

クリーンルーム内の浮遊微粒子拡散性状に関する研究 (その9) ——沈降速度を考慮した浮遊微粒子濃度分布の数値シミュレーション——

Study on Diffusion of Airborne Particles in Clean Room (Part 9)

——Numerical Simulation for Diffusion of Airborne Particles with Sedimentation——

村上 周三*・加藤 信介**・永野 紳一郎***

Shuzo MURAKAMI, Shinsuke KATO and Shin-ichiro NAGANO

1. はじめに

本研究は、クリーンルーム内で発生した浮遊微粒子の拡散性状を予測し、これを制御することを目的とする。筆者らは、別報¹⁾²⁾にてコンベンショナルフロー型クリーンルーム内気流に関して数値シミュレーションによる予測法が実用手法として有望であることを示している。また、前報^{3,4}にて浮遊微粒子の拡散性状に関する実験結果とシミュレーションの比較に関して報告している。

本報では、浮遊微粒子拡散性状に関して① Passive Contaminant を仮定した場合と② 重力沈降を考慮した場合のシミュレーションを行い、その結果を報告する。

2. 粒子拡散のシミュレーションのための仮定

気流性状の3次元解析は $k-\epsilon$ 型2方程式乱流モデルを基礎とする数値シミュレーションにより行う。浮遊微粒子拡散性状の数値解析では、次のような仮定を行う。

Passive Contaminant を仮定する場合は、①凝集・沈着による粒子損失、粒度分布の変化は無視、②重力沈降は無視、③浮遊微粒子は気流と完全に一体となって輸送される、④発塵は初速零の定常発生とし、発生量は瞬時一様拡散濃度が1.0となるように設定する。

重力沈降を考慮する場合は、凝集効果がないことを除き上記①、②、③の条件を仮定しない。粒子の拡散は(1)式に従うと仮定し、床面では沈降により浮遊微粒子は定常的に床面に沈着して空気中から分離除去されるものとする。今回の検討では床面の濃度は、法線方向の濃度分布が1/4乗則を満たすものとして算出している。ただし乱流拡散による床、壁面等への沈着は考慮しない。

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial CU_j}{\partial x_j} + \frac{\partial CV}{\partial x_3} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\nu_t \frac{\partial C}{\partial x_j} \right) \quad (1)$$

ただし、 V :浮遊微粒子の沈降速度 (m/s), Passive

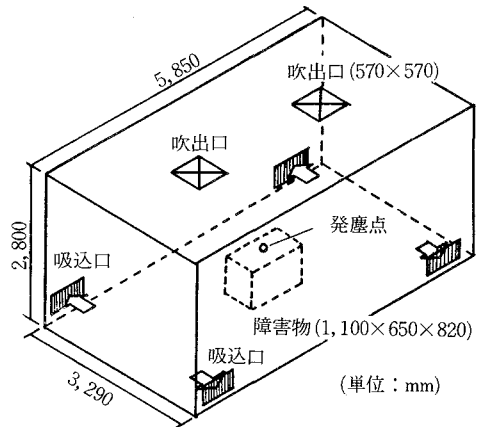
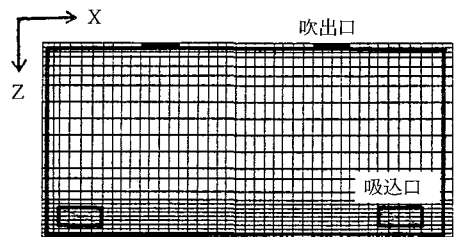
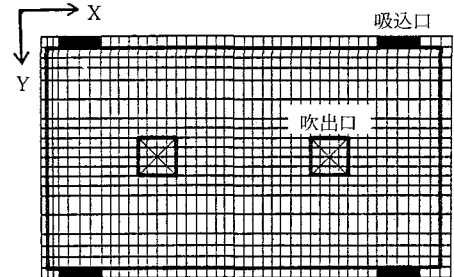


図1 解析対象クリーンルーム



鉛直断面: 43(X)×23(Z)メッシュ



水平断面: 43(X)×20(Y)メッシュ

図2 メッシュ分割図 (CASE 1の場合)

Contaminant 仮定の場合は $V=0$ とする。

U_j : j 方向の気流速度(m/s), 添字 3 は重力の働く方向。

C : 浮遊微粒子無次元濃度 ν_t : 渦動粘性係数 (m^2/s)

* 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

*** 東京大学生産技術研究所 受託研究員(フジタ工業(株))

表1 解析種類 (障害物有, 無の2種類)

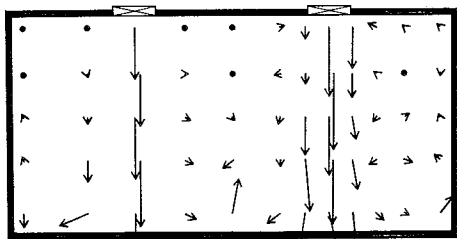
CASE	吹出口 個数	吸込口 個数	吹出風速 (m/s)	発塵点高さ (m)	換気量 (m ³ /s)	気流 障害物
CASE1	2	4	1.0	0.80	0.64	無
CASE2	"	"	"	0.85	"	有

注) 吹出口における乱れの境界条件は, 流入乱流量を $k=0.005$ (m²/s²), $l=0.285$ (m) として実物のスケールで計算

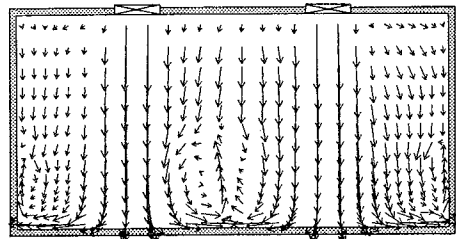
表2 粒径毎の重力沈降速度 (密度 1g/cm³)

粒径 (μm)	0.31	1.0	4.5	10	50	100
重力沈降速度 (m/s)	4.5×10^{-6}	3.5×10^{-5}	6.3×10^{-4}	3.0×10^{-3}	7.5×10^{-2}	3.0×10^{-1}

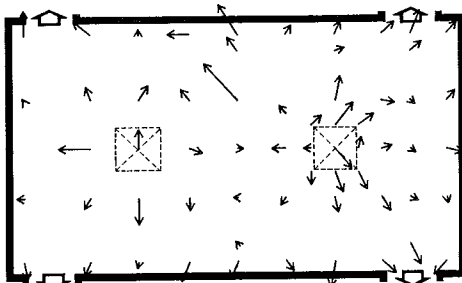
注) ポリスチレン標準粒子を想定



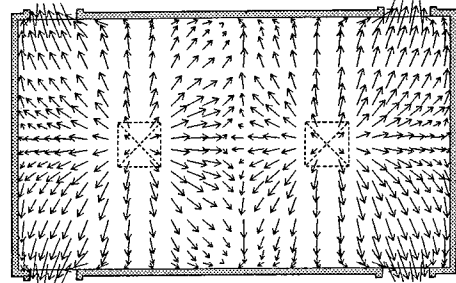
(a) 吹出口を含む鉛直断面 (実大実験)



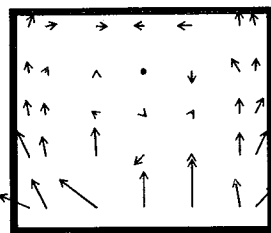
(a) 吹出口を含む鉛直断面 (数値シミュレーション)



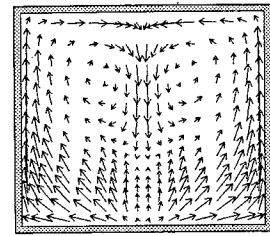
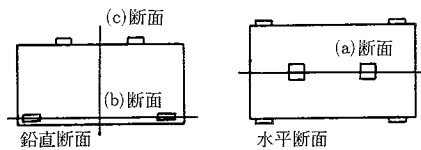
(b) 吸込口を含む水平断面 (実大実験)



(b) 吸込口を含む水平断面 (数値シミュレーション)



(c) 室中央の短辺方向鉛直断面 (実大実験)



(c) 室中央の短辺方向鉛直断面 (数値シミュレーション)

図3 CASE1の気流性状 (実大実験)

図4 CASE1の気流性状 (数値シミュレーション)

3. 解析概要

なおシミュレーションと比較する実大実験は粒径 0.31 μm の単分散ポリスチレン標準粒子を用いて行っている。

3.1 解析対象クリーンルームおよび解析種類

解析対象クリーンルームを図1, 解析種類を表1に示

研 究 速 報

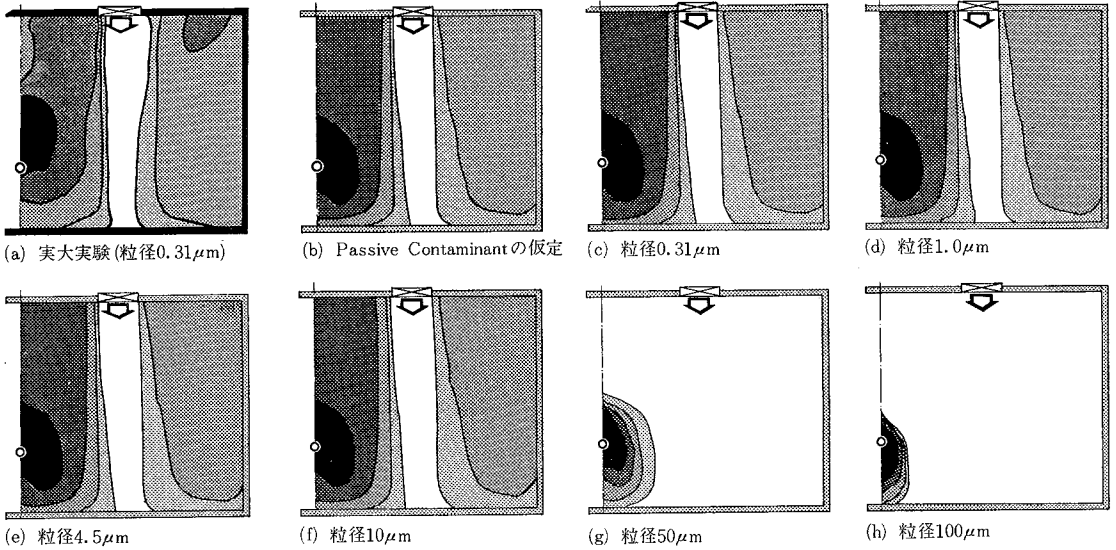
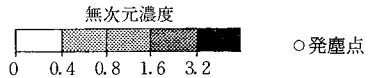


図 5 CASE 1 における拡散性状

(b)~(h)はシミュレーション結果であり、
(c)~(h)は重力沈降速度を考慮している



す。今回の解析では浮遊微粒子の重力沈降速度として、表 2 に示すように密度 1g/cm^3 (ポリスチレン標準粒子等を想定) のものを用いる。⁵⁾

3.2 数値シミュレーション

境界条件等を含むシミュレーション方法の詳細については文献 1), 2) を参照されたい。メッシュ分割は $43(X) \times 20(Y) \times 23(Z)$: CASE 1, $43(X) \times 20(Y) \times 20(Z)$: CASE 2 として気流解析を行う。図 2 に CASE 1 の場合のメッシュ分割を示す。浮遊微粒子拡散性状の解析は、気流解析結果より得られた速度・渦動粘性係数を基に浮遊微粒子濃度拡散方程式 (1) の差分法による数値シミュレーションより行う。

4. 数値シミュレーションと実験の比較

4.1 CASE 1 の気流性状 (図 3, 図 4)

実験結果 (いずれも実大実験) を図 3 に、数値シミュレーション結果は図 4 に示す。両者ともほぼ対称な気流性状が得られ、平均流の様相もほぼ対応する。ただし、シミュレーションでは室中央では室中央上部で明確な下降流が生ずるのに対し、実験ではその気流速度が小さく多少異なる (図 3(a), (c), 図 4(a), (c))。

4.2 CASE 1 における拡散性状 (図 5)

拡散性状はほぼ対称な結果を示すため実験結果および数値シミュレーションともおのおの対称面の片側のみを示す。

① Passive Contaminant を仮定した場合 (図 5(b))

無次元濃度 1.6 以上の値を示す領域の分布形状が多少異なる点を除けば、実験結果 (図 5(a)) とシミュレーション結果 (図 5(b)) はほぼ対応した結果を示す。

② 粒径による重力沈降を考慮した場合 (図 5(c) ~ (h)) 粒径が $0.31 \sim 10\mu\text{m}$ の場合の結果 (図 5(c) ~ (f)) は、Passive Contaminant を仮定した場合の結果 (図 5(b)) とほとんど差異はない。しかし、粒径が $50, 100\mu\text{m}$ と大きい場合 (図 5(g), (h)) は、浮遊微粒子はあまり拡散せず、無次元濃度 0.4 以下の清浄領域が室の大部分を占めるようになり実験結果と大幅に異なる。また、浮遊微粒子の室内平均濃度は粒径 $10\mu\text{m}$ のとき約 1.6 であるのに対し、粒径 $50\mu\text{m}$ のとき約 0.5 であり明らかな差異が生じている。減少した浮遊微粒子の大部分は床面に沈着するものと考えられる。

4.3 CASE 2 の気流性状 (図 6)

室内中央吹出噴流間に気流障害物となる物体を置いた場合の実験結果と数値シミュレーション結果を図 6(a), (b) に示す。物体上部における気流性状において、実験結果ではほとんど風速 0 (多少上昇流の傾向を示す: (図 6(a))), シミュレーションでは弱い下降流 (図 6(b)) となることを除けば、実験結果とシミュレーション結果の様相はほぼ対応している。

4.4 CASE 2 における拡散性状 (図 7)

物体上面の弱風速域で発塵する。

① Passive Contaminant を仮定した場合 (図 7(b)) 物体上部で浮遊微粒子が滞留し高濃度領域を生ずるこ

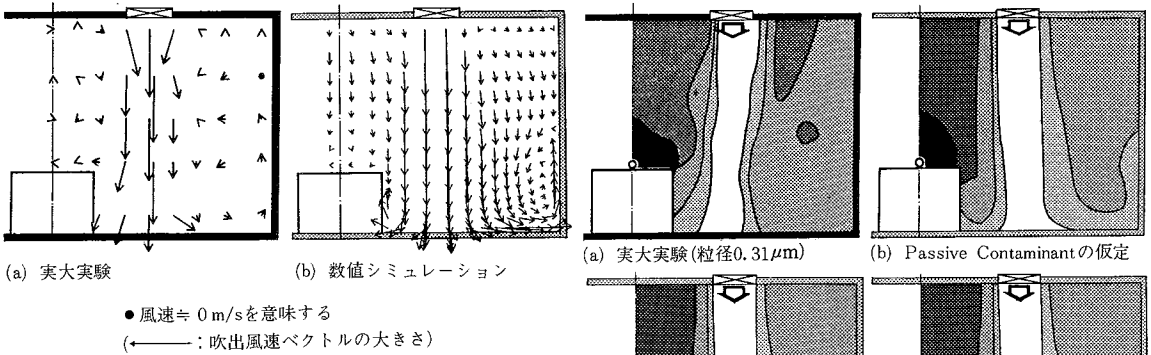


図 6 CASE 2 の気流性状

とや吹出噴流により無次元濃度 0.4 以下の清浄領域が保たれている様相等, 実験結果 (図 7(a)) と数値シミュレーション結果 (図 7(b)) はよく対応した結果を示す。
 ② 粒径による重力沈降を考慮した場合 (図 7(c) ~ (h)) 粒径が 0.31~10 μm の場合の結果 (図 7(c) ~ (f)) は, Passive Contaminant を仮定した結果 (図 7(b)) とほとんど差異はない。粒径が 50, 100 μm と大きい場合 (図 7(g), (h)) は, 浮遊微粒子はあまり拡散せず, 無次元濃度 0.4 以下の清浄領域が室の大部分を占めるようになる。

5. ま と め

数値シミュレーションにより重力沈降を考慮した場合の浮遊微粒子拡散性状の検討を行った。結果は次のとおりである。① 気流性状は, 実験とシミュレーションで良い対応をしているので, Passive Contaminant を仮定した場合には, 拡散性状も良い対応を示す。② 重力沈降を考慮したシミュレーションの場合, 粒径が 10 μm 程度では Passive Contaminant を仮定したシミュレーション結果とほぼ同じ拡散性状を示す。粒径が 50, 100 μm と大きい場合には, 浮遊微粒子は室内へほとんど拡散しない。

謝 辞

本研究は本所に設けられた NST (乱流数値シミュレーション) 研究グループにおける討論より多くの示唆をえました。本所第 1 部吉澤助教授, 同第 2 部小林敏雄助教授をはじめ各メンバーに謝意を表します。

(1985 年 11 月 9 日受理)

参 考 文 献

- 1) 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 5, その 6), 日本建築学会大会学術講演梗概集 (計画), 1984.10
- 2) 村上, 加藤, 須山: コンベンショナルフロー型クリーン

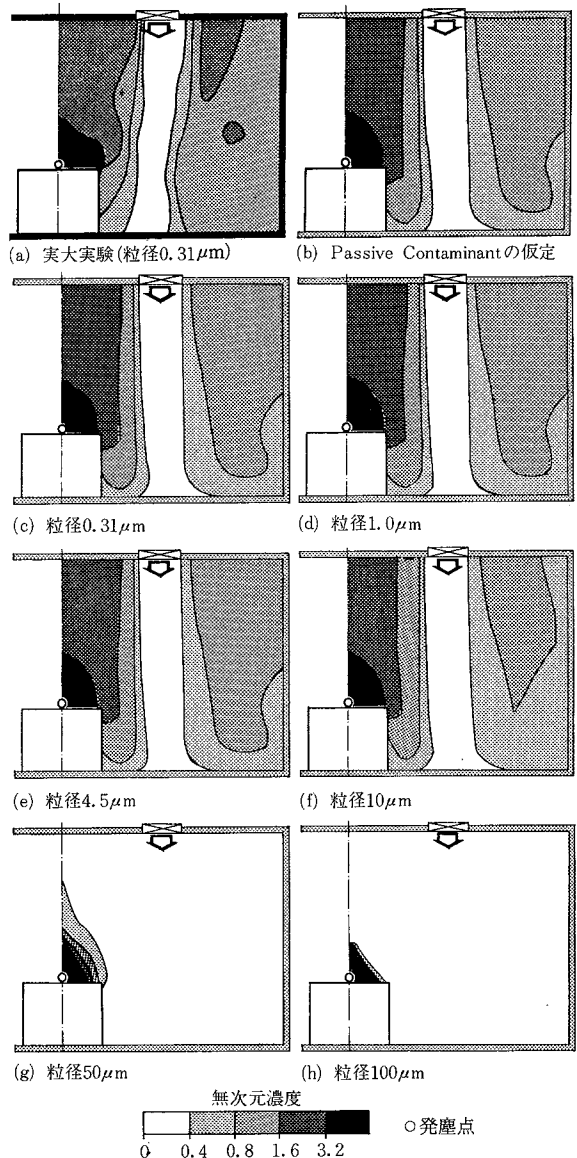


図 7 CASE 2 における拡散性状

((b)~(h)はシミュレーション結果であり, (c)~(h)は重力沈降速度を考慮している)

ルーム内の気流性状に関する研究 (その 7), 生産研究, 1985.5

- 3) 田中, 村上, 加藤: クリーンルーム内の浮遊微粒子拡散性状に関する研究 (その 7), 空気調和・衛生工学会学術論文集, 1985.10
- 4) 永野, 村上, 加藤: クリーンルーム内の浮遊微粒子拡散性状に関する研究 (その 8), 空気調和・衛生工学会学術論文集, 1985.10
- 5) 高橋幹二: 改著基礎エアロゾル工学, 養賢堂, 1982.11