

階段室のクリーンルーム化を目的とした屋内気流設計

— 数値シミュレーションによる設計条件の検討および実階段室の特性評価 —

諏訪 好英

尾崎 明弘

(本社 設計本部設備設計
第三部)

田北 博司

(本社 エンジニアリング
本部)

Airflow Design of a Staircase to Modify it for a Clean Zone

— System Design by Computer Simulations and Evaluations of Actual Staircase —

Yoshihide Suwa

Hiroshi Takita

Akihiro Ozaki

Abstract

Product defects caused by airborne contaminants should be prevented in the pharmaceutical industries and the manufacturing of electronic devices. Therefore, contamination control is very important not only in cleanrooms but also during product transportation. This paper describes investigations of airflow design to modify a staircase for a clean zone. A staircase is sometimes used to connect production lines on different floor levels. To make a suitable design of an air-supply system in this project, airflow and particle behavior were numerically simulated under varying conditions. Then, an actual staircase was designed and constructed according to the simulation results. Finally, a measurement was conducted for the staircase. The staircase satisfied the requirements for the level of cleanliness and the cleanliness recovery time.

概要

電子部品、製薬産業などの製造工程では、クリーンルーム内のみならず製品の搬送経路などにおいても汚染制御が重要となる。異なるフロアーに製造ラインがある場合には、製品搬送経路として階段室のクリーンルーム化が必要となる場合がある。本論文は階段室のクリーンルーム化にあたり実施した屋内気流計画の検討結果を報告するものである。階段室では3次元的气流計画が必要となるため、数値シミュレーションを用いてその給・排気条件を検討した。シミュレーション結果をもとに設計、施工した階段室についてその特性を評価した結果、清浄度および清浄度の回復時間に関する要求性能を十分満足することを確認した。

1. はじめに

電子部品産業や製薬、食品産業の製造工程では、微粒子や雑菌などの汚染により製品不良を引き起こすため、厳しい清浄度管理と汚染制御が要求される。特に製品加工空間であるクリーンルーム内では高いレベルの空間清浄度を維持することが必要であり、年々その要求性能も厳しくなっている。また安定した製造歩留りを確保するためには、クリーンルーム内のみならず、材料の搬入・搬出や工程間での製品搬送を行う通路空間などについても一貫した汚染制御が必要となる。

地価の高いわが国では、しばしば2階建て、3階建ての建屋で異なるフロアーに製造ラインを配置することが行われるが、この場合、異なるフロアーに分割された工程間での製品のやりとりが問題となる。異なるフロアーにある工程間での製品のやりとりには、クリーンエレベータやエンクロージャを用いる方法などが考案されているが、製品の搬送頻度や目的によっては階段室を通常のクリーンルームと同様の清浄空間としてしまった方が有利な場合も考えられる。しかし階段室の場合、3次元的气流計画が必要であるとともに、吹き出し口やレターン吸い込み口の配置が制限されるため、通常のクリーン

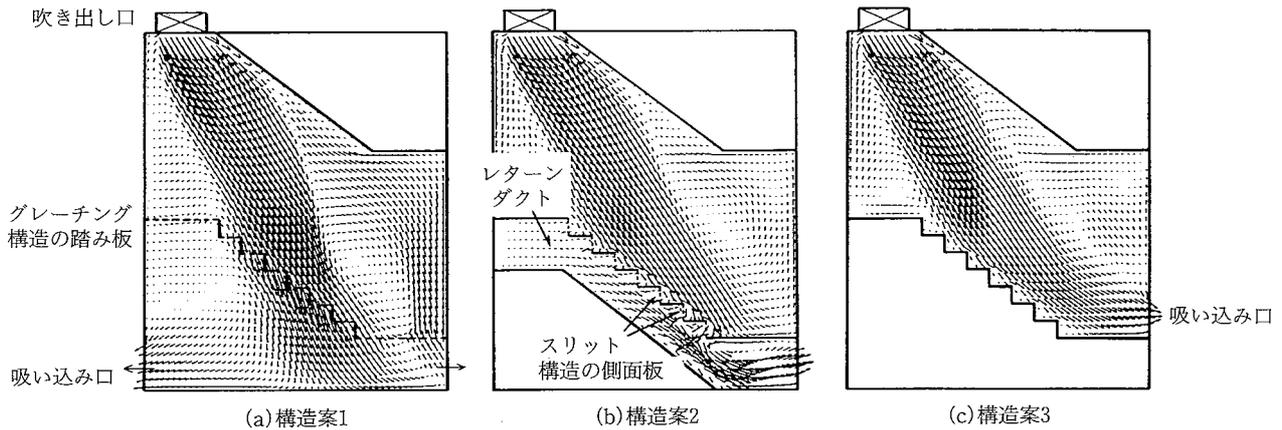


図-1 床構造による気流状態の違い

ルームとは大きく異なる設計コンセプトが必要となる。
 本報では階段室のクリーンルーム化にあたり実施した数値シミュレーションの結果と、これをもとに設計、施工した実際の階段室で測定した気流特性、清浄度特性について報告する。

2. 階段室の仕様と要求性能

対象とした階段は 4,000×1,600×8,500 mm の空間に設置され、1 FL から 2 FL まで(1 FL:1 F 床面高さ, 2 FL: 2 F 床面高さ, 以下同様に床面高さを FL, 1 階, 2 階を 1 F, 2 F と記す)の約 6 m を 32 段のステップ(段差約 190 mm)と 3 箇所の手すり場をつなぐ構造とした。通路部分の断面は 2,400 (H) × 780 mm (W) である。

なお要求性能として、通常運転状態での清浄度レベルはクラス 100 (Fed.Std.209 E¹) を満足すること、作業員 1 名が通過した後のクラス 100 までの清浄度回復時間が 30 分以内であることとした。

3. 数値シミュレーションを用いた設計条件の検討

3.1 気流解析の手法

階段室内での気流状態の検討には SIMPLE 法²⁾による 3 次元気流解析を行った。乱流補正には標準 k-ε モデル³⁾を用いている。基礎方程式を以下に示す。

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad \dots\dots\dots(1)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial u_j u_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{p}{\rho} + \frac{2}{3} k \right) + \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ \nu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right\} \dots\dots(2)$$

$$\nu_t = C_0 \frac{k^2}{\epsilon} \quad \dots\dots\dots(3)$$

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \frac{\partial u_i k}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\nu_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_i} \right) + \nu_t G_s - \epsilon \quad \dots\dots\dots(4)$$

$$\frac{\partial \epsilon}{\partial t} + \frac{\partial u_i \epsilon}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\nu_t}{\sigma_\epsilon} \frac{\partial \epsilon}{\partial x_i} \right) + c_1 \frac{\epsilon}{k} \nu_t G_s - c_2 \frac{\epsilon^2}{k} \dots\dots(5)$$

$$G_s = \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j}$$

- x : 座標
- t : 時間
- u : 気流の速度
- p : 圧力
- ρ : 空気の密度
- ν_t : 渦動粘性係数
- k : 乱流エネルギー
- ε : エネルギー散逸率
- σ_k, σ_ε, C₁, C₂, C₀ : モデル定数

3.2 階段室の基本構造に関する検討

通常、クラス 100 レベルのクリーンルーム設計では、天井全面に最終段フィルタを敷き詰め、床面にグレーチング構造を用いる垂直下降流方式を採用することが多い。階段室の場合には床面がステップ状に傾斜しており、また吹き出し口を天井全面に配置することが困難である。初期的な検討として 3 種類の床構造を想定し、それぞれの場合についての気流状態を数値シミュレーションにより比較した。

踊り場から踊り場までの 1 ゾーン分について解析した結果を図-1 に示す。ここでは気流方向を階段の勾配と一致させるためフィルタからの吹き出し気流を 30° 傾斜させた。いずれの場合も階段に沿って一様な気流が形成されている。しかし図-1 (a) および (b) の場合には構造的に複雑となる上、下流側踊り場近傍には若干の旋回領域も形成されることがわかった。数値シミュレーションの結果から、階段室の床構造としてはグレーチングなど特殊な構造を使用しない図-1 (c) の床構造で十分な気流特性を得られるものと判断した。

3.3 給・排気条件の適正化に関する検討

階段室全体について 3 次元モデルを作成し、給・排気条件の適正化を検討した。解析対象としたモデルを図-2 に示す。ここでは踊り場から踊り場までの各ゾーンについての気流制御をある程度独立させることとし、各ゾーンの上流側、下流側にそれぞれ 1 対ずつの吹き出し口、吸い込み口を配置した。

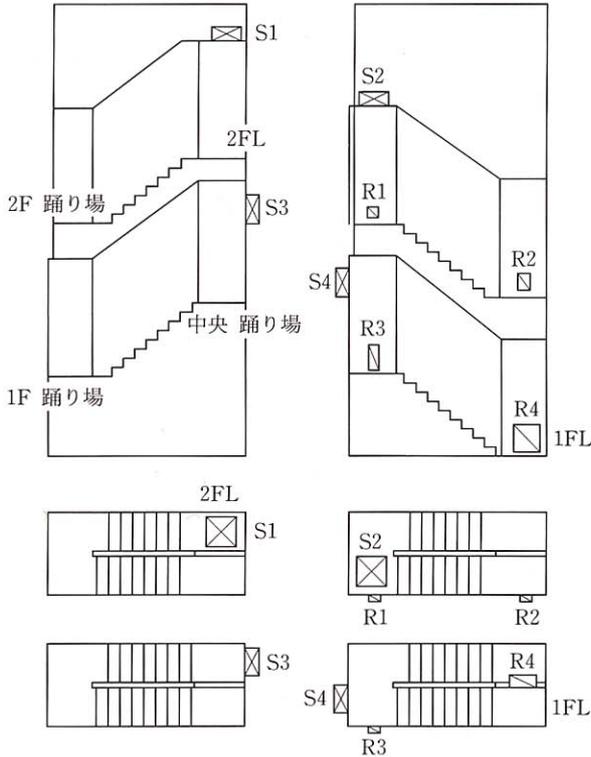
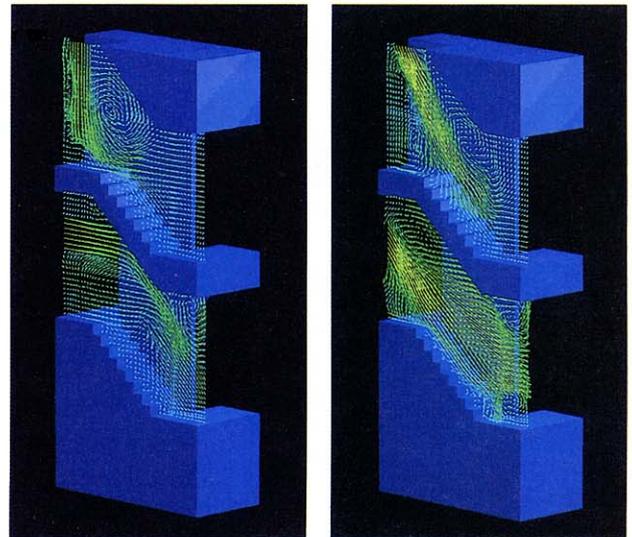


図-2 解析対象の3次元モデル

図-3は異なる給・排気条件について気流分布を解析した結果の一例である。ダクト引き回しのための制約から、吹き出し口には天井面に設置されているものと壁面に設置されているものがある。吹き出し気流を傾斜させない図-3(a)の場合、気流は水平方向または垂直方向に吹き出されるため階段の勾配に沿っていない。このため2F踊り場付近や1F～中央踊り場までの階段部分ではよどみや旋回領域の形成が認められた。なお解析の結果、階段室全体の気流状態には下流側へ行くほどその風量が増大する傾向が認められた。当初は各ゾーンに1対ずつ設けた吹き出し、吸い込み口の流量を一致させる方法を想定したが、各ゾーンにおける吹き出し、吸い込み流量は必ずしもバランスしないものと考えられる。

図-3(b)は各種条件についての解析結果をもとに給・排気条件を適正化した場合の気流分布である。ここでは各部吹き出し口の気流角度を調整するとともに、下流側で増加する風量とのバランスをとるため、各吸い込み口での吸引流量が下流側へ行くほど大きくなるよう設定した。給・排気条件を適正化した場合には、いずれのゾーンでも階段に沿った主流域が形成されており、一様流に近い気流分布が得られている。数値シミュレーションにより求めた給・排気条件の適正值を表-1に示す。

なお表-1の条件のもとで全体的な風量を変化させたところ、換気回数の増加に伴って踊り場近傍に2次流的な渦領域が発生することがわかった。空気の置換という意味では換気風量は大きく設定した方が有利であるが、階段室では主流領域での流路が複雑に回り込む形となるため換気風量の増加に伴って2次流を形成しやすくなる



(a) 給排気条件を適正化しない場合 (b) 給排気条件を適正化した場合

図-3 室内気流状態の解析結果

表-1 給・排気条件の適正值

吹き出し口	気流角度	吸い込み口	吸引量比率
S1	30°	R1	10.4%
S2	30°	R1	14.6%
S3	45°	R3	20.8%
S4	45°	R4	54.2%

ものと考えられる。制御空間内での汚染物質の除去という観点からは、2次流による渦領域の発生は好ましくない。検討の結果、本階段室では換気風量を80回/h程度以下とすることが望ましいと判断した。

4. 清浄度回復特性の予測

4.1 微粒子濃度分布の解析手法

気流解析の結果をもとに、階段室内でどの程度の清浄度特性が得られるのかを予測した。気流中における微粒子濃度の分布状態は次式で表される^{4),5)}。

$$\frac{\partial C}{\partial t} + (u_i - \delta_{i,3} v_T) \frac{\partial C}{\partial x_i} = (D + D_t) \frac{\partial^2 C}{\partial x_i^2} + S \dots \dots \dots (6)$$

$$v_T = \frac{C_c d^2 (\rho_p - \rho) g}{18\mu} \dots \dots \dots (7)$$

$$D = \frac{C_{CK} T}{3\pi\mu d} \dots \dots \dots (8)$$

- C : 空間の粒子濃度
- v_T : 粒子の終末沈降速度
- D : 分子拡散による拡散係数
- D_t : 乱流による拡散係数 ($\approx \epsilon$)
- S : 粒子濃度の生成・消滅項

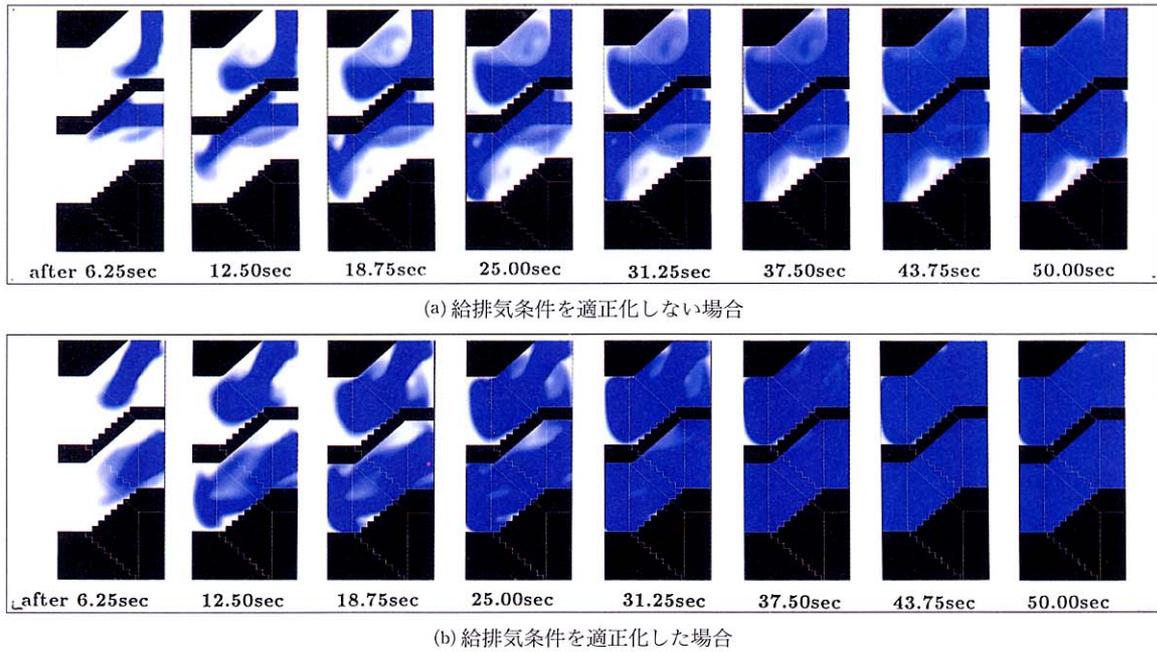


図-4 粒子濃度の非定常解析結果

- C_c : カニングガムの補正係数
- d : 粒子の力学的相当径
- ρ_p : 粒子密度
- g : 重力加速度
- μ : 空気の粘性係数
- k : ボルツマン係数
- T : 空気の温度

生成・消滅項には粒子の凝集，凝縮による濃度変化をモデルとして組込むことも可能であるが，制御空間内の微粒子濃度が十分希薄であることを考慮すると，これらの影響は無視できる。

クリーンルーム内などでの微粒子挙動を解析する方法としては，この他にラグランジュ的な運動方程式により粒子追跡を行う方法⁶⁾も提案されているが，(6)式では空間的な粒子濃度を変数としているため，制御空間の特性を評価する上では都合がよいと考えた。

4.2 微粒子濃度の時間変化と清浄度回復特性

図-4は領域内での粒子濃度変化を解析した結果である。計算には粒径 $0.5\mu\text{m}$ の単分散粒子を仮定し，室内全域に粒子が発生したものととしてその後の濃度変化を非定常解析した。図では初期濃度で正規化した粒子濃度を50階調の濃淡で表しており，白い部分が高濃度領域を，濃紺の部分が低濃度の領域を表している。

ここでは比較のため2種類の給・排気条件について解析した結果を示したが，吹き出し角度を調整しない図-4(a)の条件では清浄度の回復が遅く，旋回流が形成される領域では特に粒子が除去されにくくなることがわかる。一方，給・排気条件を適正化した図-4(b)の条件では，清浄気流の供給に伴って微粒子が速やかに除去されており，50秒経過した時点では高濃度の領域は認められ

ない。

解析結果をもとに実際の清浄度回復特性を見積もって見た。クリーンルーム用衣服を着用した作業員からの発塵量についてはこれまでいくつかの測定が行われており，ラジオ体操など比較的激しい運動をした場合でも粒径 $0.5\mu\text{m}$ 以上の粒子発生量は最大 4×10^6 (個/min・人)程度であることが示されている⁷⁾。また今回対象としたものと同様の階段で測定した作業員の通過時間は30~40秒程度であった。通過時間内に発生する粒子が作業員の通過領域に一樣に分散するものと仮定して初期濃度を計算すると，作業員一人が階段を通過した場合の領域内の微粒子濃度は約 $5,000$ 個/ ft^3 となる。図-4に示した結果と比較すると，クラス100までの回復時間は数100秒以内であり，要求性能は十分満足できるものと予測される。

5. 実階段室での特性評価

5.1 設計条件の具体化

4章までの検討により得られた設計条件に従い，実際の階段室を設計，施工した。吹き出し気流角度の設定にはルーバを用い，可視化により気流方向を確認しながらルーバ角度の調整を行った。また各部の吸い込み流量はレターンダクトのダンパにより調整した。なお換気回数 84 回/hである。

5.2 気流状態および清浄度特性の評価

基本特性として室内の気流状態および清浄度レベルを評価した。図-5は3次元超音波風速計(カイジョウ製WA-390)により測定した気流分布である。ルーバによる吹き出し気流角度の調整により，階段室には数値シミュレーションにより予測したものと同様な気流状態が得られていることがわかった。

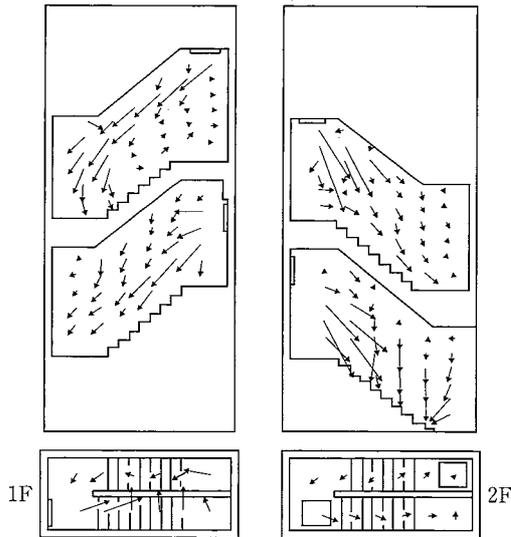


図-5 気流分布の測定結果

清浄度測定にはパーティクルカウンタ (HIAC/ROIKO 5230) を使用した。Fed.Std.209 E による清浄度評価では、床面積の平方根に相当する点数で測定を行うこととされている。階段表面や踊り場床面を含めた総床面積から計算すると測定点数の下限値は4箇所となるが、階段室は3次元的な構造を有している。ここでは平面的な測定点数を16点とし、作業者の足元高さ (FL+500 mm) および腰の高さ (FL+1,200 mm) に測定器のプロブを設置して合計32点での測定を行った。清浄度測定結果を粒子カウント数の頻度分布として示したものを図-6 に示す。クラス100程度の清浄空間では粒子カウント数の頻度がポアソン分布にしたがうことが知られている。図には測定結果から求めたポアソン分布の近似曲線を併記したが、本階段室の清浄度は要求性能であるクラス100を95%信頼性限界¹⁾ (Upper Confidential Limit) において満足することを確認した。

図-7 は定点での測定により得られた清浄度の立ち上がり特性である。図には4.2節に示した数値シミュレーションの結果を併記したが、両者は定量的によく一致している。また施工した階段室の特性は、数値シミュレーションにより予測した結果と同様、要求性能を十分満足することがわかった。

5.3 各部での清浄度回復特性に関する考察

階段室各部での清浄度回復特性の評価には被験者による歩行実験を行った。実験は被験者2名と測定者1名により以下のような手順で行った。

① 測定者はパーティクルカウンタをセットし、カウント値が定常状態となった時点で1F側扉の外に待機している被験者に無線連絡する。このとき測定者は測定器プロブの風下側で待機する。

② 連絡を受けた被験者1が、続いて被験者2が10秒の間隔をおいて階段を昇り始める。

③ パーティクルカウンタによる計測は2名の被験者が測定器のプロブを通過し、2Fの扉の外に退出する

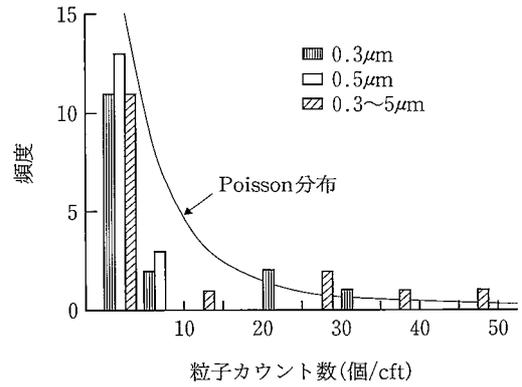


図-6 清浄度の測定結果

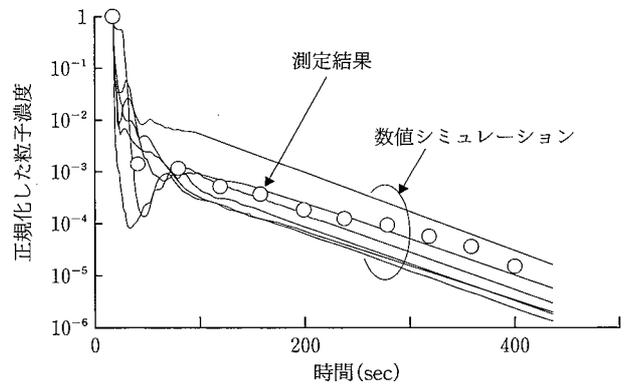


図-7 清浄度の回復特性

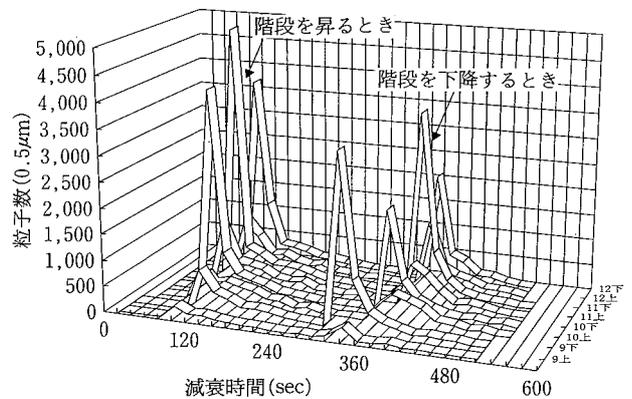


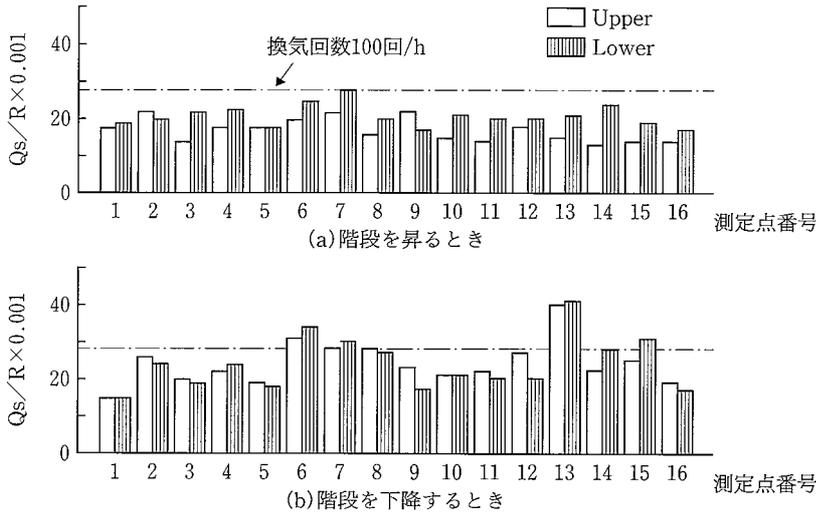
図-8 粒子数変化の測定結果

まで継続する。扉の外に退出した被験者は測定者に無線連絡し、1回の測定を終了する。

④ 被験者が2Fから1Fに下降する場合についても同様の手順により測定を行う。

実験の結果得られたデータ例を図-8に示す。パーティクルカウンタによる計測値には被験者が階段を昇る場合、下降する場合の粒子濃度のピークが現れている。

清浄度回復特性の評価には、被験者が測定器のプロブを通過した直後からの粒子濃度の減衰カーブを用いた。プロブの周辺を検査空間とした場合、そこでの粒子濃度の変化は次の常微分方程式で表せる⁸⁾。



* 測定点は1Fから2Fまでの階段通路を16分割した各点とした。測定点番号は2F側から階段を下降する方向に設定してある。
Upperは各測定点でのFL+1,200mm, LowerはFL+500mmにおける値を示す。

図-9 各部における実質換気回数

$$R \frac{dC}{dt} = M - (C - C_{out})Q_{out} - \eta C Q_s \quad \dots\dots(9)$$

- R : 検査空間の体積
- M : 発塵量
- η : フィルターの粒子捕集効率
- C_{out} : 検査空間周辺の粒子濃度
- Q_{out} : 周辺と検査空間との空気の流入/流出流量
- Q_s : フィルターから供給される空気の流量

また(9)式の解析解は次式で与えられる。

$$C(t) = C(0) \cdot \exp\left(\frac{Q_{out} + \eta Q_s}{R} \cdot t\right) + \frac{C_{out} Q_{out} + M}{Q_{out} + \eta Q_s} \left\{ 1 - \exp\left(\frac{Q_{out} + \eta Q_s}{R} \cdot t\right) \right\} \dots\dots(10)$$

ここで対象とする検査空間では外部からの流れ込みや被験者以外の発塵源はない。また簡略化のためフィルタ効率を100%とすると空間内での任意時刻における粒子濃度は次式のように表せる。

$$C(t) = C(0) \cdot \exp\left(\frac{Q_s}{R} \cdot t\right) \quad \dots\dots(11)$$

左辺の指数部は粒子濃度の減衰カーブから求めることが可能であり、指数関数の内部にある Q_s/R は検査空間における局所的な実質換気回数に対応する。ここでは測定結果の減衰カーブを最小2乗近似し、室内各部における清浄度回復特性を評価した。

図-9は被験者が階段を昇る場合、下降する場合について集計した結果である。本階段室の換気回数は84回/hであるが、測定点の多くにおいて実質換気回数はこれを上回っており、100回/hを越えている箇所も認められる。特に被験者が階段を下降する場合にはその傾向が顕著である。階段を昇る場合にはプローブを通過した後も被験者がその上流側に位置することとなるが、階段を下降する場合には被験者自身からの発塵が減衰カーブに影響しない。その意味では図-9(b)の結果は階段室そのものの清浄度回復特性を表すものと考えられる。

6. まとめ

階段室のクリーンルーム化を目的として気流および粒子濃度変化の数値シミュレーションを行い、給・排気条件の検討を行った。またその結果をもとに設計、施工した実際の階段室においてその清浄度特性を評価した。その結果、数値シミュレーションによる予測結果は実測値と定量的に一致しており、施工した階段室は要求性能を十分満足することを確認した。

階段室のような3次元構造を有する屋内空間では、経験的に気流計画のための現象予測を行うことが困難である。数値シミュレーションを応用した設計条件の検討は、このような複雑形状の屋内気流計画を考える上で有効な設計手法となり得ることを示した。

参考文献

- 1) Fed. Std. 209E, Federal Standard USA, Airborne Particulate Cleanliness Classes in Cleanrooms and Clean Zones, (1992)
- 2) Patankar, S. V.: Numerical Heat Transfer and Fluid Flow, Hemisphere Publishing Corp., (1980)
- 3) Launder, B. E. and Spalding, D. B.: Mathematical Models of Turbulence, Academic Press, (1972)
- 4) 諏訪:クリーンルームにおける微粒子の挙動, 日本機械学会講習会教材, No.940-11, 混相流の数値解析, p. 55~60, (1994)
- 5) Hinds, W. C.: Aerosol Technology, John Wiley & Sons, Inc., (1982)
- 6) 都築, 他: クリーンルーム内気中じんあい挙動解析, 日本機械学会論文集(B編), Vol.53, No.493, p.2771~2776, (1987)
- 7) 鈴木, 藤井, 早川: クリーンルーム用衣服着衣者からの発塵量および発塵機構, 日本建築学会計画論文報告集, No.386, p.43~52, (1988)
- 8) 早川 編: クリーンルーム, 井上書院, (1985)