは、局所領域で発生、もしくは流入した汚染質の排出のスムーズさを評価する。Visitation Frequencyは、LESを用いたParticle追跡を行うことにより詳細に解析される。

(3) LESは、Purging Flow Rate、及び、Visitation Frequency解析の有効なツールとなるが、本研究では、LES精度を検証するために精密な室内気流模型実験を行っている。この模型実験では、流れ場に影響を与える各種要因をパラメトリックに変化させ、平均風速データのみならず、各種乱流統計量(Reynolds Stress等)の詳細なデータも提供している。このデータは、本研究で用いたLESの検証用のみならず、DNS及びk-ε model等のRANS modelの検証データとして広く活用されることが期待される。

(4) 精密模型実験により精度を検証したLESを用い、Purging Flow Rate、及び、Visitation Frequencyを詳細に解析し、局所領域換気性状の構造、即ち、局所領域平均濃度を形成する拡散場の構造を明確にした。

具体的には、本解析で用いたDynamic Smagorinsky Modelを用いたLESが、従来の標準k-ε modelによる数

*¹ 東京大学生産技術研究所 助教授

*² 東京大学生産技術研究所 教授

*³ 東京大学生産技術研究所 助手

値予測に比べ、遙かに高い精度で室内気流の平均場、更には乱流拡散場を予測することを確認した。

また、このLESに基づくParticle拡散トレースを用いて、詳細に局所領域に関する汚染質の拡散・輸送構造を解析した。更には、定性的データとはなるが、 $k-\epsilon$ modelを用いて室内の居住域に対するPurging Flow Rateを解析し、室内の換気設計のための基礎的なデータを得た。

これらの成果は、居住空間の最適な換気設計資料として広く利用されることが期待される。以下に本研究で得られ成果を詳細に説明する。

4. 新たな換気効率指標の導入

本研究では、局所領域平均濃度を決定する指標としてPurging Flow Rateを用い、更に局所領域の流れ・構造を評価するためのパラメータとしてVisitation Frequencyを導入する。

4.1 Visitation Frequency

Visitation Frequency (VF)とは、解析対象として局所的に設定された領域内で発生した汚染質が、一度領域から排出された後、再び領域内に移流されてくる回数で定義される。VFは、慣性のないParticleの挙動、もしくはPassive Contaminantを仮定した平均拡散場解析による流入fluxを用いて以下のように定義される。

$$VF = 1 + (J_p/M_p) = 1 + (\Delta q_p/q_p) \quad (1)$$

- J_p : 単位時間当たり対象領域Pに流入(再帰)するParticle数 [個/s]
- M_p : 単位時間当たり対象領域Pに初めて入る、もしくは発生するParticle数 [個/s]
- Δq_p : 単位時間当たり対象領域Pに流入(再帰)する汚染質量 [流入flux, m^3/s]
- q_p : 単位時間当たり対象領域P内で発生する汚染質量 [m^3/s]

VFは局所領域内で発生した、もしくは流入してきた汚染質の排出のスムーズさを示す重要なパラメータとなる。

4.2 Purging Flow Rate

Purging Flow Rate (PFR) は局所領域に対する実質的な換気空気の入流量、もしくは汚染質排出量を示す換気指標であり、局所領域の濃度分布形成特性、汚染質の排出特性を示すVFと密接な関係を持つ。

PFRはParticleのVF及び局所領域平均滞在時間 T_p 、もしくは局所領域内での汚染質発生量と平均濃度を用いて以下のように定義される。

$$PFR = V_p / (VF \times T_p) = q_p / C_p \quad (2)$$

- V_p : 対象領域Pの体積 [m^3]
- VF : Particleの平均Visitation Frequency
- T_p : 対象領域Pの平均滞在時間 [sec/1回の滞在]
- q_p : 単位時間当たり対象領域P内で発生する汚染質量 [m^3/s]
- C_p : 対象領域Pの平均濃度 [-]

局所領域の汚染質濃度を定める実質的な換気量を示すPFRは、局所領域空気質の代表的制御変数となる。

(2)式中の局所領域平均滞在時間 T_p は、移流の強弱により良否が決定する。即ち、局所領域内が1方向性流であり、且つ、平均流が強いほど T_p は小さくなる。乱れの影響は、 T_p の評価に大きく影響を与えない。

5. 精密室内気流模型実験

本研究で導入するPFRの解析は、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)に対処し得る実験システムとする。

5.1 模型概要

模型は、居室をモデル化したもので、 $X \times Y \times Z = 1.5 \text{ m} \times 0.3 \text{ m} \times 1.0 \text{ m}$ (図5-1)。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。

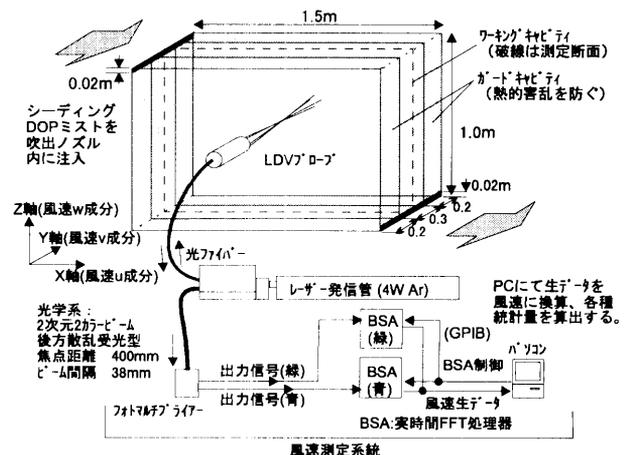


図5-1 居室模型の構成とLDVシステム

この吹出口，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（1系統当たり3l/min）。

5.2 風速測定

本研究では，2次元のLDV（Laser Doppler Velocimetry，図5-1）を用いて風速を測定した。データ数は，15,000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。測定位置は何れもワーキングキャビティ中央断面（図5-1）である。

5.3 測定ケース

風速測定ケースは，(1)吹出・吸込口位置，(2)室内障害物，(3)温度差の各パラメータを変化させて11ケース設定する。

(1) 吹出・吸込口位置を変化させるケースでは，天井面に沿って吹出口を設置し，対向壁床面に沿って吸込口を設置するケース（CASE 1），吹出口直下に吸込口を設置するケース（CASE 2），対向壁天井面に沿って吸込口を設置するケース（CASE 3），及び，Displacement Ventilation型のケース（CASE 4）の4ケース設定する。（図5-2参照）

(2) 室内障害物を設置するケースでは，居住域に2か所障害物を設置し，吹出・吸込口位置を変えることにより3ケース設定する。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

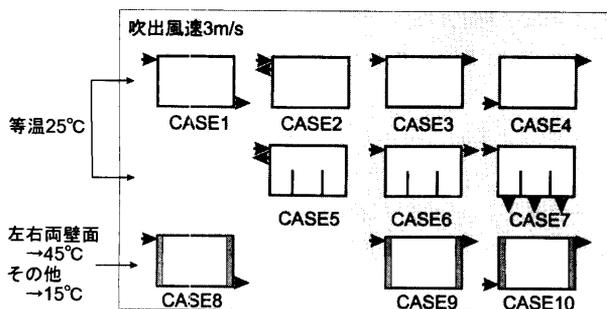


図5-2 実験ケース

（図5-2参照）。天井面位置の吹出口に対し，CASE 5は吹出口直下に吸込口を設置したケース，CASE 6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，CASE 7は居住域①～③の各々に吸込口を設置したケースである。

(3) 温度差をつけたケースでは，吹出口対向壁面，及び，吹出口側壁面の2壁面を45°Cに加熱し，吹出・吸込口位置を変化させて3ケース設定する（CASE 8～CASE 10）。吹出温度，天井面及び床面は15°Cに制御する。また，室内下部居住域に吹出口を設けるDisplacement Ventilation型の換気システムに関して，浮力の影響を検討するため，特に吹出口対向壁のみを45°Cに加熱したケース（CASE11）を設定する。なお，CASE 8は，CASE 10と室中央水平面（Z=500mmのライン）で線対称となるよう吹出・吸込口を設けている。このため，CASE 8は，CASE10と同じ吹出・吸込口位置で浮力が逆向きに働く。即ち，温度差が逆符号となった場合に相当する。

5.4 実験条件

吹出風速は約3 m/s（吹出口Re数=4200）で，CASE 1～CASE 7の等温実験においては，吹出空気，及び，模型内表面を約25°Cに制御した。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°C程度であった。また，壁面温度はアルミ製通水パネルに，温度制御されたブラインを供給することにより制御する。ブラインは，高温側（45°C）2系統，低温側（15°C）2系統の計4系統で供給する。吹出空気，及び，模型内表面を約15°C，及び，45°Cに制御したが，吹出空気温度，表面温度測定結果のばらつきは，各制御温度に対し最大でも1°C以内であった。

また，吹出・吸込空気の温度差より空気に伝達された熱量を求め，壁面温度制御用のブラインの往路・復路の温度差より模型内に投入した熱量を求めて両者のバランスをチェックしたところ，全てのケースにおいて5%以内の誤差であった。（吹出口，及び，吸込口の気流温度で測定した室内投入熱量は，1壁面加熱の場合，88.8 W，2壁面加熱の場合，121.2Wである。また，吹出口のアルキメデス数（Ar数）は，CASE 8が $Ar=4.72 \times 10^{-4}$ ，CASE 9が $Ar=3.05 \times 10^{-4}$ ，CASE10が $Ar=4.29 \times 10^{-4}$ である。）

5.5 気流の可視化

気流を研究する上での困難は，その動きが直接目に見えない，という点である。気流の動きを捉えるために様々な計測器があるが，これらの測定で得られるのはほとんどポイントごとの値であり，流れ場全体の様相を把握することは困難である。そのため，直感的に流れ場全体の様相を把握するために，流れの可視化が重要となる。

本研究では、照度の高いLaser Light Sheet（スリット光の様に薄く、且つ、面的な広がりを持つ光）を光源とし、気流の可視化を行った。Laser Light Sheetを用いることにより、浮遊粒子自身の拡散現象をLagrange的に可視化解析できる。

Laserシステムは、LDVに使用したシステムを用い、シリンドリカルレンズにLaser Beamを垂直に入射することによりLaser Light Sheetを得ることができる。シリンドリカルレンズは、Laser発信管から光ファイバーにより連結されている。光ファイバーを用いることで、シリンドリカルレンズの位置が自由に決定できるようになるが、Laserがファイバー内で減衰し、照度が若干減少する。

トレーサー粒子には、DOPミスト、及び、炭酸マグネシウム粉末を用いている。図5-3にLLS System概要を示す。

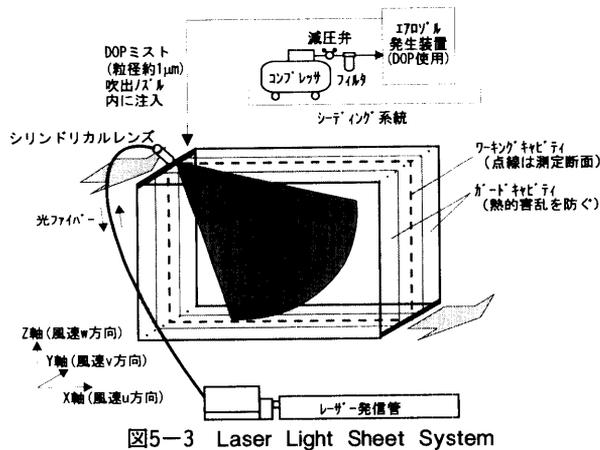


図5-3 Laser Light Sheet System

6. LESを用いたParticle Tracing

本研究では、LESを用いて、汚染質塊、即ち、Particle追跡を行い、局所領域に対するParticleの出入りの様相、各時刻における位置等を詳細に解析する。

6.1 LES計算概要

計算対象は、図6-1に示すような室内気流場とする。これは、精密模型実験CASE 1のworking cavityに対応する。吹出スロット幅を $L_0=0.02\text{m}$ とすると $75L_0(X) \times 15L_0(Y) \times 50L_0(Z)$ である。

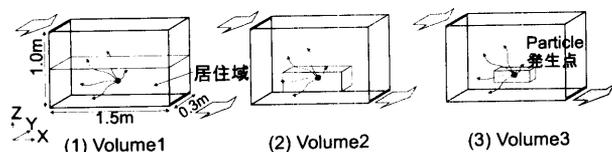


図6-1 解析対象

計算条件は、模型実験の境界条件に準じ、等温吹出、固壁は断熱とする。Subgrid Scaleモデルには、Dynamic

Smagorinsky modelを用いる。気流解析の後、居住域（室の下半分）中心($X=0.75\text{m}$, $Y=0.15\text{m}$, $Z=0.25\text{m}$)より、Particleをshort burstにより、59,319個(1.17個/1 cell)発生させ、Particle Tracingを行う。計算及び解析条件は、表6-1、及び、図6-1に示す。

表6-1 LES計算及び解析条件

SGS model	Dynamic Smagorinsky Model
メッシュ分割	48(X)×23(Y)×46(Z)
差分スキーム	空間：2次精度中心差分 時間：3次精度 Runge-Kutta 法
流入境界	吹出口速度分布は実験に対応する平均速度分布を与えた。流入の乱れ強さは無視。
壁面境界	Linear - Power Law

6.2 Particle Tracing

本報では、ParticleはResolvable Scaleの移流により輸送されると仮定し、Subgrid Scaleの影響は無視して解析を行っている。

6.3 局所領域の設定

VF、及び、PFRの解析対象領域として図6-1に示す3種の局所領域を設定した。 $Z < 0.5\text{m}$ の居住域をVolume1とした場合、各局所領域の体積は、(室内全体)：Vol. 1：Vol. 2：Vol. 3 = 1：1/2：1/16：1/54である。

7. $k-\epsilon$ modelを用いたPFRの定性的解析

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、汚染質発生量、評価対象領域内の平均汚染質濃度で定まる。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。本節では、標準 $k-\epsilon$ model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。計算対象は、精密模型実験(8.1.2精密模型実験結果参照)で行ったCASE 1～CASE 3である。

8. 結果及び考察

8.1 精密模型実験・平均風速測定結果

8.1.1 吹出噴流・キャビティ内の風速の2次元性

吹出噴流、及び、キャビティ内の風速のY方向の風速は、高い2次元性を示した。吹出噴流の到達域、及び、対向壁との衝突域において2次元性を高めるために、ワーキングキャビティにガードキャビティに対し、微少圧力(0.3mmAq)を加えている。

8.1.2 室中央断面平均風速分布

図8-1に各ケースにおける室中央断面平均風速分布を

示す。

吹出・吸込口位置を変化させたCASE 1～3に着目すると、各ケースとも右回りの大きな循環が観察され、キャビティ隅角部では、大きな循環とは逆向きの2次渦が観察される(図8-1(1)~(3))。また、天井付近のU成分の風速に着目すると、各ケースとも、ほぼ同じ風速分布であるが、床付近ではCASE 2の風速が最も大きく、CASE 1が小さい。また、吹出口壁付近ではCASE 2のW成分の風速が最も大きく、CASE 1が小さい。吹出口対向壁付近ではCASE 3の風速がやや小さくなっている。

Displacement Ventilation型のCASE 4では床面に沿った水平吹出であり、吹出気流に誘引された左回りの大きな循環が観察される。キャビティ隅角部には室内の大きな循環とは逆向きの2次渦が観察される

室内障害物を設置したCASE 5～CASE 7に着目すると、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2次渦も観察される。CASE 5とCASE 6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CASE 7では、障害物で囲まれた居住域内で、CASE 5, CASE 6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。X=750mmの位置におけるU成分の上下方向分布に着目すると、CASE 5とCASE 6は、同じ様な風速分布を示しているが、CASE 7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。同位置におけるW成分の水平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=0mm)付近においてCASE 7の風速が最も大きくなっている。

温度差を設定したCASE 8～CASE 11にケースに着目する。CASE 11と比較し、CASE 10では2次渦の大きさがやや大きくなっている。また、天井面に沿った水平吹出のケース(CASE 8, 9)では、右回りの大きな循環が観

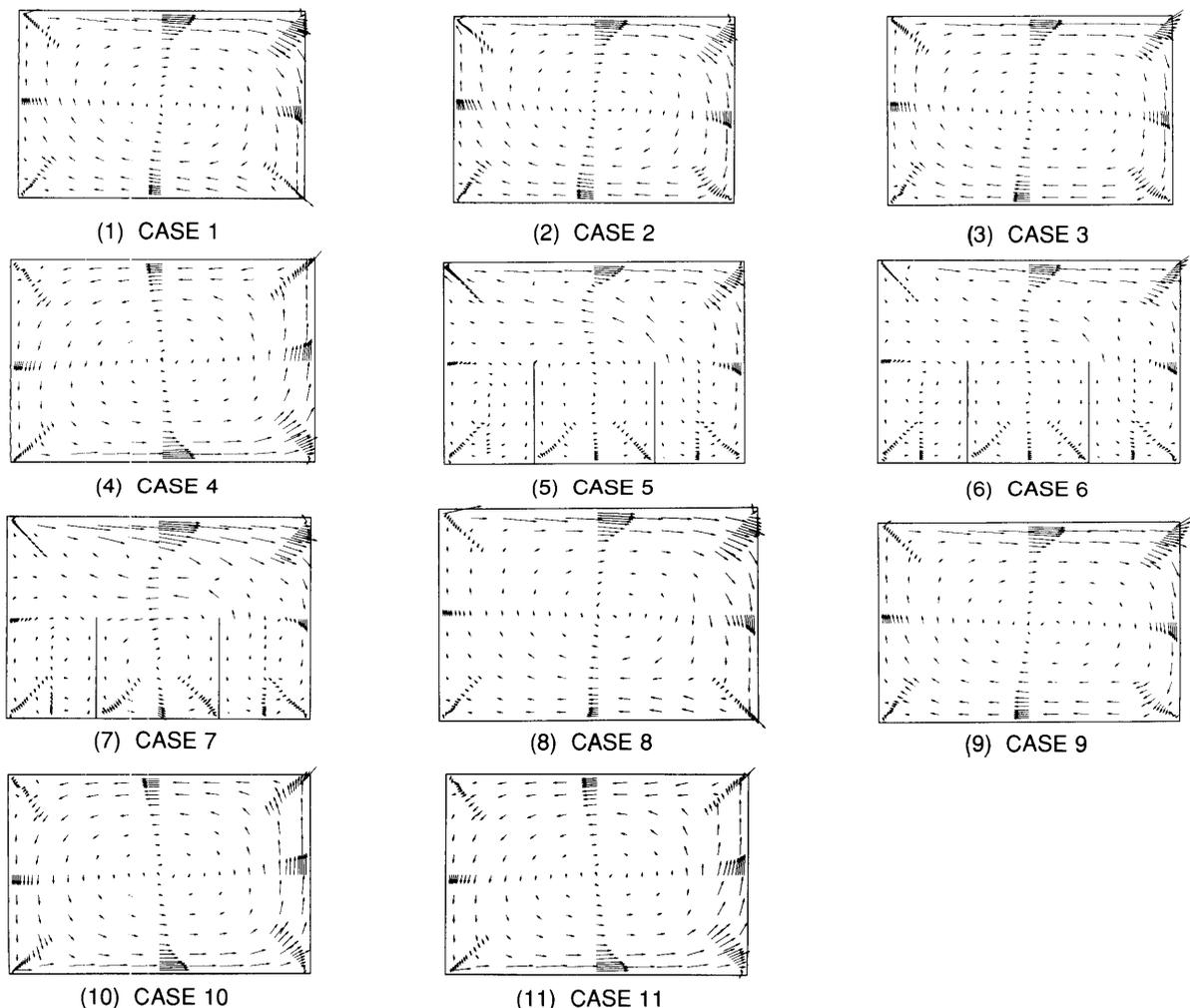


図8-1 室中央断面平均風速分布

察され、キャビティ隅各部で同様の2次渦が観察される。等温で同様の吹出・吸込口位置のケースと比較すると、全体的流れ場の傾向は一致する。

これらの平均風速データは、数値シミュレーションの検証用データとして大変重要な意味を持つ。

8.2 精密模型実験・各種乱流統計量測定結果

本研究ではLDVを用いて、全てのケース（CASE 1～CASE11）において平均風速のみならず、各種乱流統計量も測定している。室内に障害物がないケースでは、吹出噴流の到達域、及び、対向壁との衝突域において若干風速が乱れるが、それ以外の領域は、ほぼ層流となっている。そのため、本報告書では、室内に障害物を設置したケースを中心に各種乱流統計量（風速変動のr.m.s. $\sqrt{\overline{u^2}}$, Reynolds Stress $\overline{u_i u_j}$ ）の分布を示す。

風速変動成分（図8-2(1)～(4)）に着目すると、各ケースとも、 $\sqrt{\overline{u^2}}$, $\sqrt{\overline{w^2}}$ の値はほぼ同様に、分布性状も同様の傾向を示す。また、天井付近（Z=1000mm）で値が大きくなっており、特に居住域に障害物があるケース（CASE 5, 6, 7）の値が大きく、吹出風速で無次元化した乱れの強さは2%程度である。Reynolds Stress（図8-2(5)～(6)）に着目すると、風速変動成分と同様に、吹出噴流域である天井付近で値が大きくなっている。渦動粘性係数は、風速勾配が明確な領域で見積もりが可能である（ $\nu_t = \overline{uw} / (\partial \overline{U} / \partial Z)$ ）。例えば、CASE 2では、天井付近で ν_t の最大値が約400cm²/sで、動粘性係数 ν の1000倍のオーダーである（ ν は25℃で約0.16cm²/s）。

8.3 精密模型実験・気流の可視化結果

ここでは、CASE 6をLaser Light Sheetにより可視化した結果を、(1)吹出噴流、(2)吸込口近傍、(3)吹出口側壁面下部、(4)室内障害物隅角部、(5)障害物上部、の5点を中心に示す。

(1) 吹出噴流（図8-3(1)） 吹出噴流は、天井面に付着して直接、対向壁隅角部まで到達する。吹出噴流直下には微少な渦が流れに沿って生成するせん断混合層が観

察される。この渦は発達した後、吹出口から約50cmの位置までで消滅する。

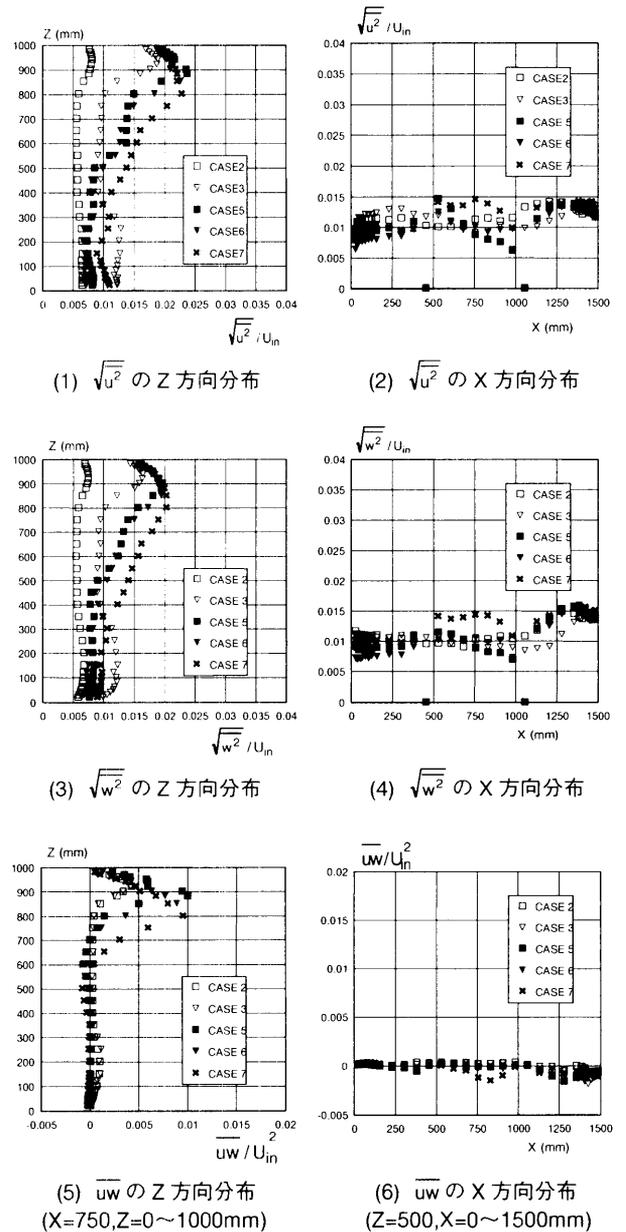
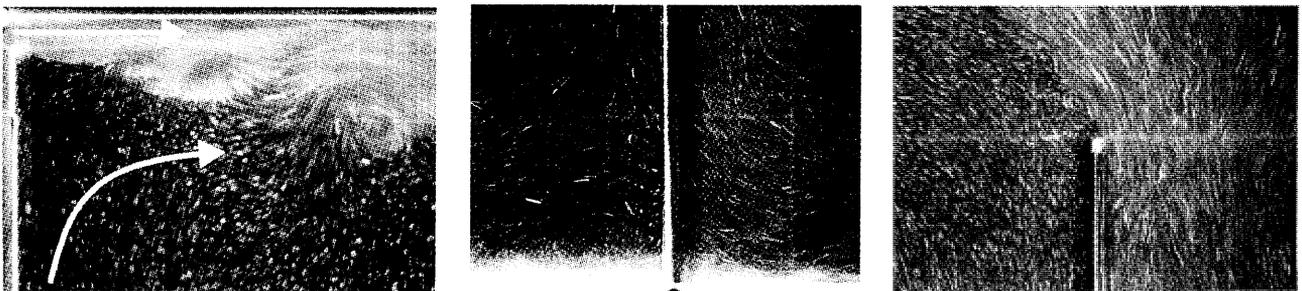


図8-2 室中央断面各種乱流統計量の分布



(1) 吹出噴流

(2) 室内障害物入り隅部の様子

(3) 障害物上部の様子

図8-3 気流の可視化

(2) 吸込口近傍(写真省略) 吸込口近傍では、吹出口から直接吸込口に到達する気流と模型下部領域に向かう循環流の2つに分れる。吸込口直下は、この排出流と循環流に挟まれ、渦の生成・消滅が繰り返す複雑な様相を示す。

(3) 吹出口側壁面下部(写真省略) 入り隅部に最大直径6 cm程度の2次渦が観察される。渦は、定常的には存在せず、生成・消滅を繰り返す。

(4) 室内障害物入り隅部(図8-3(2)) 吹出口からの循環流が障害物に衝突し、複雑な流れ場となっている。

[居住域②], 及び, [居住域③] の入り隅部では直径3 cm程度の2次渦が観察されるが、定常的には存在せず、生成・消滅を繰り返す。

(5) 障害物上部(図8-3(3)) 吹出口からの循環流は、[居住域③] を右回りに循環した後、障害物のエッジより左斜め上方に向かって流出する。エッジ部分で剥離した気流の直下に微少な渦が流れに沿って発達するせん断混合層が観察される。

これら流れの非定常な性状は、LESシミュレーションにて再現可能と思われ、シミュレーション精度を定性的に検討するのに有効なデータとなる。

8.4 実験, 及び, LESによる平均風速解析結果

図8-4に室内中央断面におけるU, Wの平均風速分布を示す。解析ケースは、模型実験CASE 1である。精密

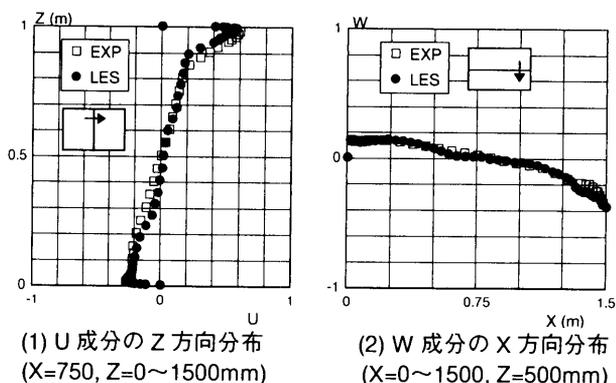


図8-4 室中央(X-Z)断面風速分布(吹出風速で基準化)

模型実験, LESの両者の結果は良く一致するが、壁面近傍で若干の差異が見られる。特に、天井・床面では、LESの結果が非拡散的である。原因として、本解析で使用したDSモデルが若干Cを過大評価していることが考えられる。Cが大きいと ν_{SGS} が大きくなり、即ち、Smagorinskyモデルでは、 ϵ (散逸)が大きくなることを意味する。 ϵ が大きくなれば、乱流エネルギーは小さくなり、流れは非拡散的となる。

8.5 Particle TracingによるVF, PFR解析結果

Particle Tracingは、Particle発生後、74.27秒間(計算対象領域の名目換気時間25sec)行い、59,319個中52,505個のParticleが排出(88.5%)された。図8-5にParticle発生後の拡散状況を時系列に示す。図8-6にVol. 1~3

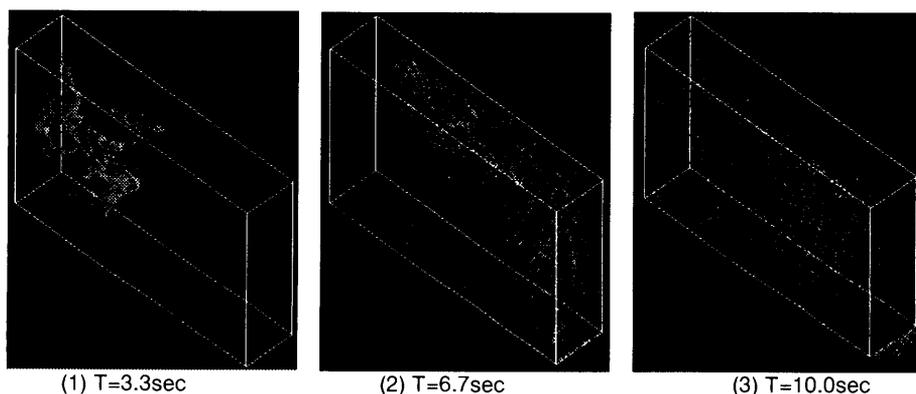


図8-5 Particle発生後の拡散状況

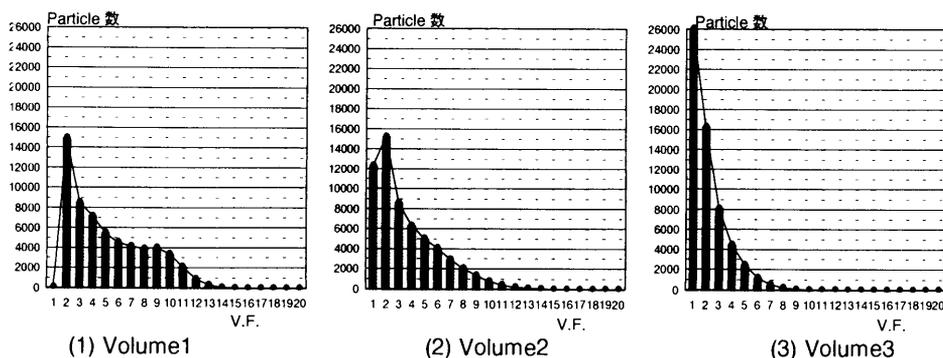


図8-6 Visitation Frequency分布

における各VolumeのVF分布を示す。Vol. 1では、VF=2にピークが存在し、一度Vol. 1を出た後に、更に、もう一度流入してから排出されるParticleが全体の25.1%を占めている。また、VF=9に変曲点が見られ、VF=17までに88.5%のParticleが排出されている。Vol. 2もVF=2にピークが存在し、VFが大きくなると、Particle数は指数関数的に減少する。Vol. 3では、VF=1にピークが存在し、Vol. 3を出た後、再帰還することなく排出されるParticleが全体の43.9%を占める。また、VFの減衰が急で、全体の流れ場の中で、Vol. 3がParticleの再帰の少ない場所であることを示している。

表8-1にPFR, 平均VF, 及び, T_p の解析結果を示す。

表8-1 平均VF及びPFR解析結果
(PFR値は換気流量, 平均濃度は完全拡散濃度で基準化)

	平均VF	T_p [sec]	PFR	平均濃度
Volume1	5.17	4.88	0.50	2.02
Volume2	3.52	6.40	0.07	14.49
Volume3	2.13	10.51	0.02	47.62

平均VFの値より、Vol. 1では5.17回のParticleの再帰があるのに対し、Vol. 3では2.13回と小さい。また、 T_p の値よりVol. 1におけるParticleの滞在時間は4.88secであるが、Vol. 3では10.51secと2倍程度になっている。PFRの値よりVol. 1に流入するParticleの希釈に有効な換気流量は、吹出口換気流量の50%であることが解る。また、対象領域がVol. 1からVol. 3と変化した場合、PFRが急激に小さくなり、Vol. 3では吹出口換気流量の2%しかParticleの排出効率が無いことが解る。

8.6 考察

Vol. 1は、室内の大循環流を含むため、移流によりParticleが輸送される傾向が強く、Particleの再帰(VF)が多く、平均滞在時間(T_p)が短くなる。また、室内の大循環流から若干外れた位置に設定したVol. 2, 3では、拡散によりParticleが輸送される傾向が強く、平均滞在時間(T_p)が長くなる。また、対象領域はVol. 1→3と段階的に小さく設定したため、必然的に平均VFは小さくなる。PFRの値より対象領域の平均濃度が直ちに計算される。ポイント発生したParticleは、その周辺に滞在する時間が長い(Vol. 3の T_p が長い)ために、Vol. 3の平均濃度が高く、Vol. 1では低くなる。対象領域のParticleの平均寿命(1個のParticleの全ての訪問の合計滞在時間 T_p (total))は、(平均VF× T_p)により計算され、Vol. 1, 2, 3では、それぞれ、25.24sec, 22.53sec, 22.42secとなり、相対的にVol. 3でparticleが長い時間停滞していることが解る。

8.7 k-ε modelを用いたPFR解析結果

本節では、精密室内気流模型実験で検討した室内流れ場のうち、CASE1~CASE3において、①床面から一様に汚染質を発生させた場合、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、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。計算、及び、解析条件は表8-2参照。

表8-2 計算及び解析条件(ケース番号は実験と一致)

	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
流入境界	$U_{in}=3\text{m/s}$, $k_{in}=3/2 \cdot (U_{in} \times 0.0115)^2$, $\epsilon_{in}=C_\mu \cdot k_{in}^{3/2}/l_{in}$, 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、

本報には示さないが、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2次渦が確認され、8.1.2に示した実験結果と大局的に一致した。また、実験と計算値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。

(1) 汚染質を床面一様発生させた場合のPFRの試算

居住域の汚染質平均濃度、及び、PFRを表8-3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。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

表8-3 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

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、CASE 2のPFRが1.39と1を超えており、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。また、CASE 1では、換気流量1に対し居住域PFRは0.72で、換気流量の7割（居住域循環流量の2割）程度しか希釈効果がない。CASE 3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のPFRの試算

居住域の汚染質平均濃度、及び、PFRを表8-3に示す。床面一様発生の場合と同様に、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、汚染質の効率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）効果しか持たない。CASE 2の換気システムは、床面一様発生条件ではPFRが1を超え、効果的に汚染質を排出したが、居住域中心発生条件では、CASE 1、CASE 3の換気システムと大差ない結果となった。また、CASE 1では、換気流量1に対し居住域PFRは0.62で、換気流量の6割程度しか希釈効果がない。CASE 3も同様の傾向である。

9. 結論

「CFDを用いた居住空間の換気効率評価手法の開発と検証に関する研究」と題して、居住域、呼吸域、もしくは、発熱機器周辺領域といった局所領域の換気性状を評価するために新たな換気効率指標を導入し、その指標の構造、及び、有用性を、精密模型実験と数値シミュレーションCFDにより解析した結果を報告した。

具体的には、

(1) 居住域、呼吸域等の局所領域の空気質（汚染質平均濃度）を直接制御・評価するPurging Flow Rateを新たに導入し、この指標を用いることで居住域、もしくは、居住者周辺の換気量を適切に評価することが可能となることを示した。

(2) Purging Flow Rateは、局所領域の平均濃度を定める局所領域（汚染質排出）換気量を示すが、更に、局所領域平均濃度の構造を示し、汚染質の排出のスムーズさを評価するVisitation Frequencyを定義し、換気設計におけるその有用性を示した。

(3) 数値シミュレーション精度を検証するデータを提供するために、精密な室内気流模型実験を行った。この

模型実験では、流れ場に影響を与える各種要因をパラメトリックに変化させ、平均風速データのみならず、各種乱流統計量（Reynolds Stress等）の詳細なデータも提供している。このデータは、本研究で用いたLESの検証用のみならず、DNS、及び、 $k-\epsilon$ model等のRANS modelの検証データとして広く活用されるであろう。

(4) 精密模型実験により、精度を検証したLESを用いたParticle Tracingを行い、Purging Flow Rate、及び、Visitation Frequencyを詳細に解析し、局所領域換気性状の構造、即ち、局所領域平均濃度を形成する拡散場の構造を明確にした。

(5) 標準 $k-\epsilon$ modelを用いて吹出・吸込口位置等の境界条件を変化させた場合のPFR値を系統的に解析し、換気設計資料として整備するためのデータのストックを行った。

今後、更に詳細な解析を加えると共に、局所領域換気性状に影響を与える境界条件をパラメトリックに変化させてVisitation Frequency、Purging Flow Rateの解析を行い、換気設計資料としてデータベース化を行う予定である。

<参考文献>

- ・小林 光（大成建設）、村上周三（東京大学生産技術研究所教授）、加藤信介（東京大学生産技術研究所助教授）、伊藤一秀（東京大学大学院）：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：日本建築学会年次大会学術講演梗概集、D-2、pp.559～560、1996.9
- ・伊藤一秀（東京大学大学院）、村上周三（東京大学生産技術研究所教授）、加藤信介（東京大学生産技術研究所助教授）、小林 光（大成建設）：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：日本建築学会年次大会学術講演梗概集、D-2、pp.561～562、1996.9
- ・鈴木信夫（静岡ガス）、伊藤一秀（東京大学大学院）、加藤信介（東京大学生産技術研究所助教授）、村上周三（東京大学生産技術研究所教授）、小林光（大成建設）：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、I、pp.45～48、1996.9
- ・伊藤一秀（東京大学大学院）、村上周三（東京大学生産技術研究所教授）、加藤信介（東京大学生産技術研究所助教授）、小林光（大成建設）：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、I、pp.49～52、1996.9
- ・鈴木信夫（静岡ガス）、伊藤一秀（東京大学大学院）、加藤信介（東京大学生産技術研究所助教授）、小林光（大成建設）、村上周三（東京大学生産技術研究所教授）：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一居住域に障害物がある場合の検討：日本建築学会関東支部研究報告集、pp.1～4、1997.3
- ・伊藤一秀（東京大学大学院）、加藤信介（東京大学生産技術研究所助教授）、小林光（大成建設）、鈴木信夫（静岡ガス）、村上周

三（東京大学生産技術研究所教授）：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6）精密模型を用いた室内気流測定—居住域に温度差がある場合の検討—：日本建築学会関東支部研究報告集，pp.5～8，1997.3

- ・鈴木信夫（静岡ガス），伊藤一秀（東京大学大学院），村上周三（東京大学生産技術研究所教授），加藤信介（東京大学生産技術研究所助教授），高橋岳生（東京大学生産技術研究所技官）：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7）PFR検討用精密模型を用いた室内気流の測定と可視化：日本建築学会年次大会，D-2，pp.591～592，1997.9
- ・伊藤一秀（東京大学大学院），村上周三（東京大学生産技術研究所教授），加藤信介（東京大学生産技術研究所助教授），小林光（大成建設），富永禎秀（新潟工科大学助手）：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8）Particle TracingによるVisitation Frequency，PFRの解析：日本建築学会年次大会，D-2，pp.593～594，1997.9
- ・伊藤一秀（東京大学大学院），村上周三（東京大学生産技術研究所教授），加藤信介（東京大学生産技術研究所助教授）：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9）Visitation Frequency，Purging Flow Rateによる局所領域換気効率の評価：空気調和衛生工学会講演論文集，Ⅱ，pp.421～424，1997.9
- ・大川泉（静岡ガス），村上周三（東京大学生産技術研究所教授），加藤信介（東京大学生産技術研究所助教授），伊藤一秀（東京大学大学院）：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10）精密模型を用いた室内気流の測定と可視化—居住域に障害物がある場合の検討—：空気調和衛生工学会講演論文集，Ⅱ，pp.425～428，1997.9