



## 新たな換気効率指標と三次元乱流数値

### シミュレーションによる算出法

—換気効率の評価モデルに関する研究—

村上 周 三\*<sup>1</sup>  
 加藤 信 介\*<sup>2</sup>

キーワード：室内環境・流体力学・換気設備・換気効率・数値シミュレーション・  
 $k-\epsilon$ 型二方程式乱流モデル・室内空気分布

室内における汚染質の拡散性状を基礎とする3種の新たな換気効率の指標を定義する。これは、①各場所で汚染質が発生したと仮定した場合の室内平均濃度、②同じく、汚染質が発生したと仮定した場合の平均拡散半径、および③吹出し空気の平均到達時間、である。

これらを用いて、実在のクリーンルーム内の換気特性を考察する。換気効率指標の分布は、①吹出し口・吸込み口などを変化させた場合の気流分布の変化による換気効率特性の変化を効果的に示す、②室内汚染源の発生位置の変化が室内の清浄度に与える影響を直接的に示す、③清浄空気到達の程度を具体的に表す、などの特徴を有し、室内の換気設計を行う際の指標として有用なことが示される。

## 1. 緒 言

室内では、その気流性状に対応して室内各点の空気の入れかわり方が異なり、汚染質の排出のされ方や新鮮空気の配分のされ方(すなわち室内各点の換気の効率)が異なると考えられる。本研究は、こうした室内の換気効率の分布特性を表すものとして、新しく3種類の換気効率指標とその分布を定義し、実際の室内気流に適用してその有用性を検討する。

## 2. 既往の室内換気設計と室内換気の研究

室内換気設計は、①換気量、②室内で発生した汚染質の効果的排除、③清浄空気の効果的配分、の各観点に基づいて行われる。②、③に関しては、室内気流や室内で発生した汚染物質の分布性状が問題とされる。これに対応し、多くの室内気流分布の解析法や予測法の研究、および汚染質拡散の解析や予測法の研究が進められてい

る。また、これら気流分布、汚染質の濃度分布の解析から進んで室内の“換気効率”を定義し、その分布を考察しようとする試みがなされている<sup>1)~3)</sup>。研究によっては、気流分布を一種のブラックボックスとし、排出年齢分布関数を求めて室内の汚染質拡散を解析する研究方法もある<sup>4)</sup>。しかし、室内気流の詳細な測定を可能とする測器の開発や<sup>5), 6)</sup>、室内気流分布の数値解析手法の開発により<sup>7), 8)</sup>、現在では室内気流分布を踏まえた室内汚染質拡散の解析が可能となっている<sup>9)</sup>。汚染質拡散の解析でしばしば求められる濃度分布は、①汚染質発生地点近傍の濃度の高低により、その地点近傍の換気性状の良否を知ることができる、②室内全体の汚染質分布の情報を具体的に与え、その分布のパターンから室内での換気特性(汚染質が滞留しそうな場所、汚染質が速やかに排出されそうな場所、等々の換気効率の分布)の推定にも用いられる<sup>10), 11)</sup>。しかし、濃度分布パターンの解析のみでは、①分布のパターンが汚染質排出源位置により変化する、②汚染質排出源位置を変化させて求めた濃度

\*1, \*2 東京大学生産技術研究所 正会員

分布それぞれの相互関係を合理的に整理できていない、  
 ③設計資料として用いるための定量的に評価し得る換気効率の分布(換気効率自身は室内気流自身の特性であり、汚染質発生の有無やその位置などに無関係に定まっていると考えるのが合理的であろう)に具体的に関係付けられていない、などの問題を残している。

### 3. 換気効率の概念

本研究は、室内の換気設計に必要な室内の換気特性を表す指標として、最も基本となる換気量のほか、室内における換気の効率分布を定量的に把握するのに有効となる指標を新に提供することを目的としている。このため、まさに膨大な数にのぼる汚染発生源ごとの汚染質分布図を求めてこれを整理し、上述の問題点に直接答える室内各点における換気効率を示す指標を提案する。本研究は、このため次の基本方針に基づく。

- 1) 気流分布のみならず、汚染質の拡散も定常状態を考える。
- 2) 室内の換気性状は、汚染源ごとに対応する濃度分布によって最も端的に表される。
- 3) したがって、その分布形の普遍的でかつ取扱いの簡単な表示方法を考える。

1), 2)に関しては、濃度分布を解析する多くの既往の研究と同様の方針である。しかし、各汚染質の発生に対応する濃度分布は、換気の効果に対応して重要な示唆を与えるが、汚染質の発生位置が異なればそれに応じて変化する。汚染質発生量が同一であっても汚染質の発生位置が異なれば、同一地点の汚染質濃度の値は異なってくる。したがって、濃度の値をその場所の換気効率指標と結び付けるためには、①汚染質の発生位置に関し、実際問題への応用に対し普遍性の高い取決めを行って濃度分布を求め、各位置の濃度の値をそのまま換気効率指標とし、その分布を求める方法、②汚染源に対応する濃度の空間分布の特性を一般的な形で数値化し、これをその換気効率指標として定義し、汚染源を室内全体にスキャンすることに対応してその分布を求める方法、などが考えられる。本研究は、前者に関し室内一様の汚染質発生を提案し、後者に関し濃度分布特性の数値化の手法として濃度分布のモーメントの使用を提案する。

#### 3.1 濃度分布のモーメント展開

濃度分布に限らず、一般の分布関数は、そのモーメントと関係付けられる。以下、濃度分布とそのモーメントの関係を簡単に示す。

濃度分布関数  $C_X(X)$  をフーリエ変換する。

$$C_k(k) = \int_{V(X)} C_X(X) \cdot e^{-2i\pi kX} dX \quad \dots\dots(1)$$

ここに、

$$\begin{aligned} C_X(X) &: X(X, Y, Z) \text{ における濃度} \\ C_k(k) &: \text{濃度 } C_X(X) \text{ のフーリエ変換} \\ i &: \text{虚数単位}(=\sqrt{-1}) \\ X &: \text{位置ベクトル}(X, Y, Z) \\ k &: \text{波数ベクトル}(k_x, k_y, k_z) \end{aligned}$$

式(1)の指数部の内積  $kX$  を成分表示する。

$$C_k(k) = \int_{V(X)} C_X(X) \cdot e^{-2i\pi k_x X} \cdot e^{-2i\pi k_y Y} \cdot e^{-2i\pi k_z Z} dX \quad \dots\dots(2)$$

さらに、指数部を級数展開する。

$$\begin{aligned} C_k(k) &= \sum (-2i\pi k_x)^l / l! \cdot \sum (-2i\pi k_y)^m / m! \\ &\cdot \sum (-2i\pi k_z)^n / n! \cdot \int_{V(X)} X^l \cdot Y^m \cdot Z^n \\ &\cdot C_X(X) dX \quad \dots\dots(3) \end{aligned}$$

すなわち、濃度分布のフーリエ変換対  $C_k(k)$  は上式に示されるように、濃度分布のモーメントを各々係数とする級数に展開される。これは、モーメント  $\int_{V(X)} X^l \cdot Y^m \cdot Z^n \cdot C_X(X) dX$  により濃度分布のフーリエ変換、さらには濃度分布自身が決定されることを意味する。本研究では、汚染源に対応する濃度分布を一般的な形で数値化する手法として、この濃度分布のモーメントを用いる。

#### 3.2 濃度分布の低次のモーメント

本研究では、濃度分布の低次のモーメントの中で以下のものを換気効率指標として用いている。

- (1) 零次のモーメント

$$C_0 = \int_{V(X)} C_X(X) dX \quad \dots\dots(4)$$

- (2) 一次のモーメント

$$X_G = \int_{V(X)} X \cdot C_X(X) dX / C_0 \quad \dots\dots(5)$$

- (3) 二次のモーメント

$$X_R^2 = \int_{V(X)} (X - X_G)^2 \cdot C_X(X) dX / C_0 \quad \dots\dots(6)$$

図-1に、濃度分布のモーメントの意味を風速変動の確率密度関数の例とともに示す。一般に分布関数は、その低次のモーメントによって、その概略の分布性状が推定できる。

### 4. 換気効率指標と分布の定義

以下に換気効率指標とその分布を具体的に定義し、その物理的な意味を考察する。

#### 4.1 換気効率指標と分布—その1(SVE 1室内平均濃度とその分布)

ある汚染源(点発生)に対応して得られる室内平均濃度を瞬時一様拡散濃度で基準化して定義する。これは、換

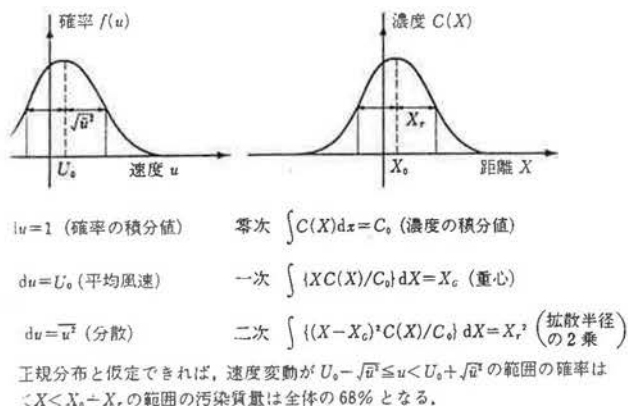
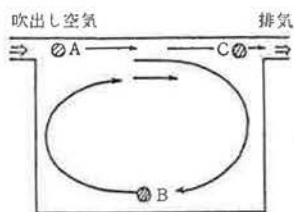


図-1 濃度分布と速度の確率密度関数の対応



- ・汚染源 A: 拡散半径大  
室内平均濃度<瞬時一樣拡散濃度
- ・汚染源 B: 拡散半径大  
室内平均濃度>瞬時一樣拡散濃度
- ・汚染源 C: 拡散半径小  
室内平均濃度<瞬時一樣拡散濃度

図-2 室内気流モデル (汚染質定常発生)

次のモーメントを瞬時一樣拡散濃度で基準化する。

$$X_S = C_0(X_S)/C_S \quad \dots\dots(7)$$

$$C_S = q/Q \quad \dots\dots(8)$$

$$= \int_{V(X)} C_X(X_S, X) dX \quad \dots\dots(9)$$

$(X_S)$ : Scale for Ventilation Efficiency 1,  $X_S$  における換気効率指標—その1 (無次元室内平均濃度およびその分布). 空間全体に汚染質発生位置  $X_S$  をスキャンさせ、SVE1の分布を算出

$(X_S, X)$ :  $X_S$  を汚染源位置とし、汚染質発生量を  $q$ , 換気量  $Q$  とした場合の  $X$  位置での濃度を表す [kg/m<sup>3</sup>]

汚染源の汚染質発生量 [kg/s]

換気量 [m<sup>3</sup>/s]

瞬時一樣拡散濃度 [kg/m<sup>3</sup>]

すなわち室内の汚染質平均濃度は、発生した汚染質が排出されるまでの室内平均残留時間  $\tau$  の逆数である。この指標の分布は、どの場所で汚染質が発生した場合に速やかに排出されるか、またどの場所で汚染質が発生した場合に汚染質が室内に滞留するか、を端的に示す。図-2に示す室内モデルにおいて、

吹出し口近傍のC点で発生した汚染質は速やかに排出されるため、室内の平均濃度は低い値となる。一方、

汚染源B点で汚染質が発生した場合、汚染質は室内に滞留しやすいため、室内の平均濃度は高い値を示す。この場合、汚染質発生量と汚染質排出量は定常的に一致するが、汚染質排出までの時間が長くなるほど、室内の総汚染質量は増加し室内平均濃度は上昇する。吹出し口近傍のA点で発生した汚染質は、吹出し噴流でよく拡散される。したがって、室内はほぼ均一の濃度となり、瞬時一樣拡散濃度に近づく。換気効率指標—その1は、このように汚染質の排出効率を示すものである。

また、汚染質排出までの時間が長くなるほど、室内の総汚染質量は増加し室内平均濃度は上昇する。吹出し口近傍のA点で発生した汚染質は、吹出し噴流でよく拡散される。したがって、室内はほぼ均一の濃度となり、瞬時一樣拡散濃度に近づく。換気効率指標—その1は、このように汚染質の排出効率を示すものである。

また、汚染質排出までの時間が長くなるほど、室内の総汚染質量は増加し室内平均濃度は上昇する。吹出し口近傍のA点で発生した汚染質は、吹出し噴流でよく拡散される。したがって、室内はほぼ均一の濃度となり、瞬時一樣拡散濃度に近づく。換気効率指標—その1は、このように汚染質の排出効率を示すものである。

また、汚染質排出までの時間が長くなるほど、室内の総汚染質量は増加し室内平均濃度は上昇する。吹出し口近傍のA点で発生した汚染質は、吹出し噴流でよく拡散される。したがって、室内はほぼ均一の濃度となり、瞬時一樣拡散濃度に近づく。換気効率指標—その1は、このように汚染質の排出効率を示すものである。

また、汚染質排出までの時間が長くなるほど、室内の総汚染質量は増加し室内平均濃度は上昇する。吹出し口近傍のA点で発生した汚染質は、吹出し噴流でよく拡散される。したがって、室内はほぼ均一の濃度となり、瞬時一樣拡散濃度に近づく。換気効率指標—その1は、このように汚染質の排出効率を示すものである。

汚染質は増加し室内平均濃度は上昇する。吹出し口近傍のA点で発生した汚染質は、吹出し噴流でよく拡散される。したがって、室内はほぼ均一の濃度となり、瞬時一樣拡散濃度に近づく。換気効率指標—その1は、このように汚染質の排出効率を示すものである。

#### 4.2 換気効率指標と分布—その2 (SVE2 汚染質の平均拡散半径とその分布)

ある汚染源(点発生)に対応する濃度分布の二次モーメントを室内平均濃度(零次モーメント)で基準化し、その平方根で定義する。

$$SVE2(X_S)^2 = \int_{V(X)} \frac{\{X - X_G(X_S)\}^2 \cdot C_X(X_S, X) dX}{C_0(X_S)} \quad \dots\dots(10)$$

$$\text{ただし、} X_G(X_S) = \frac{\int_{V(X)} X \cdot C_X(X_S, X) dX}{C_0(X_S)} \quad \dots\dots(11)$$

ここに、

SVE2( $X_S$ ):  $X_S$  における換気効率指標—その2 (汚染質の平均拡散半径). 空間全体で汚染質発生位置  $X_S$  をスキャンさせ、SVE2の分布を算出

$X_G(X_S)$ : 汚染質濃度分布の重心(零次のモーメント)で基準化した濃度分布の一次モーメント)

SVE2, すなわち濃度分布の基準化された二次モーメントの平方根は、長さの次元を持ち、汚染質の平均的な拡散距離いわば平均拡散半径に対応する量となる。室内平均濃度が汚染質の室内残留性に関する指標であるのに対し、これは汚染質の室内への広がりに関する指標となる。室内で生じた汚染質は、なるべく室内に広がることなく速やかに排出されることが望ましい。これを

図-2に示す室内気流モデルで検討する。吹出し口近傍A点で汚染質発生があった場合、室内平均濃度はB点で汚染質発生があった場合よりも低くなる可能性がある。しかし、汚染質は室内に大きく広がるため好ましくない。この指標の分布は、どの場所に汚染質が排出された場合、室内に汚染質が広く拡散するか、また拡散することなく排出されるかを端的に示す。

#### 4.3 換気効率指標と分布—その3(SVE3吹出し空気 の平均到達時間)

室内一様に汚染質が発生する際の各点の濃度およびその分布により定義する。この指標は吹出し空気がその点に到達するまでの時間(行程)が長いほど、汚染の確率が上昇するという想定に基づく。

$$\text{SVE3}(X) = Cx'(X)/Cs \quad \dots\dots(12)$$

$$\text{ただし, } Cs = q/Q \quad \dots\dots(13)$$

ここに、

SVE3(X): Xにおける換気効率指標—その3(室内一様汚染質発生時の各点濃度を瞬時一様拡散濃度で基準化した無次元濃度)

Cx'(X): 室内一様に総量qの汚染質発生がある場合のX点の濃度 [kg/m<sup>3</sup>]

Cs: 瞬時一様拡散濃度 [kg/m<sup>3</sup>]

第三の換気効率指標SVE3は、主に汚染質の排出を意識した前記二つの換気効率指標とその分布とは異なり、室内の任意の点に関し吹出し空気がそこに到達するのに要した平均的な時間(行程)を示すものである。吹出し空気が到達するのに要した時間(行程)が短ければ短いほど、その到達した空気は汚染されている可能性が小さく、時間(行程)が長くなるほど途中汚染されている可能性が増すと考えられる。吹出し空気の平均到達時間(行程)は、室内気流を吹出し口から室内を経て排気口に至る無数の流管の集合としてモデル化することにより容易に理解される。吹出し口から排気口に至る流管は、途中の循環などに応じてさまざまな長さを持つ。室内一様に汚染質を発生した場合、流管中を流れる空気の汚染質濃度は、吹出し口からの時間(行程)が長くなるほど高くなる。また排出口ではさまざまな流管が集合し、その場の濃度が各流管濃度の平均となることを考慮すると、室内各点の濃度もその場所に吹出し口からの空気が平均的に到達する時間(行程)を表すものと期待される。

なお、吹出し口から慣性を持たない粒子(新鮮空気を示す目印)が平均流に乗って各地点に到達するのに要する時間の分布は、式(14)で表されることが明らかにされている<sup>12)</sup>。この観点に立脚して、第三の換気効率指標SVE3を解釈すれば、以下のようになる。

- 1) 吹出し口からの慣性を持たない粒子の到達時間Tは、流れが層流の場合、空間一様発生項 $T_P$ がある輸送方程式(14)で示される<sup>12)</sup>(テンソル表示)。

$$\partial T U_i / \partial X_i = T_P \quad \dots\dots(14)$$

ここに、

T: 慣性を持たない粒子の到達時間 [s]

$U_i$ : 流速( $i=X, Y, Z$ ) [m/s]

$T_P$ : 発生項(=1)<sup>12)</sup> [-]

- 2) 通常室内気流は乱れており、慣性を持たない粒子の輸送は平均流のみならず、乱れ成分にもよっている。すなわち、式(14)のレイノルズ平均を考えると、平均的な到達時間 $\langle T \rangle$ は式(15)で表される。

$$\partial \langle T \rangle \cdot \langle U_i \rangle / \partial X_i = -\partial \langle T' U_i' \rangle / \partial X_i + T_P \quad \dots\dots(15)$$

ここに、

$\langle T \rangle$ : Tのアンサンブル平均

$T'$ : Tの変動値(=T- $\langle T \rangle$ )

$\langle U_i \rangle$ :  $U_i$ のアンサンブル平均

$U_i'$ :  $U_i$ の変動値(= $U_i - \langle U_i \rangle$ )

- 3) 室内で汚染質が一様に発生する場合の汚染質の平均濃度 $\langle C \rangle$ は式(16)で表される。ただし、汚染質の分子拡散は無視する。

$$\partial \langle C \rangle \cdot \langle U_i \rangle / \partial X_i = -\partial \langle C' U_i' \rangle / \partial X_i + C_P \quad \dots\dots(16)$$

ここに、

$\langle C \rangle$ : Cのアンサンブル平均

$C'$ : Cの変動値(=C- $\langle C \rangle$ )

$$C_P: \text{発生項} \left( q = \int_{V(X)} C_P dX \right)$$

- 4) 式(15)における $\partial \langle T' U_i' \rangle / \partial X_i$ の項の取扱いは明確ではないが、汚染質の乱流拡散を示す項 $\partial \langle C' U_i' \rangle / \partial X_i$ と対応させて考えることができる。すなわち、室内で汚染質が一様に発生する場合の汚染質の平均濃度 $\langle C \rangle$ を吹出し口からの慣性を持たない粒子が各点に平均して到達時間 $\langle T \rangle$ に対応させて解釈することができる。

- 5) 式(16)の濃度輸送方程式で $\langle C \rangle$ を慣性を持たない粒子(すなわち新鮮空気)が各点に平均して到達する時間と読み換え、発生項を式(15)の $T_P=1$ の対応から $C_P=1$ とすると、室内全体での発生量は $q = \int_{V(X)} C_P dX$ から $q = \int_{V(X)} dX$ 、すなわち室容積に対応する値となる。したがってこの場合、瞬時一様拡散濃度 $C_s=q/Q$ は換気回数 $n$ の逆数となる。

- 6) 以上から、第三の換気効率指標SVE3に換気回数 $n$ の逆数を乗じたものは、その地点に平均して新鮮空気が到達する時間に対応すると解釈される。



率の指標とその分布の算出法

に達する各汚染源ごとの濃度分布解析には、  
による数値解析を利用することが有効であ  
析による室内の換気効率の指標とその分布を  
頂を 図-3 に示す。

気流の三次元数値解析を行う。平均濃度  
る必要がある。平均風速のほか、渦  
の分布なども算出する必要がある。本研  
二方程式モデルを基礎方程式とし、差  
数値シミュレーションを行う手法<sup>7)</sup>を  
この方法による解析は実際の室内気流と  
子であると確認されており<sup>8)</sup>、これを利  
布の定常解を求める。算出された気流  
各点発生源に対する定常濃度分布を算  
の濃度分布の数値シミュレーションに  
ミュレーション結果と実験結果が比較  
応結果が得られている<sup>9)</sup>。換気効率指  
分布の算出は以下の手順で行う。①差  
定まる最小セル空間内で一様に汚染質  
点発生源に対応)。この場合の濃度分布  
濃度分布から点発生源位置における  
一その1、その2をを求める。③この汚  
を逐次空間内をスキャンし、各々対応  
換気効率指標を求め、これにより  
の分布を求める。④点発生源に対  
布を重ね合わせるか、あるいは室内  
主の条件で改めて濃度分布を求め、  
一その3の分布を得る。

例

ンベンショナル型クリーンルームに  
究で定義した室内の換気効率指標  
3)の分布を三次元の数値解析によ  
れを検討する。なお、本稿は数値シ  
ノの有効性の検証を直接の目的とす  
ので、気流分布に関するシミュ

レーションと実物における測定、および模型実験との比  
較の結果などに関しては割愛する。これらに関しては、  
文献 13), 14)にその詳細を記す。

6.1 対象室内および室内気流性状

対象クリーンルームを 図-4 に示す。表-1 に示すよ

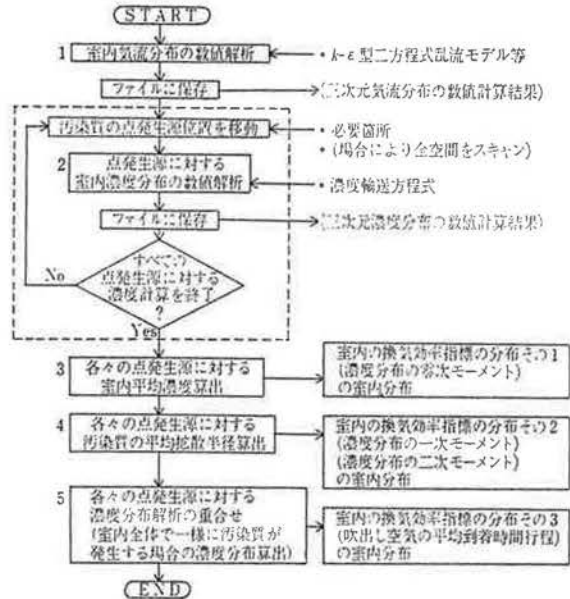


図-3 数値解析による室内の換気効率分布算出の  
フローチャート

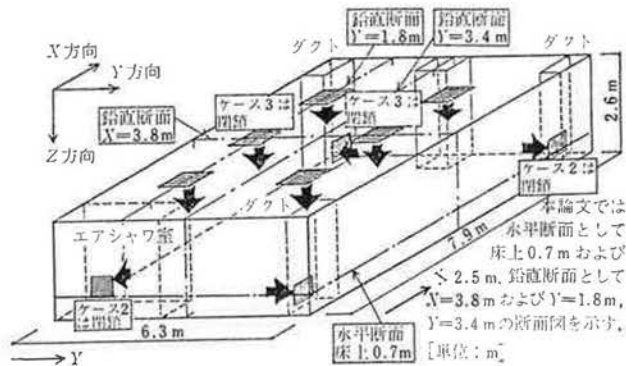


図-4 室内モデル(コンベンショナルフロー型クリーンルーム)

表-1 室内気流性状のパターン

気流 パターン	吹出し口 回数	吸込み口 回数	吹出し口 風速 [m/s]	換気量 [m <sup>3</sup> /s]	室内総 汚染質 発生量	備 考
ケース1	6	4	1.0	2.46	2.46	基本パターン
ケース2	6	2	1.0	2.46	2.46	吸込み口減(対角の二つ減)
ケース3	4	4	1.0	1.64	1.64	吹出し口減(室中央の二つ減)

注 室内総汚染質発生量は、瞬時一様拡散濃度が1.0となるように定めている。ただし、吸込み口  
風速は各吸込み口とも等流量となるように吸込み口風速を与えている。

吹出し口面積 0.64×0.64 m<sup>2</sup>, 吸込み口面積 0.54×0.54 m<sup>2</sup>

うに、吹出し口および吸込み口の一部を閉鎖した場合(図-4参照)を含め、3種のケースに関して検討を行う。

6.2 気流の数値解析

表-2に、解析の基礎となるk-ε型二方程式乱流モデルを示す。室内空間をメッシュ数26×21×13の三次元差分格子に分割し、表-3に示す境界条件の下で定常解を算出している。各ケースにおける吹出し口を含む短辺および長辺方向の垂直断面の風速ベクトルを図-5~7に示す。図-5(a)に示されるように室中央には上昇流

が生じるほか、壁近傍にも上昇流が生じて吹出し気流とともに室内循環流を形成する。

6.3 点発生汚染源の濃度分布の例

換気効率指標(SVE 1, 2)の分布は、点発生源の汚染質濃度分布を逐次汚染源の位置を変えて算出して求める。図-8に、室中央(床+0.7 m)で汚染質が発生した場合の無次元濃度分布の例(瞬時一様拡散濃度基準、以下同様)を示す。室内中央の上昇流により汚染質は天井に向かって拡散し、発生源から天井面付近に高濃度が生じている。

6.4 換気効率指標の分布—その1

図-9~11にSVE 1換気効率指標の分布—その1(汚染質発生源ごとに対応する無次元室内平均濃度の分布)を示す。いずれのケースも室中央の値が高く(最大1.5~2.0)、吸込み口近傍の値は小さい(0.5以下)。かなり広範囲に1.0以上となる。また、吸込み口からの距離によりその値が大きく変化するのに比較して、各ケースとも吹出し噴流・室中央および壁近傍の上昇流などの部分で際立った変化はなく、吹出し噴流・室中央のいずれで汚染質が発生しても、室内の平均濃度はさほど変化していない。なお、室中央の吹出し口二つを閉鎖したケース3は、他の2ケースに比べ全般にその値が大きく、汚染質の排出が効率的でないことを示す。また、ここで示す断面では、吸込み口を二つ減じたケース2は、他ケースより広範囲でその値が小さく、効率的な排出が行われることを示す(ただし、閉鎖した吸込み口周辺ではその値はかなり大きくなっている)。

6.5 換気効率指標の分布—その2

図-12~14にSVE 2換気効率指標の分布—その2(汚染質発生源ごとに対する平均拡散半径)[単位: m]の分布を示す。図中の値は、その点の汚染源に対する平均拡散半径を示す。値が大きいくほど、汚染質が広く拡散することに対応する。各ケースとも、第一の換気効率指標の

表-2 k-ε型二方程式乱流モデル  
基礎方程式

(1) 連続式	$\frac{\partial U_i}{\partial X_i} = 0$
(2) 平均流の輸送方程式	$\frac{\partial U_i}{\partial t} + \frac{\partial U_j U_j}{\partial X_j} = -\frac{\partial}{\partial X_i} \left( \frac{P}{\rho} + \frac{2}{3} k \right) + \frac{\partial}{\partial X_j} \left( \nu_t \left( \frac{\partial U_i}{\partial X_j} + \frac{\partial U_j}{\partial X_i} \right) \right)$
(3) 乱流=エネルギー(k)の輸送方程式	$\frac{\partial k}{\partial t} + \frac{\partial k U_j}{\partial X_j} = \frac{\partial}{\partial X_j} \left( \frac{\nu_t}{\sigma_1} \frac{\partial k}{\partial X_j} \right) + \nu_t S' - C_2 \frac{k^2}{k}$
(4) 乱流散逸(ε)の輸送方程式	$\frac{\partial \epsilon}{\partial t} + \frac{\partial \epsilon U_j}{\partial X_j} = \frac{\partial}{\partial X_j} \left( \frac{\nu_t}{\sigma_2} \frac{\partial \epsilon}{\partial X_j} \right) + C_1 \frac{\epsilon}{k} \nu_t S' - C_2 \frac{\epsilon^2}{k}$
(5) 渦動粘性係数の算出式	$\nu_t = C_D \frac{k^2}{\epsilon} = C_D \frac{k^{3/2}}{l}$
(6) 濃度(C)の輸送方程式	$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial C U_j}{\partial X_j} = \frac{\partial}{\partial X_j} \left( \frac{\nu_t}{\sigma_3} \frac{\partial C}{\partial X_j} \right) + C_0$

ただし、 $S' = 2S_{i,j}S_{i,j} = 2 \left[ \frac{1}{2} \left( \frac{\partial U_i}{\partial X_j} + \frac{\partial U_j}{\partial X_i} \right) \right]^2$   
 $\sigma_1 = 1.0, \sigma_2 = 1.3, \sigma_3 = 1.0,$   
 $C_D = 0.09, C_1 = 1.59, C_2 = 2.0$   
 $U_i$ : 平均速度 [m/s] P: 圧力 [N/m<sup>2</sup>]  
 $\epsilon$ : 乱流散逸 [m<sup>2</sup>/s<sup>3</sup>]  $\nu_t$ : 渦動粘性係数 [m<sup>2</sup>/s]  
 $k$ : 乱流=エネルギー [m<sup>2</sup>/s<sup>2</sup>] l: 乱れの長さスケール[m]  
 $C_0$ : 汚染質の発生項[kg/m<sup>3</sup>・s]  
 $C$ : 汚染質の平均濃度[kg/m<sup>3</sup>]

表-3 境界条件  
数値シミュレーションの境界条件

(1) 吹出し口	$U_t = 0.0, U_n = U_{out}, k = 0.005, l = 0.375 \text{ m}, C = C_{out}$ 添え字 t, n: 吹出し面に対しそれぞれ接線方向, 法線方向を示す。 $U_{out}$ : 吹出し風速(=1.0 m/s), $C_{out}$ : 吹出し空気濃度(=0.0 kg/m <sup>3</sup> )
(2) 吸込み口	$U_t = 0.0, U_n = U_{in}, \partial k / \partial n = 0.0, \partial \epsilon / \partial n = 0.0, \partial C / \partial n = 0.0$ $U_{in}$ : 吸込み風速(=1.0 m/s)
(3) 壁面	$(\partial U_t / \partial n)_{n=0} = m(U_t)_{n=h} / h, U_n = 0.0, \partial k / \partial n = 0.0, \partial C / \partial n = 0.0,$ $(\epsilon)_{n=h} = (C_D k_{n=h}^{3/2}) / (C_D^{1/4} \kappa h)$ h: 壁面から第一セルの差分定義点までの距離 m: $U_t$ が壁近傍でベキ乗分布するとみなしたときのベキ指数(=1/7) $\kappa$ : カルマン定数(=0.4)

注 本シミュレーションは実スケールの物理量を用いてなされている。

室内平均濃度の分布形状と類似した分布を示す。この値は大きく(2.5 m 程度)、吸込み口近傍では(1.5 m 程度)。なお、吹出し口を二つ減じると、拡散半径は室内で一様に高い値(2.5 m)算出されている。この場合、この断面の汚染質発生が生じて、室内に広く拡散する

効率指標の分布—その3

図5にSVE3換気効率指標の分布—その3(吹

出し空気の平均到達時間)の分布を示す。図中の値は、室内一様汚染質発生の場合の、その点の無次元濃度を示す。吹出し口からの新鮮空気は、各地点におよその値に換気回数の逆数を乗じた時間を経て到着するものと考えられる。値が大きいほど吹出し口からの空気が到達する時間(行程)が長く、汚染されている可能性が大きいことを示す。図-15~17は、先に示した換気効率指標の分布—その1,2と同じく水平断面(床上0.7 m)における分布を示す。各ケースとも吹出し噴流の部分でその値が

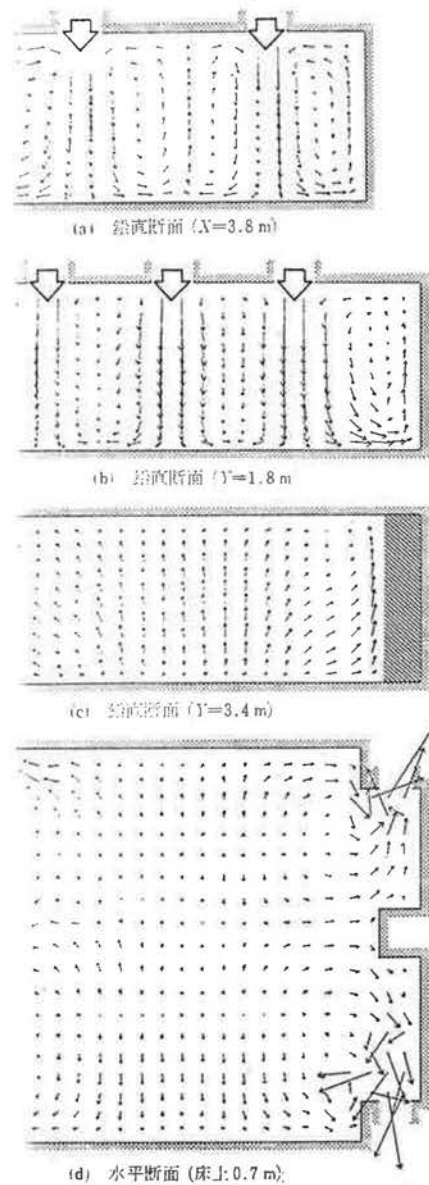


図-5 風速ベクトル(ケース1)

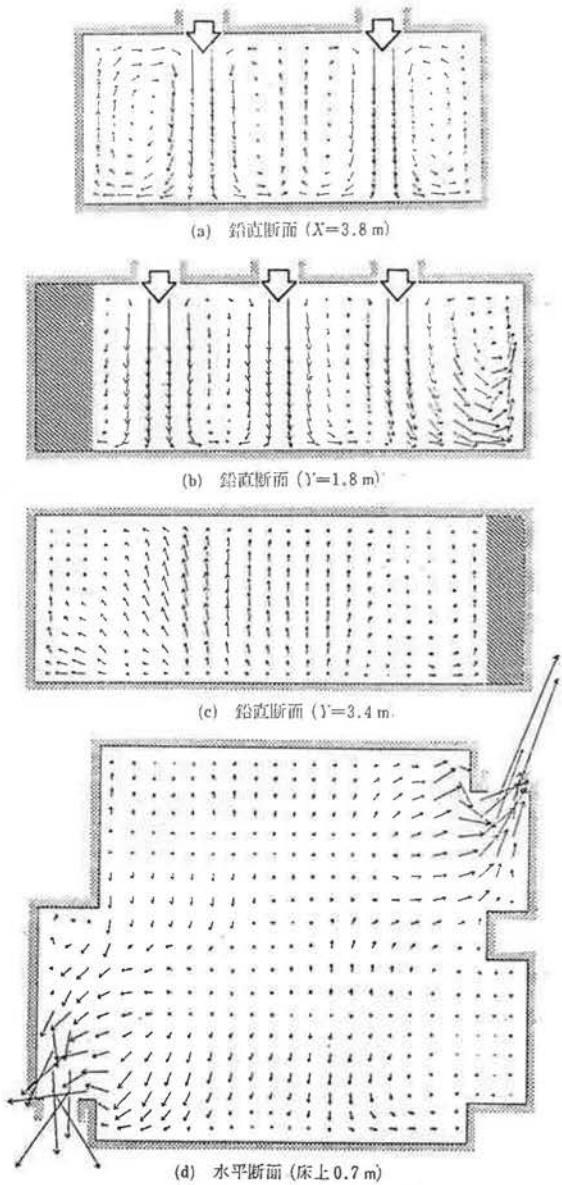


図-6 風速ベクトル(ケース2)

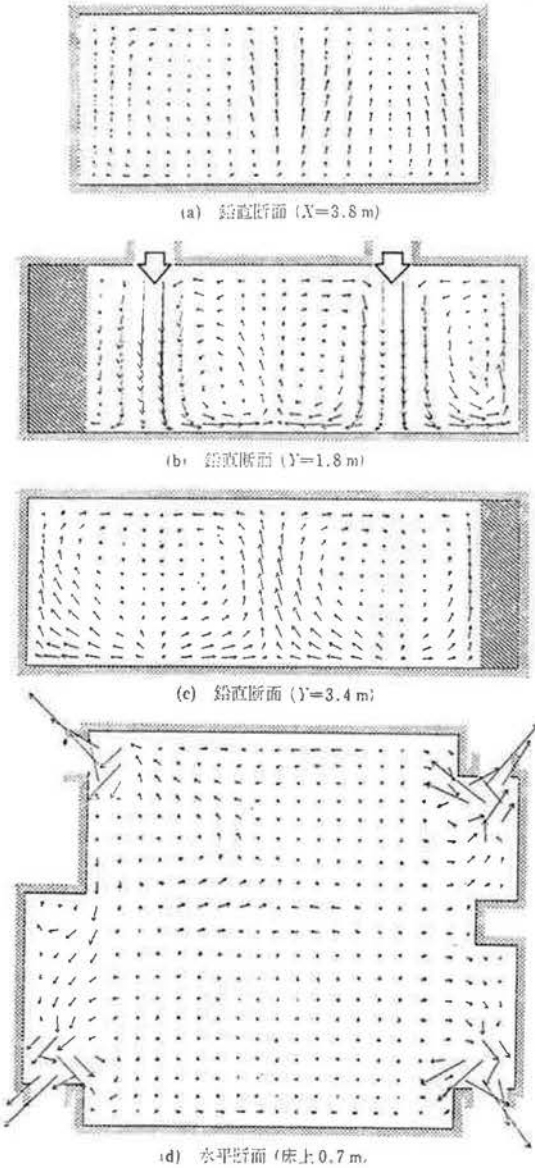


図-7 風速ベクトル(ケース3)

小さく、その周辺で大きな値を示す特徴を持つ。これは、吹出し噴流が吹出し口からの空気を直接供給することから当然であるが、その値は比較的高い値を示し、吹出し口からこの水平断面に到達するまでに誘引などによる周辺気流との混合による汚染の可能性を示す。図-18(a),(b)にはケース1における室中央の鉛直断面の分布を示すが、室中央などの上昇流に対応して天井付近でその値が大きい。これはこの付近の空気が吹出し口から相対的に長い時間(経路)を経て到着し汚染されている可能性が高いことを示している。図-18(c),19,20に各

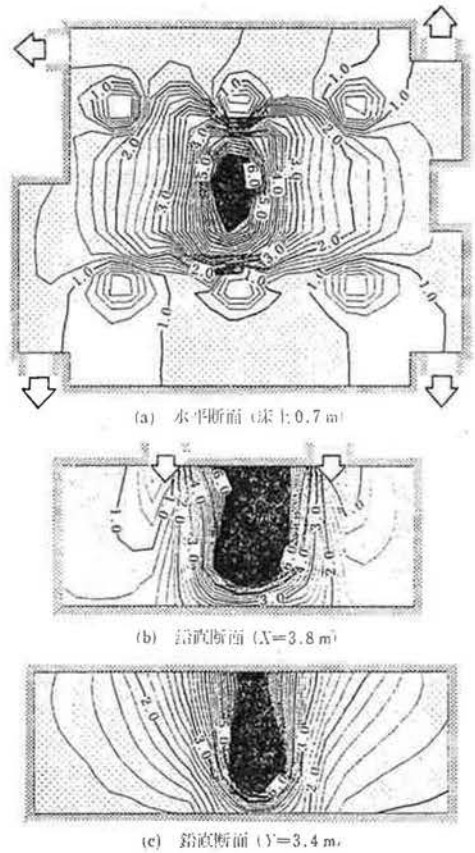


図-8 無次元濃度分布(ケース1)[汚染発生源:室内中央(X=3.8m, Y=3.4m), 床上0.7m]

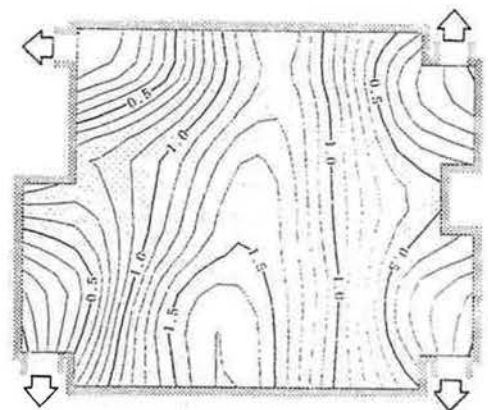


図-9 換気効率指標の分布(1)各汚染源に対応する室内平均濃度分布(ケース1:水平断面, 床上0.7m)

ケースでの天井付近の分布を示す。噴流の周辺で値が一樣に高くなっている。ただしケース1ではその値が1.0程度であるのに対し、吹出し口を二つ減じたケース3で



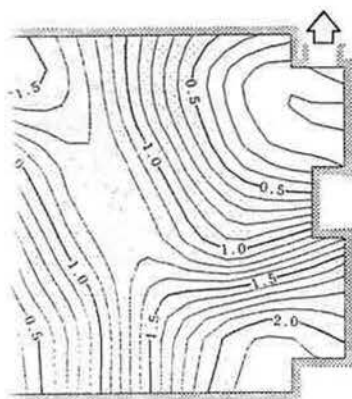


図-12 換気効率指標の分布(1)各汚染源に対応する室内平均濃度分布(ケース2:水平断面、床上0.7m)

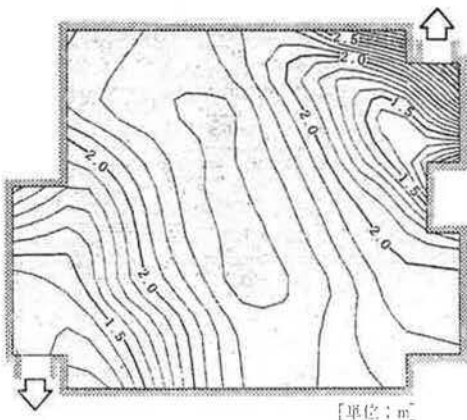


図-13 換気効率指標の分布(2)各汚染源に対応する拡散半径の分布(ケース2:水平断面、床上0.7m)

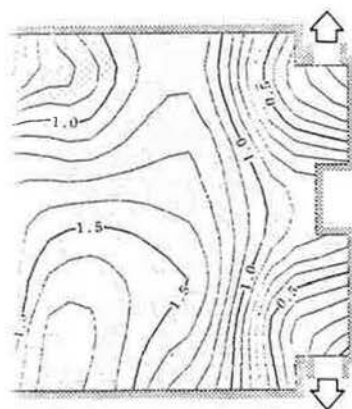


図-14 換気効率指標の分布(1)各汚染源に対応する平均濃度分布(ケース3:水平断面、7m)

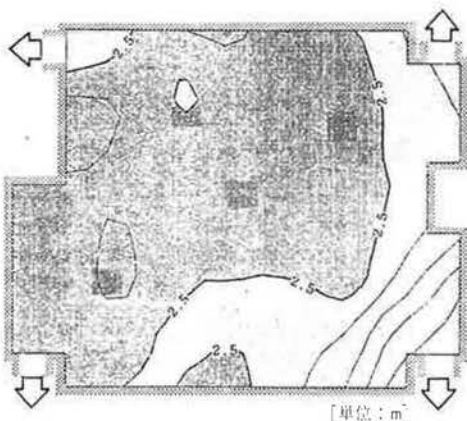


図-15 換気効率指標の分布(2)各汚染源に対応する拡散半径の分布(ケース3:水平断面、床上0.7m)

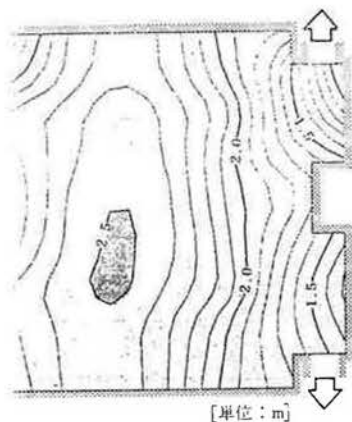


図-16 換気効率指標の分布(2)各汚染源に対応する拡散半径の分布(ケース1:水平断面、床上0.7m)

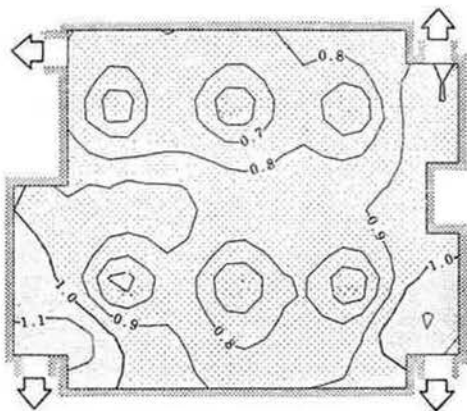


図-17 換気効率指標の分布(3)室内一様汚染室発生時の室内濃度の分布(ケース1:水平断面、床上0.7m)

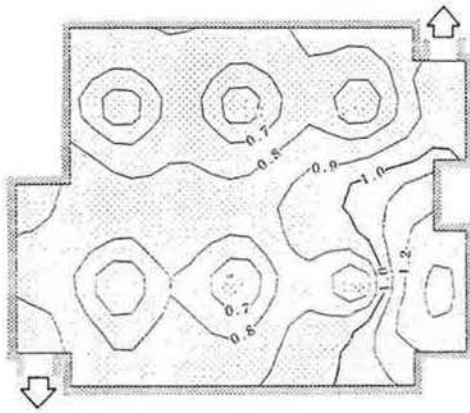


図-16 換気効率指標の分布(3)室内一様汚染室発生時の室内濃度の分布(ケース2:水平断面, 床上0.7 m)

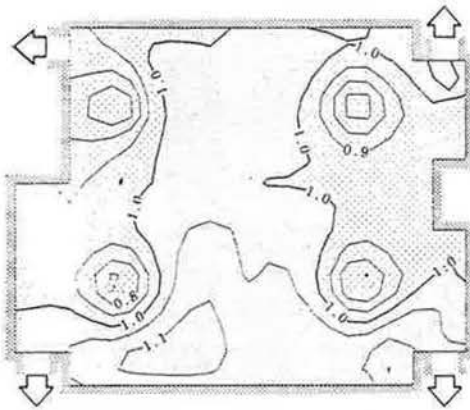


図-17 換気効率指標の分布(3)室内一様汚染室発生時の室内濃度の分布(ケース3:水平断面, 床上0.7 m)

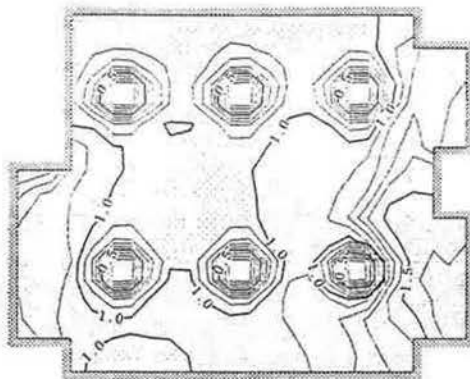
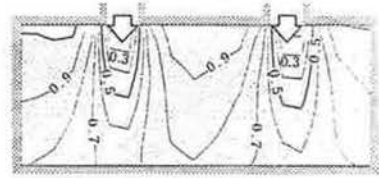
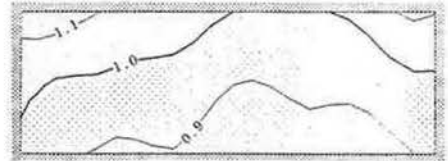


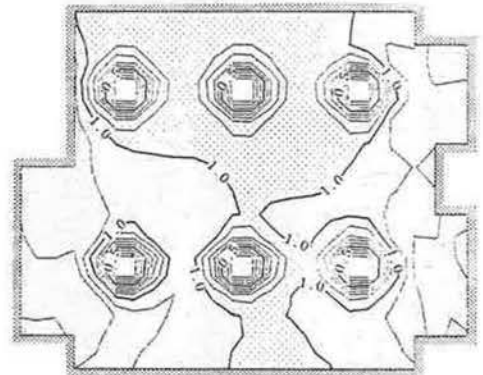
図-19 換気効率指標の分布(3)室内一様汚染室発生時の室内濃度の分布(ケース2:水平断面, 床上2.5 m)



(a) 鉛直断面 (X=3.8 m)



(b) 鉛直断面 (Y=3.4 m)



(c) 水平断面 (床上2.5 m)

図-18 換気効率指標の分布(3)室内一様汚染室発生時の室内濃度の分布(ケース1)

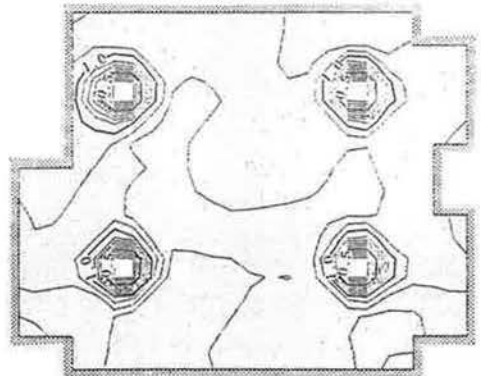


図-20 換気効率指標の分布(3)室内一様汚染室発生時の室内濃度の分布(ケース3:水平断面, 床上2.5 m)

が生ずるほか、吸込み口を二つ減じた部分的には1.5以上の大きな値を示し、新鮮空気の到達に時間がかかり、汚染された部分が大きくなっていることを示す。

論

性の分布状態を示すため、新しく換気効率の分布を3種定義し、その物理的な意味を示した。3種の換気効率の指標は、①各発生したと仮定した場合の室内平均濃度汚染質が発生したと仮定した場合の平均および③吹出し空気の平均到達時間、で

換気効率指標の分布を用いて、実在のケースの換気特性を考察した。この結果、換気効率には、①吹出し口・吸込み口などを変化させた場合の換気効率特性の変化、②室内汚染源の発生位置の変化が室内に与える影響を簡便にかつ直接的に示す、③換気効率の程度を具体的に表す、などの特徴を換気設計を行う際の指標として有用なことを

な室内換気モデルを対象として本換気効率換気効率分布の解析を行い、室内換気設計に役立つことが求められよう。なお、今回換気効率の分布の適用の実例として行った解析は、型計算機センター HITACS 810/20 を用いた場合の CPU 時間を要している。本研究は、一部文部省科学研究費補助金(奨励研究 A)によって行っている。

本研究に関連した既発表文献

- 村上周三：換気効率の評価モデルに関する研究(換気効率指標とその分布の定義及び算出法、関東支部研究報告集(計画)、(1984-7))
- 村上周三：換気効率の評価モデルに関する研究(ベンショナル型クリーンルームに対する適用、学会関東支部研究報告集(計画)、(1984-7))
- 村上周三：換気効率の評価モデルに関する研究(換気効率指標とその分布の定義及び算出法、

- 空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集、(1984-10))
- iv) 加藤信介・村上周三：換気効率の評価モデルに関する研究(その2)ベンショナル型クリーンルームに対する適用例、空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集、(1984-10))

参考文献

- 1) 金原清之・林太郎・辻克彦・福原駿：一樣流を用いた換気に関する研究(第3報)一樣流換気的一般特性および換気効率、空気調和・衛生工学会論文集、No. 26(1984)、pp. 11~19
- 2) 長沢佳明：室内空気の流動パターンと換気効果に関する研究(1~4)、日本建築学会大会梗概集(計画)、(1980~1983)
- 3) Yoshiaki Ishizu and Kazuyo Kaneki: Evaluation of Ventilation Systems through a Numerical Computation and Presentation of a New Model、空気調和・衛生工学会論文集、No. 24(1984)
- 4) 大場正昭・後藤滋：排出年令分布関数による室内気流モデル実験(その1、その2)、日本建築学会大会梗概集(計画)、(1973-10、1974-10)
- 5) 田中俊彦・村上周三・小峯裕己：タンデム型熱線風速計による室内気流の測定、三次元的な測定システムの開発、日本建築学会大会梗概集(計画)、(1978-9)
- 6) 村上周三・小峯裕己：タンデム型熱線風速計による変動風速の三次元的な測定、建物周辺気流に関する実験的研究(11)、日本建築学会論文報告集、297号(1980-11)
- 7) 野村豪・松尾陽・貝塚正光・坂本雄三・遠藤清尊：室内空気分布の数値解法に関する研究(1~3)、日本建築学会論文報告集、231号、232号、238号(1975)
- 8) 野村豪・村上周三・加藤信介・佐藤正章：3次元乱流数値解析と模型実験、数値解析手法を用いる室内空気分布予測法に関する研究(その2)、日本建築学会論文報告集、298号(1980-12)
- 9) 田中俊彦・村上周三：室内濃度分布の数値計算と模型実験の比較、日本建築学会建築環境工学論文集、4号(1982)
- 10) 田中俊彦・村上周三：室内における物質の拡散と濃度変動に関する研究(1,2)、日本建築学会大会梗概集(計画)、(1979、1980)
- 11) 戸河里敏・早川真：高効率換気システムの研究(1,2)、日本建築学会大会梗概集(計画)、(1981、1983)
- 12) 松本博・長谷川房雄・内海康雄：室内空気濃度分布の予測に関する研究(その6)数値シミュレーション手法を用いた換気効率の一算出法、日本建築学会大会梗概集(計画)、(1985-10)
- 13) 村上周三・加藤信介・宗像康光・美馬徹：クリーンルーム内の気流性状に関する研究(3,4)、日本建築学会大会梗概集(計画)、(1984-10)
- 14) 村上周三・加藤信介・宗像康光・美馬徹：クリーンルーム内の気流性状に関する研究(1,2)、日本建築学会関東支部研究報告集(計画)、(1984-7)

(昭和 61. 1. 7 原稿受付)

# New Scales for Ventilation Efficiency and Calculation Method by Means of 3-Dimensional Numerical Simulation for Turbulent Flow

—Study on Evaluation of Ventilation Efficiency in Room—

by Shuzo MURAKAMI\*<sup>1</sup> and Shinsuke KATO\*<sup>2</sup>

**Key Words :** Indoor Environment, Fluid Mechanics, Ventilating Systems, Ventilation Efficiency, Numerical Simulation,  $k-\varepsilon$  2-Equation Turbulence Model, Room Air Distribution

**Synopsis :** Three new scales for ventilation efficiency and their distributions in a room are defined in order to evaluate the distribution of 'Ventilation Efficiency' in a room. They are defined according to the distribution of contaminant in a room. ① SVE 1 (Scale for Ventilation Efficiency 1): a space averaged value of concentration of contaminant in a room; its value is defined at the point where the contaminant is generated as a point source. ② SVE 2: an average diffusion radius of contaminant dispersion in a room; it is also defined at the point where the contaminant is generated. ③ SVE 3: a concentration value of each point in a room, where contaminant is uniformly generated in the whole space of the room. The distribution of SVE 1 and SVE 2 are calculated by scanning the source point of contaminant in whole space of the room. SVE 1 directly evaluates the exhausting efficiency of contaminant. SVE 2 evaluates the diffusivity of contaminant in a room. SVE 3 is corresponding to the traveling time of air from the supply outlet to each point. These new scales of ventilation efficiency can be calculated by the contaminant distribution which is measured by experiment, of course. However 3-dimensional simulation for tur-

bulent flow and that of turbulent scalar diffusion by means of  $k-\varepsilon$  two equation turbulence model makes it possible to predict the contaminant diffusion sufficiently in practical application. Thus in this paper these new scales for ventilation efficiency are calculated from the contaminant distribution obtained by 3-dimensional simulation for scalar diffusion using  $k-\varepsilon$  two equation turbulence model.

In order to estimate the utility of these new scales for ventilation efficiency, the characteristics of ventilation efficiency in the conventional flow type clean room are analyzed using of these new scales. The results are as follows. ① First and second new scales well represent the difference of ventilation efficiency which is caused by changing the numbers of the exhaust inlets and the supply outlets in the same room. ② These new scales well represent the influence of position of the contaminant source on the cleanliness of the room air. ③ The third new scale well represents the traveling time of clean air from the supply outlet. And it is easy to know where is far from and close to the supply outlet in a view point of the air flow route. Thus it is confirmed that these new scales for ventilation efficiency are useful for evaluating the distribution of ventilation efficiency in a room.

\*<sup>1</sup>,\*<sup>2</sup> Institute of Industrial Science, University of Tokyo, Member

(Received January 7, 1986)