

クリーンルーム内の浮遊微粒子の拡散性状に関する研究

—実物実験と数値シミュレーション—

Study on Distribution of Airborne Particles in Clean Room

—Full-scale Experiment and Numerical Simulation for Particle Diffusion in Clean Room—

村 上 周 三*・加 藤 信 介*・田 中 幸 彦**・宗 像 康 光*

Shuzo MURAKAMI, Shinsuke KATO, Yukihiko TANAKA and Yasumitsu MUNAKATA

1. はじめに

クリーンルームでは、室内を常に高潔度に保持するため、①室内への浮遊微粒子の侵入防止、②室内での浮遊微粒子発生防止、③室内で発生した浮遊微粒子の速やかな室外への除去、の3点(クリーンルーム3原則)に留意する必要がある。

本研究は、③の発生した微粒子の室内での拡散性状を解明し、その予測手法を開発することを目的としている。浮遊微粒子の拡散性状は種々検討されているが、^{1,2)}①微粒子自身が凝集・沈着して、その粒径分布、粒子数が変化すること、②重力による沈降があること、等により通常のガス拡散等の passive contaminant の拡散性状とは異なるものと考えられている。このため本研究では実験により、①浮遊微粒子の拡散性状の全般的把握および、②浮遊微粒子固有の特性(凝集・沈着・沈降等)が、その拡散性状に与える影響等に着眼して検討を行う。

今回、予備実験として行った実在のコンベンショナル型クリーンルーム(F社技術研究所研究用クリーンルーム)内での検討結果および拡散の予測方法の第一次段階として検討した passive contaminant 拡散の数値シミュレーション結果を報告する。

2. 実物実験

2.1 測定対象クリーンルーム

測定したクリーンルームを図1に示す。実験は、換気回数20回/h(吹出風速1.0 m/s)とし、等温吹出で行う。

2.2 実験種類

実験の種類を表1に示す。

2.3 測定

2.3.1 気流の測定

気流の測定は、絶対風速をサーミスタ風速計、風向をスモークテストによる目視観測により行う。

2.3.2 浮遊微粒子濃度の測定

浮遊微粒子濃度の測定は、光散乱型粒子計数器(HIAC/ROYCO Model 4102:ハロゲン光源、吸引流量

$4.72 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{sec}$ (0.1 ft³/min))により行う。サンプリングは、各測定点の空気を内径6φ、長さ5mのタイロンチューブにより直接吸引して行う。³⁾測定時間は1分間とする。

粒子発生は、標準粒子懸濁液をアトマイザにより噴霧、乾燥させる方式の粒子発生装置(HIAC/ROYCO Model 256)を用いて行う。標準粒子には、3種類の単分散ポリスチレン標準粒子(粒径0.31, 1.0, 4.5 μm)を使用する。粒子発生量は各測定に共通して約10⁶個/sec(室内瞬時一様拡散を仮定した粒子濃度は約3×10⁵個/m³ (10⁴個/ft³)),発生点における微粒子濃度は6×10⁸個/m³ (2×10⁷個/ft³)程度を目安とする。なお粒子発生点近傍では、粒子の凝集を考慮する必要がある。しかし、4.5 μm粒子に対する単純な凝集モデルでも、凝集による粒子数の半減期は10⁵sec程度(乱流凝集定数K_T=10⁻¹⁴ m³/sec 個と仮定)で、室内の拡散に関する特徴時間180 sec(ここでは1回換気に要する時間)と比べ十分に大きい。した

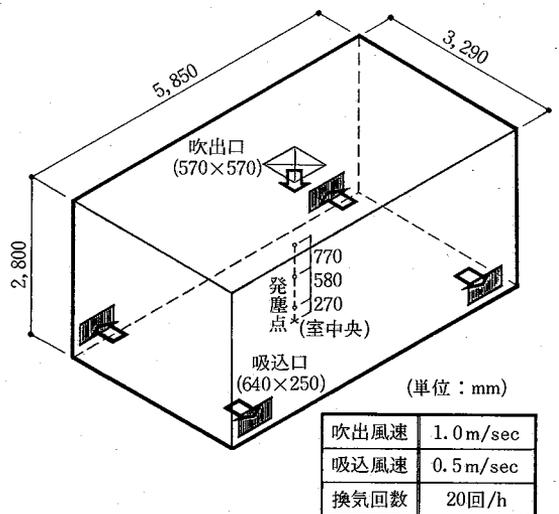


図1 クリーンルームの概要

* 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 フジタ工業㈱技研

表 1 実 験 種 類

実験 CASE	実験項目	測定 No.	発塵点の高さ (m)	粒子径 (μm)	気流障害物
基本タイプ	—————	1	0.85	0.31	無
CASE-1	再現性の確認	2	0.85	0.31	無
CASE-2	発塵点の高さを変えた場合の比較	3	0.27	0.31	無
		4	1.62	0.31	無
CASE-3	発生粒子径を変えた場合の比較	5	0.85	1.0	無
		6	0.85	4.5	無
CASE-4	作業台を置いた場合	7	0.85	0.31	有*

* クリーンルーム中央に作業台 (1,100^L×650^W×820^H) を設置

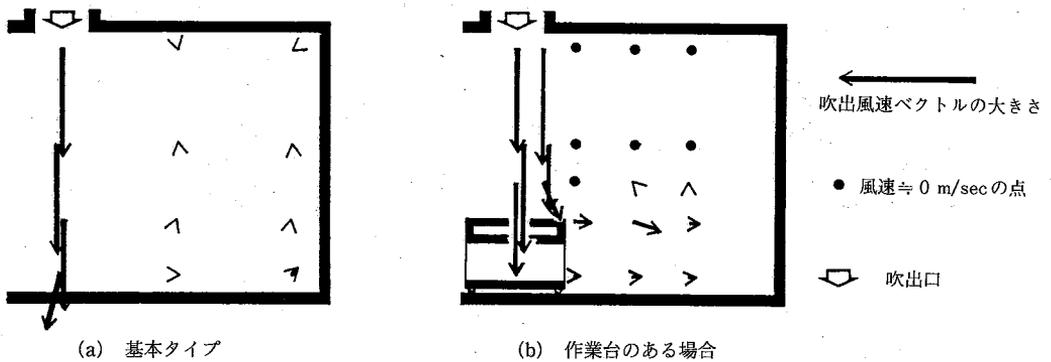


図 2 気流分布の実験結果 (長辺断面)

がって今回の実験において、乱流凝集による粒子数減少の影響は小さいと考えられる。

2.4 実験結果および考察

2.4.1 気流分布

クリーンルーム内長辺方向断面の風速分布を図 2 に示す。図は、対称面の片側のみを示している。気流分布の特徴を以下に示す。

①基本タイプ(図 2 (a))：吹出噴流は、ほとんど減衰せずに床面まで到達し、吹出口→床→壁→天井と大きな循環流を形成する。吹出噴流に比べ他の部分の風速はきわめて小さい。

②作業台のある場合 (図 2 (b))：吹出口直下 (室中央) に作業台 (長さ 1,100×幅 650×高さ 820 mm) を置いた場合作業台から壁面に向かって強い横向きの流れが生じる。その他の部分は基本タイプ同様風速はきわめて小さい。

2.4.2. 浮遊微粒子濃度分布

クリーンルーム内の浮遊微粒子の濃度分布を図 3 に示す。濃度は、各実験とも、4ヶ所の吸込口の平均濃度を基準として無次元化している。濃度分布についても、気

流分布と同様長辺断面については片側断面のみを示す。浮遊微粒子濃度分布の特徴を以下に示す。

①基本タイプ (図 3 (a), (b) 測定 No.1)

このタイプは吹出口直下 (室中央) 高さ 0.85 m の点から粒径 0.31 μm の粒子を発生させる。濃度は、発塵点下流で高く (1.6 以上)、その上流は吹出口から清浄空気が供給されるため、粒子は検出されない。またそれ以外の部分では、ほぼ様な濃度 (約 1.0) を示す。発塵点が吹出噴流中にあるため、微粒子は噴流中でよく拡散混合しその後室全体に運ばれる。そのため、室内濃度は比較的均一となる。

② CASE-1 (実験の再現性、測定 No.1 と 2 の比較)

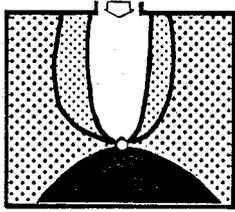
基本タイプ (図 3 (b)) を異なる実験タイプをはさんで同様の条件で測定 (図 3 (c)) を行いその浮遊微粒子濃度分布を比較する。両者の分布はよく一致し実験の再現性は良好なものと考えられる。

③ CASE-2 (発塵高さの変化、測定 No.1, 3, 4 の比較)

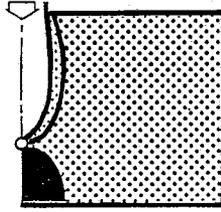
発塵点高さを 0.27 m (図 3 (d)), 0.85 m (図 3 (b)), 1.62 m (図 3 (e)) と変化させその濃度分布を比較する。発塵点高さに対応して高濃度領域の大きさが異なるが、

研究速報

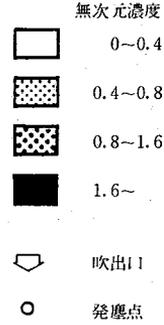
基本タイプ



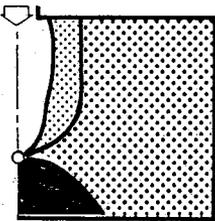
(a) No.1 (短辺断面)



(b) No.1 (長辺断面)

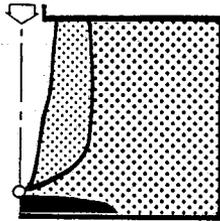


CASE-1 (No.1とNo.2)の比較

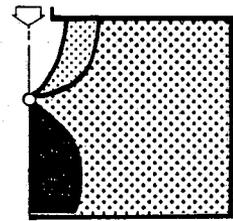


(c) No.2 (長辺断面)

CASE-2 (No.1とNo.3,4)の比較

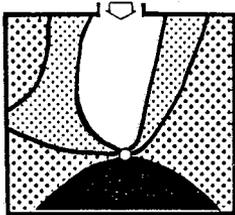


(d) No.3 (長辺断面)

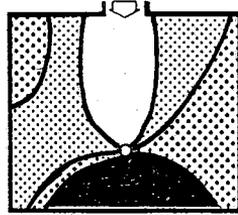


(e) No.4 (長辺断面)

CASE-3 (No.1とNo.5,6)の比較

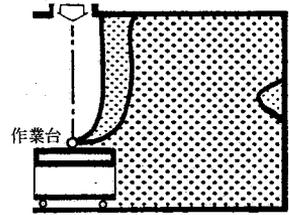


(f) No.5 (短辺断面)



(g) No.6 (短辺断面)

CASE-4 (No.1とNo.7)の比較



(h) No.7 (長辺断面)

図3 浮遊微粒子濃度分布の実験結果

室全体は一様な濃度分布を示し大きな差異は見られない。

④ CASE-3 (粒子径の変化, 測定 No.1, 5, 6 の比較)

発生粒子の粒径を $0.31 \mu\text{m}$ (図3(a)), $1.0 \mu\text{m}$ (図3(f)), $4.5 \mu\text{m}$ (図3(g))と変化させ、浮遊微粒子濃度分布を比較する。粒子の粒径が異なる場合それぞれの凝集特性が異なるほか粒子の重力による沈降速度の差により、濃度分布が異なることが予測される。しかし粒子の沈降速度は、最も速い $4.5 \mu\text{m}$ 粒子でも $6.4 \times 10^{-4} \text{m/sec}$ であり、天井高 (2.8m) に対する、重力沈降の特徴時間は、 $4.4 \times 10^3 \text{sec}$ となる。これは、室内の拡散に関する特徴時間 180 sec (前出) に比べて十分長く、重力沈降の影響は比較的少ないものと考えられる。実験結果も、粒径

1.0 および $4.5 \mu\text{m}$ の場合にやや対称性が崩れているものの分布に大きな差異は見られない。

⑤ CASE-4 (作業台の有無, 測定 No.1, 7 の比較)

吹出口直下に、作業台を置いた場合 (図3(h)) と置かない場合 (図3(b)) の浮遊微粒子濃度分布を比較する。作業台を置いた場合には、全体的にあまり高濃度の領域が見られない。これは、作業台の上面から壁面に向う気流によって、粒子が室全体に移動・拡散してよく混合するためと考えられる。

3. 数値シミュレーション

測定 No.1 と 7 に対応して、passive contaminant の拡散性状に関する数値シミュレーションを行い、その結果を実験結果と比較する。数値シミュレーションは $k-\epsilon$ 型

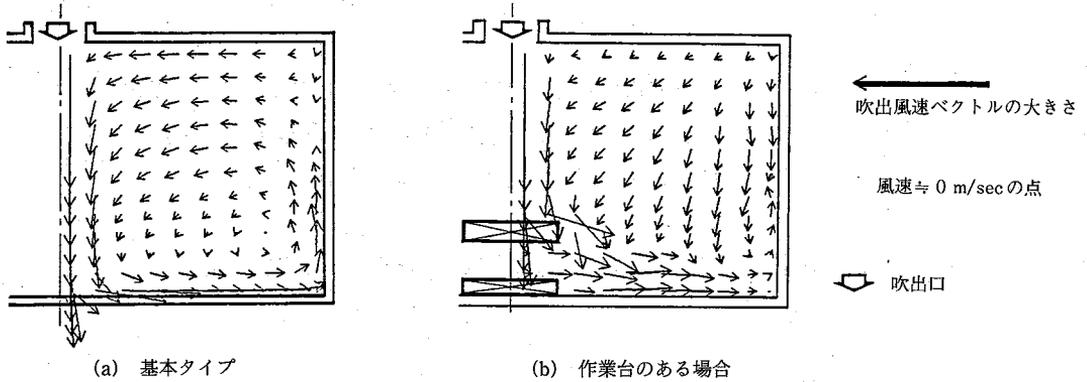


図 4 気流分布の数値シミュレーション結果 (長辺断面)

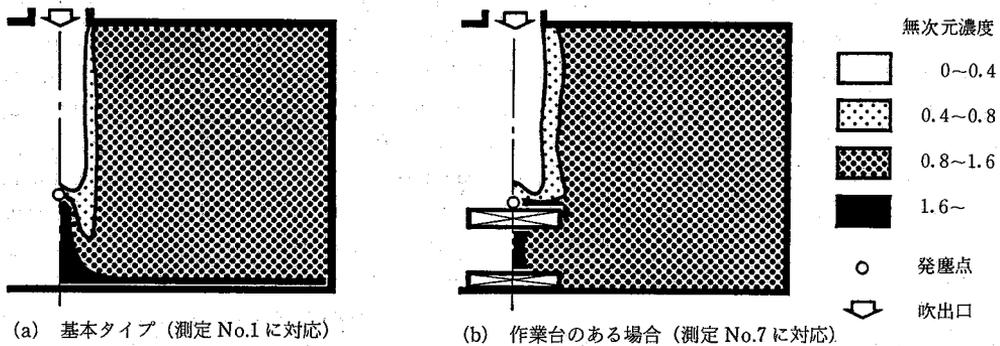


図 5 濃度分布の数値シミュレーション結果 (長辺断面)

2 方程式乱流モデルを基礎とし定常の気流分布を求め、発塵点に対応する位置で汚染質発生を仮定してその濃度分布を求める。なお、浮遊微粒子は、重力による沈降や凝集・沈着等の影響を受けるが、今回のシミュレーションにはこうした効果を反映していない。

シミュレーションは、室内を基本タイプで 35×20×20 メッシュ、気流障害物のある場合で 37×20×23 メッシュに分割して行う。シミュレーション方法の詳細については、参考文献 5) を参照されたい。

3.1 気流分布

気流分布の数値シミュレーション結果を図 4 に示す。実験結果 (図 2) と比較すると、基本タイプ、作業台のある場合とも、シミュレーションの結果のほうが全体的にやや高い速度を示す傾向にある。

作業台のある場合、その上面から壁面へ向う強い気流に関し、シミュレーション結果と実験結果はよく対応している。

3.2 濃度分布

passive contaminant の拡散性状のシミュレーション結果を図 5 に示す。シミュレーション結果と実験結果はよく対応している。2 方程式乱流モデルと passive contaminant を仮定して汚染質拡散方程式を解くこと

による浮遊微粒子拡散性状の予測手法は、十分実用性があるものと期待される。

4. ま と め

- ① 吹出噴流中に発塵点がある場合、発塵点高さ、発生粒子径の違いによる浮遊微粒子濃度分布に関して目立った差異は認められない。
- ② 浮遊微粒子の濃度分布に関して、passive contaminant と乱流モデルを仮定した数値シミュレーション結果は、実験結果とよく対応している。

(1985 年 3 月 13 日受理)

参 考 文 献

- 1) 藤井修二ほか“層流クリーンルーム設計法に関する研究”日本建築学会大会学術講演梗概集 (計画) 1983. 9 (北陸) 1984. 10 (関東)
- 2) 美馬徹ほか“実在するコンベンショナル型クリーンルーム内の浮遊微粒子の濃度分布性状”第 4 回空気清浄とコンタミネーションコントロールに関する技術研究大会 1985. 2
- 3) 村上周三ほか“クリーンルーム内の浮遊微粒子計測法に関する研究”生産研究 1985. 4
- 4) 高橋幹二“改著基礎エアロゾル工学”養賢堂 1982. 11
- 5) 村上周三ほか“室内気流の数値シミュレーションと実験の対応”生産研究 1984. 12