

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

第1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

加藤 信介 *1

伊藤 一秀 *2

村上 周三 *1

空気調和・衛生工学会で提案された HASS 102 換気規準では、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, 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、各種換気システムを採用したオフィス空間を対象として、空調吹出空気に含まれる Return Air (再循環空気)の割合を変化させた場合のこの室内の換気効率, すなわち規準化居住域濃度の構造を Visitation Frequency および Purging Flow Rate の指標を用いて詳細に解析する。

本稿においては、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)と HASS 102 換気規準で定義されている規準化居住域濃度の関係を、室内における循環流と Return Air (再循環空気, 即ち室全体に対する循環流)の相似性から考察する。更に具体的解析事例として一般的オフィス空間を対象として行った Return Air (再循環空気)が変化した場合の規準化居住域濃度, Visitation Frequency および Purging Flow Rate の解析結果を示し、3 種の異なる換気システムの評価を行うことで、それら換気効率指標の有用性を確認する。

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

簡易に換気計画を行う際には、室内の完全混合を仮定し、室内における汚染質の濃度分布を無視した状態で必要換気量が算定されることが多い。しかし一般には、室内に汚染源が偏在し、不均一濃度場が形成されていることが多い。こういった場合、居住域、人間の呼吸域周辺、発熱機器或いは調理機器周辺といった室内の限られた範囲における空気質制御が重要となる。特に空気調和・衛生工学会で提案されている HASS 102 換気規準¹⁾においては、完全混合の仮定が成立しない居室においては、室内のなかで特に居住域の換気効率 (=排気濃度で無次元化された居住域平均濃度, 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。本研究ではオフィス空間を対象として、HASS 102 で定義される換気効率, すなわち居住域および呼吸域の平均濃度の構造を Visitation Frequency (訪問回数)²⁾, 局所領域平均滞在時間(Tp), および Purging Flow Rate (局所排出換気量)³⁾の指

標を用いて詳細に解析する。

居住域および呼吸域といった局所領域の平均濃度は、領域内で発生する汚染質量と局所領域に流入する換気量で決定される。一般に汚染質発生率は最小限に押さえられており、既知量として与えられることが多く、そのため局所領域の平均濃度は流入する換気量を増減することで制御されることとなる。本研究で用いる Purging Flow Rate (局所排出換気量)は、局所領域の平均濃度を制御する換気量を直接定義するものである。詳細は後述するが、HASS 102 で定義される規準化居住域濃度は排気口風量によって無次元化された Purging Flow Rate の逆数となる。

この局所領域の換気性状を評価する際には、室全体の換気システムと、問題とする局所領域の換気性状の相対的な関係を理解することが重要となる。Purging Flow Rate は室全体の換気システムから供給される新鮮換気量に対し局所領域内で汚染質を排出するのに有効となった換気量を示すものであるが、この局所領域で発生した汚染質の排出効率を室全体の換気システムとの関係で評価することは、局所領

*1 東京大学生産技術研究所 正会員

*2 東京工芸大学 正会員

域の平均濃度の構造(換気の構造)を理解するうえで有効となる。本研究では室全体の換気システムと、局所領域で発生、もしくは局所領域に流入した汚染質の排出特性との関係を端的に示す指標として Visitation Frequency を用いて局所領域の換気性状を明らかにする。

本報では一般的な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・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 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に与える影響を Visitation Frequency および Purging Flow Rate を用いて詳細に解析した結果を報告する。

なお、本報は空気調和・衛生工学会学術講演論文集にて公表した内容⁴⁾に新たな解析ケースを加えて取りまとめたものである。

2. Visitation Frequency および Purging Flow Rate

一般的な室内においては吹出噴流が指向性を持つこと、汚染発生源が偏在すること、更には室内障害物が存在することなどの理由で室内に汚染質の不均一濃度分布が生じる。HASS 102 で定義される規準化居住域濃度、空気齢⁵⁾、および SVE's⁶⁾はこういった汚染質の不均一濃度分布を基にして室内各点の換気効率を評価している。

本研究では、汚染質の不均一濃度分布の高低のみを評価するのではなく、発生した汚染質が室外に排出されるまで、問題とする局所領域にどれくらい再帰し、また滞在するかなど、領域内の汚染質濃度を定める汚染質挙動の構造の解析・評価を行う。そのための指標として Visitation Frequency および局所領域平均滞在時間 T_p を導入する⁷⁾。

Visitation Frequency (訪問回数, 以降 VF)とは解析対象として局所的に設定された領域内、すなわち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する。すなわち、局所領域内で発生した、もしくは局所領域に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。全発生汚染質の平均 Visitation Frequency に対し、個々の汚染質挙動を示す個別汚染質 Visitation Frequency(個別 VF)を定義することが出来る。本報では平均 Visitation Frequency を VF として表記し個々の汚染質挙動を示す個別 VF とは区別する。以降平均 VF は単に VF と表記する。

VF 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(1)式のように定義される⁸⁾。

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

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 VF は室内の換気設計上、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。VF が高い場合、局所領域から排出された汚染質が室内から円滑に排出されず、再度還流する頻度の高いことを示す。逆に VF が低い場合、汚染質の再帰の少ない好ましい設計であることを示す。

局所領域内の汚染質の平均的挙動は VF と共に、一度の訪問時に平均して滞在する時間(T_p)により記述される。局所領域平均滞在時間 T_p を、一度局所領域に流入した汚染質が局所領域から流出するまでの平均的時間として定義する。平均滞在時間 T_p に VF を乗じたものは局所領域での全(合計)平均滞在時間、即ち平均寿命を示し、これは局所領域の平均濃度に比例する。

局所領域の汚染質平均濃度が同一の値、すなわち局所領域の平均寿命が同一の場合($VF \times T_p$ の値が同じ)においても、循環流を含む領域では汚染質の再帰が大きくなり(VF 大)、滞在時間が短くなる(T_p 小)。また流れが滞留する領域においては汚染質の再帰は少ないが(VF 小)、滞在時間は長くなる(T_p 大)。このように VF, T_p を同時に評価することで、局所領域内の平均濃度生成の構造を評価することが可能となる。

Purging Flow Rate(PFR)は局所領域で実質的に汚染質を希釈、排除するのに有効な換気空気の流入量、すなわち汚染質の排出効率を示すものであり、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⁸⁾。

PFR は汚染質(Particle)の VF およ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。

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

PFR : Purging Flow Rate [m^3/s]
 V_p : 対象領域 P の体積 [m^3]
 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/m^3]

本来、室全体を対象とする場合に PFR と表記し、局所領域を対象とする場合には、局所を意味する"Local"を付けて Local PFR (L-PFR)と表記して区別するべきであるが、本報では局所領域のみを対象とするため、"Local"を省略して全て PFR と表記する。

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。PFR は局所領域の設定方法および汚染質発生位置に大きく依存するが、ここでは汚染質が対象とする局所領域内で一様発生する場合のみを考察し、汚染質発生位置の違いによる PFR 変化の性状に関しては検討を行わない^{注1)}。

3. 規準化居住域濃度 (HASS102 換気効率)と PFR

居住域などの局所領域の平均濃度は室内の空気質制御で

重要な指標となる。空気調和・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平均濃度として定義している。(2)式および(3)式に示されるように、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と一致する。

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

C_p : 対象領域 P の平均濃度 [kg/m^3]
 C_e : 排気口での平均濃度 [kg/m^3]
 C_n : 規準化居住域濃度 [-]
 Q : 吹出口換気量 [m^3/s]

(3)式に示されるように、居住域 PFR は、HASS102 換気規準で定義される換気効率、すなわち規準化居住域濃度を実質的に表すパラメータとなっている。

4. 解析オフィス空間の概要

4.1 解析対象オフィス (図-1)

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。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。全ての解析ケースで吹出換気量は $1,800\text{m}^3/\text{h}$ である。

本報で示す解析ケースは天井吹出・天井吸込方式型空調 (case 1) の場合、スロット吹出としては吹出風速が 0.42 m/s と小さい境界条件としている。床吹出・天井吸込方式型空調 (case 2) では吹出気流は鉛直方向成分($U_{in}=U_z=0.51\text{ m/s}$)のみとしたノズル状であり吹出ジェットの内拡散を押さえる条件としている。また置換換気方式型空調 (case 3) では置換換気としては吹出風速が比較的大きい($U_{in}=0.56\text{ m/s}$)条件としている。これらは全て室内換気性状を危険側に評価する吹出境界条件となっている。case1 から case3 の吹出条件を調整し、室内換気性状が安全側に評価される、より現実的な吹出境界条件とした場合の検討結果は次報で示す予定である。

4.2 解析ケースおよび熱負荷設定

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 $0.2\text{ 人}/\text{m}^2$ 、および1人当たり1台のOA機器(PC)を仮定し、床面一様に発熱量を与える。照明負荷($20\text{W}/\text{m}^2$)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 $367\text{W}/\text{m}^2$ (東京8月南面全天日射)、冬期冷房時および暖房時には $757\text{W}/\text{m}^2$ (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し、窓面一様に発熱量を与える。窓ガラスは1枚ガラスとし、熱貫流率 $6.17\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{C}$ と仮定する。外気温は夏期冷房時 29.8C 、冬期冷房時及び暖房時 1.3C 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($40\text{W}/\text{m}^2$)を与える。

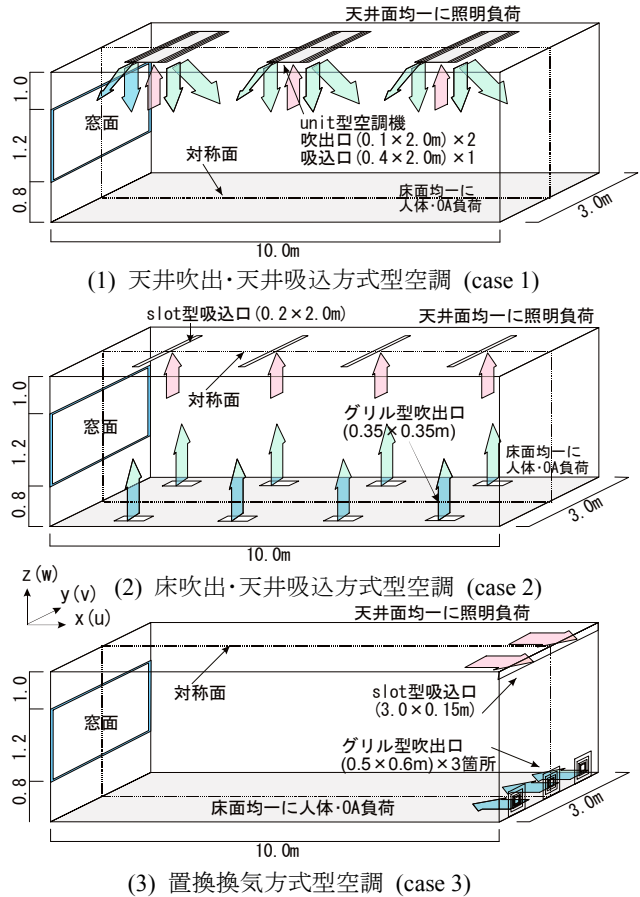


図-1 解析対象オフィス

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-1)	600 (20)	330 (11)	1200 (40)	660 (22)	84 (2.8)	-	2880 (96)
冬期冷房 (添字-2)	600 (20)	330 (11)	1200 (40)	1360 (45)	-500 (-17)	-	2990 (100)
暖房 (添字-3)	-	-	-	1360 (45)	-500 (-17)	-2980 (-99)	-2120 (-71)

(単位は W, ()内の値は床面積当たりの発熱量 W/m^2)
 例えば case1-3 とは(case1)の部分が図1の空調方式(天井吹出・天井吸込方式)を示し、添字の(-3)の部分は表1の熱負荷条件(暖房)を示す。

表-2 境界条件及び計算条件

解析メッシュ	73(x)×21(y)×23(z)
差分スキーム	移流項: Hybrid
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: 一般化対数則、 温度: 対流熱伝達量は α_c 型壁関数を用いて算出 全ての面で $\alpha_c=4.0$ と仮定 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 $\text{min.O.A.}=30\text{m}^3/\text{h} \cdot \text{人}$ 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に基づいて次の様に定めた。 吹出風量 $1,800\text{ m}^3/\text{h}$ 流れ場を解析した後、居住域・呼吸域内で passive contaminant を一様発生させ拡散場解析を行う。

冷房および暖房条件では、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。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)}。

5. 放射・対流連成解析

5.1 室内流れ場の解析

標準 $k-\varepsilon$ model (ε 方程式の浮力生産項は Violet 型)に基づく 3 次元解析を行う。速度の壁面境界条件は一般化対数則、温度の壁面境界条件は、対流熱伝達率 α_c を与え、各壁面要素で熱平衡式を解く α_c 型壁関数を用いる。放射解析と連成して行う。境界条件及び計算条件は表-2 に示す。

5.2 壁間相互放射熱伝達

discrete beam 法により形態係数を算出し、radiosity 法⁹⁾による緩和計算により室内の相互放射性状を解析する。

6. 換気効率指標の解析

流れ場の解析を行った後、図-2 に示す居住域及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(HASS で定義する換気効率)および VF, PFR を解析する。すなわち、汚染質は解析対象となる局所領域内で一様発生させている¹⁾。なお、空調吹出空気に含まれる再循環空気(Return Air)の割合を 0～90%まで変化させた場合の規準化居住域濃度、VF および PFR の変化を併せて解析する。本論では吹出風速、吹出口換気量を固定とした条件(CAV 方式; Constant Air Volume)で解析を行っているため、再循環空気の割合が 0%とは全外気方式(吹出空気は全て新鮮外気で 1,800m³/h 供給)を意味し、例えば再循環空気の割合が 90%とは新鮮外気が吹出換気量の 10%(180 m³/h)で再循環空気が 90%(1620 m³/h)であることを意味する。

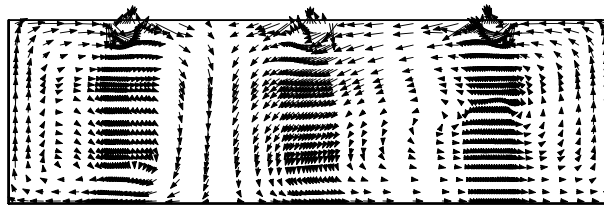
7. 解析結果

7.1 気流分布

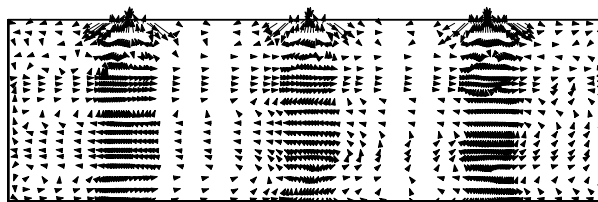
天井吹出・天井吸込方式型の空調システム(case 1)では、空調空気を室温より相対的に低温で供給する case1-1(夏期冷房)で、室内に窓面側(図中左側)に右回りの循環流、室右部では左回りの循環流の 2 つの大循環流が観察される(図-3(1))。窓面側での循環流は窓面に与えられた日射熱負荷が上昇流の駆動力となる。天井面に設置した吹出・吸込口を有する unit 型空調機周辺では吹出気流と吸込気流が入りし、複雑な流れ性状となっている。空調空気を室温より相対的に高温で供給する case1-3(冬期暖房)では、吹出空気は浮力の効果で天井面付近に留まり、床面まで到達しない。そのため、吹出口近傍以外の領域で滞留域が観察される。隣り合って設置された吹出・吸込口位置周辺でショートサーキットが観察される(図-3(2))。冬期冷房(case 1-2)条件と夏期冷房条件



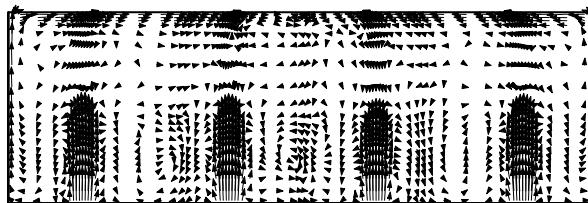
図-2 居住域・呼吸域の設定



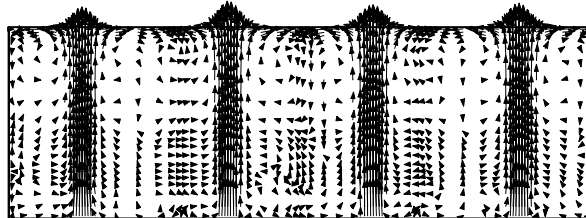
(1) case 1-1 (天井吹出・天井吸込方式、夏期冷房)



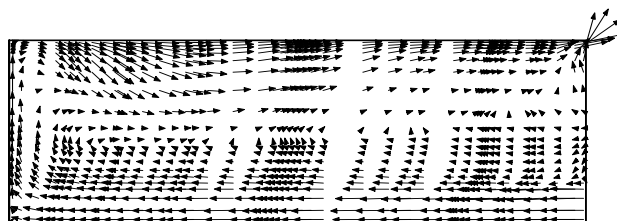
(2) case 1-3 (天井吹出・天井吸込方式、冬期暖房)



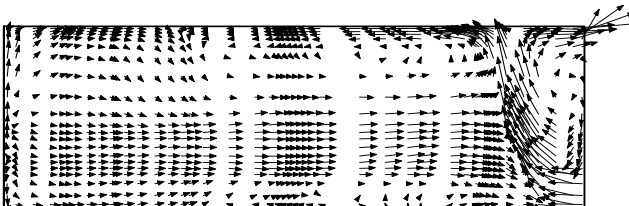
(3) case 2-1 (床吹出・天井吸込方式、夏期冷房)



(4) case 2-3 (床吹出・天井吸込方式、冬期暖房)



(5) case 3-1 (置換換気方式、夏期冷房)



(6) case 3-3 (置換換気方式、冬期暖房)

(図 1 対称面より Y 方向に 0.05m 位置)

図-3 平均風速分布

(case 1-1)は床面積当たりの発熱量が $4\text{W}/\text{m}^2$ しか異ならず、熱負荷条件がほぼ同じため、流れ場も同様となる。

床吹出・天井吸込方式型の空調システム(case 2)では、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)では、床面からの吹出気流は天井面に到達する前に拡散する(図-3(3))。そのため室上部では滞留域が生じている。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る(図-3(4))。そのため吹出気流は居住域に拡散せず、吹出口近傍以外の領域で滞留域が観察される。冬期冷房(case 2-2)条件と夏期冷房条件(case 2-1)は熱負荷条件がほぼ同じため、流れ場も同様となる。

置換換気方式型の空調システム(case 3)では、空調空気を室温より相対的に低温で供給する case3-1 では、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ている(図-3(5))。床面近傍に低速で導入された吹出気流が室内低部に停滞し、室内熱負荷による全般的な上昇流により上部に輸送されて排気されることを想定するいわゆる置換換気システムは充分には成立していない。空調空気を室温より相対的に高温で供給する case3-3 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ている(図-3(6))。冬期冷房(case 3-2)条件と夏期冷房条件(case 3-1)は熱負荷条件がほぼ同じため、流れ場も同様となる。

7.2 温度分布

図-4 に吹出・吸込口温度差で無次元化した平均温度分布を示す。夏期冷房、および冬期冷房条件においては、吹出温度が 0.0、吸込温度が 1.0 となるように無次元化し、冬期暖房条件においては、吹出温度が 1.0、吸込温度が 0.0 となるように無次元化している。

天井吹出・天井吸込方式型の空調システム(case 1)では、天井面に吹出・吸込口が一体となった unit 型空調機を設置してあるため、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ている(図-4(1))。これはショートサーキットの存在を示す。空調空気を室温より相対的に高温で供給する case1-3(暖房)では、室内全体に温度成層が観察される(図-4(2))。冬期冷房(case 1-2)条件と夏期冷房条件(case 1-1)は熱負荷条件がほぼ同じため、温度場も同様となる。

床吹出・天井吸込方式型の空調システム(case 2)では、空調空気を室温より相対的に低温で供給する case2-1 では、室上部に温度成層が観察される(図-4(3))。空調空気を室温より相対的に高温で供給する case2-3 では、吹出気流が天井部の吸込口まで到達しているために、高温で供給された空調空気は室内に十分拡散する前に吸込口より排出される(図-4(4))。冬期冷房(case 2-2)条件と夏期冷房条件(case 2-1)は熱負荷条

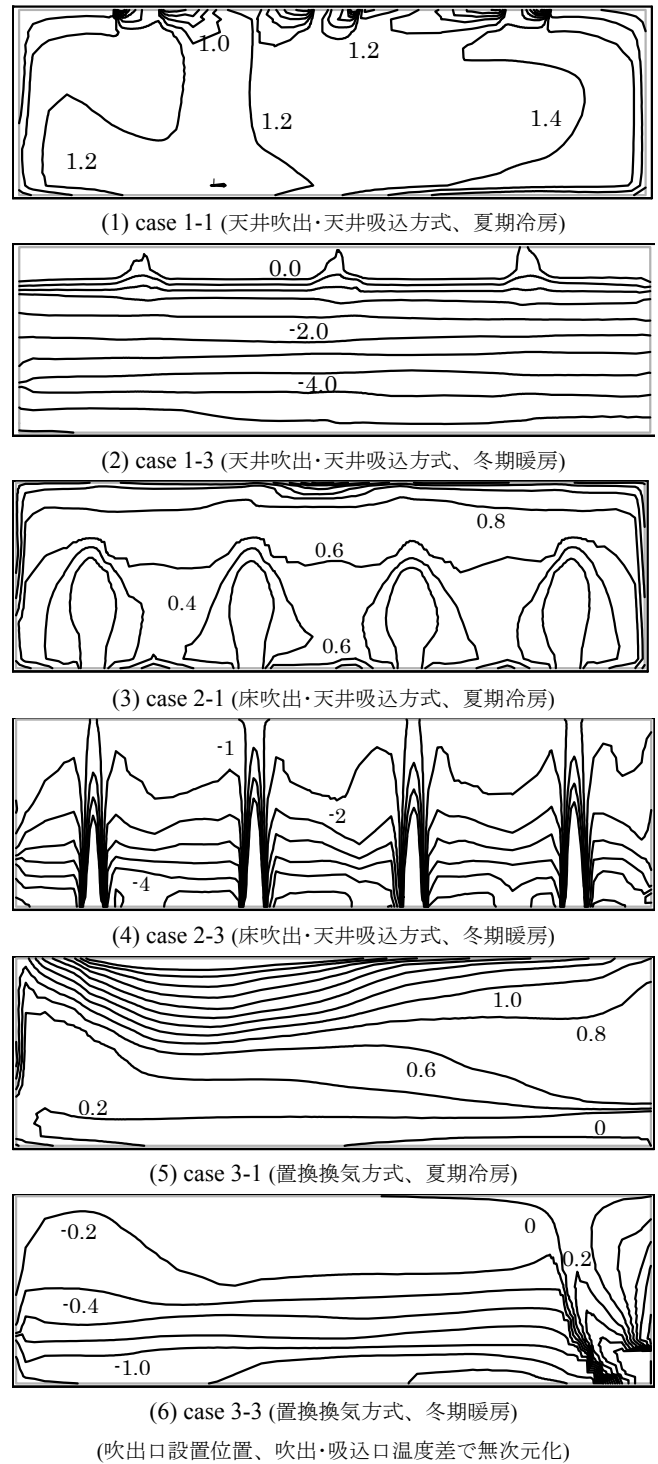
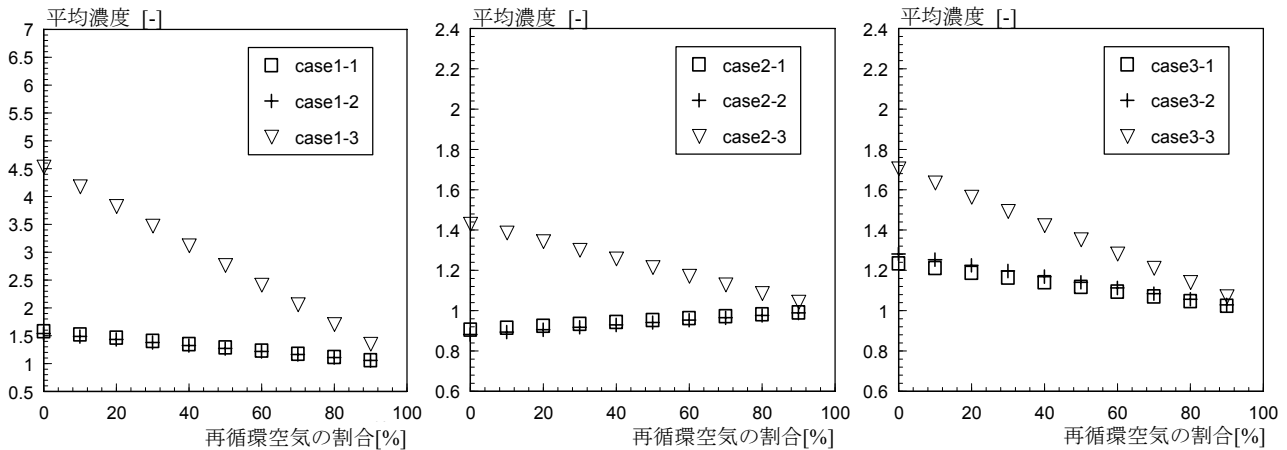


図-4 平均温度分布

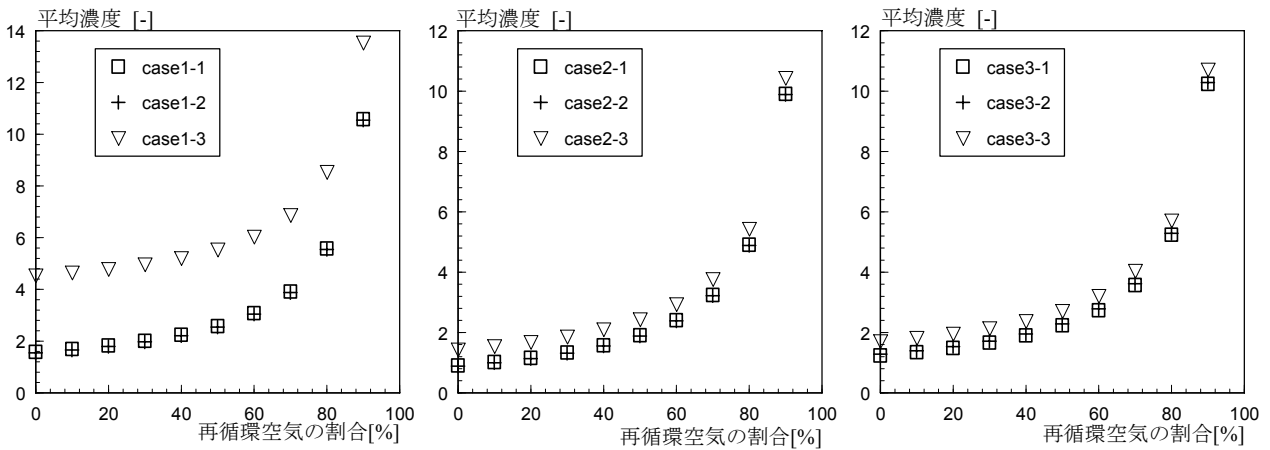
件がほぼ同じため、温度場も同様となる。

置換換気方式型の空調システム(case 3)では、空調空気を室温より相対的に低温で供給する case3-1 では、室内に温度成層が観察される(図-4(5))。空調空気を室温より相対的に高温で供給する case3-3 では、ショートサーキットが生じているために、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(図-4(6))。冬期冷房(case 3-2)条件と



(1) case 1 (天井吹出・天井吸込方式) (2) case2 (床吹出・天井吸込方式) (3) case3 (置換換気方式)
 (横軸は吹出空気に含まれる再循環空気の割合、縦軸は平均濃度、吸込口濃度で基準化)

図-5 居住域平均濃度 (規準化居住域濃度) 分布



(1) case 1 (天井吹出・天井吸込方式) (2) case2 (床吹出・天井吸込方式) (3) case3 (置換換気方式)
 (横軸は吹出空気に含まれる再循環空気の割合、縦軸は平均濃度、再循環空気 0% の場合の吸込口濃度で基準化)

図-6 居住域平均濃度分布

夏期冷房条件(case 3-1)は熱負荷条件がほぼ同じため、温度場も同様となる。

7.3 居住域を対象とした換気効率解析

7.3.1 規準化居住域濃度の分布

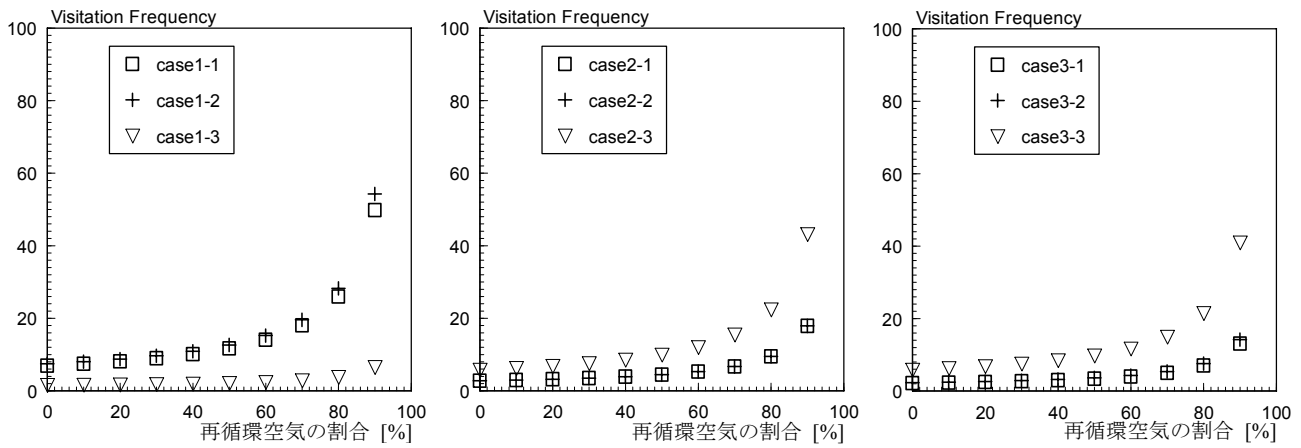
図-5 に吹出空気に含まれる再循環空気の割合を 0%~90% まで順次変化させた場合の居住域平均濃度(規準化居住域濃度)の分布を示す^{注3)}。図-5 の平均濃度は排気口での平均濃度で規準化している。

case1-1(天井吹出・天井吸込方式、夏期冷房)及び case1-2(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 1.6 となり、完全混合を仮定した室に対し、6 割程度換気性状が悪いことを示す。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、すなわち規準化居住域濃度は 1 に近づく。case1-3(同、冬期暖房)では吹出 airflow が居住域まで到達せず、室中央部で

滞留域となっているため、平均濃度は高くなる。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-5 (1))。

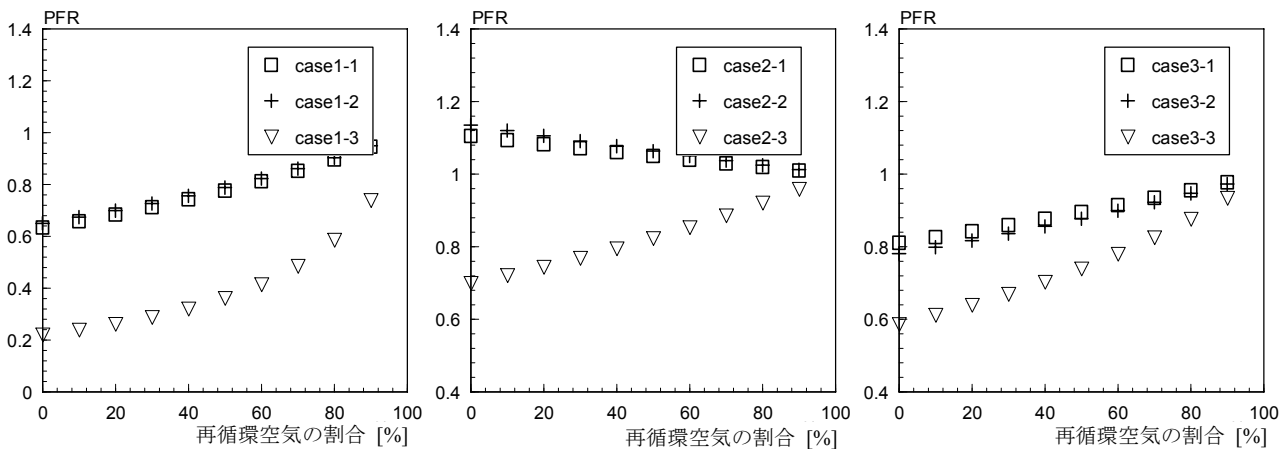
case2-1(床吹出・天井吸込方式、夏期冷房)および case2-2(同、冬期冷房)では再循環空気の割合が 0% の場合に居住域平均濃度は 0.9 となり、完全混合を仮定した室に対し、1 割良い換気性状を示す。再循環空気の割合が増加すると室内完全混合仮定濃度に近づき、規準化居住域濃度は 1 に近づく。case2-3(同、冬期暖房)ではショートカットが生じているため平均濃度は高くなるが、再循環空気の割合を増加させると居住域平均濃度は 1 に近づく(図-5 (2))。

case3-1(置換換気方式、夏期冷房)、case3-2(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 1.3 程度の値となり、完全混合を仮定した室に対し、3 割程度換気性状が悪いことを示す。居住域・呼吸域平均濃度の両者とも



(1) case 1 (天井吹出・天井吸込方式) (2) case2 (床吹出・天井吸込方式) (3) case3 (置換換気方式)
 (横軸は吹出空気に含まれる再循環空気の割合、縦軸はVF)

図-7 居住域 Visitation Frequency 分布



(1) case 1 (天井吹出・天井吸込方式) (2) case2 (床吹出・天井吸込方式) (3) case3 (置換換気方式)
 (横軸は吹出空気に含まれる再循環空気の割合、縦軸はPFR、新鮮外気量で基準化)

図-8 居住域 Purging Flow Rate 分布

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、HASS で定義する換気効率 η は1に近づき、置換換気方式では比較的室内の空調熱負荷が小さい場合、一般には $80\text{W}/\text{m}^2$ 以下の場合に有効な方式と考えられており、今回の条件では必ずしも置換換気方式が有効に働くというものではない。また、case3-1およびcase3-2では、吹出気流が対向壁まで到達し、時計回りの室内大循環流が形成されるために、吹出口上部に低風速域(滞流域)が生じ、無次元濃度が1.0以上の高濃度域が生じる^{注4)}。この高濃度域の影響で、居住域平均濃度は高くなっている。今回境界条件として用いた吹出風速では本来の置換換気空調方式の特徴が発揮されず、室内滞流域での換気効率が顕著に悪くなっている。置換換気方式の適用の際には、室内熱負荷条件ならびに吹出風速などに対する配慮が大変重要となる。

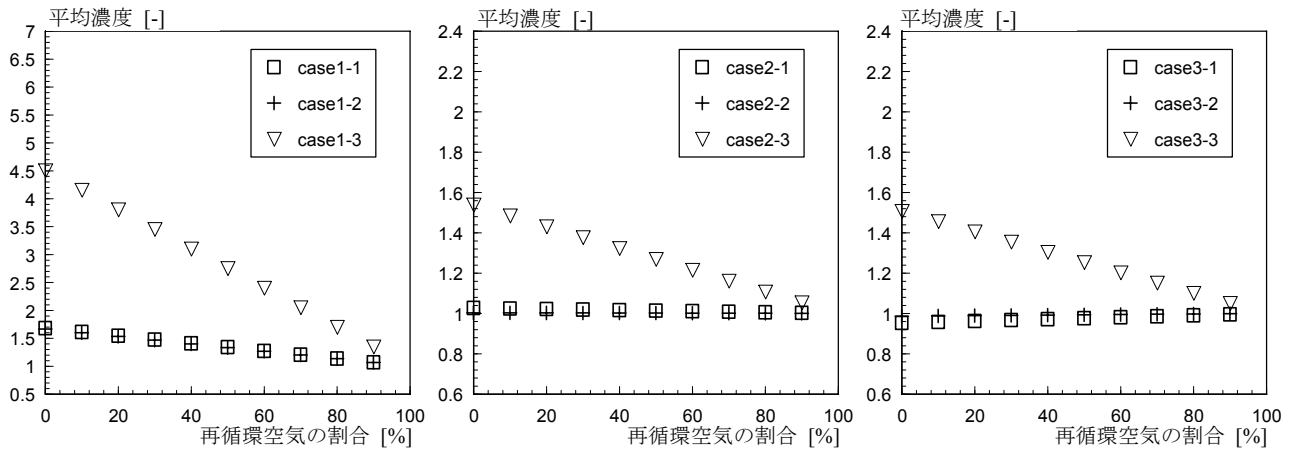
また、図-6に再循環空気0%の場合の吸込口濃度で基準化した場合の居住域平均濃度分布を示す。当然のことである

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、実際の濃度値の面からも制御を行うことが重要であることが言うまでもない。

7.3.2 居住域 Visitation Frequency の分布

図-7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^{注5)}。

case1-1(天井吹出・天井吸込方式、夏期冷房)およびcase1-2(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=7.0)に対し、再循環50%の場合にはVFが約1.8倍(VF=11.7)、再循環90%の場合には約8.2倍(VF=50.0)に増加する(図-7(1))。case1-3(同、冬期暖房)にお



(1) case 1 (天井吹出・天井吸込方式) (2) case 2 (床吹出・天井吸込方式) (3) case 3 (置換換気方式)
 (横軸は吹出空気に含まれる再循環空気の割合、縦軸は平均濃度、吸込口濃度で基準化)

図-9 呼吸域平均濃度 (規準化呼吸域濃度) 分布

いては、case1-1 および case1-2 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 1.6、50%再循環の場合には VF=2.1、90%再循環の場合には VF=6.5 となる。この case1-3 は case1-1 および case1-2 と比較し、平均濃度の値は大きく評価されているが(図-5(1))、VF の値は相対的に小さくなっている(図-7(1))。これは case1-3 が、汚染質の再循環は相対的に少ないが、対象領域内での滞在時間が相対的に長く、よどんだ流れ場であることを端的に示している。

case2-1(床吹出・天井吸込方式、夏期冷房)および case2-2(同、冬期冷房)では、再循環空気の増加に対する VF の増加の程度は比較的小さいが、新鮮空気のみを供給した場合の VF の値(VF=2.8)に対し、再循環 50%の場合には VF が約 1.6 倍(VF=4.4)、再循環 90%の場合には約 6.4 倍(VF=17.9)に増加する(図-7(2))。case2-3(同、冬期暖房)では、case2-1 および case2-2 と比較し、VF の値・増加率共に高い値となる。

case3-1(置換換気方式、夏期冷房)および case3-2(同、冬期冷房)では、再循環空気の増加に対する VF の増加の程度は 3 種の換気システムの中で最も小さいが、新鮮空気のみを供給した場合の VF の値(VF=2)に対し、再循環 50%の場合には VF が約 1.7 倍、再循環 90%の場合には約 7 倍(VF=13.5)に増加する(図-7(3))。case3-3(同、冬期暖房)において case3-1 および case3-2 と比較し、VF の値・増加率共に高い値となる。

VF の値は(1)式で定義されるとおり、対象領域に対する流入 flux (=移流 flux $\sum(u_i \cdot C_i \cdot A_i)$ + 拡散 flux $\sum(-v_t \cdot \partial C_i / \partial x_i \cdot A_i)$) で決定される。ここで 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。吹出気流に含まれていた汚染質は室内均一に拡散するため、再循環空気の割合が増加しても濃度勾配は変化せず、拡散 flux $\sum(-v_t \cdot \partial C_i / \partial x_i \cdot A_i)$ の値は常に一定と

なる。すなわち再循環空気の割合が増加した場合の VF の増加分は移流 flux $\sum(u_i \cdot C_i \cdot A_i)$ の増加分に起因する。移流 flux を決定する C_i の増加率は、吹出気流に含まれる汚染質が室内で瞬時一様拡散した場合の濃度の増加率に比例する^{注6)}。

7.3.3 居住域 Purging Flow Rate 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 PFR 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すなわ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。

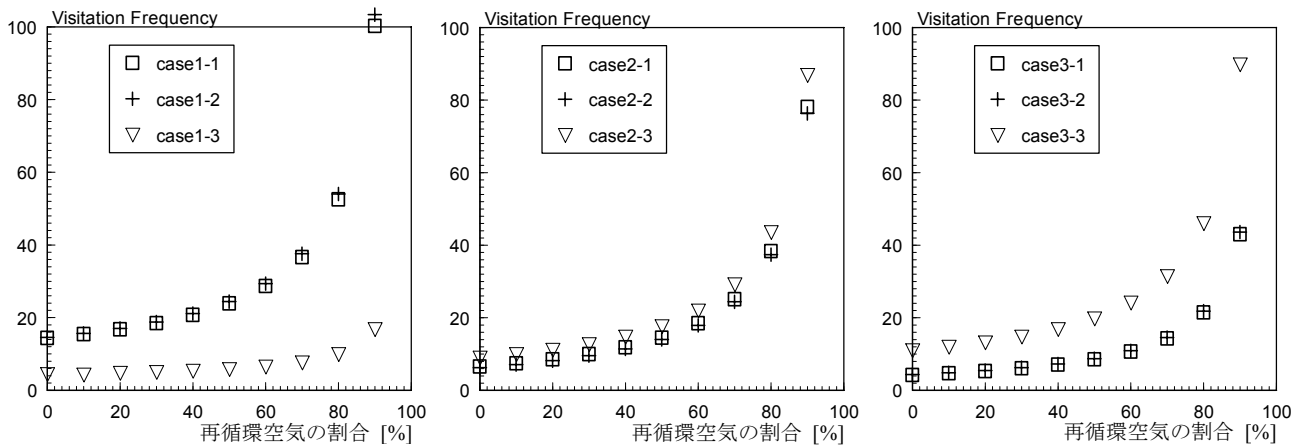
居住域を対象とした場合、全解析ケース中で case2(床吹出・天井吸込方式)の case2-1(夏期冷房)および case2-2(冬期冷房)のみ PFR が 1 を越えており、居住域に効率的に新鮮外気を供給するシステムであることが分かる。

7.4 呼吸域を対象とした換気効率解析

7.4.1 規準化呼吸域濃度の分布

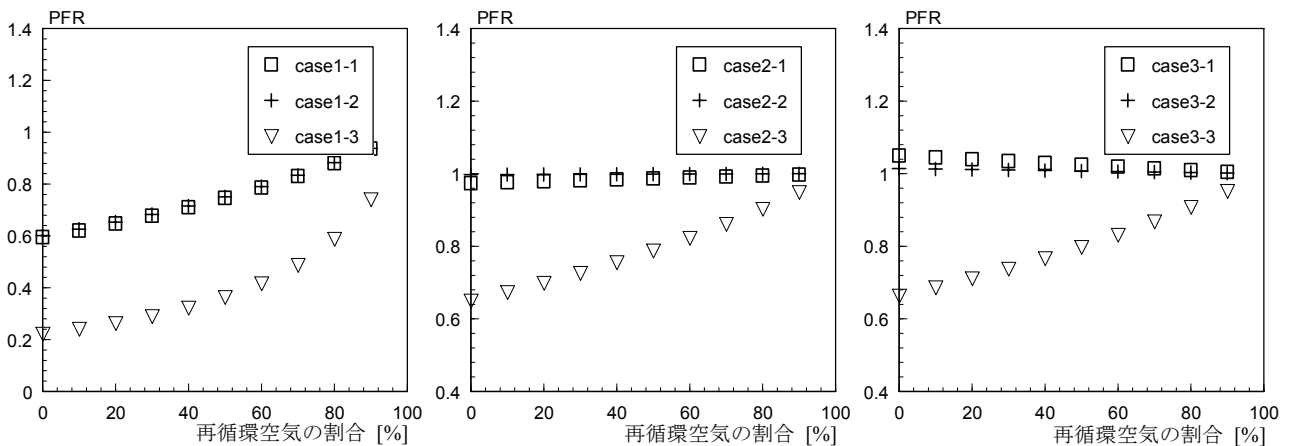
図-9 に吹出空気に含まれる再循環空気の割合を 0%~90% まで順次変化させた場合の呼吸域平均濃度(規準化呼吸域濃度)の分布を示す。図-9 の平均濃度は排気口での平均濃度で規準化している。

case1(天井吹出・天井吸込方式)、case2(床吹出・天井吸込方式)では、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。case3(置換換気方式)では、case3-1(同、夏期冷房)、case3-2(同、冬期冷房)の条件において再循環空気の割合が 0%の場合に呼吸域平均濃度は 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。また、case3-1 および case3-2 では規準化居住域濃度が約 1.3 であったが、規準化呼吸域濃度は 1.0 以下に減少している。これは室内の不均



(1) case 1 (天井吹出・天井吸込方式) (2) case2 (床吹出・天井吸込方式) (3) case3 (置換換気方式)
 (横軸は吹出空気に含まれる再循環空気の割合、縦軸は VF)

図-10 呼吸域 Visitation Frequency 分布



(1) case 1 (天井吹出・天井吸込方式) (2) case2 (床吹出・天井吸込方式) (3) case3 (置換換気方式)
 (横軸は吹出空気に含まれる再循環空気の割合、縦軸は PFR、新鮮外気量で基準化)

図-11 呼吸域 Purging Flow Rate 分布

一濃度場の存在が原因である。このように室内では流れの不均一性に起因する不均一濃度場の存在が一般的であるため、制御目標となる局所領域に対応した換気設計が重要となる。

また、居住域の場合(図-6)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に収束するのに対し、再循環空気0%の場合の吸込口濃度で規準化した場合の呼吸域平均濃度は、そ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。

7.4.2 呼吸域 Visitation Frequency の分布

図-10 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2倍程度の値となり、case1-1(夏期冷房)において新鮮空気のみを供給した場合に

は VF=14.3、再循環50%の場合には VF=24.0、再循環90%の場合には VF=100.2 となる。呼吸域の VF の値が居住域の値に対して約2倍となる原因は、呼吸域においては流入 flux の算出面が上下2面あるのに対し、居住域では上面の1面のみであることが大きく影響している(図-2)。case1 では呼吸域と居住域の平均濃度はほぼ同様のため、呼吸域を対象とした場合に VF の値が2倍となることは即ち平均滞在時間 T_p は約1/2 となっていることを示している(式(2)参照)。この傾向は case1-2 (冬期冷房)においても同様である(図-10(1))。これは室内に2つの大循環流が生じており、その循環流に沿って呼吸域内に入り出す汚染質塊が多いことを示す。case1-3(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、若干値が大きくなっているが、case1-1 および case1-2 と比較し、約1/10 程度のオーダーである。

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の 2 倍程度の値となり、case1(天井吹出・天井吸込方式)と同様の傾向を示す。

また、case2 と case3 を比較した場合、各熱負荷条件において呼吸域平均濃度はほぼ同一の値を示す(図-9)が、VF の値は大きく異なる。case2 の呼吸域平均濃度の構造は VF の値が大きく、即ち汚染質再循環の多いことが特徴であるのに対し、case3 の呼吸域平均濃度の構造は、汚染質再循環は case2 と比較して相対的に少ないが、領域内で汚染質滞在時間が相対的に長いことが特徴である。

7.4.3 呼吸域 Purging Flow Rate の分布

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に対する PFR 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すなわ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)及び 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。

8. 結論

各種換気システムを有するオフィスを対象とし、吹出空気に含まれる再循環空気の割合が変化した場合の居住域及び呼吸域平均濃度の構造を、VF および PFR により解析した。その結果、以下の知見が得られた。

8.1 天井吹出・天井吸込方式の換気システムの場合

- (1) 本解析では通常天井吹出・天井吸込方式の換気システムと比較し吹出風速を小さく設定しており、居住域・呼吸域の換気性状には危険側の境界条件として検討を行った。
- (2) 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 程度となる。
- (3) 冬期暖房条件のケースでは居住域・呼吸域の平均濃度は 4.0 を越え、極端に悪い換気性状を示すが、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率は 1 に近づく。

8.2 床吹出・天井吸込方式の換気システムの場合

- (1) 本解析では床面での吹出口をノズル状とし、一般的なディフューザ型と比較し、居住域・呼吸域の換気性状には危険側の境界条件として検討を行った。
- (2) 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 2.0 倍、90%再循環の場合には約 9.6 倍に増加する。

- (3) 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は 1 に近づく。
- (4) 天井吹出・天井吸込型空調システムと床吹出・天井吸込型空調システムの換気性状を VF、平均濃度(HASS 102 で定義される換気効率)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の方が効率的に汚染質を排出することが示された。

8.3 置換換気方式の換気システムの場合

- (1) 本解析では通常置換換気方式の換気システムと比較し吹出口面積を小さく設定しており、そのため吹出空気の運動量が比較的大きい場合の検討を行った。
- (2) 置換換気を意図した吹出方式の空調は、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滞流域で換気効率が悪化し、総合的な居住域換気効率は低下する。
- (3) 再循環空気の割合を増加させた場合の VF の増加の傾向は、他の換気システムの場合と同様である。

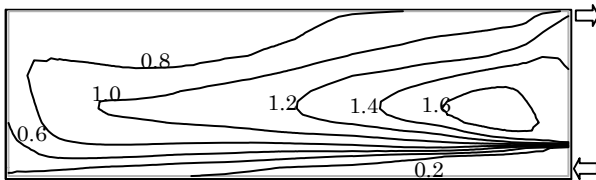
8.4 各換気システムの比較

床吹出・天井吸込方式(case2)と置換換気方式(case3)を比較した場合、各熱負荷条件において呼吸域平均濃度はほぼ同一の値を示すが、VF の値は大きく異なる。case2 の呼吸域平均濃度の構造は VF の値が大きく、すなわち汚染質再循環の多いことが特徴であるのに対し、case3 の呼吸域平均濃度の構造は、汚染質再循環は case2 と比較して相対的に少ないが、領域内で汚染質滞在時間が相対的に長いことが特徴である。このように VF を用いることで、換気性状を平均濃度の高低のみでなくその構造までを評価することが可能であることが示された。

注 釈

- 1) HASS 102 換気規準¹⁾によれば、完全混合状態でない場合の設計必要換気量を算定する際には、汚染質発生は室内もしくは居住域で一様に発生するものと想定することになっている。本稿ではこの指針に従い、汚染質発生を居住域もしくは呼吸域で一様発生とした。
- 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 : 0.24 kcal/kgf・°C、 γ : 1.25 kgf/m³、 V : 換気量 m³/h、 t_{ave} : °C 1 kcal/h = 1.16 W、 t_{ave} : 夏期 26°C、冬期 24°C (空調目標温度)
夏期冷房時 t_{in} =21.4 °C、冬期冷房時 t_{in} =19.2 °C、暖房時 t_{in} =27.4 °C。

- 3) 空間内で定常的に発生する汚染質量を q_p 、再循環空気の割合を x とすると吹出空気に含まれる汚染質量は $\{x/(1-x)\} \cdot q_p$ となる。
- 4) 居住域で汚染質を一様発生させた場合の case3-1 の平均濃度分布を以下に示す。図中の値は再循環空気が 0% の場合の吸込口濃度で規準化している。室内には大循環流が生じており、置換換気システムが有効に働いていないことが明らかである。



補図 規準化居住域濃度分布(case3-1)

- 5) 再循環空気を考慮した場合、空調吹出空気に含まれる汚染質は新たな汚染質発生ではなく、室内に再帰 (return) してくる汚染質である。汚染質を含まない新鮮空気のみを供給する場合の VF は(1)式で示される。再循環空気を考慮した場合、(1)式中、 q_p は変化せず、流入 flux Δq_p のみ変化する。汚染質の return を考慮した場合の流入 flux を $\Delta q_p'$ とすると、再循環空気を考慮した場合の VF は次式で示される。

$$VF_{(\text{return})} = (q_p + \Delta q_p') / q_p \quad (4)$$

したがって、再循環空気を考慮した場合 VF の増分 VF' は次式となる。

$$VF' = (VF_{(\text{return})} - VF) = (\Delta q_p' - \Delta q_p) / q_p \quad (5)$$

- 6) 対象とする局所領域内が完全混合していると仮定すると、再循環空気 0% の場合の局所領域平均濃度は 1 (再循環空気 0% の場合の吸込口濃度で規準化)、再循環空気 20% の場合は 1.25、再循環空気 50% の場合は 2、再循環空気 80% の場合は 5、のように局所領域平均濃度は上昇していく。そのため VF の増加分もこの平均濃度上昇分に従い、その値が上昇する。

参考文献

- 1) 空気調和・衛生工学会規格 HASS102-1997 (1997)
- 2) Csanady G. T.: Dispersal by randomly varying currents, J. Fluid Mech. Vol. 132 (1983), pp. 375- 394
- 3) Sandberg, M. : Ventilation effectiveness and purging flow rate - A review. International Symposium on Room Air Convection and Ventilation Effectiveness, University of Tokyo (1992), pp. 1- 21
- 4) 伊藤一秀, 加藤信介, 村上周三: 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 16) パーティションの有無の違いによる置換換気されるオフィスの居住域平均濃度と VF の解析, 空気調和衛生工学会講演論文集, III (1998), pp. 1341- 1347
- 5) Sandberg, M. and Sjoberg, M.: The use of moments for assessing air quality in ventilated rooms, Building and Environment, 18 (1983), pp. 181-197

ronment, 18 (1983), pp. 181-197

- 6) S. Kato and S. Murakami.: New ventilation efficiency scales based on spatial distribution of contaminant concentration aided by numerical simulation. ASHRAE Transactions 94(2) (1988), pp. 309- 330
- 7) 伊藤一秀, 加藤信介, 村上周三: 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 (2000), pp. 31- 37
- 8) 伊藤一秀, 村上周三, 加藤信介: 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 (1997), pp. 421-424
- 9) Star- CD (汎用流体解析ソフト)Reference Manual

(平成 12. 1. 27 原稿受付)

Study of Normalized Concentration in an Occupied Zone, Visitation Frequency and Purging Flow Rate under Various Ventilation System

Part 1 Study on Evaluation of Ventilation Effectiveness of Occupied Zone in Office Space

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

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

Synopsis : The Ventilation Standard HASS 102 of The Society of Heating, Air- Conditioning and Sanitary Engineers of Japan (SHASE) was revised in November, 1997. 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 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 relationship between VF, PFR and Normalized Concentration in an Occupied Zone (Cn) are theoretically 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 January 27, 2000)

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

*2 Tokyo Institute of Polytechnics, Member