

コンベンショナルフロー型クリーンルーム内の気流性状に関する研究

——室内障害物および給排気分配のバラツキの影響の数値解析——

Study on Air-Velocity Distribution in Conventional Flow Clean Room

—— Numerical Simulation of Effect to Air-Flow by Multiple Obstacle in Clean Room and
Unbalanced Air-flow Rate of Supply or Return ——

村 上 周 三*・加 藤 信 介**・須 山 喜 美***・中 川 浩 之****

Shuzo MURAKAMI, Shinsuke KATO, Yoshimi SUYAMA and Hiroyuki NAKAGAWA

実際のクリーンルーム内には生産装置等さまざまな気流障害物が設置される。また吹出、吸込風量の調節も完全に均等にすることは困難であり、これらには相当のバラツキがある。これの擾乱要因が室内全体の気流・拡散性状へ影響を及ぼす可能性は大きい。本稿では、これらの影響を主に数値シミュレーションにより解析、検討した結果を示す。なお、気流障害物を有する場合の数値解析に関しては、模型実験との整合性を高めるため境界条件、移流項の差分スキーム等の解析条件を検討した結果も合わせて示す。

1. は じ め に

クリーンルーム内の気流制御を計画する場合、実際の室内に設置される生産装置等の気流障害物が流れ場・拡散場へ及ぼす影響を考慮しておくことが必要になる。

また、実際の建物においては吹出・吸込風量の調節を完全に均等にすることは困難であり、そのバラツキが室内の気流分布に与える影響の検討は不十分である。

従来の研究⁷⁻⁹⁾では障害物がなく均等な吹出・吸込を仮定した単純モデル空間を解析の対象として行われてきた。本稿では、実際の室内で想定されるそれらの擾乱要因が及ぼす影響を数値シミュレーションにより解析する。

また、気流障害物を設置した場合については模型実験との整合性を高めるように、従来用いられてきた境界条件、および移流項の差分スキームに検討を加えた^{1,2)}。

2. 対象クリーンルームモデルと気流障害物

図1に示す吹出口9個、吸込口4個のコンベンショナルフロー型クリーンルームを対象として、3種類の障害物を室内に任意に配置し、表1に示す5タイプを解析する。なお、吹出・吸込風量は一定である。

3. 数値解析条件の検討

$k-\epsilon$ 型2方程式乱流モデルを基礎とする3次元解析(表2, 3)を行う。ただし、本報では、表4に示すCase 1~3の数値解析条件を検討し、従来より筆者らが用い

てきた計算条件による解析⁶⁻⁹⁾に比べ、より精度がよく実験との対応のよい解法を考察する。

3.1 流入乱流量の設定(表4, Case 1)

実験値に対応する流入乱流エネルギー $k=0.005\text{m}^2/\text{s}^2$ 、乱れの長さスケール $l=0.2\text{m}$ とした場合⁴⁾、壁際中央では天井までの上昇流となり(図3(a), (b))、実験結果(図2(a))と異なる。

3.2 壁面 ϵ 境界条件(表4, Case 2)

壁際室内第1セルの乱流エネルギー散逸 ϵ をLaunder & Spalding⁵⁾に準じて表4中(2)式で定義した場合、障害物上部天井付近に滞留域を生じ、壁際上昇流は天井まで到達せず実験結果に近づく(図3(d))。一方、壁面近傍では、(2)式の採用により渦動粘性係数 ν_t を小さく見積る(ϵ を大きく見積る)ことにより流れ場は不安定となり振動解となる(図3(c))。

3.3 運動方程式移流項差分スキーム(表4, Case 3)

QUICKスキーム⁶⁾を空間全体の運動方程式移流項に採用した場合、天井付近の滞留域は再現され、振動解も解消する(図4(e), (f))。以降の解析ではCase 3の条件(表3)を採用する。なお、障害物のないタイプ0において前報⁹⁾までのCase 0の条件による解析結果とCase 3の条件による解析結果(図4(a)~(d))はほぼ同様であり、従来より筆者らが用いてきた計算条件による計算結果(たとえば文献7~9)等を修正する必要はない。

3.4 数値解析と模型実験の整合性

- (1)気流性状 前項3.3で示したように(たとえば図2(a)と図4(f)の比較)流れ場の整合性は良好である。
- (2)汚染質拡散性状 数値解析結果では図2(b)と図4

*東京大学生産技術研究所 付属計測技術開発センター

**東京大学生産技術研究所 第5部

***(機関組(元民間等共同研究員))

****受託研究員(機関組)

表 1 解析種類

タイプNo.	障害物形状	障害物個数	障害物位置
タイプ0	—	0	—
タイプ1	箱型	1	壁際
タイプ2	机型	1	壁際
タイプ3	箱型	3	室中央吹出口下および壁際
タイプ4	箱型	3	室中央吹出口下および壁際
	垂れ壁	1	天井吹出口間

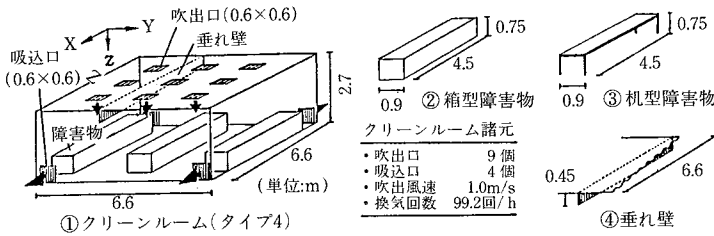


図 1 クリーンルームおよび気流障害物の形状

表 2 $k-\epsilon$ 型 2 方程式乱流モデルの基礎方程式 (Case 3 に対応)

$$\frac{\partial U_i}{\partial X_i} = 0 \quad (1) \text{ 連続式}$$

$$\frac{\partial U_i}{\partial t} + \frac{\partial U_i U_j}{\partial X_j} = -\frac{\partial}{\partial X_i} \left\{ \frac{P}{\rho} + \frac{2}{3} k \right\} + \frac{\partial}{\partial X_j} \left\{ \nu_t \left\{ \frac{\partial U_i}{\partial X_j} + \frac{\partial U_j}{\partial X_i} \right\} \right\} \quad (2) \text{ 平均流の輸送方程式}$$

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \frac{\partial k U_j}{\partial X_j} = \frac{\partial}{\partial X_j} \left\{ \frac{\nu_t}{\sigma_1} \frac{\partial k}{\partial X_j} \right\} + \nu_t S - \epsilon \quad (3) \text{ 乱流エネルギー}(k)\text{の輸送方程式}$$

$$\frac{\partial \epsilon}{\partial t} + \frac{\partial \epsilon U_j}{\partial X_j} = \frac{\partial}{\partial X_j} \left\{ \frac{\nu_t}{\sigma_2} \frac{\partial \epsilon}{\partial X_j} \right\} + C_1 \frac{\epsilon}{k} \nu_t S - C_2 \frac{\epsilon^2}{k} \quad (4) \text{ 乱流散逸}(\epsilon)\text{の輸送方程式}$$

$$\nu_t = k^{1/2} l = C_D \frac{k^2}{\epsilon} \quad (5) \text{ 渦動粘性係数の算出式}$$

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial C U_j}{\partial X_j} = \frac{\partial}{\partial X_j} \left\{ \frac{\nu_t}{\sigma_3} \frac{\partial C}{\partial X_j} \right\} \quad (6) \text{ 濃度}(C)\text{の輸送方程式}$$

ただし $S = 2 \cdot S_{1j} S_{ij} = 2 \left\{ \frac{1}{2} \left(\frac{\partial U_i}{\partial X_j} + \frac{\partial U_j}{\partial X_i} \right) \right\}^2$

$C_D = 0.09, C_1 = 1.44, C_2 = 1.92, \sigma_1 = 1.0, \sigma_2 = 1.3, \sigma_3 = 1.0$
 U_i : 平均速度 (m/s) P : 圧力 (N/m²) k : 乱流エネルギー (m²/s²)
 ϵ : 乱流散逸 (m²/s³) ν_t : 渦動粘性係数 (m²/s) l : 乱れの長さスケール (m)

表 3 境界条件と差分スキーム (Case 3 に対応)

- (1) 吹 出 口: $U_t = 0.0, U_n = 1.0 \text{ m/s}, k = 0.005 \text{ m}^2/\text{s}^2, l = 0.2 \text{ m}, C = 0.0$
 添字 t, n : 吹出面に対しそれぞれ接線方向, 法線方向を示す.
- (2) 吸 込 口: $U_t = 0.0, U_n = 2.25 \text{ m/s}, \partial k / \partial Z = 0.0, \partial \epsilon / \partial Z = 0.0, \partial C / \partial Z = 0.0$
- (3) 壁 面: $\partial U / \partial Z_{z=0} = m U_{z=h} / h, U_n = 0.0, \partial k / \partial Z = 0.0, \partial C / \partial Z = 0.0$

$$\epsilon = \frac{C_D^{3/4} k^{3/2}}{\kappa h} \cdot \frac{1}{2} \cdot \ln \left[\frac{E \cdot 2h (C_D^{1/2} k)^{1/2}}{\nu} \right] \quad (7)$$

h : 壁面から第 1 セルの差分定義点までの距離
 m : U_t がベキ乗分布するとみなしたときのベキ指数, $m = 1/7$
 κ : カルマン定数, $\kappa = 0.4$ $E = 9.0$ $\nu = 0.15 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$

- (4) 差分スキーム: (空間差分): 移流項は QUICK スキーム

他はすべて中心差分

ただし, k, ϵ, C の輸送方程式の時間積分計算時 k, ϵ, C がアンダージュートする場合に限り, 1 次精度風上差分を使用

(時間差分): Adams-Bashforth による 2 次精度スキーム

(g)の比較に示されるように高濃度領域が障害物側面やや広がるものの、室1/3の汚染質分布領域、障害物上部天井付近の低濃度領域等、模型実験との対応は比較的良好である。

4. 気流障害物設置の影響

4.1 気流障害物のない場合 (タイプ0 : 図4(a), (b), 図7)

障害物のないタイプ0の気流性状は、1個の吹出噴流

表示断面 (図2, 3)

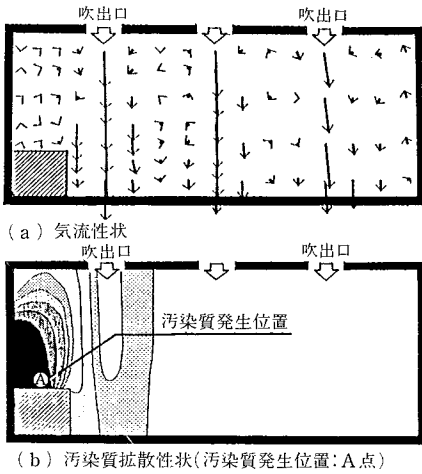
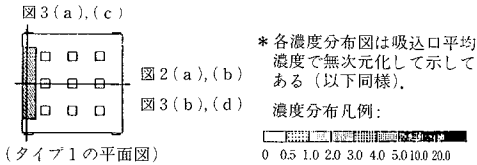


図2 模型実験結果 (タイプ1)

とその周囲の上昇流により構成される「気流単位」が、吹出口の数だけ合成される様相を呈する(図4(a), (b), および図7参照)。この「気流単位」の概念は必ずしも普遍性を持つものではないが室内の気流性状を解析する際に極めて都合が良い。

4.2 壁際単体障害物設置の場合

障害物のないタイプ0と壁際にそれぞれ箱型、机型気流障害物設置したタイプ1, 2の比較を図4に示す。

(1)箱型障害物の場合(タイプ1: 図4(e)~(h))

気流障害物の設置は、その気流障害物を含む気流単位に大きな影響を及ぼす。障害物により壁際の強い上昇流は低減され、障害物上部に循環流が形成される(図4(e), (f))。障害物より離れた領域では障害物設置の影響を受けずタイプ0とほぼ同様の流れ場となる。

障害物上面(A点)で汚染質が発生した場合(図4(g)), 汚染質は室の約1/3の領域に分布する。障害物上の循環流

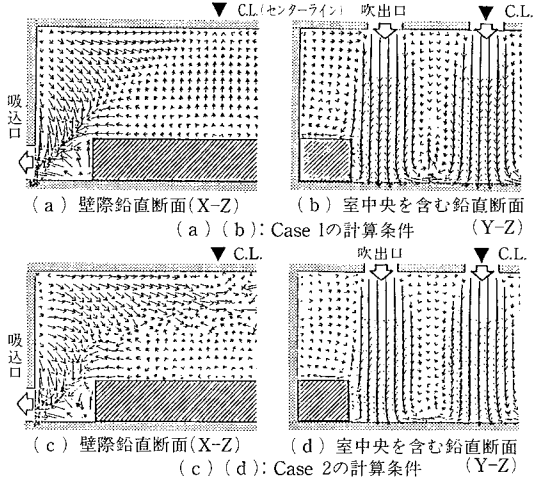


図3 壁面ε境界条件の違いによる気流性状の比較

表4 数値解析の条件

	Case 0	Case 1	Case 2	Case 3
・流入乱流量 ・壁面ε境界条件	$k=0.05, l=0.45$ $\epsilon = \frac{C_0^{3/4} k^{3/2}}{xh} \dots (1)$	$k=0.005, l=0.2$ 同左	同左 $\epsilon = \frac{C_0^{3/4} k^{3/2}}{xh} \frac{1}{2} \ln \left[\frac{E \cdot 2h \cdot (C_0^{1/2} k)^{1/2}}{\nu} \right] \dots (2)$	同左 同左
・運動方程式 移流項差分スキーム	中心差分(吸込口近傍: 1次精度風上差分)	中心差分(吸込口近傍: QUICKスキーム)	同左	QUICKスキーム
・k, ε輸送方程式 移流項差分スキーム	1次精度風上差分	QUICKスキーム	同左	同左
・汚染質濃度輸送方程式 移流項差分スキーム	1次精度風上差分	QUICKスキーム	同左	同左
[記号および備考] k: 乱流エネルギー(m ² /s ²) l: 乱れの長さスケール(m) ε: エネルギー散逸 (m ² /s ³) h: セル幅の1/2 (m) C ₀ =0.09, x=0.4	文献4)で考察 壁面速度境界条件: 1/7乗則(以降同様) 壁面k境界条件: free-slip (以降同様) 定数: C ₁ =1.59, C ₂ =2.0	文献3)で採用 k-εモデルの数値定数: C ₁ =1.44, C ₂ =1.92 以降本数値定数を採用	上記のεの境界条件は文献1)で検討 E=9.0(壁面粗度パラメータ) ν=0.000015m ² /s(動粘性係数)	以降本計算条件を採用 汚染質濃度輸送方程式 時間差分: 後退差分(表3) 瞬時一様拡散濃度が1となるように汚染質発生

部および側面の高濃度範囲はタイプ0 (図4(c)) に比べやや縮小するが、この場合室内平均濃度 (表5)¹⁰⁾は1.69 (タイプ0) から2.10 (タイプ1) に増大する。室中央 (C点) で汚染質が発生した場合 (図4(h)), 室全体に汚染質は分布するが、壁側吹出気流の影響により障害物表面は清浄となる。

(2) 机型障害物の場合 (タイプ2: 図4(i)~(l))

机型障害物上部の壁際上昇流は、壁際中央で天井に達し、タイプ1 に比べ大きな循環流を形成する (図4(j))。循環流の一部は机下部に回り込み、吸込口に向かう (図4(j))。机上面 (A点) で汚染質発生の場合、障害物近くの天井から床面まで高濃度となるが (図4(k)), 室内平均濃度は1.43とタイプ1 (2.10) に比べかなり低くなる (表5)。室中央 (C点) で汚染質発生の場合 (図4(l)), 机周囲は清浄となる。この場合も室内平均濃度は1.26とタイプ1 (1.63) に比べ低い。壁際障害物の場合、箱型より机型のほうが好ましい。

4.3 複数の障害物設置の場合 (タイプ3: 図5)

両壁際および室中央に計3個の箱型障害物を設置した場合 (タイプ3) を図5に示す。

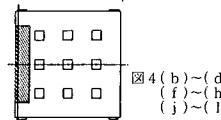
(1) 気流性状 壁際障害物上部では天井まで至る大きな循環流が形成される (図5(b)), 中央障害物上面に吹出

噴流が衝突し、一部は障害物側面で循環流を形成する (図5(b))。また、障害物上の吹出気流間では小さな上昇流が形成される (図5(a))。

(2) 汚染質拡散性状 ①壁際障害物上部 (A点) で汚染質が発生した場合 (図5(c)), 中央の障害物より左側に汚染質が分布し、壁側吹出噴流より壁側の領域で高濃度となる。②障害物間 (B点) で汚染質が発生した場合 (図5(d)), 発生位置下部および中央障害物左側面に高濃度の汚染質が分布する。この場合①の壁際障害物上部発生の場合、中央障害物および噴流により汚染質拡散は妨げられ、汚染質分布範囲は①の場合とほぼ同様となる。③中央障害物上部 (C点) で汚染質が発生した場合 (図5(e)), 室中央の汚染質発生のため、吹出噴流部を除き汚染質は室全体に分布する。特に、中央障害物上面の薄い領域および側面の循環流部では高濃度領域となる。④障

表示断面 (図4)

図4(a),(e),(i)



(タイプ1,2平面図)

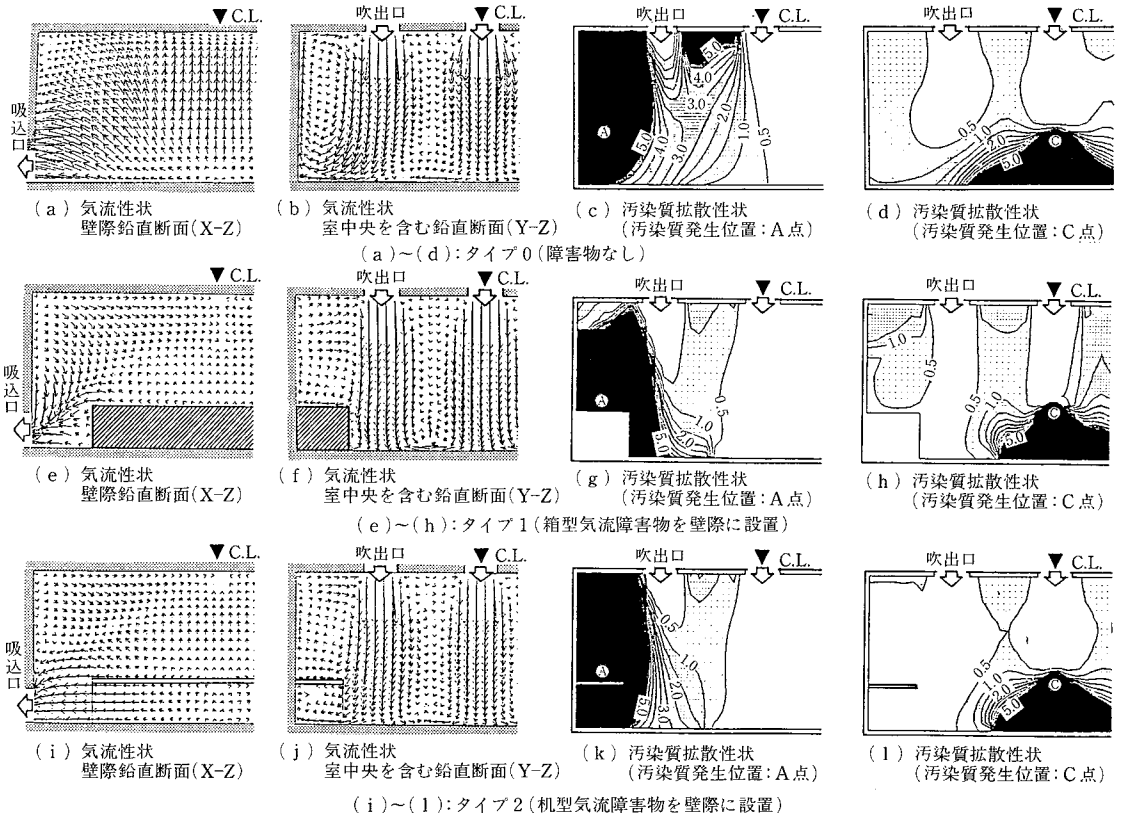


図4 タイプ0~2の気流性状および汚染質拡散性状の比較 (Case 3の計算条件)

害物間の床面で面状に均等に汚染質が発生した場合 (図 5 (f)), 床面近傍の薄い領域および中央障害物側面の循環流部に汚染質が滞留する。図は割愛するが、汚染質は障害物のない壁面上昇し、天井面にも分布する。

4.4 天井障害物設置 (タイプ4: 図6)

タイプ3の障害物配置に天井垂れ壁 (45cm: 室高の1/6幅) を付加した場合 (タイプ4), 天井付近で垂れ壁に沿う水平成分を有する流れが僅かに形成される (図6 (b)) 以外タイプ3とほぼ同様の気流性状・拡散性状となり (図6 (a), (c)), この場合の天井垂れ壁設置の影響は小さい。

4.5 換気効率指標の検討

各タイプの室内平均濃度, 平均拡散半径を表5に, 室内一様汚染質発生の場合の濃度分布をタイプ0とタイプ3に関して図7に示す。これらの換気効率指標の意味は注1, および文献10) を参照されたい。

①室内平均濃度 (表5各欄上段): 気流障害物が増加するほど室内平均濃度は増大し, 発生した汚染質は排出されにくくなる。②平均拡散半径 (表5各欄下段): 平均拡散半径は壁側汚染質発生では小さな値となる。③室内一様汚染質発生の場合の濃度分布 (図7): 天井付近および障害物の周囲の循環流部で高濃度となる。これらの領域は相対的に吹出口からこの領域に至る経路が長く, 汚染

された空気の到達する可能性が高い。

5. 吹出・吸込風量バランスの影響

図1に示す吹出口9個, 吸込口4個のクリーンルームを対象として表6に示す5タイプを解析する。ただし室内には気流障害物となる生産装置等の設置を仮定しない。

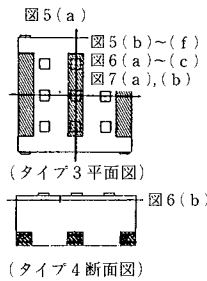
なお室内への供給風量は一定 (換気回数99.2回) とし, 着目する吹出口・吸込口の風速を±50%変化させてある。

数値解析の条件は前節3.3で検討したCase3と同様である。ただし, 吹出風速の増減に伴い, 流入乱流エネ

表5 各タイプの室内平均濃度と平均拡散半径

タイプNo	壁際 (A点)	障害物中央 (B点)	室中央 (C点)
タイプ0	1.69 1.87m	1.55 2.08m	1.60 2.60m
タイプ1	2.10 1.50m	—	1.63 2.56m
タイプ2	1.43 1.51m	—	1.26 2.52m
タイプ3	2.55 1.79m	1.53 2.38m	2.02 2.56m
タイプ4	—	—	2.21 2.56m

表示断面 (図5~7)



*各欄上段: 室内平均濃度 (単位無)
各欄下段: 平均拡散半径 (単位m)

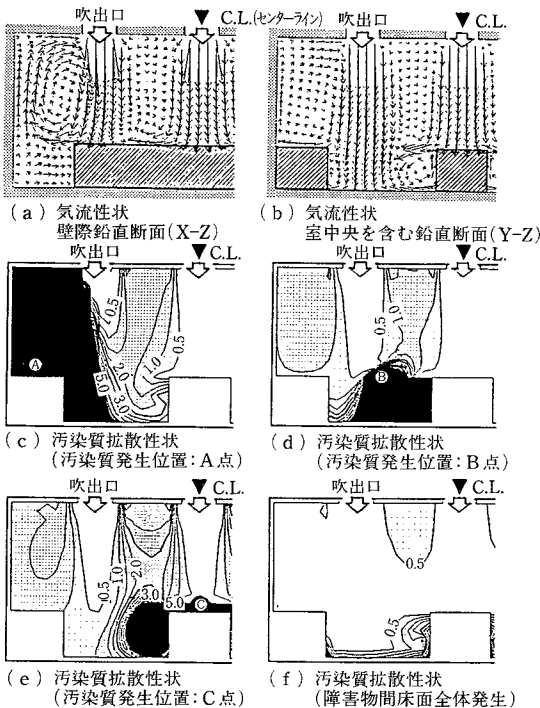


図5 タイプ3の気流性状および汚染質拡散性状

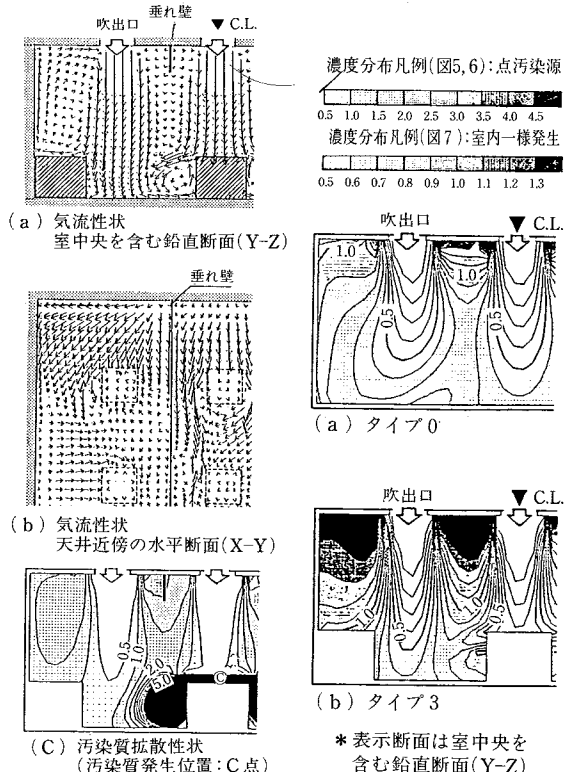
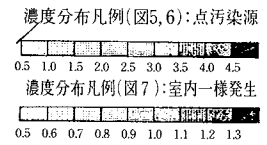


図6 タイプ4の気流性状および汚染質拡散性状



*表示断面は室中央を含む鉛直断面 (Y-Z)

図7 室内一様汚染質発生の場合の濃度分布

ルギー k は、吹出気流平均運動エネルギーの1% [$k=0.01 \cdot 1/2 \cdot W^2$] を用いる。

5.1 吹出・吸込風量の均等な場合 (タイプ0: 図8)

吹出・吸込風量を均等分配するタイプ0の場合、流れ場・拡散場の詳細は、文献9)を参照されたい。

室内の気流性状は、4.1節で述べたように各吹出噴流に対応する気流単位(1つの吹出噴流とそれをとり囲む上昇流により構成)9つを合成した様相を呈する。

5.2 室中央の吹出口の風量のバラツキ

(1)中央吹出口の風量増加(タイプ11: 図9)

中央の吹出口の風速を1.5m/s(タイプ0の50%増)とし、他を均等(0.9375m/s)とした場合。

中央の高風速の吹出噴流は床面で発散し(図9(a)),床面に沿って壁面に至る強い水平流となる(図9(b))。この流れは壁際で上昇し、天井面に達した後、中央の吹出口に収束する。また、中央の噴流周囲の下降流はやや強くなる。本タイプの流れ場は、高風速の中央の吹出噴流に対応する気流単位が、他の8つの気流単位を包含して室内に広がった様相を呈す(図9(a))。

壁側中央の吹出噴流部(A点)で汚染質発生の場合(図9(c)),タイプ0(図8(c))に比べ天井面に沿った中央吹出口へ向かう収束流の影響により、室上部中央側の高濃度領域が増大する。

室中央の吹出噴流部(B点)で汚染質発生の場合(図9(d)),室中央の気流単位が室全体に拡大したため、汚染質は床面および壁面に沿って移流拡散され、噴流部を除く室全体に広く分布する。室内平均濃度(表7,注1)は1.19となり、タイプ0(1.60)に比べかなり小さくなるが、平均拡散半径(表7,注1)は2.90mとタイプ0(2.60m)に比べ大きくなる。

室内一様汚染質発生(吹出口よりの清浄空気の到達時間を評価する際の拡散場に対応¹⁰⁾)の場合、中央吹出口近傍の部分で濃度が低くなるほかはタイプ10とほぼ同様の様相となる。

(2)中央吹出口の風量減少(タイプ12: 図10)

中央の吹出風速を0.5m/s(タイプ0の50%減)、他を均等(1.0625m/s)とした場合。

吹出風速が減少した中央の噴流は室中央床面付近の上昇流と衝突し床面まで到達しない(図10(b))。壁側の吹出噴流による4個の気流単位が室下部で中央側に増大し(図10(a))、室中央の単位は室上部に縮小される。

壁側中央の噴流部(A点)で汚染質発生の場合(図10(c)),壁側の単位の増大に伴い高濃度領域は室中央まで広がる。

室中央(B点)で汚染質発生の場合(図10(d)),噴流間の上昇流により発生位置から室上部まで高濃度領域が分布する。室内平均濃度は2.04とタイプ10(1.60)に比べかなり大きくなる。

室内一様汚染質発生の場合(図10(e)),噴流の到達しない室中央下部の領域および天井近傍が高濃度となり、汚染空気の到達する可能性が高い。

5.3 室内全体でバラついた場合(タイプ13: 図11)

一方の壁側三連の吹出口の風速を1.5m/s(タイプ0より50%増)、他方の壁側三連の吹出口の風速を0.5m/s(タイプ0より50%減)とした場合。

吹出風速の大きな左側の吹出噴流と壁面との間に高風速の上下の循環流が形成される(図11(b))。

左側の噴流と中央の噴流の間には床面近くに小さな上昇流が形成され、比較的明瞭な気流単位の境界となる。一方、右側の吹出風速の小さな噴流は床面に到達せず、この領域では中央の噴流と壁面との間で大きな低風速の循環流が形成される。

壁側吹出噴流部(A点)で汚染質発生の場合(図11(c)),左側の気流単位の大部分は高濃度領域となる。本タイプの各吸込口は均等吸込みであり、左側の単位に供給された空気は右側の吸込口にも吸込まれる。したがって、室の右側へも汚染質が移流拡散され、“偏った拡散場”が形成される。これは①対称性を欠き、②室の半分以上

表6 解析種類

タイプNo.	タイプ0	タイプ11	タイプ12	タイプ13	タイプ14
風量の変化した吹出口・吸込口の位置 (●: 風量増大) (○: 風量低減)					
風量の状況 (風速, m/s)	基本タイプ ・均等吹出(1.0m/s) ・均等吸込(2.25m/s)	●: 吹出風速50%増(1.5m/s) ・他は均等吹出(0.9375m/s) ・均等吸込(2.25m/s)	○: 吹出風速50%減(0.5m/s) ・他は均等吹出(1.0625m/s) ・均等吸込(2.25m/s)	●: 吹出風速50%増(1.5m/s) ○: 吹出風速50%減(0.5m/s) ・他の吹出: 1.0m/s ・均等吸込(2.25m/s)	●: 吸込風速50%増(3.375m/s) ○: 吸込風速50%減(1.125m/s) ・均等吹出(1.0m/s)

*換気回数は各タイプとも同一(99.2回/h)

のスケールにわたり、③吸込口に至る流れにより特徴づけられる。

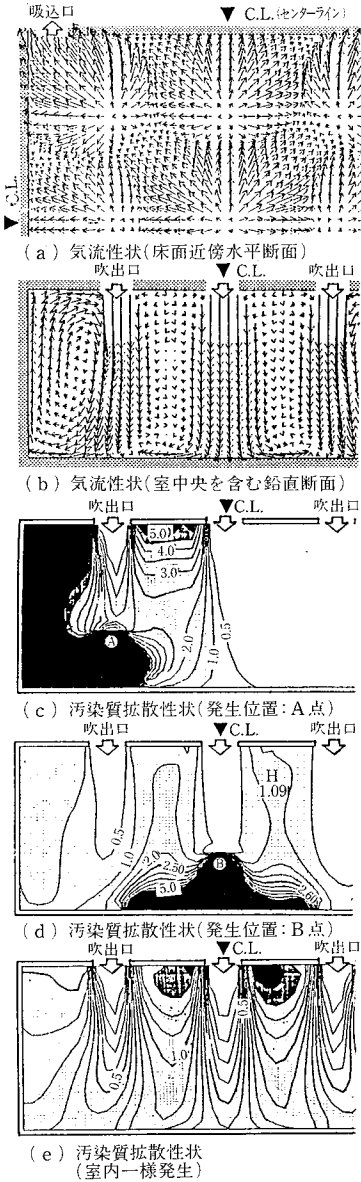
室中央噴流部 (B点) で汚染質発生の場合 (図11 (d)), 汚染質は発生位置より左側では、この気流単位の境界まで分布する。一方、室の右側では汚染質は前述の大きな循環流により移流拡散され広く分布する。この領域では中央の噴流からの流跡に沿って床面および壁面近傍で高濃度となる。

室内一様汚染質発生の場合 (図11 (e)), 吹出風量の大

い室左側循環流部分は比較的低濃度となるが、室右側の領域 (“偏った拡散場”の風下側) ほど高濃度となる。

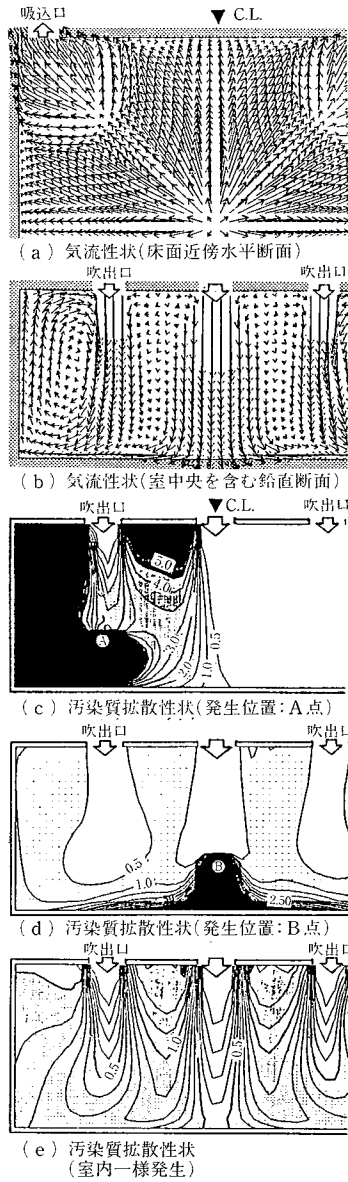
5.4 吸込風量がバラつた場合 (タイプ14: 図12)

吹出風速は均等として2ヶ所の吸込口の風速を3.375m/s (タイプ0 に比べ50%増), 他の吸込風速を1.125m/s (タイプ0 に比べ50%減) とした場合、吸込口より離れた室中央断面 (図12 (b)) では吸込風速を均等としたタイプ0 とほぼ同様となる。一方、吸込口に隣接する気流単位では吸込風量変化の影響は大きく、風量が



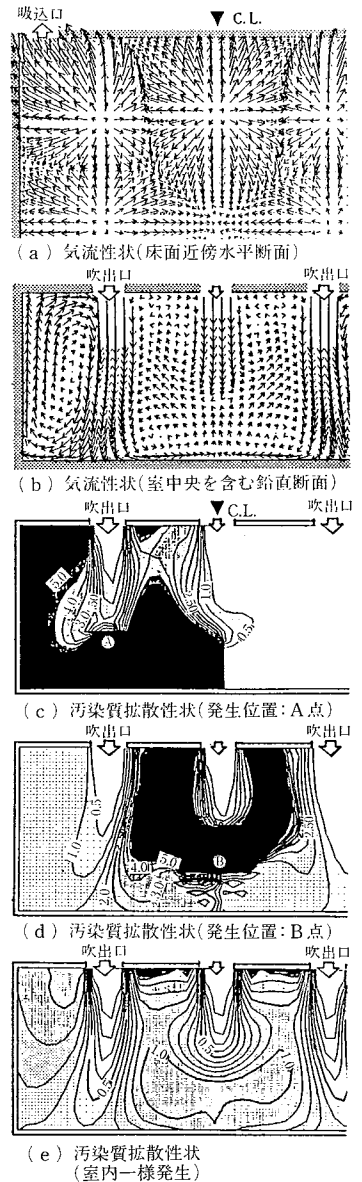
* (b)~(e): 室中央を含む鉛直断面

図8 タイプ0の気流性状および汚染質拡散性状 (均一吹出・均一吸込)



* (b)~(e): 室中央を含む鉛直断面

図9 タイプ11の気流性状および汚染質拡散性状 (室中央吹出口風量50%増)



* (b)~(e): 室中央を含む鉛直断面

図10 タイプ12の気流性状および汚染質拡散性状 (室中央吹出口風量50%減)

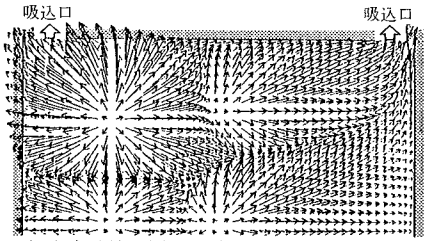
低減された吸込口に隣接する単位の占める領域は増大し、風量の増大した吸込口に隣接する単位では過大な風量が吸込まれるため単位の占める領域が縮小される。

吸込風量増大側の噴流部 (A点) で汚染質発生の場合 (図12(c)), 発生位置を含む壁側三連の気流単位は小さく、汚染質の分布はタイプ0に比べやや狭い領域となる。室内平均濃度は0.96, 平均拡散半径は1.74mとなり、格段に小さな値となる。

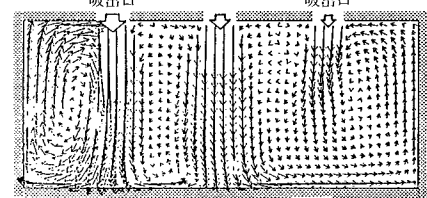
中央の吹出噴流部 (B点) で汚染質発生の場合 (図12

(d)), 中央の気流単位内に汚染質が高濃度で滞留するほか、“偏った拡散場”が形成され、汚染空気は主に風量の増大した吸込口に向かうため、右側(“偏った拡散場”の上流側)の単位は比較的清浄である。室内平均濃度は1.49, 平均拡散半径は2.49mとなり、タイプ0(1.60(-), 2.60m)よりやや小さな値となる。

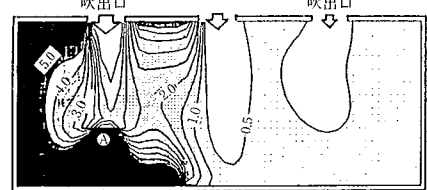
室内一様汚染質発生の場合(図12(e)), 吸込風量の多い左側の領域でやや高い濃度となる。この領域は“偏っ



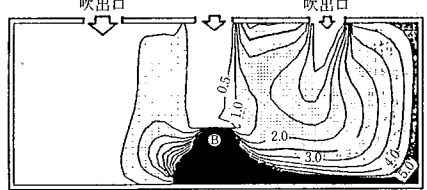
(a) 気流性状(床面近傍水平断面)



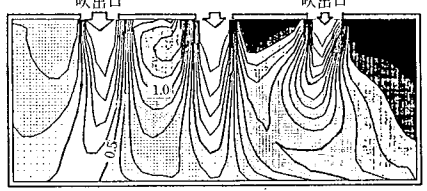
(b) 気流性状(室中央を含む鉛直断面)



(c) 汚染質拡散性状(発生位置:壁側吸込口下A点)



(d) 汚染質拡散性状(発生位置:室中央B点)

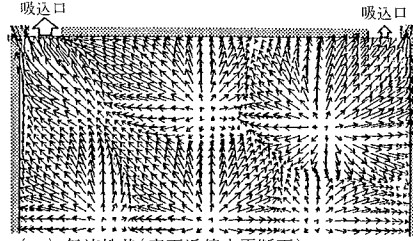


(e) 汚染質拡散性状(室内一様発生)

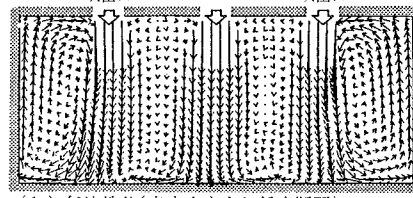
* (b)~(e):室中央を含む鉛直断面

図11 タイプ13の気流性状および汚染質拡散性状

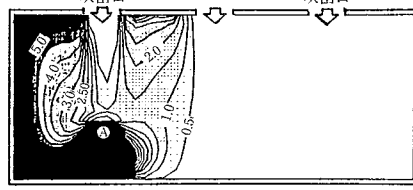
(左壁側三連吹出口風量50%増, 右壁側三連吹出口風量50%減)



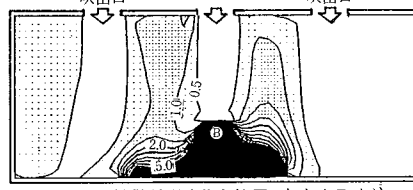
(a) 気流性状(床面近傍水平断面)



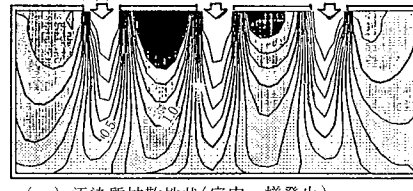
(b) 気流性状(室中央を含む鉛直断面)



(c) 汚染質拡散性状(発生位置:壁側吸込口下A点)



(d) 汚染質拡散性状(発生位置:室中央B点)



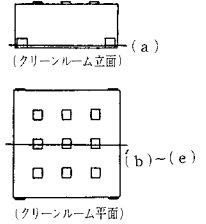
(e) 汚染質拡散性状(室内一様発生)

* (b)~(e):室中央を含む鉛直断面

図12 タイプ14の気流性状および汚染質拡散性状

(左壁側三連吸込口風量50%増, 右壁側三連吸込口風量50%減)

表示断面 (図8~12)



*各濃度分布図は吸込口平均濃度で無次元化して示してある

濃度分布凡例((c),(d)):点汚染源

0.5 1.0 1.5 2.0 2.5 3.0 3.5 4.0 4.5

濃度分布凡例((e)):室内一様発生

0.5 0.6 0.7 0.8 0.9 1.0 1.1 1.2 1.3

表7 各タイプの室内平均濃度と平均拡散半径

タイプNo.	壁側噴流中 (A点)	室中央噴流中 (B点)
タイプ0	1.55 2.08m	1.60 2.60m
タイプ11	1.66 2.05m	1.19 2.90m
タイプ12	1.82 2.14m	2.04 2.36m
タイプ13	1.61 2.55m	1.46 2.28m
タイプ14	0.96 1.74m	1.49 2.49m

*各程上段:室内平均濃度(単位無)
各程下段:平均拡散半径(単位m)

*注1:各換気効率指標の意味 (詳細は文献3)参照

・室内平均濃度:その点で発生した汚染質の室内残留時間に対応,この値が小さいほど,発生した汚染質は速く排出される。

・平均拡散半径:その点で発生した汚染質の空間的広がりに対応,この値が大きいほど,発生した汚染質は室内に広く拡散する。

・室内汚染質一様発生の場合の各点濃度:吹出空気の到達時間(行程)に対応,この値が大きいほど,清浄な吹出空気が到達する時間(行程)が長く,到達する空気が汚染されている可能性が高い。

た拡散場”の風下側となっており、汚染された空気の到達する可能性が高い。

5.5 換気効率指標の検討 (表7)

①吹出噴流速度の減少および吸込風量の増加は、その気流単位の領域を減少させる。噴流速度が減少した気流単位で汚染質発生がある場合、室内平均濃度は高くなる (たとえばタイプ12: B点の場合)。

②吹出噴流の速度の増大および吸込風量の減少は、その気流単位の領域を増大させる。この場合、汚染質分布の平均拡散半径の値も、より大きな値となる (たとえばタイプ11: B点の場合)。

③“偏った拡散場”が形成される場合、室内一様発生の場合の汚染質濃度は、下流側で上昇する。したがって、複数の気流単位を有する複雑な室内流れ場に関しても、この濃度分布と吸込口の位置関係により容易に“偏った拡散場”の状況を推察することができる (たとえばタイプ13: 図11(e))。

6. ま と め

①障害物近傍の流れ場は非常に複雑な構造となり、僅かなシミュレーション条件の違いにより大きく変化する。このため模型実験を併用し、数値解析の確からしさを検討した上で解析を行うことが好ましい。

②室内の障害物がない場合や流量アンバランスのない流れ場は、吹出気流とその周囲に生ずる上昇流により形成される気流単位が合成された様相を呈する。

③気流障害物は、その障害物を含む気流単位に大きな影響を及ぼすが、障害物を含まぬ気流単位への影響は比較的小さい。

④障害物の設置により、その周囲の気流性状はますます複雑となり、障害物周囲および室内全体の拡散場は大きく変化する。また、発生した汚染質の排出時間は長くなる傾向を有する。

⑤汚染源となる障害物周囲に循環流が形成されている場合、循環流部には汚染質が高濃度で滞留する。また、この領域は清浄な吹出空気の到達時間 (行程) も長く、到達空気が汚染されている可能性が高いため気流計画に特に配慮が必要である。

⑥壁際に設置する障害物は箱型より机型障害物のほうが好ましい。

⑦吹出風速の±50%程度のバラツキは、室内の気流単位の様相を大きく変化させる。特に、隣接する噴流に対し約半分の風速の噴流部では床面まで至る気流単位は形成されない。

⑧風量の大きな噴流部には大きな気流単位が形成される。その単位内で汚染質発生の場合、汚染質の平均拡散半径も大きくなる。

⑨室内に“偏った拡散場”が形成される場合、その風上側での汚染質発生は、汚染質分布範囲が広くなり好ましくない。

⑩“偏った拡散場”の把握には室内一様発生の場合の濃度分布の検討が有効である。

なお、今回示した結果はバラツキの程度を平均値の50%とかなり大きくしている。今後は、吹出・吸込風量のバラツキがより小さい場合に関しても考察する予定である。
(1987年10月8日受理)

参 考 文 献

- 1) 加藤, 村上, 須山: コンベンショナルフロー型クリーンルーム内の気流性状に関する研究 (その4), 第6回空気清浄とコンタミネーションコントロール研究大会予稿集, 昭和62年5月
- 2) 須山, 村上, 加藤, 中川: コンベンショナルフロー型クリーンルーム内の気流性状に関する研究 (その20), 空気調和・衛生工学会論文集, 1987年10月
- 3) S. MURAKAMI, S. KATO and Y. SUYAMA: THREE-DIMENSIONAL NUMERICAL SIMULATION OF TURBULENT AIR-FLOW IN VENTILATED ROOM BY MEANS OF A TWO-EQUATION MODEL, ASHRAE Transactions, Vol. 93 (Part 2), 1987
- 4) 村上, 加藤, 須山: 乱流数値シミュレーションの診断システムに関する研究 (第6報), 空気調和・衛生工学会論文集, 1985年9月
- 5) B.E. LAUNDER and D.B. SPALDING: THE NUMERICAL COMPUTATION OF TURBULENT FLOWS, COMPUTER METHODS IN APPLIED MECHANICS AND ENGINEERING 3, 1974
- 6) 村上, 加藤, 須山: 室内気流数値解析の診断システムに関する研究 (第9報, 第10報) 空気調和・衛生工学会学術論文集, 1986年10月
- 7) 加藤, 村上, 須山: クリーンルーム内の気流性状に関する研究 (その13), 空気調和・衛生工学会論文集, 1985年9月
- 8) 須山, 村上, 加藤: コンベンショナルフロー型クリーンルーム内の気流性状に関する研究 (その16), 日本建築学会大会学術講演梗概集, 昭和61年8月
- 9) 加藤, 村上, 須山: コンベンショナルフロー型クリーンルーム内の気流性状に関する研究 (その3), 第5回空気清浄とコンタミネーションコントロール研究大会予稿集, 昭和61年4月
- 10) 村上, 加藤: 新たな換気効率指標と3次元乱流シミュレーションによる算出法, 空気調和・衛生工学会学術論文集, No.32, 1986年10月