

次世代クリーンルームの汚染制御技術に関する研究（その4）

——天井チャンバの最適設計の検討——

謝 国 平 宮 川 保 之

Study on Technology of Contamination Control in Cleanroom Environments (Part 4)

——Design of Plenum Chamber for Unidirectional Flow Cleanrooms——

Guoping Xie Yasuyuki Miyagawa

Abstract

Reasonable designs of plenum chambers are very important for uniform airflow distribution in unidirectional flow cleanrooms. The relation between airflow uniformity and plenum chamber configuration has been studied in this paper.

The influence of the height of the plenum chamber and the velocity of airflow introduced into the chamber on airflow uniformity is investigated experimentally. In addition, a numerical simulation method to predict airflow uniformity is proposed, taking into account the characteristics of the filter's pressure loss. The calculation domain in this study includes not only the cleanroom, but also the plenum chamber and the exhaust chamber. The validity of the numerical method is also verified by comparing the simulation results with the experiments. Finally, the method is used to obtain an appropriate height for the plenum chamber.

概 要

本研究は、天井チャンバ方式のクリーンルームを対象に、気流の均一性について模型実験及び数値解析により検討し、クリーンルーム天井チャンバの最適設計のための基礎資料を得ることを目的としている。

まず、模型実験を行い、天井チャンバの高さ、チャンバへの吹出し風速がクリーンルーム内の気流の均一性に影響を及ぼすことを確認した。次に、フィルタの圧力損失の特性を考慮した数値シミュレーション手法を提案し、シミュレーション結果と実験結果とを比較することによって、数値解析手法の有効性を確認した。最後に、給気ノズルの高さをパラメータとして、数値解析手法を用いて気流分布の均一性を検討することにより、適切な天井チャンバ高さの設計方法を提案した。

1. はじめに

垂直整流型クリーンルームにおいて設計清浄度を維持するためには、発生した汚染物質を室外へ速やかに排除し、製品への汚染を未然に防止することが必要である。このためクリーンルームの設計においては室内の気流速度を均一化し、風向のそろった流れを形成するような構造が要求される。特に半導体デバイスの製造ラインとして使用するクリーンルームでは、室内の気流のばらつきにより生じる偏流などが、隣接する製造プロセスへのクロスコンタミネーションの原因となる。このため、4 Mbit以上の DRAM (Dynamic Random Access Memory) 製造用クリーンルームでは、空間的な風速のばらつきが10%以内となるような気流分布が経験的に要求されている。

クリーンルームにおける偏流の発生要因には、天井及び床下チャンバでのダクト配置の偏りや障害物によるネック風速の発生、室内に設置する設備などのレイアウト

の偏りなどが考えられる。室内全体にわたって均一な気流分布を得るには、まずフィルタからの吹出し風速及び床面でのリターン風速を均一化することが必要である。なかでも天井チャンバについては、その後流側であるクリーンルーム内の気流状態に大きく影響するものと考えられ、チャンバ構造や運転条件と風速の均一性との関係を明確化することがクリーンルーム設計において重要である。

気流の均一性に関しては、天井チャンバを連続分配ダクトと仮定してクリーンルーム内の気流分布を計算するもの¹⁾と、連続方程式及び運動量方程式を数値解析し室内の流れ場を求めるもの^{2)~4)}の2つの考え方がある。前者は、ベルヌーイの定理に基づいたもので、計算が簡単なため、ダクト及びチャンバ高さの目安を決定する手法として用いられることがある。しかし、この方法には、流れ場の1次元解析しかできないこと、給気ダクトからの流れによる誘引現象を考慮できないこと、室内に製造装置が設置された場合に対応できないこと、などの問題

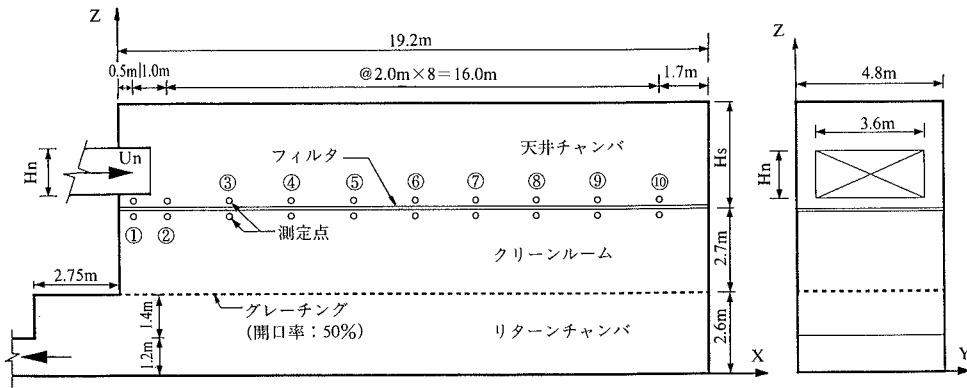


図-1 天井チャンパ方式のクリーンルームの断面

がある。一方、数値解析を行った場合には、吹出し口での誘因現象や装置の配置による気流の変化を3次元的に再現することが可能である。

数値解析手法を用いた研究例としては、前田・田中ら^{1),2)}及び Sadjadi ら⁴⁾の報告がある。前田・田中らは、フィルタ面からの気流速度が均一であると仮定し、床面の開口率や室の長さによる風向の変化について検討を行っている。しかし、対象領域としてフィルタより上流側の系を考慮しておらず、天井チャンパの構造などに起因する風速分布のばらつきについては検討していない。Sadjadi らは、天井チャンパの高さと気流のばらつきとの関係について、数値解析による検討を行っているが、解析結果についての実験的な検証が十分には行われておらず、予測手法の有効性については検討を必要としている。

本研究では、まず天井チャンパの高さ及びチャンパへの吹出し風速がクリーンルーム内気流の均一性に及ぼす影響について実験的な検討を行った。またフィルタの圧力損失特性を考慮した気流の数値解析手法を提案し、実験結果との比較により本手法の有効性を確認した。さらに提案した数値解析手法を用いて吹出し風速やチャンパ構造の適正化を試みた。以下、これらの結果を報告する。

2. 模型実験

本研究で対象とする天井チャンパ方式クリーンルームの断面を図-1に示す。本クリーンルームではその上流側に天井チャンパ、下流側に床下チャンパを有し、フィルタ面から床面へと下降流を形成する。天井チャンパ(高さ H_s : 1.95~3.37 m)への給気は、チャンパの片側に取付けたノズル(高さ H_n : 0.5~1.5 m)により行方。クリーンルームそのものの寸法は $19.2 \times 4.8 \times 2.7$ mとした。

実験は、縮尺1/10の模型を用いて行った。模型に用いたフィルタについては、実用風速範囲内で実際の HEPA フィルタと同等の特性を有する疑似フィルタを製作した。

図-2に疑似フィルタの圧力損失と面風速との関係を示す。図中の疑似フィルタ C は、面風速 0.1~0.5 m/s の範囲で、圧力損失と面風速とは直線関係にあり、また直線の勾配が HEPA フィルタとほぼ一致している。

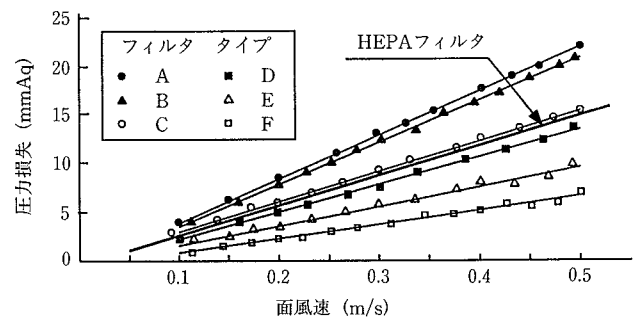


図-2 疑似フィルタの面風速と圧力損失との関係

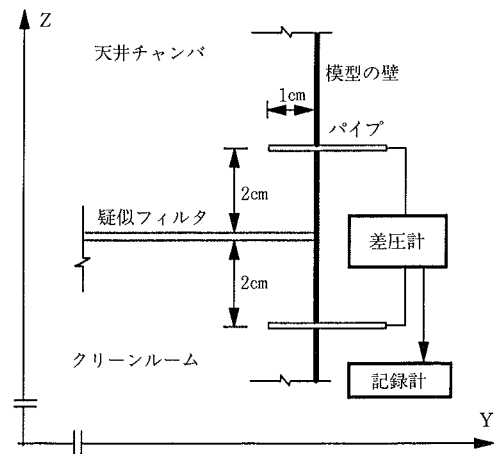


図-3 差圧測定の概要

2.1 実験方法

実験には、フィルタを通過する風速として実際と同じ風速を与えて測定を行った。

模型実験の場合、圧力損失に関する相似条件は次式で与えられる。

$$n_c \cdot n_u^{n-2} = 1 \quad \dots\dots(1)$$

ここで、 n_c : 模型の抵抗係数と実物の抵抗係数の比

n_u : 模型の風速と実物の風速の比

n : 圧損と風速の関係を表わすべき指数

本研究では、図-2に示すように、 $n=1$ 。また、模型に用いた疑似フィルタと実物では抵抗係数が等しいため、 $n_c=1$ となる。従って、模型実験に実風速を用いることが必要条件となる。

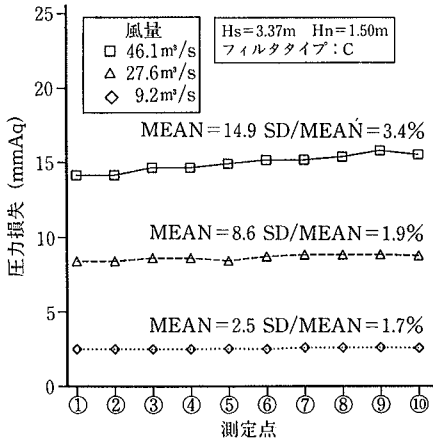


図-4 Hs=3.37, Hn=1.5 m の時の差圧分布

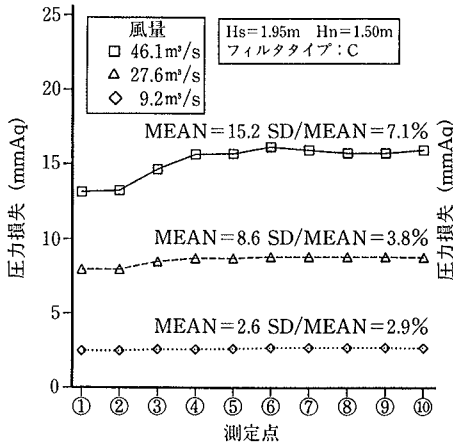


図-5 Hs=1.95, Hn=1.5 m の時の差圧分布

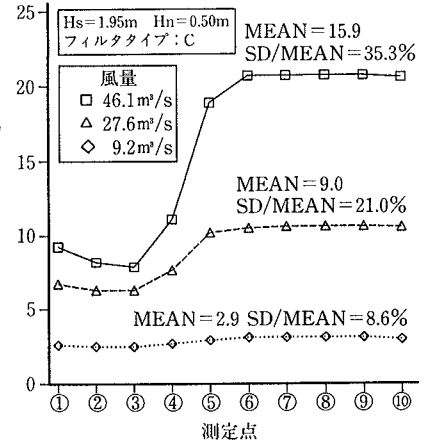


図-6 Hs=1.95, Hn=0.5 m の時の差圧分布

実験には、10台の校正済みの差圧計 (YAMAMOTO ELECTRIC WORKS Co., MANOSTAR GAGE, WO-80) を用いて、図-1 に示した①~⑩の測定点におけるフィルタ上流側と下流側の差圧を同時に測定した。

測定点の Y 方向での位置については、サンプリングパイプが気流に及ぼす影響を抑えるため、天井チャンバ内でのパイプをできるだけ短くすることが望ましい。また、模型の壁面による影響を受けないよう、測定点がある程度壁面から離す必要がある。そこで予備実験を行い、図-3 に示すように、壁面の影響を受けない範囲で最もパイプが短くなる 1 cm の位置に測定点を設定した。Z 方向については、それぞれフィルタの上面と下面から 2 cm の位置とした。

図-2 に示したように、フィルタの差圧と面風速とは比例関係にあることから、本研究では天井面での差圧分布を測定することになり、フィルタ面での風速分布の均一性を評価することとした。

実験条件は次のとおりである (以下、風速、風量及び寸法については、実物に換算して表わす)。

- (1) ファンの送風量：9.2, 27.6, 46.1 m³/s の 3 種類。これに対応したフィルタ直下の平均風速 (風量/天井面積) はそれぞれ 0.1, 0.3, 0.5 m/s となる。
- (2) 天井チャンバの高さ Hs：1.95, 3.37 m の 2 種類。
- (3) 給気ノズルの高さ Hn：0.5, 1.5 m の 2 種類。ノズル高さの変更によりチャンバへの吹出し風速を変化させた。

2.2 実験結果及び考察

天井チャンバの高さを 3.37 m、給気ノズルの高さを 1.5 m としたときの差圧分布を図-4 に示す。ここでは供給風量を 46.1, 27.6, 9.2 m³/s (ノズルからの吹出し風速はそれぞれ 8.6, 5.1, 1.7 m/s) の 3 段階に変化させた場合について併記した。いずれの場合も SD/MEAN (標準偏差/平均値) は 5% 以下となっている。

図-5 は給気ノズルからの吹出し風速を前述のケースと同様に設定し、天井チャンバの高さを 1.95 m に下げた場合である。図-4 の場合に比べて SD/MEAN が大きくなっており、特に供給風量が多い場合には、ノズル付

近での差圧が平均値より小さくなっていることがわかる。

天井チャンバの高さを 1.95 m に設定したまま、さらにノズル高さを 0.5 m として吹出し風速を増大させた場合の差圧分布を図-6 に示す。風量 46.1 及び 27.6 m³/s (ノズルの吹出し風速はそれぞれ 25.7, 15.4 m/s) のとき、差圧分布には大きなばらつきを生じており、SD/MEAN はそれぞれ 35.3%, 21.0% に達している。

実験の結果、天井チャンバの高さとノズルからの吹出し風速は気流の均一性に大きく影響を及ぼすことがわかった。特に、吹出し風速を大きくするとノズル付近での差圧が極端に低下している。これはネック風速により誘引が生じたためと考えられる。なお、図-5 及び図-6 をみると、天井チャンバの高さが十分でない場合でも、吹出し風速が小さければ十分均一な気流が得られることがわかる。

3. 気流の数値解析

3.1 数値解析の概要

クリーンルーム内気流の数値解析に関しては、グレーチングなど計算格子よりも小さな障害物に対し、セル内での流体占有率の変化及びそれによる圧力損失の双方を考慮するアプローチ⁵⁾と、運動量方程式にのみ圧力損失の効果を付加するアプローチ⁴⁾とがこれまでに提案されている。フィルタメディアのような障害物を対象とする場合には、圧力損失のみを考慮すればよいと考えられ、ここでは運動量方程式のソース項としてフィルタ特性をモデル化した。

解析対象は天井チャンバ及び床下チャンバを含めたクリーンルーム系の全体として、k-ε 型 2 方程式乱流モデル⁶⁾を用いて 3 次元の流れ場を解析した。基礎方程式を以下に示す。

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad \dots\dots\dots(2)$$

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

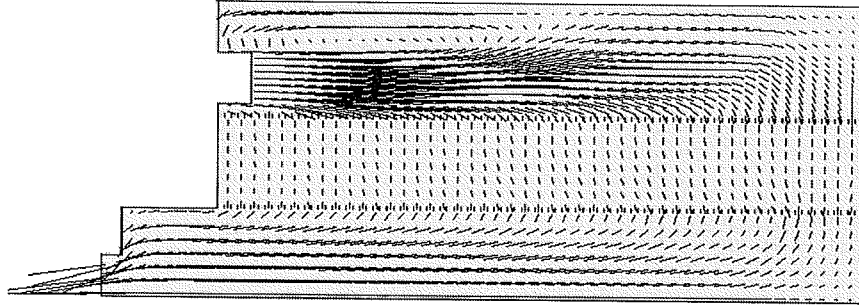


図-7 風量 46.1 m³/s, Hs=3.37 m, Hn=1.5 m の時の風速ベクトル(1)

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

$$\frac{\partial \epsilon}{\partial t} + \frac{\partial \epsilon u_j}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\nu_t}{\sigma_\epsilon} \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right) + C_1 \frac{\epsilon}{k} \nu_t G_s - C_2 \frac{\epsilon^2}{k} \quad \dots\dots(5)$$

$$\nu_t = C_D \frac{k^2}{\epsilon} \quad \dots\dots(6)$$

ここで,

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

$$\sigma_k = 1.0, \sigma_\epsilon = 1.3, C_D = 0.09, C_1 = 1.44, C_2 = 1.92$$

(2)~(6)式の離散化にはコントロールボリューム法を用いた。移流項には QUICK 法⁷⁾, 拡散項には中心差分法を用いて離散化方程式を構成し, SIMPLE 法⁸⁾により定常解を求めた。

計算に用いたメッシュ分割については, ケースによって異なるが, 113×24×47 から 113×24×54 のメッシュを用いた。給気ノズルの位置はメッシュ幅を 10 cm, その他の部分では 20 cm の等間隔とした。

境界条件として壁面には対数則を, また天井チャンバへの給気ノズルには流入速度 U_n , 乱流エネルギー k [$k=0.005 U_n^2$], エネルギー散逸率 ϵ [$\epsilon=0.09 k^{3/2}/(Hn/2)$] をそれぞれ固定値として与えた。

(3)式におけるソース項 S は, 流体セルについて $S=0$, フィルタまたはグレーチング床を含むセルでは圧力損失の効果を考慮して, 次式のように表わした。

$$S = \Delta p / \Delta z \quad \dots\dots(7)$$

$$\Delta p = -A w^n \quad \dots\dots(8)$$

フィルタに関しては, 図-2の実験結果から, $n=1$, $A=245$ を用いた。

グレーチング床に関しては, 開口部での圧力損失の場合と同様に, $n=2$ である。これについては老川ら⁹⁾の測定によっても実証されている。また, 同測定によると, グレーチング床の開口率が50%の時に, $A=1$ となる。

3.2 数値解析結果と実験結果との比較

チャンバへの供給風量及び天井チャンバ, 給気ノズルの高さを次のように組合せた場合について数値解析を行った。すなわち,

- ① 供給風量 46.1 m³/s, Hs=3.37 m, Hn=1.5 m
- ② 供給風量 46.1 m³/s, Hs=1.95 m, Hn=1.5 m
- ③ 供給風量 46.1 m³/s, Hs=1.95 m, Hn=0.5 m

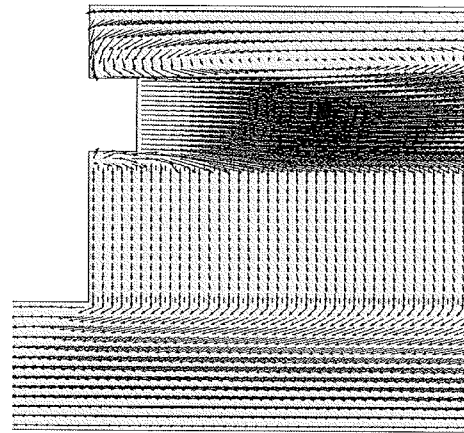


図-8 風量 46.1 m³/s, Hs=3.37 m, Hn=1.5 m の時の風速ベクトル(2)

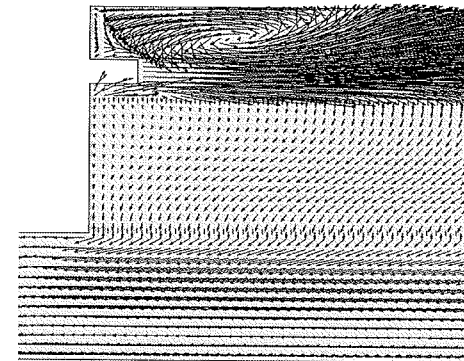
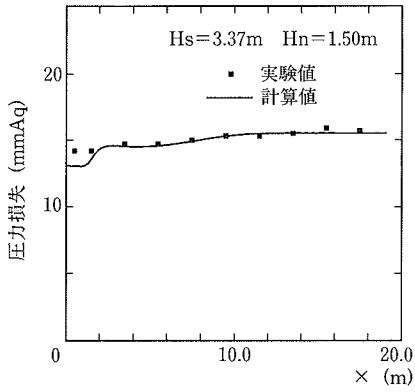


図-9 風量 46.1 m³/s, Hs=1.95 m, Hn=0.5 m の時の風速ベクトル

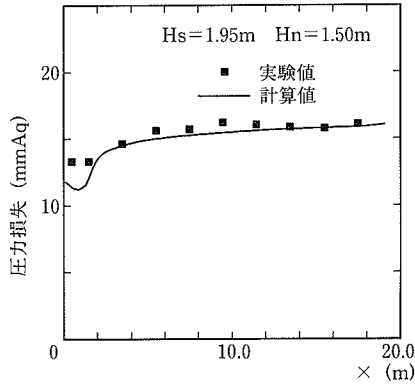
④ 供給風量 27.6 m³/s, Hs=1.95 m, Hn=0.5 m

図-7にケース①の解析結果を風速のベクトル分布として示し, また図-8にノズル付近の領域を拡大して示している。ただし, 図-7ではX方向とZ方向のベクトルを1本おきに間引いて示してある。クリーンルーム空間においては, ほぼ全面的に下降流を形成しており, かつ均一な気流分布を示している。

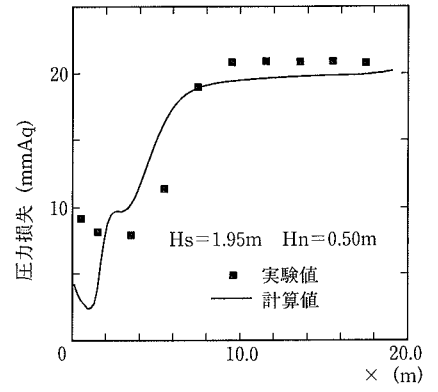
HsとHn両方とも小さいケース③の解析結果を図-9に示す(ノズル付近の拡大図)。天井チャンバの左上では旋回流が形成されること, ノズルの直下では誘引が生じて, フィルタを通過する風速がばらつくことが解析に



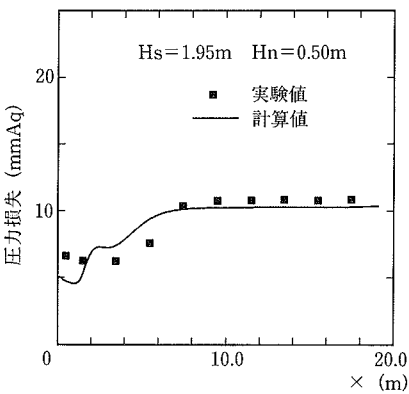
図一10 風量 46.1 m³/s の時の計算値と実験値との比較



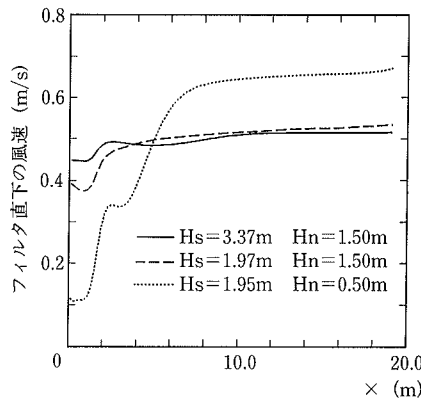
図一11 風量 46.1 m³/s の時の計算値と実験値との比較



図一12 風量 46.1 m³/s の時の計算値と実験値との比較



図一13 風量 27.6 m³/s の時の計算値と実験値との比較



図一14 フィルタ面直下の風速分布 (風量 46.1 m³/s)

表一1 Hn, \bar{U}_r と SD/ \bar{U}_r の関係

Hn (m)	Un (m/s)	\bar{U}_r (m/s)	SD (m/s)	SD/ \bar{U}_r (%)
1.0	12.8	0.5	0.073	14.6
1.2	10.7	0.5	0.054	10.8
1.5	8.6	0.5	0.040	8.0
1.7	7.5	0.5	0.036	7.2
2.0	6.4	0.5	0.028	5.6
2.2	5.8	0.5	0.023	4.6
2.5	5.1	0.5	0.020	4.0

よって再現された。このため、クリーンルーム空間での気流分布はケース①に比べかなり不均一となっている。

ケース①～④の解析結果を、フィルタの上下面での差圧分布としてまとめたものを図一10～13に示す。前述した実験結果を比較のため併記した。

いずれの場合も、数値解析により求めた差圧分布は実験結果と定量的に一致しており、全体的な傾向からも解析結果が実際の現象をよく再現していることがわかる。このことから、本研究で提案した数値解析手法を用いて天井チャンバ構造の気流均一性への影響を検討することは十分可能と考えられる。ただし、吹出し風速の大きい図一12の条件で特に顕著なように、ノズルに近い部分での差圧分布には実験値との差異が認められる。その原因については、乱流モデルを含めて詳細な検討の余地はあるが、本研究では全体的な傾向に着目しており、局所的な差異は実用的にそれほど大きな支障がないと考える。

なお、図一14は、図一10～12と同様の条件についての数値解析結果を、フィルタ面直下における風速の分布としてまとめたものである。当然のことながら、差圧分布と風速分布とは傾向的によく一致している。このことから、差圧分布によって風速の均一性を評価することの妥当性が確認された。

4. 吹出し風速と天井チャンバ高さの適正値の検討

対象としたクリーンルームについての気流の均一化を目的として、ノズルからの吹出し風速及び天井チャンバ高さの適正値の算定を試みた。

模型実験及び数値解析の結果から、フィルタ面においてより均一な気流分布を得るためには、天井チャンバ高さを大きくとり、かつノズルからの吹出し風速を小さく抑えることが有効と考えられる。しかし建設コストなどの面からはチャンバの高さを適当な範囲に抑えることが要求されるため、チャンバの高さを増大させない方向で風速の均一化を考えていく必要がある。そこで、まずフィルタ面での風速の均一化を考慮してノズルからの吹出し風速の適正値を決定し、これに見合うノズルの高さ Hn と施工・メンテナンス作業に必要な余裕高さ α の和として、チャンバの高さ Hs (Hs = Hn + α) を求めていく方法が現実的と考えられる。

ここでは供給風量を 46.1 m³/s、 α を 0.5 m に固定して Hn を変化させ、それぞれの場合について数値解析を行い、フィルタ面での風速の均一性を比較した。解析により得られた結果を表一1に示す。Hn を大きくすると、風速のばらつき (SD/ \bar{U}_r) は単調に減少している。この関

係を、ノズルからの吹出し風速 U_n と SD/\bar{U}_f との関係として整理したものを図-15に示す。両者はほぼ比例関係にあると認められ、ここで対象としたクリーンルームについて係数を求めると次式が成り立つ。すなわち、

$$SD/\bar{U}_f(\%) = 1.35U_n - 3.1 \quad \dots\dots\dots(9)$$

従って、フィルタ面における風速のばらつきを10%以内に抑えるためには U_n を 10 m/s 以下 ($H_n \geq 1.3$ m), H_s を 1.8 m 以上に、また、ばらつきを 5%以内に抑えるためには U_n を 6 m/s 以下 ($H_n \geq 2.1$ m), H_s を 2.6 m 以上にする必要のあることが算定できる。

5. まとめ

本研究では、整流型クリーンルームを対象として、気流の均一性への天井チャンバ構造の影響について実験及び数値解析により検討を行った。また、その結果をもとにチャンバ構造の適正化を試みた。得られた主な成果を以下にまとめる。

① フィルタ面での風速の均一性は、天井チャンバの高さ及びチャンバへの吹出し風速によって変化する。チャンバの高さは大きいほど、また吹出し風速は小さいほど均一な気流分布が得られる。

② フィルタの圧力損失を考慮した数値解析手法を提案し、チャンバの高さ、吹出し風速及び供給風量をパラメータとした試行解析を行った。実験値と比較した結果、本解析手法によりクリーンルーム内の気流の均一性を定量的に予測できることがわかった。

③ 数値解析手法を用いて天井チャンバとノズル寸法の適正値を検討し、フィルタ面で均一な気流分布を得るためのクリーンルーム設計法を提案した。

④ フィルタ面での風速のばらつきとノズル吹出し風速とはほぼ比例関係にあることを見出した。この関係から、風速のばらつきを特定の範囲に抑えるために必要なノズル寸法を算定できることがわかった。

今後は、室内の設備レイアウトや床面・床下チャンバの設計法についても検討していく必要がある。

謝 辞

本研究を進めるにあたり、数値解析研究室 諏訪好英氏、片岡浩人氏、並びにエンジニアリング本部 渥美勝利氏には多大なご協力をいただいた。ここに記して御礼を申し上げます。

記 号

- H_n : 給気ノズルの高さ (m)
- H_s : 天井チャンバの高さ (m)
- n : 圧損と流速の関係を表わすべき指数
- n_c : 模型の抵抗係数と実物の抵抗係数の比
- n_u : 模型の流速と実物の流速の比
- p : 圧力 (N/m²)
- Δp : 圧力差 (N/m²), (mmAq)
- SD : 標準偏差 (m/s), (mmAq)
- U_n : ノズルからの吹出し風速 (m/s)

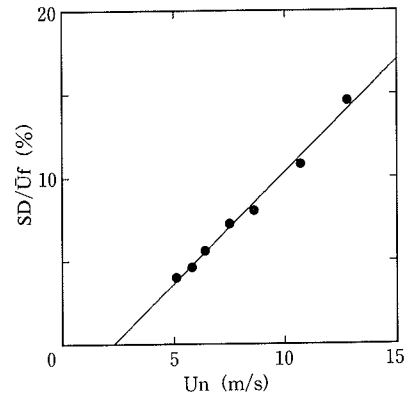


図-15 フィルタ直下気流分布のばらつきとノズル吹出し風速 U_n との関係

- U_f : フィルタ直下の風速 (m/s)
- \bar{U}_f : フィルタ直下の平均風速 (m/s)
- u_i : 速度の3成分 (m/s)
- u : x方向の速度 (m/s)
- v : y方向の速度 (m/s)
- w : z方向の速度 (m/s)
- α : H_s と H_n の差 (m)
- k : 乱流エネルギー (m²/s²)
- ϵ : エネルギー散逸率 (m²/s²)
- ν : 渦動粘性係数 (m²/s)
- ρ : 流体密度 (kg/m³)

参考文献

- 1) 高橋, 他: 垂直層流型クリーンルームの形状と気流分布の不均一度, 第8回空気清浄とコンタミネーションコントロール研究大会, p. 233~237, (1989. 4)
- 2) 前田, 他: クリーンルーム内の気流適正化に関する研究(第1報), 第5回空気清浄とコンタミネーションコントロール研究大会, p. 115~118, (1986. 4)
- 3) 田中, 他: クリーンルーム内の気流適正化に関する研究(第2報), 第5回空気清浄とコンタミネーションコントロール研究大会, p. 119~122, (1986. 4)
- 4) Sadjadi, R. S. M. and Liu, B. Y. H.: Supply Plenum and Airflow Uniformity in Cleanrooms, J. of the IES, (March/April 1991)
- 5) 鈴木, 他: グレーチング圧力損失の $k-\epsilon$ への影響を考慮した改良型2方程式モデル, 空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集, p. 717~720, (1988. 9)
- 6) Lauder, B. E. and Spalding, D. B.: Mathematical models of turbulence, Academic Press, London and New York, (1972)
- 7) Leonard, B. P.: The QUICK algorithm: A uniformity third-order finite-difference method for convective flows, Computer Method in Fluids, Pentech Press, (1980)
- 8) Patankar, S. V.: Numerical heat transfer and fluid flow, McGraw-Hill, New York, (1980)
- 9) 老川, 他: クリーンルーム内の流れを考慮した室圧調整, 第7回空気清浄とコンタミネーションコントロール研究大会, p. 89~92, (1988. 4)