

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7)数値シミュレーションによる気流性状及び汚染質拡散性状の解析—

Study on Air Velocity Distribution in Conventional Flow Clean Room

—(Part 7) Numerical Simulation of Air Flow and Concentration Distribution—

村上 周三*・加藤 信介*・須山 喜美**

Shuzo MURAKAMI, Shinsuke KATO and Yoshimi SUYAMA

1. はじめに

クリーンルーム内に発生した汚染質は、室内の気流により移流・拡散される。そのため、クリーンルーム内のコンタミネーションコントロールを有効に行うためには、気流性状と汚染質拡散性状の把握が不可欠となる。^{1,2,3,4)} 本報では、コンベンショナルフロー型モデルクリーンルーム内の気流性状及び、汚染質拡散性状の数値シミュレーションによる解析結果について、模型実験との対応とともに報告する。

2. 解析概要

2.1 解析対象空間

表1 数値シミュレーションの基礎方程式⁵⁾

$$\frac{\partial U_i}{\partial X_i} = 0$$

$$\frac{\partial U_i}{\partial t} + \frac{\partial U_i U_j}{\partial X_j} = -\frac{\partial}{\partial X_i} \left\{ \frac{P}{\rho} + \frac{2}{3} k \right\} + \frac{\partial}{\partial X_j} \left\{ \nu_i \left\{ \frac{\partial U_i}{\partial X_j} + \frac{\partial U_j}{\partial X_i} \right\} \right\}$$

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \frac{\partial k U_j}{\partial X_j} = \frac{\partial}{\partial X_j} \left\{ \frac{\nu_t \partial k}{\sigma_k \partial X_j} \right\} + \nu_t S - \epsilon$$

$$\frac{\partial \epsilon}{\partial t} + \frac{\partial \epsilon U_j}{\partial X_j} = \frac{\partial}{\partial X_j} \left\{ \frac{\nu_t \partial \epsilon}{\sigma_\epsilon \partial X_j} \right\} + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} \nu_t S - C_{2\epsilon} \frac{k \epsilon}{\nu_t}$$

$$\nu_t = C_\mu \frac{k^2}{\epsilon} = k^{1/2} l$$

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial C U_j}{\partial X_j} = \frac{\partial}{\partial X_j} \left\{ \frac{\nu_t \partial C}{\sigma_c \partial X_j} \right\}$$

ただし $S = \left\{ \frac{\partial U_i}{\partial X_j} + \frac{\partial U_j}{\partial X_i} \right\} \frac{\partial U_i}{\partial X_j}$, $\sigma_k = 1.0$, $\sigma_\epsilon = 1.3$, $\sigma_c = 1.0$
 $C_{1\epsilon} = 0.09$, $C_{2\epsilon} = 1.59$, $C_\mu = 0.18$

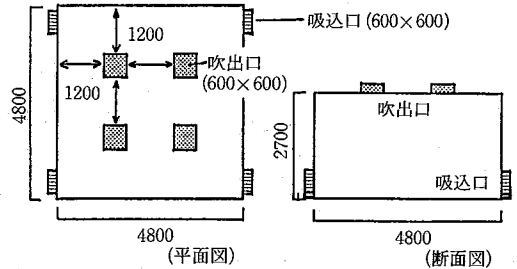
表2 数値シミュレーションの境界条件⁵⁾

- (1)吹出口: $U_t = 0.0$, $U_n = U_{out}$, $k = 0.05$, $l = 0.45$, $C = C_{out}$
 添字 l, n : 吹出面に対しそれぞれ接線方向, 法線方向を示す。
 U_{out} : 吹出風速, $U_{out} = 1.0$, C_{out} : 吹出空気濃度, $C_{out} = 0.0$
- (2)吸込口: $U_t = 0.0$, $U_n = U_{in}$, $\partial k / \partial n = 0.0$, $\partial \epsilon / \partial n = 0.0$, $\partial C / \partial n = 0.0$
 U_{in} : 吸込風速, $U_{in} = 1.0$
- (3)壁面: $(\partial U_i / \partial n)_{n=0} = m (U_i)_{n=h}$
 $\partial C / \partial n = 0.0$, $(\epsilon)_{n=h} = \{ C_D(k) \}_{n=h}^{2/3} / \{ C_D \}^{1/4} \kappa h$
 h : 壁面から第一セルの差分定義点までの距離
 m : U_i がベキ乗分布するとみなした時のベキ指数, $m = 1/7$
 κ : カルマン定数, $\kappa = 0.4$

解析するコンベンショナルフロー型クリーンルームを図1に示す。⁴⁾ 室形状は、①対称性と②単純な寸法関係の2つを考慮してあり、吹出口、吸込口を各4個(600×600 mm)有する。天井高は2.7mで、吹出口端から壁面までの距離および、隣の吹出口端までの距離は同一である。また、吸込口は下端を床面に接し、室端部に配置してある。汚染質の発生は床面より0.75m高さ(作業台面高さでの汚染質発生を想定)、および0.3m高さ(吸込口中央高さ)の2つの高さの室内各点(A~D点)である。

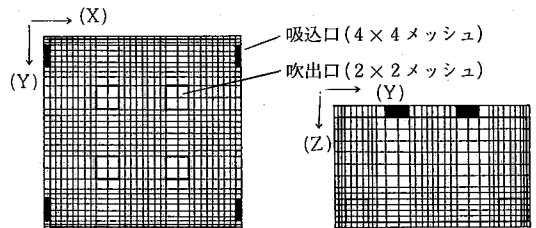
2.2 解析方法

気流性状および、汚染質拡散性状について $k-\epsilon$ 型2方程式乱流モデルを基礎とする3次元数値シミュレーションおよび、模型実験により解析する。まず、模型実験(詳細は表3)による基本的断面(吹出口を含む鉛直断面等)の測定結果と数値シミュレーション結果の対応を検討



*吹出風速: 1 m/s (換気回数: 83.3 回/h)
 *吸込口は下端を床面と同レベルに設置

図1 クリーンルームモデル (単位: mm)



(水平面: 28(X)×32(Y)メッシュ) (鉛直面: 32(Y)×14(Z)メッシュ)
 図2 メッシュ分割図

* 東京大学生産技術研究所 付属計測技術開発センター
 ** 民間等共同研究員 (株)間組 技術研究所

研究速報
し、つぎに、数値シミュレーションにより詳細に気流性状と汚染質拡散性状を検討する。

2.3 数値シミュレーション概要

基礎方程式および、境界条件をそれぞれ表 1, 表 2 に示す。また、メッシュ分割を図 2 に示す。メッシュ分割数は 28(X)×32(Y)×14(Z)とし、吹出口面は 2×2 メッシュ、吸込口面は 4×4 メッシュに分割する。定常解を求めるが、得られた解は時間的空間的に多少振動している。

濃度計算では汚染質発生セルにて、空気と等比重の汚染質を、吐出速度を 0 としてこれが室全体に瞬時一様拡散した場合の濃度が 1 となるように定常発生し、定常解を算出する。

3. 数値シミュレーションと模型実験の対応

図 3 に吹出口を含む鉛直断面の模型実験結果を、図 4 - (a), (b) に対応する数値シミュレーション結果を示す。

表 3 模型実験概要

- (1)実験方法：クリーンルームモデルの縮尺 1/8 模型を使用。相似条件として Re 数を一致。
- (2)風速測定：タンデム型熱線風速計による各風速成分の 3 次元の測定(観測時間 20 秒の平均風速)
- (3)濃度測定：エチレングスをトレーサーとし、F.I.D ガスクロにて濃度測定。

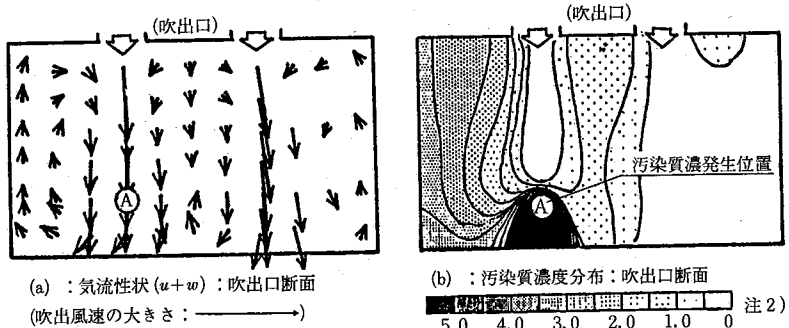


図 3 模型実験による気流性状・汚染質拡散性状 (汚染質発生位置：吹出口下 A 点)

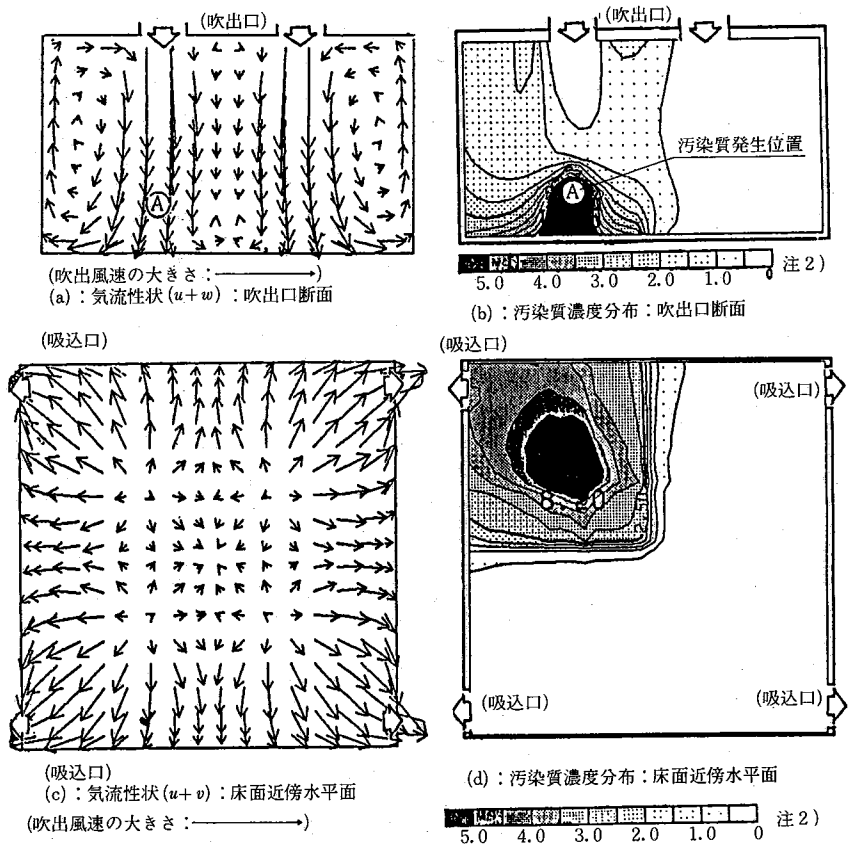
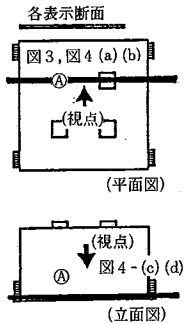


図 4 数値シミュレーションによる気流性状・汚染質拡散性状 (汚染質発生位置：吹出口下 A 点)

⊕ 注 1. 各風速ベクトルは 2 成分 ($u+w$), ($u+w$), または ($u+v$) で表示。
注 2. 濃度は瞬時一様拡散濃度を 1.0 として表示。

研究速報

3.1 気流性状の対応

吹出気流は吹出口よりほとんど減衰することなく直下の床面に達し、壁際で上昇流となる。吹出気流間では床面付近に上昇流が生ずるほか、上部では吹出気流の誘引による下降流が生じている。これらは、数値シミュレーションと模型実験の間でよく対応している(図3-(a), 図4-(a))。

3.2 汚染質拡散性の対応

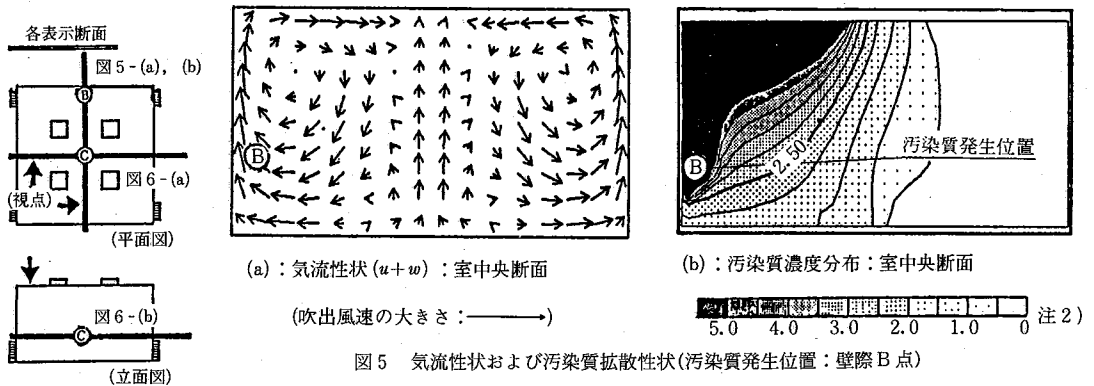
吹出気流内(A点)で汚染質が発生した場合、発生した汚染質は吹出気流より下方に移流され、汚染質発生位置より床面まで高濃度領域が分布する。続いて、壁際の上昇流、吹出気流間の上昇流により室の上部に拡散され表示断面の左半分に汚染質が広く分布する。一方、吹出口下では清浄な領域が分布する(図3-(b), 図4-(b))。ただし、模型実験結果では、図中、右側天井部に汚染質が分布するが、数値シミュレーション結果には見られない。おおむね、数値シミュレーション結果は模型実験結果とよく対応している。以上より、数値シミュレーションによる気流性状および汚染質拡散性状についての詳細な解析が可能であると判断した。

4. 気流性状および汚染質拡散性状

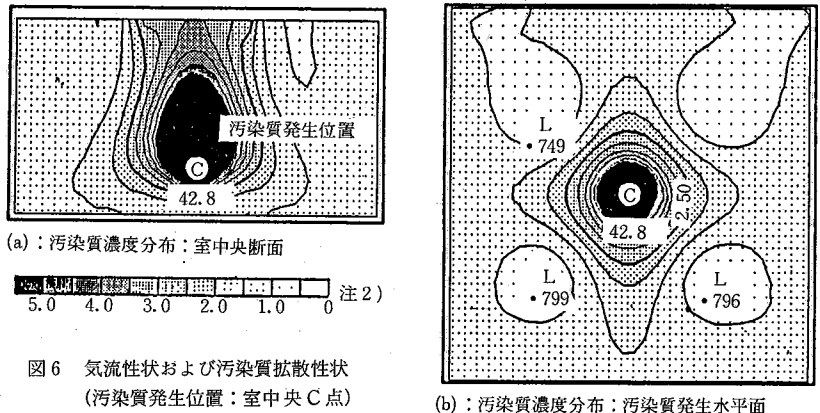
数値シミュレーションにより室内各部について汚染質拡散性状を気流性状と関連させながら考察する。なお、各部分の風速ベクトル図とともに、着目した点で汚染質が発生させた場合の濃度分布図を適宜対応させて表示する。また、濃度分布図では、汚染質が瞬時一様拡散した場合の濃度を1として表示する。

4.1 吹出気流部

吹出気流は天井吹出口より床面までほとんど減衰せずに到達し(図4-(a))、床面では四方に広がる(図4-(c))。気流は床面に沿って流れ、壁際で天井に至る強い上昇流を生ずる。吹出気流中(A点)で発生した汚染質は吹出気流に移流され、発生位置下方で高濃度となるほか(図4-(b))、吸込口に向かう水平成分を有する流れ(図4-(c))により高濃度領域は室の隅角部に向けて分布する(図4-(d))。このため、汚染質の拡散は、汚染質発生位置を有する室の1/4に留まる(図4-(d))。なお、汚染質の室全体の平均濃度は、0.69となる。汚染質が定常発生する場合の室全体の平均濃度は、発生した汚染質



- 注1. 各風速ベクトルは2成分($u+w$), ($v+w$), または($u+v$)で表示。
- 注2. 濃度は瞬時一様拡散濃度を1.0として表示。



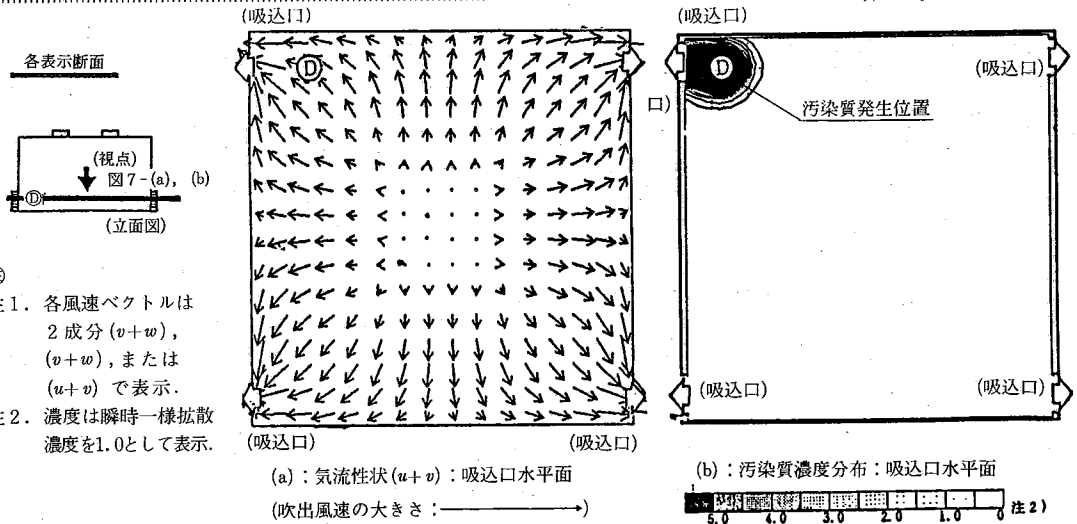


図7 気流性状および汚染質拡散性状(汚染質発生位置: 吸込口手前D点)

が平均して室内に残留する時間に対応し、この値が低いほど汚染質は速やかに排出されることを意味する。⁶⁾

4.2 壁際上昇流部

壁際の上昇流部(図5-(a), B点)で汚染質が発生した場合、汚染質は発生位置より上方に拡散され、室中央の天井面まで高濃度領域が分布する(図5-(b))。室上部で汚染質は広く拡散し、室のほぼ1/2の空間で濃度が1以上となる。室全体の平均濃度は1.46と4.1の場合に比べ非常に高い値となる。

4.3 室中央上昇気流部

4個の吹出気流に囲まれた室中央部では、床面から天井に至る強い上昇流が生じる(図5-(a))。上昇流部(C点)で発生した汚染質は上方に拡散され、天井まで高濃度領域が分布する(図6-(a))。汚染質発生位置が室中央のため汚染質は室全体に拡散され、清浄空気が吹出される吹出気流部を除き一様に1以上の濃度となる(図6-(b))。室全体の平均濃度は1.30と高い値となる。

4.4 吸込口周辺

吸込口手前0.6m(D点)で発生した汚染質は、吸込口に向かう流れ(図7-(a))により、ほとんどが吸込口に吸込まれる(図7-(b))。このため、室の大部分では汚染質が検出されず(図7-(b))、室全体の平均濃度は0.08と非常に低い値となる。

5. ま と め

吹出口4個、吸込口4個を有するコンベンショナルロー型クリーンルーム内の気流性状および、汚染質拡散性状を数値シミュレーションにより解析した。解析結果

は模型実験結果とよく対応しており、模型実験と併用した数値シミュレーションによる詳細な解析は有効である。解析により得られた特徴的な気流性状および、汚染質拡散性状は、以下の通りである。①吹出気流部で汚染質が発生した場合、発生位置の下方で特に高濃度となるほか、汚染質は広く室内に拡散する。②壁際や、室中央の上昇流部で汚染質が発生した場合、汚染質はより広い範囲に拡散し、室全体が高濃度となる。③吸込口手前付近で汚染質が発生した場合、汚染質は速やかに排出され、室内は比較的清浄である。(1985年3月22日受理)

参 考 文 献

- 1) 加藤信介, 村上周三, 須山喜美: クリーンルーム内の気流性状に関する研究, その5, その6, 日本建築学会大会梗概集(計画), 1984, 10
- 2) 須山喜美, 村上周三, 加藤信介: クリーンルームにおける気流性状に関する研究, 空気調和・衛生工学会学術論文集, 1984, 10
- 3) 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, 昭和57年11月
- 4) 村上周三, 加藤信介: 室内気流の数値シミュレーションと実験の対応, コンベンショナル型クリーンルーム内気流の解析, 生産研究, 1984, 12
- 5) 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気流分布予測手法に関する研究, その2, 日本建築学会論文報告集, 298号, 1980, 12
- 6) 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1, その2, 空気調和・衛生工学会学術論文集, 1984, 10