

居住域に気流障害物が設置されたオフィスの規準化居住域濃度, Visitation Frequency, Purging Flow Rate の系統的解析

第2報 オフィス空間を対象とした居住域換気効率の評価に関する研究

伊藤 一秀 ^{*1}

加藤 信介 ^{*2}

村上 周三 ^{*3}

空気調和・衛生工学会で提案された HASS 102 換気規準¹⁾では、室内の換気効率(=排気濃度で無次元化された居住域平均濃度、すなわち規準化居住域濃度)を加味した換気設計を行うことを推奨している。本研究では、前報²⁾に引き続き、モデルオフィス空間に形成される規準化居住域濃度の構造を Visitation Frequency 及び Purging Flow Rate の指標を用いて詳細に解析することを目的とする。特に本報では 3 種の換気システムを採用したオフィス空間を対象として、居住域にパーティション・デスク等の気流障害物が設置された場合に関して検討を行う。

オフィス空間を対象とした空調システムでは、吹出空気にある程度の Return Air (再循環空気、即ち室全体に対する循環流)を混入し、空気調和機器に対する負荷を軽減し、省エネルギー性を向上させることが一般的である。本稿においては吹出空気量を一定とし、再循環空気の割合が増加した場合に規準化居住域濃度予測に与える影響を、特に居住域に気流障害物のあるオフィス空間を対象として、筆者らが提案・導入している換気効率指標(Visitation Frequency および Purging Flow Rate)を用いて考察する。

キーワード： 再循環空気・規準化居住域濃度・Visitation Frequency・Purging Flow Rate

1. 序

前報²⁾では、居住域に什器等の存在しない単純にモデル化されたオフィス空間を対象として、3 種の異なる換気システムを採用した場合の流れ場、温度場ならびに汚染質拡散場の解析を行い、その結果を基に各換気システムにおいて供給空気量一定の条件で Return Air (再循環空気)の割合を順次増加させた場合の規準化居住域濃度形成に与える影響を Visitation Frequency (VF)および Purging Flow Rate (PFR)を用いて詳細に解析した結果を報告した。その結果、①全ての換気システムにおいて、冷房条件では吹出空気に含まれる再循環空気の割合が 50%を越えると急激に VF の値が増加し、特に呼吸域では 90%再循環の場合には VF の値が 100 を越え、②吹出空気に含まれる再循環空気の割合が増加すると、居住域および呼吸域平均濃度は完全拡散濃度に近づき、HASS で定義する換気効率(規準化居住域濃度)は 1 に近づき、という結果が得られた。また、③天井吹出・天井吸込型空調システ

ム(Case1)と床吹出・天井吸込型空調システム(Case2)の換気性状を VF、規準化居住域濃度の指標により比較した結果、居住域・呼吸域に近い、床面で空調空気を供給する床吹出・天井吸込型空調システム(Case2)の方が効率的に汚染質を排出することが示された。更に、④置換換気方式の換気システム(Case3)の場合、換気回数(吹出風量)が多く、室内に大きな循環流が形成される場合には、循環流に取り残された中央部の滞流域で換気性状が悪化し、総合的な居住域換気効率は低下することも示された。

本報では、より現実的なオフィス環境を解析対象とするため、居住域にパーティション・デスク等の気流障害物となる什器を設置した場合に関して、居住域・呼吸域に形成される平均濃度場の構造を Visitation Frequency および Purging Flow Rate の両指標を用いて明らかにする。

2. 規準化居住域濃度 (HASS102 換気効率) と Visitation Frequency および Purging Flow Rate

本報では、HASS102 で定義される換気効率である規準化居住域濃度¹⁾の他、Visitation Frequency²⁻⁴⁾および Purging Flow

*1 東京工芸大学 正会員

*2 東京大学生産技術研究所 正会員

*3 慶應義塾大学 正会員

Rate^{2,3,5)}の各換気効率指標を用いて濃度場の解析を行う。各指標の定義を以下に示す。

Visitation Frequency (訪問回数、以降 VF)とは局所領域内で発生した汚染質が一度局所領域から排出された後、再び領域内に移流されてくる平均回数で定義され、Passive Contaminant を仮定した平均拡散場解析による流入 flux^{注1)}を用いて(1)式のように定義される。

$$VF = 1 + (\Delta q_p / q_p) \quad \text{---- (1)}$$

VF : 平均 Visitation Frequency [-]
 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, kg/s] 但し汚染質は P 内で発生
 q_p : 単位時間当たり対象領域 P 内で発生する汚染質量 [kg/s]

局所領域の汚染質濃度を定める実質的な換気量を示す Purging Flow Rate (局所排出換気量、以降 PFR)は汚染質の 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(2)式のように定義される。

$$PFR = V_p / (VF \times T_p) = q_p / C_p \quad \text{---- (2)}$$

PFR : Purging Flow Rate [m³/s]
 V_p : 対象領域 P の体積 [m³]
 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[kg/s]
 C_p : 対象領域 P の平均濃度 [kg/m³]

空調和・衛生工学会のHASS102換気規準¹⁾では室内の換気効率(規準化居住域濃度 C_n)を平均排気濃度(瞬時一様拡散濃度)で無次元化された居住域等の局所領域平均濃度として定義している。(3)式に示すように、吹出口換気量 Q で無次元化された居住域 PFR の逆数は HASS102 換気規準で定義された換気効率(規準化居住域濃度)と一致する。また、各指標のより詳細な説明は前報²⁾に示している。

$$C_n = C_p / C_e = (C_p \times Q) / q_p = Q / PFR \quad \text{---- (3)}$$

C_e : 排気口での平均濃度 [kg/m³]
 C_n : 規準化居住域濃度 [kg/m³]
 Q : 吹出口換気量 [m³/s]

3. 解析オフィス空間の概要

3.1. 解析対象オフィス

図-1に示すように、奥行き(X方向)10.0m、幅(Y方向)3.0m、高さ(Z方向)3.0mのオフィス空間を想定する。本報では居住域にパーティション(高さ 1.2m)によって区切られたデスクが設置されている。オフィスの片側壁面(図-1左壁面)には窓面を設置し、日射負荷および熱貫流を考慮する。

3.2. 解析ケース及び熱負荷設定

表-1に示すように、①夏期冷房負荷、②冬期冷房負荷、③暖房負荷の3種の熱負荷条件(解析ケース)を設定する。人体は人員密度0.2人/m²を仮定し、床面一様に発熱量を与える。

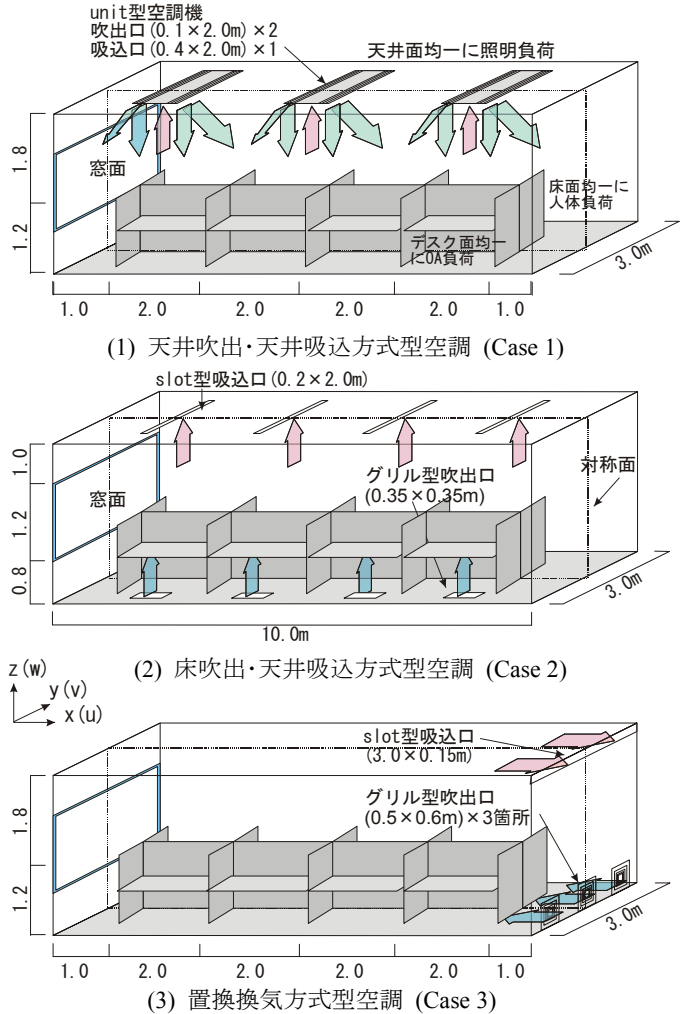


図-1 解析対象オフィス

表-1 解析ケース及び熱負荷条件 (顕熱)

	照明	人体	OA	日射	熱貫流(窓)	壁面冷熱負荷	合計
夏期冷房 (添字-4)	600 (20)	330 (11)	1200 (40)	660 (22)	84 (2.8)	-	2880 (96)
冬期冷房 (添字-5)	600 (20)	330 (11)	1200 (40)	1360 (45)	-500 (-17)	-	2990 (100)
暖房 (添字-6)	-	-	-	1360 (45)	-500 (-17)	-2980 (-99)	-2120 (-71)

(単位: W, 括弧内の値は床面積当たりの発熱量: W/m²)

また1人当たり1台のOA(PC)を仮定し、デスク上面一様に発熱量を与える。照明負荷(20W/m²)は天井面一様に与える。窓面への日射熱量は、夏期冷房時には367W/m²(東京8月南面全天日射)、冬期冷房時及び暖房時には757W/m²(東京2月南面全天日射)と仮定し、その1/2を室内発熱量と仮定する。窓ガラスは1枚ガラスとし、熱貫流率6.17W/m²・Kと仮定する。外気温は夏期冷房時29.8℃、冬期冷房時および暖房時1.3℃と仮定する。また暖房時はインテリア負荷を無視し、内壁面に夜間冷却による蓄冷を想定した暖房負荷(40W/m²)を与える。冷・暖房それぞれ床面積当たり70~100W/m²の空

調熱負荷を与えることとなる。その他の什器表面等は、断熱条件を仮定する。空調吹出温度は、夏期冷房時 $t_{in}=21.4^{\circ}\text{C}$ 、冬期冷房時 $t_{in}=19.2^{\circ}\text{C}$ 、暖房時 $t_{in}=27.4^{\circ}\text{C}$ とする^{注2)}。上記境界条件は前報²⁾で行った解析と同条件であるが、本報で示すケースは居住域に気流障害物が設置された場合の検討を行う。**表-2**に前報²⁾での解析ケースを含めた全ての解析ケースの一覧を示す。また解析対象空間の対称性を考慮し、流れ場等の解析は y 方向(**図-1**)に半分の領域を対象として行っている。

4. 放射・対流連成解析

4.1. 室内流れ場・温度場の解析

低 Re 型 k- ϵ model (Abe-Nagano model)⁶⁾ に基づく 3 次元解析を行う。壁面近傍では、y+ (Wall Unit) が 10 以下の領域を最低 3 分割以上したメッシュ分割としている。離散スキームは移流項に QUICK、その他は 2 次中心差分を用いる。速度の壁面境界条件は no-slip 条件、温度は各表面の熱収支式より算出される対流熱流束を与える。放射解析も連成して行う。境界条件および計算条件を**表-3**に示す。

4.2. 壁間相互放射熱伝達の解析

discrete beam 法により形態係数を算出し、radiosity 法による緩和計算により室内の相互放射性状を解析する。放射計算では壁面、パーティション・デスク部分を $0.1 \times 0.1\text{m}$ に分割し、放射束を割り当てる。

5. 換気効率指標の解析

流れ場・温度場の連成解析を行った後、**図-2**に示す居住域および呼吸域内で汚染質(Passive Contaminant)を一様発生させ、規準化居住域濃度 C_n (HASS で定義する換気効率)および VF、PFR を解析する。居住域での汚染質一様発生を仮定した場合の C_n は居住域平均濃度と完全混合濃度の比を、呼吸域での汚染質一様発生を仮定した場合の C_n は呼吸域平均濃度と完全混合濃度の比を示す。なお、空調吹出空気量一定の条件で吹出空気に含まれる再循環空気の割合を段階的に変化させた場合の C_n 、VF 及び PFR の変化を併せて解析する。濃度場の解析では再循環空気量が 0% の場合の拡散場解析結果を基に、濃度場の線型重ね合わせより再循環空気量を変化させた場合の濃度場を算出する。

6. 解析結果

6.1. 気流分布^{注3)}

図3に示す解析結果の表示断面は Case2 の床面吹出口中心位置を含む x-z 断面を示している。天井吹出・天井吸込方式型の空調システム(Case 1)では、既報²⁾で示した居住域に什器を設置しない場合に、空調空気を室温より相対的に低温で供給する Case1-1(夏期冷房)において、室内に窓面側(**図-1**中

表-2 解析ケース一覧

(1) パーティション無し (前報²⁾での報告ケース)

	夏期冷房	冬期冷房	冬期暖房
天井吹出・天井吸込方式	Case 1-1	Case 1-2	Case 1-3
床吹出・天井吸込方式	Case 2-1	Case 2-2	Case 2-3
置換換気方式	Case 3-1	Case 3-2	Case 3-3

(2) パーティション・デスク有り (本報での報告ケース)

	夏期冷房	冬期冷房	冬期暖房
天井吹出・天井吸込方式	Case 1-4	Case 1-5	Case 1-6
床吹出・天井吸込方式	Case 2-4	Case 2-5	Case 2-6
置換換気方式	Case 3-4	Case 3-5	Case 3-6

表-3 境界条件および計算条件

解析メッシュ数	Case1 280(x)×44(y)×69(z)=850,080 Case2 240(x)×44(y)×60(z)=633,600 Case3 141(x)×70(y)×60(z)=592,200
差分スキーム	移流項: QUICK、その他は 2 次中心差分
流入境界	Case1: $U_{in}=0.42\text{m/s}$ Case2: $U_{in}=0.51\text{m/s}$ Case3: $U_{in}=0.56\text{m/s}$ $k_{in}=3/2 \cdot (U_{in} \times 0.05)^2$, $\epsilon_{in}=C_{\mu} \cdot k_{in}^{3/2} / l_{in}$, l_{in} =吹出幅の 1/7, $C_{\mu}=0.09$
流出境界	U_{out} =(質量保存による), k_{out} , ϵ_{out} = free slip
壁面境界	速度: no-slip、温度は各表面の熱収支式より算出される対流熱流束(W/m ² ·K)を与える。 放射: 放射率は対称面を 0.0、その他壁面は 0.9
その他	吹出風速、即ち吹出風量は $\text{min.O.A.} \approx 30\text{m}^3/\text{h} \cdot \text{人}$ を仮定し、O.A.導入量を空調風量の 10%とした場合の換気回数 20 回/h に基づいて算出。 拡散場解析でのトレーサは Passive Contaminant を仮定し、居住域もしくは呼吸域で一様発生

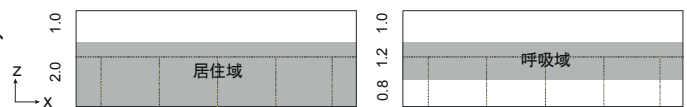
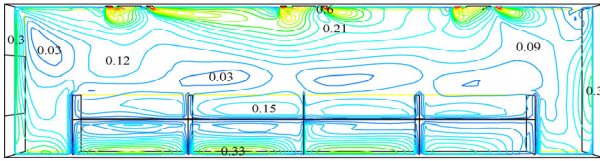


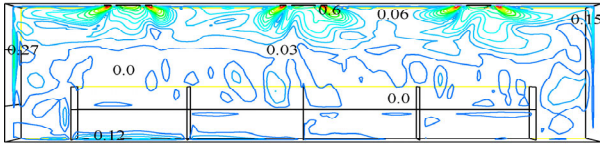
図-2 居住域・呼吸域の設定

左側に右回りの循環流、室右部では左回りの循環流の 2 つの大循環流が観察され、天井面に設置した吹出・吸込口を有する unit 型空調機周辺では吹出気流と吸込気流が出入りし、複雑な流れ性状となった。空調空気を室温より相対的に高温で供給する Case1-3(冬期暖房)では、吹出空気は浮力の効果で天井面付近に留まり、床面まで到達せず、吹出口近傍以外の領域で滞留域が観察された。居住域に気流障害物となる什器を設置した Case1-4(夏期冷房)では室上部においては、什器を設置しないケース(Case1-1)とほぼ同様の流れ場を示す。しかし居住域では什器で囲まれた各領域内でそれぞれ循環流が生じており、更に複雑な流れ場となる(**図-3(1)**)。冬期冷房(Case 1-5)条件と夏期冷房条件(Case 1-4)は熱負荷条件が類似しているため、流れ場もほぼ同様となる。Case1-6(冬期暖房)では吹出気流が居住域まで到達せず、居住域は滞留域となるため什器の有無に関係なく Case1-3 とほぼ同様の流れ性状となる(**図-3(2)**)。

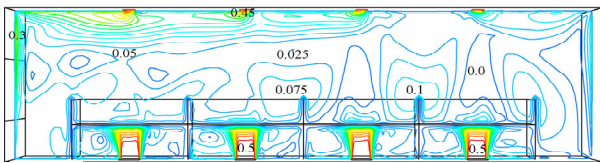
床吹出・天井吸込方式型の空調システム(Case 2)では、既報²⁾で示した居住域に什器を設置しない場合に、空調空気を室温より相対的に低温で供給する Case2-1(夏期冷房)において、床面からの吹出気流は天井面に到達する前に拡散し、室上部



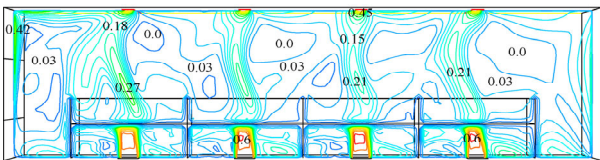
(1) Case 1-4(夏期冷房)



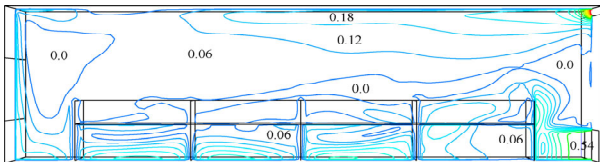
(2) Case 1-6(冬期暖房)



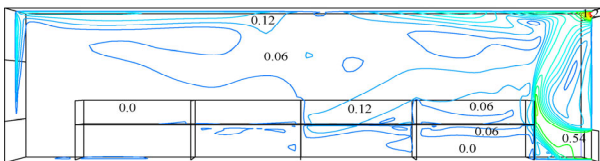
(3) Case 2-4(夏期冷房)



(4) Case 2-6(冬期暖房)



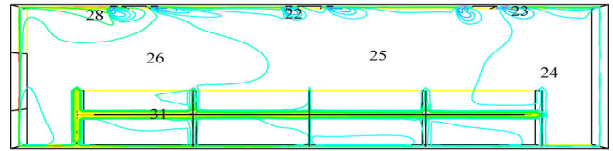
(5) Case 3-4(夏期冷房)



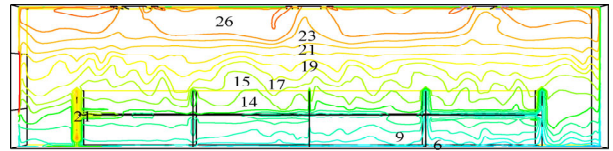
(6) Case 3-6(冬期暖房)

図-3 流れ場解析結果 (スカラ風速 [m/s])

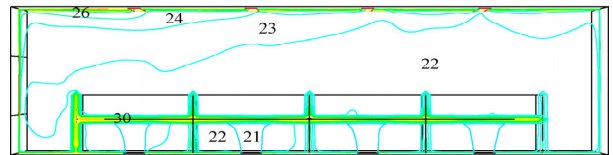
では滞留域が生じた。また、空調空気を室温より相対的に高温で供給する Case2-3(冬期暖房)では、吹出空気が浮力の効果で上昇し、天井面に設置された吸込口まで到達しており、ショートサーキットが観察された。居住域に什器を設置した Case2-4(夏期冷房)、Case2-5(冬期冷房)および Case2-6(冬期暖房)も、什器を設置しないケース(Case2-1、2-2)とほぼ同様の流れ場を示すが、床面からの吹出気流がデスク下面に衝突し居住域でより拡散的な流れ場が形成されている(図-3(3)(4))。置換換気方式型の空調システム(Case3)では、既報²⁾で示



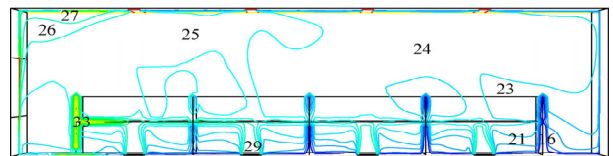
(1) Case 1-4(夏期冷房)



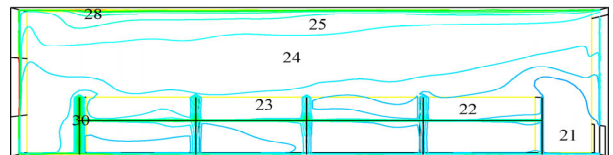
(2) Case 1-6(冬期暖房)



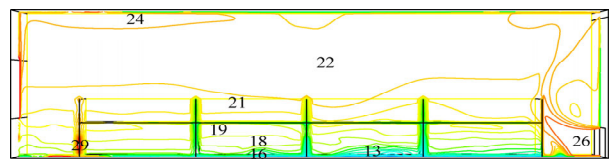
(3) Case 2-4(夏期冷房)



(4) Case 2-6(冬期暖房)



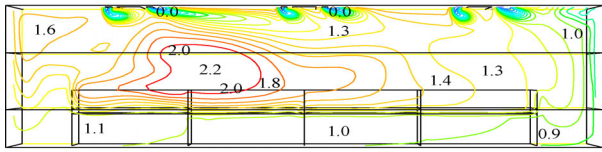
(5) Case 3-4(夏期冷房)



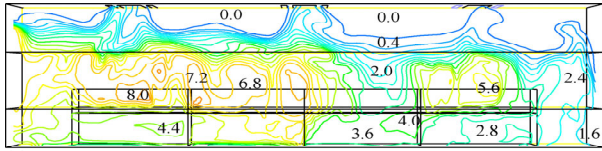
(6) Case 3-6(冬期暖房)

図-4 温度場解析結果 [°C]

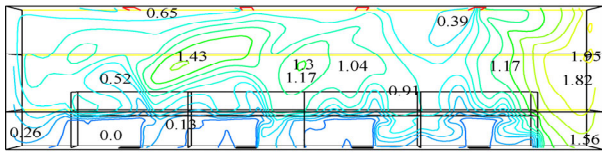
した居住域に什器を設置しない場合に、Case3-1(夏期冷房)において、吹出気流が対向壁まで到達し、右回りの室内大循環流を形成した。また、Case3-3(冬期暖房)では、吹出空気が吹出直後に浮力の効果で上昇し、吹出口側壁面付近でショートサーキットが生じた。また居住域に什器を設置した Case3-4(夏期冷房)では、床面に沿って吹き出した空調空気が各パーティションに衝突し、パーティションで囲まれた空間内は滞留域となる(図-3(5))。Case3-6(冬期暖房)では吹出直後のパーティションへの衝突、および浮力の効果により、空調吹出空気



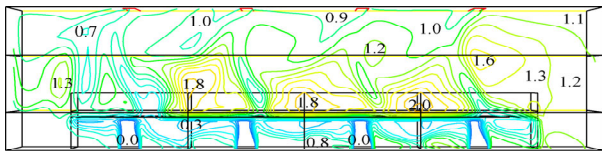
(1) Case 1-4(夏期冷房)



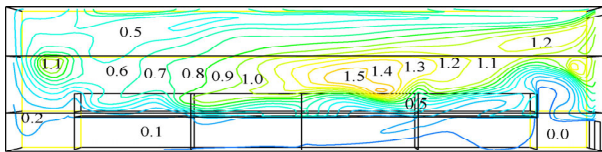
(2) Case 1-6(冬期暖房)



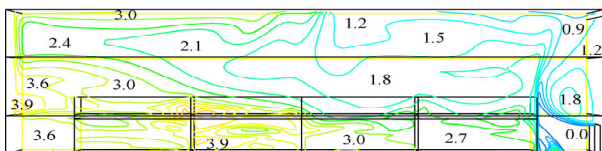
(3) Case 2-4(夏期冷房)



(4) Case 2-6(冬期暖房)

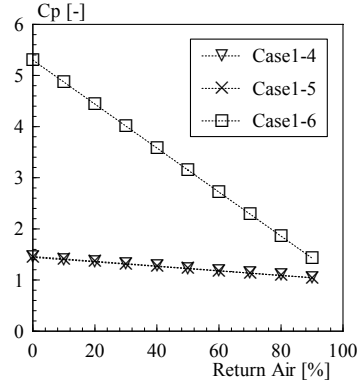


(5) Case 3-4(夏期冷房)

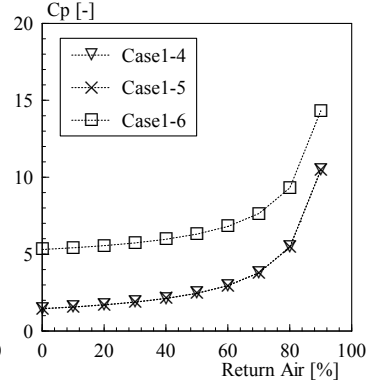


(6) Case 3-6(冬期暖房)

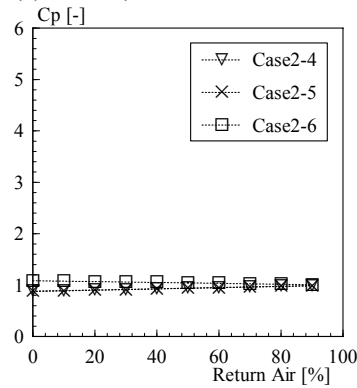
図-5 汚染質拡散場解析結果
(居住域一様発生、完全混合濃度で無次元化)



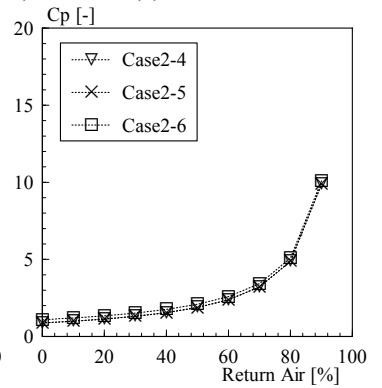
(1) Case 1 (天井吹出・天井吸込方式)



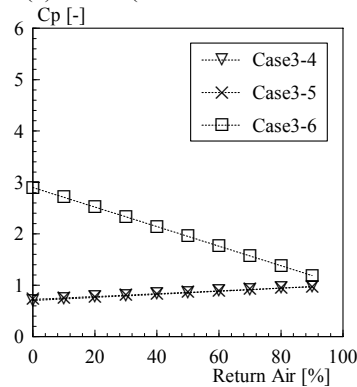
(1) Case1



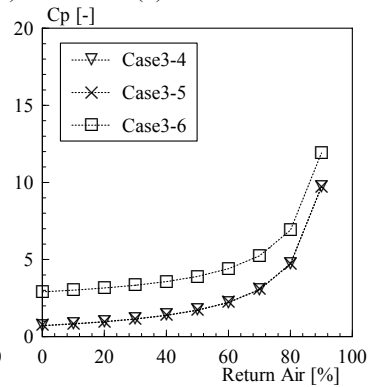
(2) Case 2 (床吹出・天井吸込方式)



(2) Case2



(3) Case 3 (置換換気方式)



(3) Case3

図-6 居住域平均濃度 Cn 分布
(縦軸平均濃度は吸込口濃度で基準化)

図-7 居住域平均濃度分布
(RA0%の場合の吸込口濃度で基準化)

は吹出直後に上昇し、Case3-4 と比較し、更に小さなショートサーキットを形成している(図-3(6))。冬期冷房(Case 3-4)条件と夏期冷房条件(Case 3-5)は熱負荷条件が比較的同じため、流れ場もほぼ同様となる。

6.2. 温度分布

天井吹出・天井吸込方式型の空調システム(Case 1)では、既報²⁾で示した居住域に什器を設置しない場合、Case1-1(夏期冷房)において、unit 型空調機設置場所付近で低温領域が生じ、ショートサーキットの存在が示された。また Case1-3(暖房)では、室内全体に温度成層が観察された。居住域に什器を設置した Case1-4 および Case1-5 では什器を設置しないケース(Case1-1, Case1-2)と比較し、室内大循環流による室内攪

拌効果が低下し、居住域平均温度が上昇する(図-4(1))。冬期暖房条件(Case 1-6)では、什器の有無に関わらず室内全体に温度成層が観察される傾向は同様である(図-4(2))。

床吹出・天井吸込方式型の空調システム(Case 2)では、既報²⁾で示した居住域に什器を設置しない場合、Case2-1(夏期冷房)では、室上部に緩やかな温度成層が観察され、空調空気を室温より相対的に高温で供給する Case2-3(冬期暖房)では、吹出気流が天井部の吸込口まで到達し、高温で供給された空調空気は室内に拡散する前に吸込口より排出される傾向を示した。本報で示す解析では、床吹出・天井吸込方式型の空調システム(Case2)の場合、床面からの吹出気流がデスク下面に衝突し居住域で滞留域を形成するため、Case2-4(夏期冷

房)では床面付近に低温領域が、Case2-6(冬期暖房)では高温領域が形成される(図-4(3)(4))。

置換換気方式型の空調システム(Case 3)では、既報²⁾で示した居住域に什器を設置しない場合、空調空気を室温より相対的に低温で供給する Case3-1(夏期冷房)では、室内に温度成層が観察され、空調空気を室温より相対的に高温で供給する Case3-3(冬期暖房)では、明確なショートサーキットが生じた。什器を設置することで温度分布はより複雑に分布し、特に暖房条件では滞留域となる床面付近で低温域が形成される(図-4(6))。

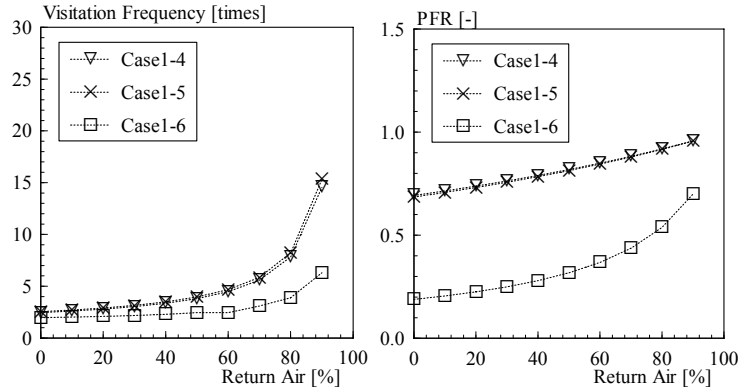
6.3. 居住域を対象とした換気効率解析

6.3.1. 規準化居住域濃度の分布

図-5 に汚染質を居住域で一様発生させた場合の拡散場解析結果を示す。解析は全外気(再循環空気量 0%)を仮定し、完全混合濃度で無次元化している。また図-6 に吹出空気量一定で再循環空気の割合のみを 0%~90%まで順次変化させた場合の居住域平均濃度(規準化居住域濃度)の分布を示す。図-6 の平均濃度は各再循環空気量における排気口での平均濃度で基準化している。

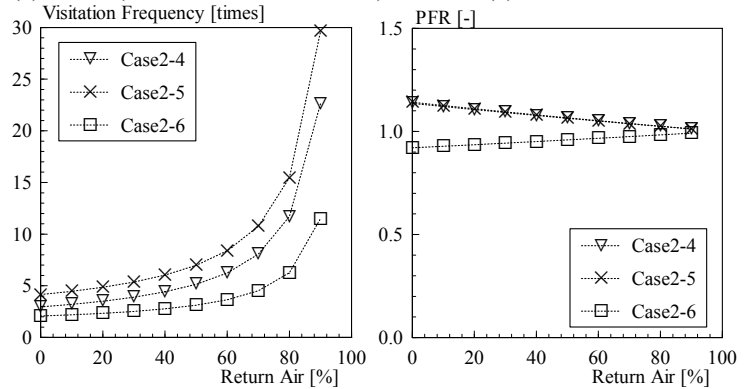
Case1-4(天井吹出・天井吸込方式、夏期冷房)および Case1-5(同、冬期冷房)では再循環空気の割合が 0%の場合に居住域平均濃度は 1.5 となり、完全混合を仮定した室に対し、5 割程度換気性状が悪いことを示す。これは什器の無いケース(Case 1-1、Case 1-2)と同様の濃度レベルである²⁾。再循環空気の割合が増加すると室内完全混合仮定濃度に近づき、HASS102 で定義する換気効率、即ち規準化居住域濃度は 1 に近づく。Case1-6(同、冬期暖房)では吹出気流が居住域まで到達せず、室中央部では滞留域となっているため、居住域平均濃度は高くなる。濃度レベルは什器の無いケース(Case 1-3)と比較して 1.2 倍となる。またこのケース(Case1-6)では Case1 の中で VF の値が最も小さくなっており(図-8(1))、対象領域内の汚染質滞在時間が相対的に長いことを端的に示している。再循環空気の割合を増加させると居住域平均濃度は 1 に近づく傾向は同様である(図-6(1))。

Case2-4(床吹出・天井吸込方式、夏期冷房)および Case2-5(同、冬期冷房)では再循環空気の割合が 0%の場合に居住域平均濃度は若干 1.0 を下回り、完全混合を仮定した室よりも良い換気性状となる。什器の無いケース(Case 2-1、Case2-2)では居住域平均濃度は 0.9 であり、什器の有無で換気性状に大きな差は生じない。再循環空気の割合が増加すると室内完全混合仮定濃度に近づき、規準化居住域濃度は 1 に近づく。Case2-6(同、冬期暖房)では再循環空気の割合が 0%の場合の居住域平均濃度は 1.1 であり、什器の無い Case 2-3 と比較し、30%程度換気性状が改善されている(図-6(2))。これは床面からの供給空気がデスク下面に衝突し、居住域で新鮮外気の滞留域が形成されているためと考えられる。



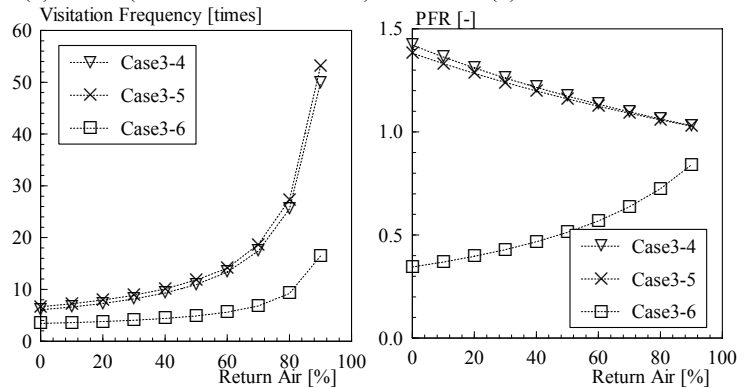
(1) Case 1 (天井吹出・天井吸込方式)

(1) Case1



(2) Case 2 (床吹出・天井吸込方式)

(2) Case2



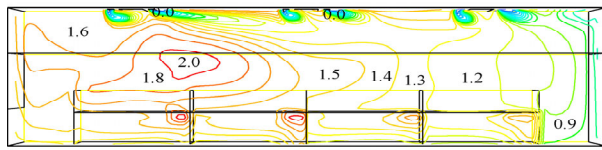
(3) Case 3 (置換換気方式)

(3) Case3

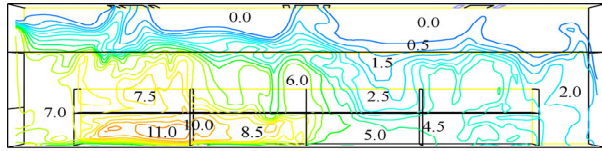
図-8 居住域 VF 分布

図-9 居住域 PFR 分布

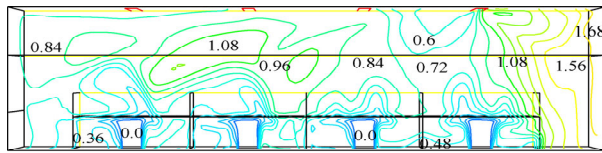
Case3-4(置換換気方式、夏期冷房)、Case3-5(同、冬期冷房)では再循環空気の割合が 0%の場合に居住域平均濃度は 0.7 程度の値となり、完全混合を仮定した室に対し、3 割程度換気性状が良い結果となる。什器の無いケース(Case3-1、Case3-2)では、居住域平均濃度が 1.0 を越えており、什器を設置することで居住域の換気性状が改善されている。これは什器を設置した Case3-4 および Case3-5 において、各パーティションに衝突した吹出気流が居住域で上昇流を形成するため、発生汚染質を効率的に居住域外に排出する流れ場が形成されていることが原因である。Case3 は置換換気を意図した換気システムであったが、本解析条件では、置換換気方式としては有効に機能しておらず、単に床面に沿って吹き出す



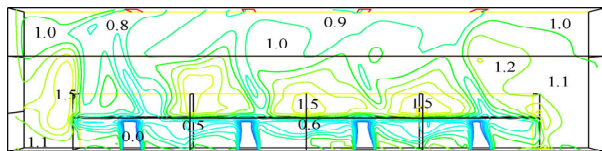
(1) Case 1-4(夏期冷房)



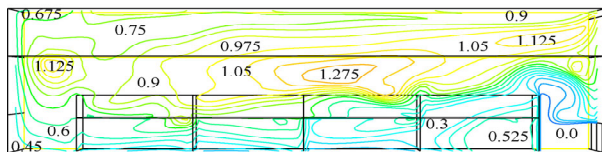
(2) Case 1-6(冬期暖房)



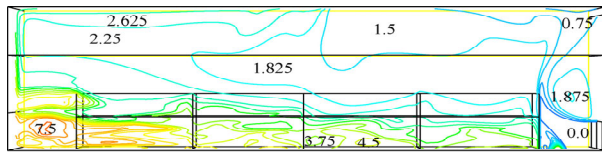
(3) Case 2-4(夏期冷房)



(4) Case 2-6(冬期暖房)



(5) Case 3-4(夏期冷房)

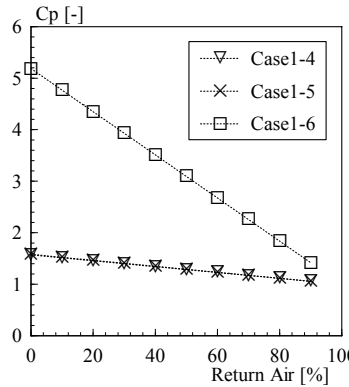


(6) Case 3-6(冬期暖房)

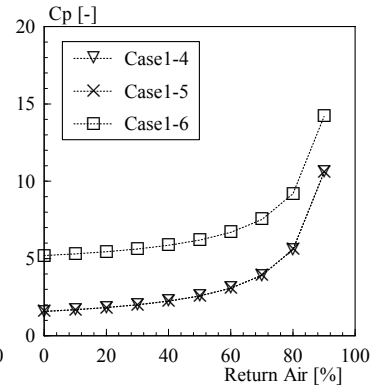
図-10 汚染質拡散場解析結果
(呼吸域一様発生、完全混合濃度で無次元化)

換気システムとなっている。X. Yuan, Q. Chen ら^{7,8)}によれば、置換換気方式では室内熱負荷が 80W/m^2 以下において、低風速で空気供給を行う場合に有効に機能することが示唆されており、本解析条件 ($U_{in}=0.56\text{m/s}$ 、 $70\sim 100\text{W/m}^2$ 程度の室内熱負荷) は置換換気方式として適切な条件設定とはなっていない。しかしながら、居住域に気流障害物を設置した今回の解析より室内に障害物が存在する場合には、床面に沿って強く吹き出す空調方式が居住域の換気性状を改善する可能性を持つことが示されたといえる。

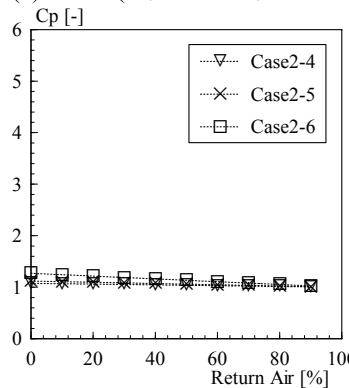
また、図-7 に再循環空気 0% の場合の排気口濃度で基準化した場合の居住域平均濃度分布を示す。当然のことであるが、再循環空気の割合が増加すると居住域平均濃度は指数関数



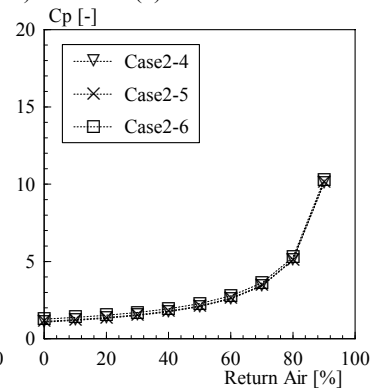
(1) Case 1 (天井吹出・天井吸込方式)



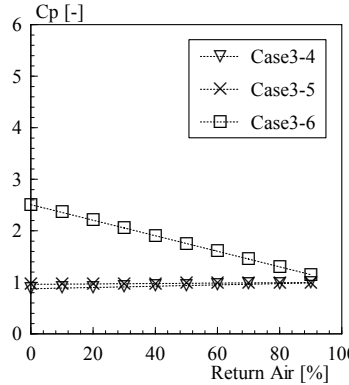
(1) Case1



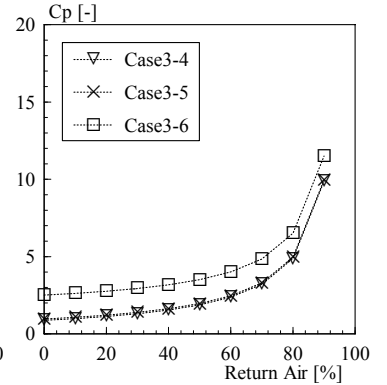
(2) Case 2 (床吹出・天井吸込方式)



(2) Case2



(3) Case 3 (置換換気方式)



(3) Case3

図-11 呼吸域平均濃度 C_n 分布
(縦軸平均濃度は吸込口濃度で基準化)

図-12 呼吸域平均濃度分布
(RA0% の場合の吸込口濃度で基準化)

的に増加していき、再循環空気が 100% で平均濃度は無限大となる。換気性状の効率を示す規準化居住域濃度は再循環空気の割合が増加すると 1 に収束していくが、実際の濃度レベルは急激に上昇していくのである。室内空気質の評価の観点からは、換気効率の制御の他、実際の濃度値(例えば CO_2 濃度等)の面からも制御を行うことが重要であることは言うまでもない。

6.3.2. 居住域 Visitation Frequency の分布

図-8 に吹出空気に含まれる再循環空気の割合を 0%~90% まで順次変化させた場合の居住域に対する VF を示す。

Case1-4 (天井吹出・天井吸込方式、夏期冷房)及び Case1-5 (同、冬期冷房)においては、再循環空気の割合が 50% を越え

ると VF の増加率が急激に大きくなる。新鮮空気のみを供給した場合の VF の値(VF=2.5)に対し、再循環 50%の場合には VF が約 1.1 倍(VF=3.8)、再循環 90%の場合には約 5.8 倍(VF=14.5)に増加する(図-8(1))。什器を設置しないケース(Case1-1、Case1-2)と比較し、VF の値は 1/2 以下となっている。居住域平均濃度レベルは什器の有無で大きな差はなく、什器を設置することで汚染質の再帰は少ないが(VF が小)、居住域内の汚染質平均滞在時間は長い(Tp が大)という濃度場形成の構造となっていることが読みとれる。Case1-6(同、冬期暖房)においては、Case1-4 および Case1-5 と比較し、VF の値・増加率共に低い値となり、新鮮空気のみを供給した場合には VF の値は 2.0、50%再循環の場合には VF=2.4、90%再循環の場合には VF=6.3 となる。什器の有無による VF の変化は殆ど無い。

Case2-4(床吹出・天井吸込方式、夏期冷房)では、新鮮空気のみを供給した場合の VF の値(VF=3.0)に対し、再循環 50%の場合には VF が約 1.7 倍(VF=5.1)、再循環 90%の場合には約 7.5 倍(VF=22.6)に増加する(図-8(2))。Case2-6(同、冬期暖房)では、Case2-4 と比較し、VF の値・増加率共に低い値となる。特に冬期暖房条件において什器が存在することにより VF のオーダが大きく低下する結果となった。

Case3-4(置換換気方式、夏期冷房)および Case3-5(同、冬期冷房)では VF のオーダが 3 種の換気システムの中で最も大きい結果となり、新鮮空気のみを供給した場合の VF の値(VF=6.1)に対し、再循環 50%の場合には VF が約 1.8 倍、再循環 90%の場合には約 8.2 倍(VF=49.8)に増加する(図-8(3))。Case3-6(同、冬期暖房)において Case3-4 および Case3-5 と比較し、VF の値・増加率共に低い値となる。冷房条件(Case3-4、3-5)では、居住域に什器を設置することにより VF の値は 4 倍に増加しており、汚染質の出入りの激しい流れ場が形成されていることが理解できる。

6.3.3. 居住域 Purging Flow Rate の分布

図-9 に吹出空気に含まれる再循環空気の割合を 0%~90% まで順次変化させた場合の居住域 PFR 解析結果を示す。

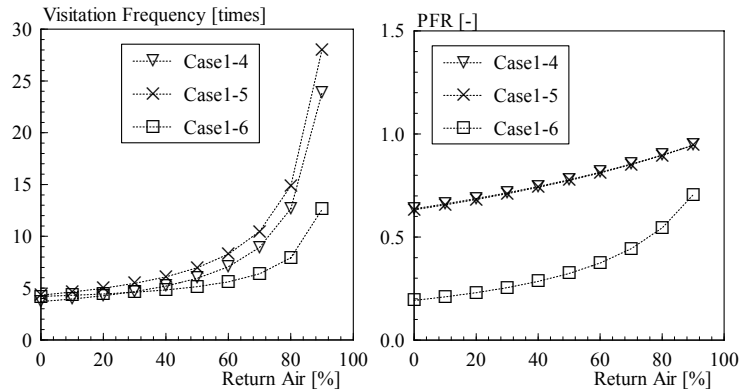
(3)式に示すとおり、吹出口換気量で無次元化した PFR は排気口濃度で無次元化した居住域平均濃度と逆数の関係となる。再循環空気の割合が増加すると室内完全混合仮定濃度、即ち排気濃度で無次元化した平均濃度は 1 に近づくため、PFR の値も 1 に近づく。

居住域を対象とした場合、全解析ケース中で Case2(床吹出・天井吸込方式)および Case3(置換換気方式)の冷房条件において PFR が 1 を越えており、居住域に効率的に新鮮外気を供給するシステムであることが分かる。

6.4. 呼吸域を対象とした換気効率解析

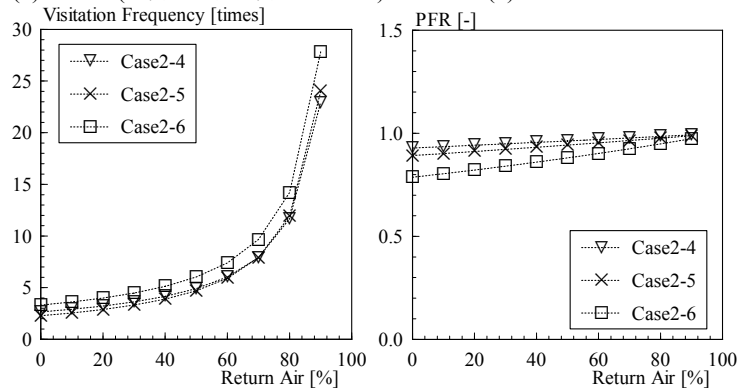
6.4.1. 規準化呼吸域濃度の分布

図-10 に汚染質を呼吸域で一様発生させた場合の拡散場解



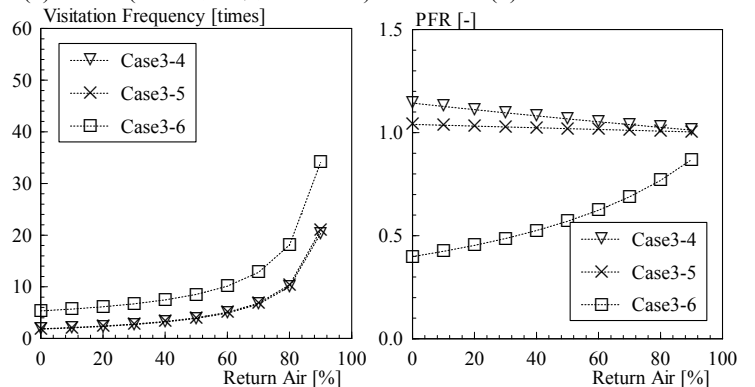
(1) Case 1 (天井吹出・天井吸込方式)

(1) Case1



(2) Case 2 (床吹出・天井吸込方式)

(2) Case2



(3) Case 3 (置換換気方式)

(3) Case3

図-13 呼吸域 VF 分布

図-14 呼吸域 PFR 分布

析結果を示す。解析は全外気(再循環空気量 0%)を仮定し、完全混合濃度で無次元化している。また、図-11 に吹出空気に含まれる再循環空気の割合を 0%~90%まで順次変化させた場合の呼吸域平均濃度(規準化呼吸域濃度)の分布を示す。図-11 の平均濃度は排気口での平均濃度で基準化している。

Case1(天井吹出・天井吸込方式)、Case2(床吹出・天井吸込方式)及び Case3(置換換気方式)の全てのケースにおいて、呼吸域平均濃度の分布は居住域平均濃度分布と同様の傾向を示す。什器を設置しないケースと比較した場合、Case1-6 及び Case3-6(冬期冷房)において呼吸域平均濃度が上昇している。その他のケースでは什器の有無により平均濃度は大きく変化しない結果となった。

また、**図-12** に再循環空気 0%の場合の吸込口濃度で基準化した場合の呼吸域平均濃度分布を示す。居住域の場合と同様に再循環空気の割合が増加すると、規準化呼吸域濃度は1に収束していくが、呼吸域平均濃度の絶対値は指数関数的に増加していき、再循環空気が100%で平均濃度は無限大となる。

6.4.2. 呼吸域 Visitation Frequency の分布

図-13 に吹出空気に含まれる再循環空気の割合を 0%~90%まで順次変化させた場合の呼吸域に対する VF を示す。

Case1(天井吹出・天井吸込方式)の場合、呼吸域の VF の値は、居住域を対象とした場合の 1.5 倍程度の値となり、Case1-4(夏期冷房)において新鮮空気のみを供給した場合には VF=3.7、再循環 50%の場合には VF=5.9、再循環 90%の場合には VF=23.9 となる。この傾向は Case1-5(冬期冷房)においても同様である(**図-13(1)**)。Case1-6(冬期暖房)においては、居住域を対象とした VF の値と比較し、2 倍程度に値が大きくなっている。

Case2(床吹出・天井吸込方式)および Case3(置換換気方式)の場合も、呼吸域の VF の値は居住域を対象とした場合と比較して若干大きな値となっている。

6.4.3. 呼吸域 Purging Flow Rate の分布

図-14 に吹出空気に含まれる再循環空気の割合を 0%~90%まで順次変化させた場合の呼吸域 PFR 解析結果を示す。

吹出口換気量で無次元化した PFR は排気口濃度で無次元化した居住域平均濃度と逆数の関係となる。再循環空気の割合が増加すると室内完全混合仮定濃度即ち排気濃度で無次元化した平均濃度は1に近づくため、PFR の値も1に近づく。

呼吸域を対象とした場合、全解析ケース中で Case3(置換換気方式)の Case3-1(夏期冷房)および Case3-2(冬期冷房)のみ PFR が 1 を越えており、呼吸域に効率的に新鮮外気を供給するシステムであることが分かる。これは什器の有無に関係なく同様の傾向である。

7. 結論

居住域にパーティション・デスク等の気流障害物が設置されたオフィスを対象として、各種換気システム及び、吹出空気に含まれる再循環空気の割合を変化させた場合の居住域及び呼吸域平均濃度の構造を、VF 及び PFR により解析した。その結果、以下の知見が得られた。

1. 天井吹出・天井吸込方式の換気システムの場合

- (1) 什器の有無に関わらず、冷房条件では吹出空気に含まれる再循環空気の割合が 50%を越えると急激に VF の値が増加し、特に呼吸域では 90%再循環の場合には VF の値が 20 を超える。
- (2) 冬期暖房条件のケースでは、什器を設置した場合に、居住域の平均濃度は什器の無い場合の 1.2 倍に上昇す

るが、吹出空気に含まれる再循環空気の割合が増加すると、居住域及び呼吸域平均濃度は完全拡散濃度に近づき、HASS で定義する換気効率は 1 に近づく。

2. 床吹出・天井吸込方式の換気システムの場合

- (1) 天井吹出・天井吸込方式の場合と同様に、吹出空気に含まれる再循環空気の割合が 50%を越えると急激に VF の値が増加し、特に呼吸域では、新鮮空気のみを供給した場合の VF の値に対し、50%再循環の場合には VF が約 1.8 倍、90%再循環の場合には約 8.5 倍に増加する。
- (2) 床吹出・天井吸込方式の場合、什器の存在により床面付近で新鮮外気の滞留域が形成され、特に冬期暖房条件における換気性状が大きく改善される。

3. 置換換気方式の換気システムの場合

- (1) 冷房条件のケースにおいて、各パーティションに衝突した吹出気流が居住域で上昇流を形成するために、居住域の換気性状は什器を設置することにより 1 割程度改善する。しかしながら什器の存在により冬期暖房条件では換気効率が悪化する。
- (2) 全ての換気システムの中で、本換気方式の冷房条件のケースのみ居住域・呼吸域の平均濃度が 1 を下回り、即ち PFR が 1 を越え、完全混合を仮定した室よりも良い換気性状であることが示された。

謝辞

本解析結果のデータ処理においては、堀田太郎氏ならびに星俊明氏(研究当時、東京工芸大学卒論生)の労に負うところが大きい。記して深甚なる謝意を示す。

注

- (1) 流入 flux (Δq_p)の定義は以下の通り。

$$\Delta q_p = \text{移流 flux } \sum (u_i \cdot C_i \cdot A_i) + \text{拡散 flux } \sum (-v_t \cdot \partial C_i / \partial x_i \cdot A_i)$$
 u_i は i 点での平均風速[m/s]、 C_i は i 点での平均濃度[kg/m³]、 A_i は流入面の面積[m²]、 v_t は乱流拡散係数[m²/s]を示す。
- (2) 空調吹出温度 T_{in} は以下の熱バランス式より算出。
 $q_{total} = C_p \times \gamma \times V \times (t_{ave} - t_{in})$, C_p : 定圧比熱, γ : 空気密度, V : 換気量, t_{ave} : 空調目標温度: 夏期 26°C, 冬期 24°C
 夏期冷房時 $t_{in} = 21.4^\circ\text{C}$ 、冬期冷房時 $t_{in} = 19.2^\circ\text{C}$ 、暖房時 $t_{in} = 27.4^\circ\text{C}$ 。
- (3) 前報²⁾では乱流モデルとして標準 $k-\epsilon$ model、壁関数として一般化対数則、移流項の差分スキームとして Hybrid を用いて流れ場の解析を行っている。本報では乱流モデルとして低 Re 型 model を用いている他、差分スキームに QUICK を用い、解析精度を向上させている。そのため、前報ならびに本報での流れ場解析結果の差は、居住域に気流障害物を設置した点以外に、乱流モデル等に起因する解析精度の差も含まれていることとなる。例えば、バックステップ流れを対象とした再付着点の解析においては、低 Re 型 model (Abe-Nagano model) を用いた場合、ほぼ実験に対応した予測精度であ

るのに対し、標準 $k-\epsilon$ model を用いた解析では 10%程度小さく予測することが報告されている⁹⁾。本報での比較は、最低限この程度の誤差を含む上での検討となっている。

参考文献

- 1) HASS102-1997 換気規準・同解説, 空調和衛生工学 vol. 71, no. 5, pp418- 433, 1997
- 2) 加藤信介、伊藤一秀、村上周三 (2000) 換気システムを変化させた場合の規準化居住域濃度、Visitation Frequency, Purging Flow Rate の系統的解析 オフィス空間を対象とした居住域換気効率の評価に関する研究 第1報: 空調和・衛生工学会論文集、No. 78、pp 45-56
- 3) 伊藤一秀、加藤信介、村上周三 (2000)平均拡散場解析による Visitation Frequency, Purging Flow Rate の解析 不完全混合室内の居住域換気効率の評価に関する研究: 日本建築学会計画系論文集、No. 529、pp 31- 37
- 4) Csanady G. T. (1983) Dispersal by randomly varying currents, J. Fluid Mech. Vol. 132, pp.375- 394
- 5) Sandberg, M. (1992) Ventilation effectiveness and purging flow rate - A review. International Symposium on Room Air Convection and Ventilation Effectiveness, University of Tokyo, ISRACVE ASHRAE pp-17
- 6) K. Abe, T. Kondo, Y. Nagano (1994) A New Turbulent Model for Predicting Fluid Flow and Heat Transfer in Separating and Reattaching Flows -1, Flow Fields Calculations, Int. J. Heat Mass Transfer, Vol.37.No1., pp139-151
- 7) Xiaoxiong Yuan, Qingyan Chen, Leon R. Glicksman (1998) A Critical Review of Displacement Ventilation, ASHRAE Transactions 104-1 , pp.78-90
- 8) Xiaoxiong Yuan, Qingyan Chen, Leon R. Glicksman (1999) Measurements and Computations of Room Airflow with Displacement Ventilation, ASHRAE Transaction 105-1 , pp.340-352

Study of Normalized Concentration, Visitation Frequency and Purging Flow Rate under the Condition to Set up Furniture in Occupied Zone

Part 2 Study on Evaluation of Ventilation Effectiveness of Occupied Zone in Office Space

By Kazuhide Ito^{*1}, Shinsuke Kato^{*2}, Shuzo Murakami^{*3}

Key Words : Return Air, Normalized Concentration in an Occupied Zone, Visitation Frequency, Purging Flow Rate

Synopsis : The Ventilation Standard HASS 102 recommends the ventilation design, which takes into account a ventilation effectiveness in an occupied zone, under the incompletely mixed condition. This index is called Normalized Concentration in an Occupied Zone (Cn), which defined as the ratio of the difference between the average pollutant concentration in an occupied zone and that of the completely mixed indoor air.

In this research, Normalized Concentration in an Occupied Zone in office space (10m(x)× 3m(y) ×3m(z)) is analyzed using the ventilation effectiveness indices of Visitation Frequency (VF ; frequency of contaminant returning back to an objective domain) and Purging Flow Rate (PFR ; air flow rate of a local domain based on the domain averaged concentration). In this paper, the partitions and desks are installed in the occupied zone of office space.

In this paper, the relationship between VF, PFR and Normalized Concentration in an Occupied Zone (Cn) are methodically analyzed.

3 cases of ventilation system were set where the thermal boundary conditions (① cooling condition in summer season, ② cooling condition in winter season, ③ heating condition in winter season) are changed respectively.

In the numerical analysis, changes in the property of Normalized Concentration in an Occupied Zone (Cn), are analyzed by VF and PFR in detail. The effects of the increment of return air, which induced in a supplied air, are also studied.

In this analysis, while VF values of occupied zone were exponentially increased, Normalized Concentration in an Occupied Zone (Cn) got closer to 1.0 (the concentration of the completely mixed indoor air) for the increment of return air in supplied air.

(Received March 12, 2004)

*1 Tokyo Polytechnic University, Member

*2 Institute of Industrial Science, University of Tokyo, Member

*3 Keio University, Member