

Study on Airflow Fields in Line-Type Cleanroom



藤田 勉
Tsutomu Fujita
エンジニアリング事業
部 鋼構造研究所建設
エンジニアリング研究
室 主任研究員(部長)



末田 明
Akira Sueda
エンジニアリング事業
部 鋼構造研究所建設
エンジニアリング研究
室



浦 等
Hitoshi Ura
エンジニアリング事業
部 建築鉄構営業部 主
査(課長)



白石 健
Takeshi Shiraishi
川鉄システム開発部
千葉事業所システム開
発グループ 樹長

要旨

ライン式クリーンルームにおける気流分布を適正にし、高 cleanliness の空間を効率的に得ることを目的に、初めに多孔板からなる細長い形状のサブライユニットにおける気流の吹き出し分布を調査した。流路断面積が徐々に減少するような構造にすると、長軸方向にわたりほぼ平準化された分布パターンを得ることができる。つぎに、空気の供給パターンが室内気流分布に及ぼす影響を実験、あるいは気流解析により調査した。ライン式クリーンルームでは渦流れや上昇流れが見られなく、ほぼ一様な下向きの気流分布となり、このため、発生する塵埃が速やかに除去される。清浄度回復特性が優れており、簡易な設備構成でクラス 100 までの高 cleanliness の空間環境を容易に実現できる。

Synopsis:

In order to improve the airflow fields in a line-type cleanroom, experiments or numerical simulations were conducted. At first, the outlet airflow from the air supply unit was studied. The outlet airflow pattern is recognized to be much improved in terms of uniformity, because of usage of flow passage-adjusting members. Then, the influence on room airflow patterns was investigated in terms of the shapes of air supply outlets, through two kinds of experiments. Several numerical simulations were carried out as well. Rotating streams or rising streams are not observed in the line-type cleanroom, and it is understood that airflow patterns are more unidirectional than in conventional non-unidirectional ones, so that dusts and other contaminants are removed with airflow effectively. The clean-up characteristic¹⁾ was validated to be exceedingly high. It is possible to afford cleanrooms of even class 100 (Federal Standard 209 D) with simple equipment.

1 緒 言

半導体、液晶、電子・精密機器などのハイテク産業や薬品・食品工業、病院などでは、空間の環境を高 cleanliness に保つことが重要な技術課題になっている。環境清浄化技術は多くの技術から構成される総合技術であるが、その中にクリーンルームにおける気流制御技術がある。室内の気流分布は浮遊微粒子の拡散や沈着に大きな影響を及ぼすことから、特に主要な課題と考えられている。

一般のクリーンルーム¹⁾には、天井または一方の壁面全体に高性能フィルタ (HEPA または ULPA フィルタ) を配置し広い範囲から清浄空気を吹き出し、床などをグレーチング構造とするいわゆる整流型と、天井に局所的に配置されたファン、フィルタを通して清浄空気を吹き出す非整流型などがある。整流型クリーンルームでは、高 cleanliness 空間が得られやすいが設備コストなどが大となる。他方、非整流型では一般的に上記とは逆の傾向がある。

ライン式クリーンルーム²⁾は上述の両者の長所を合わせもつように考えられたものである。循環空気を清浄化しかつ温度・湿度を調整するエアコントロールユニットを室内に置き、天井面にダクト状のサブライユニットを配置し、その壁面に多数開けられた小径の開口から清浄空気を室内に分散供給することを主な構造上の特徴としている。

クリーンルームの気流分布は、空気の供給パターンと排出パターンにより大きな影響を受けるが、特に前者の及ぼす影響が大きいと考えられる。ところで、壁面に多数の小径開口を有するダクトから吹き出す空気の供給パターンを均一化することは一般的には困難なことである。これらのことから、気流の適正化の面ではさらに解決すべき主要な課題が残されていた。

著者らは、このような背景から、サブライユニットからの吹き出し気流の分布挙動を探るとともに、室内気流分布の一様性を高める研究を進め、効率のよいライン式クリーンルームを開発するにいた

* 平成 4 年 10 月 21 日原稿受付

った。

本報では、ライン式クリーンルームの概要、気流分布と清浄化特性について述べる。

2 ライン式クリーンルームの概要

ライン式クリーンルームの主仕様の一例を Table 1 に示す。室内空気清浄度を保つとともに、温度・湿度が定められた範囲に入るように制御されている。

Table 1 Main specifications of a line-type cleanroom

Item	Specifications
Room dimension (m)	13.1(W) × 9.2(L) × 2.7(H)
Degree of cleanliness (0.5 μm)	Class 5 (Federal St. 209D class 100)
Temperature (°C)	23 ± 2
RH (%)	50 ± 10
Outer air intake (m³/min)	24
Ventilation (times/h)	73
Number of workers	10 persons
Indoor pressure (Pa)	19.6

Fig. 1 に概形が一般的に示されるように、焼き付け塗装カラー鋼板を壁材とし、室内空気を循環・清浄化するクリーンユニット (CU) と、空気を循環・清浄化するとともに温度・湿度を制御するエアコントロールユニット (ACU) と、清浄化空気を天井近くから室内空間に供給するサプライユニット (SU) などを室内に有し、室外には冷却ユニット (CDU) を備えている。エアコントロールユニットの内部にはファン、HEPA フィルタの他に加熱ヒータ、冷却コイル、加湿器が設けられている。下部のプレフィルタを経て吸い込まれた室内空気は単独で、あるいは取り込まれた換気用外気と一緒に温度・湿度調節が行われ、かつ HEPA フィルタにより塵埃などが除去されて清浄空気となり、上方の開口部に接続されたサプライユニットに供給される。なお、クリーンユニットにはファンと HEPA フィルタが設けられていて、清浄化した空気が同様にサプライユニットに導かれる。

このような構造・装置形式であるため、

- ・室内の空気の乱れが少ない
- ・初期投資が少なく電力費などのランニングコストが低い
- ・建物の階高が低くできる
- ・設置スペースが少ない
- ・工期が短い

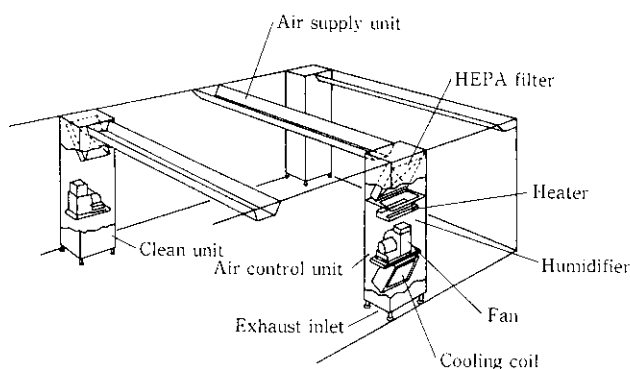


Fig. 1 Schematic illustration of a line-type cleanroom

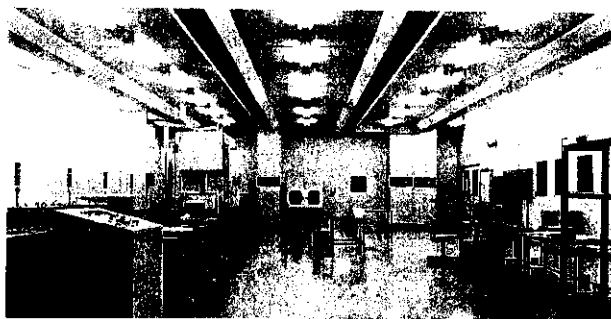


Photo 1 Line-type cleanroom applied to manufacturing electronic components

・グレードアップが容易である

などの特長がある。清浄度でクラス 100~10 万 (JIS B9920: 5~8) のものが容易に実現でき、電子・精密機器、薬品・食品工場、病院などで広く利用されている。Photo 1 にライン式クリーンルームの使用例を示す。

3 エアサプライユニットからの気流吹き出し

導管の途中に間隔をおいて開けられた分岐管群からの流出に関して、管内での流体抵抗損失などを考慮しコンピュータ計算を行ってその挙動を調べた報告²⁾がある。しかし、多数の小径開口群を壁面に有する細長い形状のダクトからの気体の吹き出し分布に関する報告は見当たらないようである。ところで、分岐流出部で大きな圧力損失が許容される場合には、出口に抵抗体を取り付けて吹き出し分布の均一化をはかることが一般的に行われている。しかし、大きな圧力損失が生じるため動力費の増大を招くなど通常は好ましくない。内外の圧力差が小さい場合に、多孔板よりなる長いダクトからの気体の吹き出し分布を均一化することは一般的には困難なことである。

ライン式クリーンルームのサプライユニットからの気流の吹き出し分布について調査するために、Fig. 2 に示されるモデルクリーン

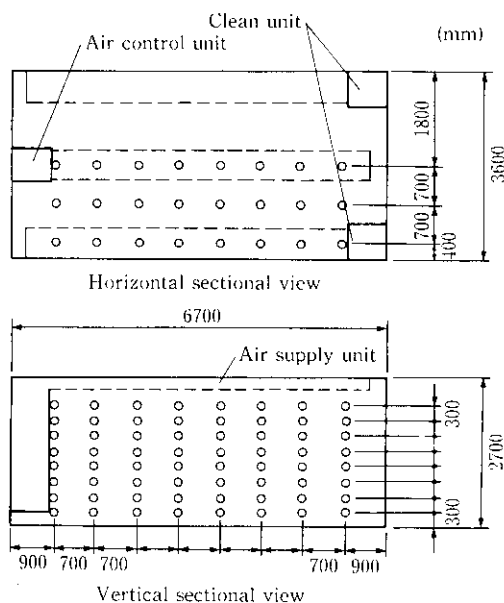


Fig. 2 Configurations and measuring points of the experimental line-type cleanroom

ルームを対象に、数値シミュレーションまたは実験を行った。室の大きさは $3.6\text{ m}(W) \times 6.7\text{ m}(L) \times 2.7\text{ m}(H)$ である。壁の中央にエアコントロールユニットを1台、対向する両隅にクリーンユニットを各1台置き、天井下面には $0.6\text{ m}(W) \times 5.7\text{ m}(L) \times 0.2\text{ m}(H)$ の逆台形型のサブライユニットをそれぞれ配置している。サブライユニットは開口率25%のパンチングメタルなどから構成されている。

数値計算には差分法による汎用の熱・流体解析コードを用いた。計算時間の短縮のため、2次元で計算するなどの簡略化を行った。なお、サブライユニットは長軸方向に流路断面面積が徐々に減少するような形状であるとして計算を行った。

サブライユニットからの気流の吹き出しについての計算結果の例を Fig. 3 に示す。入口の流入量は $40\text{ m}^3/\text{min}$ である。部分的な変化が少し見られるが、吹き出し分布には大きな変動がなく相当程度平準化されているといえる。

つぎに、Fig. 2 のクリーンルームにおいて、サブライユニットから 45 mm 離れた直下で超音波式3次元風速計を用いて気流測定実験を行った。サブライユニットは上述のように流路断面面積が減少するような構造に作られている。なお、このときのサブライユニットへの流入空気量は $37\text{ m}^3/\text{min}$ であった。

実験結果を Fig. 4 に示す。サブライユニットの長軸方向にわたり若干の変化が見られるが、吹き出し分布については相当程度平準化されていることがわかる。Fig. 3 の計算結果におおよそ傾向は似ているといえる。

小径の開口群からの吹き出し速度は、ダクトの内部の主流の速度、静圧の分布や内壁の抵抗損失、開口部の形状、流出損失などにより大きな影響を受ける。ここでは、それらの因子を考慮しながら、流出損失を小さくしかつ吹き出し分布を向上することを目指して、サブライユニット内部の流路断面形状を徐々に変えるような基本的考

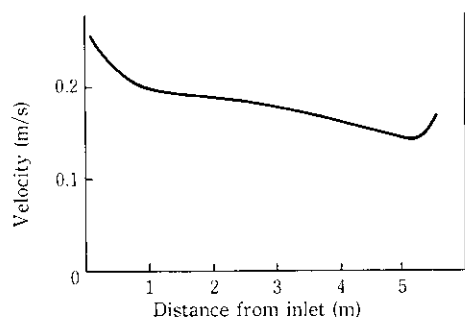


Fig. 3 Air velocity under the air supply unit (simulation)

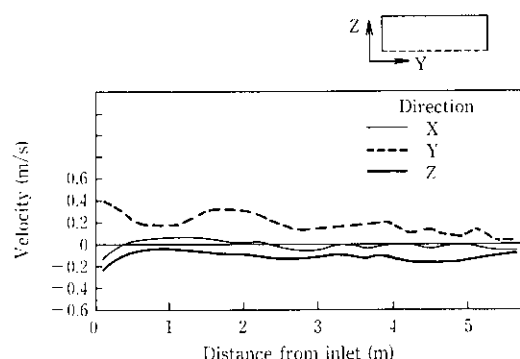


Fig. 4 Air velocity under the air supply unit (experiment)

え方を採用した場合に焦点を当て、数値計算、実験を行った。実験結果からも、多孔板から構成される細長いダクトからの流れに関し、上述のような構造にすると吹き出し気流分布は平準化されることを明らかにすることができた。比較的簡単な構成であり、送風ファンの出力を小さくすることが可能となるなど、消費エネルギーの節減の上からも好ましいことと考えられる。

4 室内における気流分布

3章での検討に引き続き、室内の気流分布の性状を明らかにするために主にライン式クリーンルームについて気流測定実験と気流解析を行った。

4.1 実験

4.1.1 実験方法

初めに、Fig. 2 に示されるライン式クリーンルームを運転し、室内の気流測定実験を行った。このときのエアコントロールユニット、クリーンユニットの循環空気量はそれぞれ $37, 33\text{ m}^3/\text{min}$ であった。測定位置は Fig. 2 に示され、超音波式3次元風速計を用いて測定した。なお、サブライユニットは3章で述べたものを用いている。

つぎに、吹き出し気流パターンの変化が室内気流分布に及ぼす影響を調査するために、サブライユニットを取り外し、替りに天井局所吹き出し型のダクト、フィルタを取り付ける部分改造を行った後、室内の気流測定実験を行った。測定位置、測定方法は上記の場合と同様である。なお、吸い込み部の構造は上記と変わっていない。

4.1.2 結果と考察

ライン式クリーンルームの場合、中央の縦断面と横断面についての実験結果を Fig. 5 (a) に示す。渦流れや上昇流れが見られなく、発生した塵埃が速やかに除去されるような下向きのほぼ均等な流れとなっている。図示しないが、他の断面においても類似した傾向が見られた。また同様に図示しないが、測定点における乱流強さもほぼ一様に小さい。すなわち、ライン式クリーンルームの室内気流分布は、整流型クリーンルームの分布パターンに近いといえる。なお、気流パターンにサブライユニットから吹き出す長軸方向の気流速度成分の影響が見られるが、全体としては対向する位置にあるクリーンユニットの下部吸い込み口に向かう斜め下向き流れとなっている。このため流れの停滞域が見られないと理解される。

局所吹き出し型のクリーンルームの場合、中央の縦断面と横断面についての実験結果を Fig. 5 (b) に示す。吹き出し口の下方は下向きの強い流れとなっているが、吹き出し口から離れると上昇流れとなっている箇所が多く見られる。乱流強さも大きかった。このような気流性状では、塵埃の滞留または拡散現象が生じやすい。

上述のように、室内気流分布は吹き出し気流パターンから大きな影響を受けることがわかる。ライン式クリーンルームでは、局所吹き出し型に比べ、良好な吹き出し気流パターンを得ることができ、そのため優れた室内気流分布を実現することができる。

4.2 気流解析

4.2.1 解析モデル

初めに、Fig. 2 に示されるライン式クリーンルームを対象に気流解析を行った。室中央断面で対称であり、室の半分を計算領域とした。解析には汎用の熱・流体解析コードを用い、3次元で計算を行った。 $k-\epsilon$ 乱流モデルを適用し、境界条件として乱流壁関数を用い

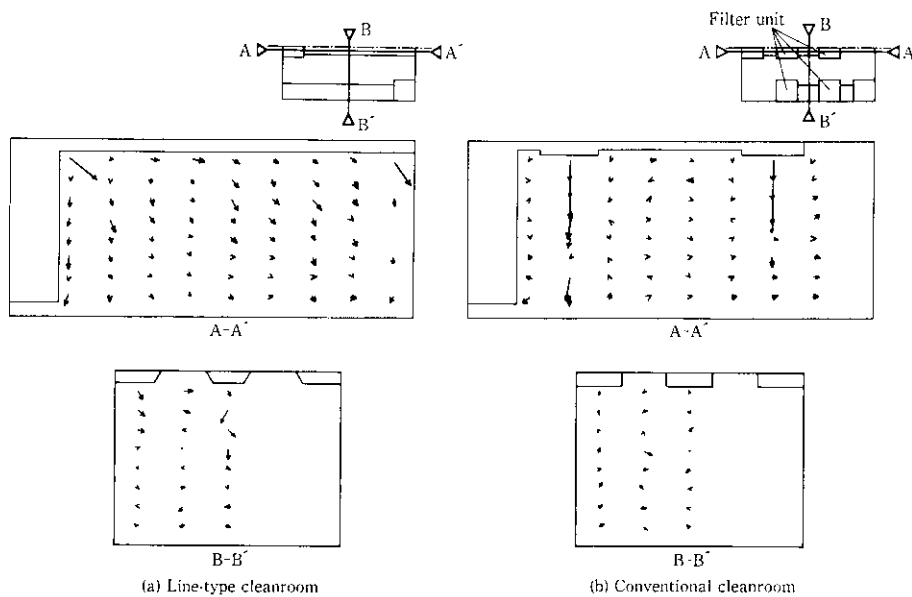


Fig. 5 Comparison of velocity vector plots of the line-type cleanroom with those of conventional one (experiment)

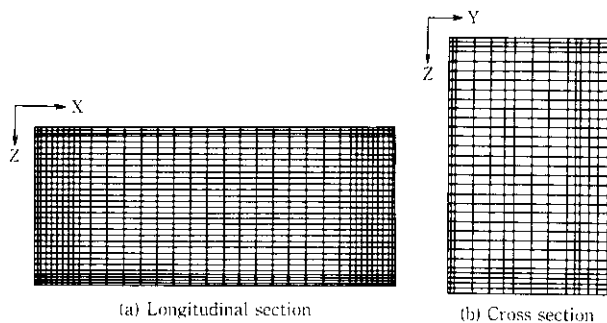


Fig. 6 Numerical mesh in half domain

た。室内への空気供給の境界条件として、3章に記された実験値を用いた。メッシュ分割を Fig. 6 に示す。

つぎに、Fig. 2 の室内の中央に $2\text{ m}(L) \times 1\text{ m}(W) \times 1\text{ m}(H)$ の大きさの作業台をおいた場合、さらには、Fig. 2 と同じ大きさの室において1台のエアコントロールユニットのみを室の隅に置き中央にサブライユニットを置きその間をダクトで接続した場合のケーススタディを行った。後者は、エアコントロールユニットのレイアウトの制約がある場合を調査するためである。境界条件は上記と同様である。

なお、分割メッシュ数は 15 000~24 000 である。

4.2.2 結 果

Fig. 2 のライン式クリーンルームについて、中央の縦断面と横断面の計算結果を Fig. 7 に示す。4.1.2 の実験結果と同様に、室内全域にわたるほぼ均一な下向き流れとなっており、塵埃が速やかに除去される様子が推察される。渦流れや上昇流れなどは見られない。また、気流パターンにダクト長軸方向の速度成分の影響が見られるが、既述したように対向する位置にある吸い込み口に向かう流れとなっており、全体としては好ましいパターンであると考えられる。実験結果と解析結果は比較的良好に一致しており、解析的手法の有効性が確認できた。つぎに、室の中央に気流遮蔽物である作業台

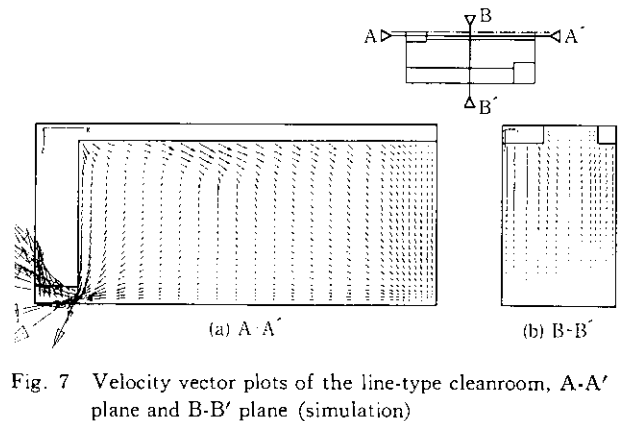


Fig. 7 Velocity vector plots of the line-type cleanroom, A-A' plane and B-B' plane (simulation)

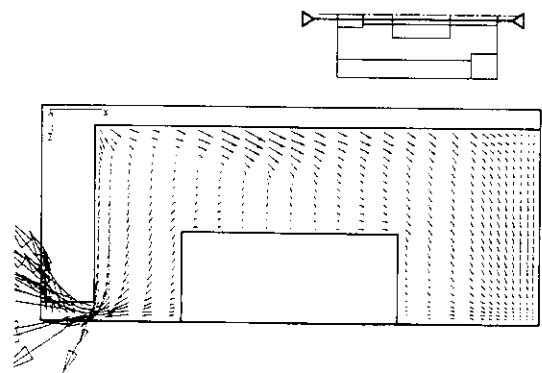


Fig. 8 Velocity vector plots in the center of the line-type cleanroom with a work table in the center of the room (simulation)

を配置した場合、室の中央での縦断面の計算結果を Fig. 8 に示す。渦流れや上昇流れが見られなく、一様な流れとなっていることがわかる。なお、局所吹き出し型クリーンルームの内部に気流遮蔽物を配置した場合については、過去に解析がなされている⁴⁾。そこでは、

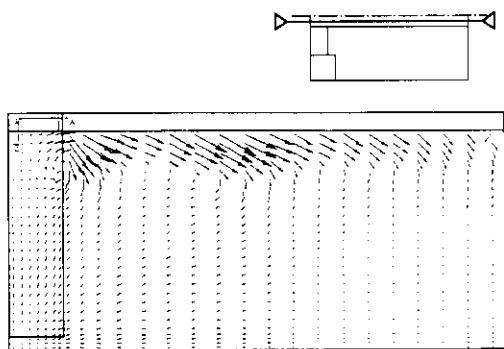


Fig. 9 Velocity vector plots in the center of the line-type cleanroom where air control unit and air supply unit are connected with connecting duct (simulation)

遮蔽物上方での上昇流れや遮蔽物横での渦流れの発生が報告されている。これらのことから、ライン式クリーンルームの室内気流分布の有効性が理解される。

室の隅にエアコントロールユニットを、中央にサブライユニットを配置し、その間をダクトで接続した場合、中央の縦断面の計算結果を Fig. 9 に示す。エアコントロールユニットから遠く離れた領域では気流速度が遅くなる。そこは気流の吸い込み口からも遠く離れており、気流分布の適正化の面からは吸い込み口の配置も考慮する必要があることがわかる。また接続ダクト下部に気流が流れ込むことにより小さな渦が発生した。しかしこの渦は非常に小さく、室内清浄化特性に与える影響は小さいと考えられる。

上述のように、ライン式クリーンルームでは渦流れや上昇流れが見られなく、全体として好ましい気流分布になっていることが気流解析からも理解される。また、室内レイアウトが変化する場合、気流解析を行うことにより設計上の指針を得ることができる見通しを得た。

5 清浄度回復特性

4章での検討結果をふまえ、室内気流分布の清浄化特性に及ぼす影響を調査するために、清浄度回復特性の測定実験を行った。

5.1 実験方法

4章に述べたライン式クリーンルームと局所吹き出し型クリーンルームについて、清浄度回復特性を調査するための実験を行った。清浄化ユニットは Fig. 2 に示される数、配置とした。室内中央の床上 1000 mm の高さで、パーティクルカウンタを用いて空気中の $0.5 \mu\text{m}$ 以上の微粒塵埃濃度を測定し、その時間的推移を調査した。

5.2 結果と考察

ライン式クリーンルームと局所吹き出し型クリーンルームの清浄度回復特性に関する実験結果を Fig. 10 に合わせて示す。局所吹き出し型では、 $0.5 \mu\text{m}$ 粒子基準でクラス 100 (JIS B 9920 のクラス 5) 以上の清浄度に達した後、さらに粒子濃度 $40 \sim 100$ (個/ ft^3) の間で変動する様子がみられる。ところが、ライン式クリーンルームではクラス 100 以上の清浄度に達した後、ひき続き粒子濃度 10 (個/ ft^3) 以下へと低下し、清浄度がさらに向上している。これは、先の実験、解析結果からも明らかのように、室内気流分布性状の違いに起因すると容易に推察される。このことから、ライン式クリーンルームでは、比較的容易にクラス 100 以上の高清浄度の空間を実現する

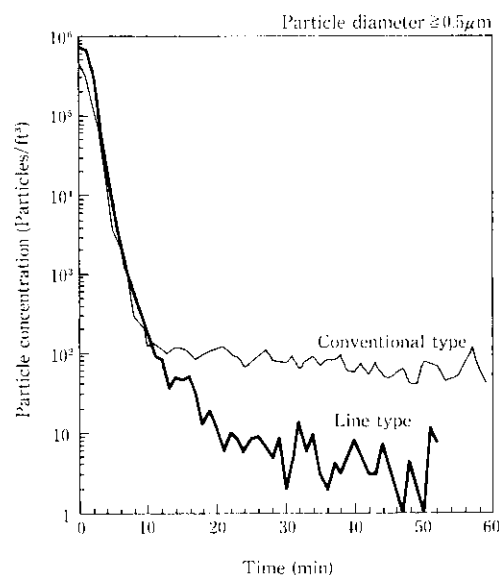


Fig. 10 Relationship between time and particle concentration

ことができる。いいかえると、室内環境を例えばクラス 100 にするために従来必要とされていた換気回数に比べて、ライン式クリーンルームではその値を低減することが可能となる。このことは、クリーンルームの設備コストやランニングコストの低減につながる。

以上のことより、ライン式クリーンルームでは適正な気流分布が実現でき、清浄化性能、あるいはコストパフォーマンスにおいて極めて優れているといえることができる。

6 結 言

ライン式クリーンルームにおける気流分布を適正にし、効率的な清浄化特性が得られるよう開発研究を行った。この結果をまとめると以下のとおりである。

- (1) 室内気流分布は、清浄空気の供給パターンにより大きな影響を受ける。
- (2) サブライユニットの流路の断面積を徐々に減少するような構造とすることにより、長軸方向にわたるほぼ平準化された良好な吹き出し分布パターンを得ることができる。
- (3) ライン式クリーンルーム内では渦流れや上昇流れが見られなく、ほぼ一様な下向き流れとなり、発生する塵埃が速やかに除去されることが期待できる。
- (4) 数値シミュレーションにより、クリーンルームの配置、形状が変わった場合の気流の様子をかなりの程度推測できる。
- (5) 清浄度回復特性は優れており、比較的簡易な設備構成で効率的に高清浄度空間を得ることができる。

参 考 文 献

- 1) 日本空気清浄協会編: 「クリーンルームハンドブック」, (1989), [オーム社]
- 2) 長谷川欣也, 木村正夫, 浦 等, 高橋 功, 秋田充徳: 川崎製鉄技報, 20 (1988) 4, 366
- 3) A. Acrivos, B. D. Babcock and R. L. Pigford: *Chemical Engineering Science*, 10 (1959), 112
- 4) 村上周三, 加藤信介: 空気調和・衛生工学, 63 (1989) 2, 17