クリーンルーム気流の均一性に関する研究

AIRFLOW UNIFORMITY IN UNIDIRECTIONAL FLOW CLEANROOMS

謝 国平*, 西岡利晃**
Guoping XIE and Toshiaki NISHIOKA

In unidirectional flow cleanrooms, it is important to form a uniform airflow distribution to exhaust quickly contaminants generated indoors. The uniformity of airflow distribution in a cleanroom has been studied as function of the height of plenum chamber and the velocity of flow introduced into the chamber.

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

Keywords: unidirectional flow cleanroom, uniformity of airflow distribution, model, experiment, numerical simulation

整流型クリーンルーム、気流の均一性、模型、実験、数値解析

1. はじめに

本研究では、天井チャンバ方式の整流型クリーンルームの設計に資することを目的として、室内に均一な気流分布を得るための諸条件を実験および数値解析により検討した。

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、天井およ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およ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演算するもの³⁾と、数値解析手法を用いて流れの連続方程式および運動量方程式を解くことにより室内の流れ場を求めるもの¹⁾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、ダクトおよびチャンバ高さの目安を決めるには用いられることがある。しかし、この方法は、流れ場の1次元解析(疑似的に2次元)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、などの問題点が指摘される。これに対して、後者の数値解析は、計算がやや複雑であるが、流れ場の3次元解析が可能で、より緻密な情報(局所的な風速、風向も含む)を得ることができる。また、

* (株)大林組技術研究所 研究員・工博

** 大阪市立大学建築学科 助教授・工博

Research Engineer, Technical Research Institute, Obayashi Corp., Dr. Eng.
Assoc. Prof., Dept. of Arch. & Bldg. Eng., Osaka City Univ., Dr. Eng

図1 天井チャンバ方式のクリーンルームの断面

装置の配置が流れ場への影響も解析できる。

数値解析手法を用いた研究例としては、前田・田中ら¹⁾²⁾および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も上流側の系を考慮しておらず、天井チャンバ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、天井チャンバの高さと気流のばらつきとの関係について、数値解析を行っているが、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。

そこで本研究では、まず天井チャンバの高さおよびチャンバ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チャンバ構造や吹出し風速の適正化を試みた。以下、これらの結果を報告する。

2. 気流の均一性に関する実験

本研究で対象とする天井チャンバ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バ、下流側に床下チャンバを有し、フィルタ面から床面へと下降流を形成する。天井チャンバ（高さ H_s : 1.95~3.37m）への給気は、チャンバの片側に取付けたノズル（高さ H_n : 0.5~1.5m）により行う。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 疑似フィルタの面風速と圧力損失との関係

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0.1~0.5m/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。

2.1 実験方法

圧力損失が生じる流体现象を模型実験で検討する際に、圧力損失に関する相似条件は次式で与えられる。

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

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ベキ指数

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。したがって、 $n_u=1$ でなければならない。即ち、模型実験では実風速を用いることが必要条件である。

一方、レイノルズ数が十分大きな流れの問題では、現象の相似性からも実風速を用いて実験条件を設定する方法がしばしば用いられる。これに関する詳細な検討は勝

田・土屋⁵⁾、村上・加藤⁶⁾によって行われている。本研究で対象とするクリーンルームではレイノルズ数が $10^5 \sim 10^6$ と大きい。

以上のことから、本実験では実風速を使用した。

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の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、模型の壁面による気流分布の影響を受けないよう、ある程度壁面から離れる必要がある。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1cm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2cm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より、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、風量および寸法については、実物に換算して表わす)。

- 1) ファンの送風量：9.2、27.6、46.1 m^3/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 H_s ：1.95、3.37mの2種類。
- 3) 給気ノズルの高さ H_n ：0.5、1.5m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 実験結果および考察

天井チャンバの高さを3.37m、給気ノズルの高さを1.5m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 m^3/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1.95m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、特に供給風量大きい場合には、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1.95mに設定したまま、さらにノズル高さを0.5m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および27.6 m^3/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

図3 差圧測定の概要

図4 $H_s=3.37$ 、 $H_n=1.5\text{m}$ の時の差圧分布

図5 $H_s=1.95$ 、 $H_n=1.5\text{m}$ の時の差圧分布

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および図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. 気流の均一性に関する数値解析

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、グレーディ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およびそれによる圧力損失の双方を考慮するアプローチ⁷⁾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

図6 Hs=1.95、Hn=0.5mの時の差圧分布

図7 解析に用いたメッシュ分割

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。

なお、Sadjadiら⁴⁾の手法では、フィルタの圧力損失を定数(0.5in Aq)としてソース項に与えた。しかし、図2に示したように圧力損失が面風速によって変化するので、圧力損失を固定値にしてしまうと、風速分布の均一性を適切に評価することが困難である。本研究では、風速による圧力損失の変化を考慮して、ソース項を与えた。

解析対象は天井チャンバおよ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⁸⁾⁹⁾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。

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

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

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

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

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

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¹⁰⁾、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¹¹⁾により定常解を求めた。

計算に用いたメッシュ分割を図7に示す。分割数はケースによって異なるが、113×24×47から113×24×54のものを用いた。給気ノズルの位置はメッシュ幅を10cm、その他の部分では20cmの等間隔とした。

図8 風量 $46.1\text{m}^3/\text{s}$ 、 $H_s=3.37$ 、 $H_n=1.5\text{m}$ の時の風速ベクトル(1)

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 [$k=0.005U_n^2$]、エネルギー散逸率 ε [$\varepsilon=0.09k^{3/2}/(H_n/2)$]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。

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

$$\Delta p = -Aw^n \quad (8)$$

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¹²⁾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および天井チャンバ、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。即ち、

- ① 供給風量 $46.1\text{m}^3/\text{s}$ 、 $H_s=3.37\text{m}$ 、 $H_n=1.5\text{m}$
- ② 供給風量 $46.1\text{m}^3/\text{s}$ 、 $H_s=1.95\text{m}$ 、 $H_n=1.5\text{m}$
- ③ 供給風量 $46.1\text{m}^3/\text{s}$ 、 $H_s=1.95\text{m}$ 、 $H_n=0.5\text{m}$
- ④ 供給風量 $27.6\text{m}^3/\text{s}$ 、 $H_s=1.95\text{m}$ 、 $H_n=0.5\text{m}$

図8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9にノズル付近の領域を拡大して示している。ただし、図8では図を見やすくするため、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。

図9 風量 $46.1\text{m}^3/\text{s}$ 、 $H_s=3.37$ 、 $H_n=1.5\text{m}$ の時の風速ベクトル(2)

図10 風量 $46.1\text{m}^3/\text{s}$ 、 $H_s=1.95$ 、 $H_n=0.5\text{m}$ の時の風速ベクトル

図11 風量46.1m³/sの時の計算値と実験値との比較

図12 風量46.1m³/sの時の計算値と実験値との比較

図13 風量46.1m³/sの時の計算値と実験値との比較

図14 風量27.6m³/sの時の計算値と実験値との比較

HsとHn両方とも小さいケース③の解析結果を図10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がケース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11～14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気流の均一性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13の条件で特に顕著のように、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。

図15 フィルタ面直下の風速分布(風量46.1m³/s)

なお、図15は、図11～図13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。

表1 Hn、UnとSD/ $\bar{U}_f$ との関係

Hn (m)	Un (m/s)	$\bar{U}_f$ (m/s)	SD (m/s)	SD/ $\bar{U}_f$ (%)
1.0	12.8	0.5	0.3	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

図16 フィルタ直下気流分布のばらつきとノズル吹出し風速Unとの関係

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および天井チャンバ高さの適正値の算定を試みた。

模型実験およ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($H_s = H_n + \alpha$)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 $46.1\text{ m}^3/\text{s}$ 、 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1に示す。Hnを大きくすると、風速のばらつき($\text{SD}/\bar{U}_f$)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Unと $\text{SD}/\bar{U}_f$ との関係として整理したものを図16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。即ち、

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

したがって、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Unを 10 m/s 以下($H_n \geq 1.3\text{ m}$)、Hs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Unを 6 m/s 以下($H_n \geq 2.1\text{ m}$)、Hsを 2.6 m 以上にすることが算定できる。

5. まとめ

本研究では、天井チャンバ方式のクリーンルームを対象として、気流の均一性について実験および数値解析による検討を行った。また、その結果をもとにチャンバ構造や吹出し風速の適正化を試みた。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およ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、吹出し風速およ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。

本報ではクリーンルームの上流側である天井チャンバについて気流の均一化を検討した。今後は、クリーンルーム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っては、(株)大林組の諏訪好英氏並びに片岡浩人氏には数多くの有益なる御助言をいただき、また実験に際して、同社の渥美勝利氏には多大なご協力をいただき、ここに記して感謝の意を表します。

記号

A	: 圧損と流速の関係を表わす係数	$[-]$
C_1, C_2, C_0	: $k-\epsilon$ 乱流モデルにおける係数	$[-]$
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	$[N/m^2]$
Δp	: 圧力差	$[N/m^2], [mmAq]$
SD	: 標準偏差	$[m/s], [mmAq]$
U_n	: ノズルからの吹出し風速	$[m/s]$
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	$[m^2/s^2]$
ϵ	: エネルギー散逸率	$[m^2/s^2]$
ν_t	: 渦動粘性係数	$[m^2/s]$
ρ	: 流体密度	$[kg/m^3]$
$\sigma_k, \sigma_\epsilon$	: $k-\epsilon$ 乱流モデルにおける係数	$[-]$

参考文献

- 1) 前田、竹浪、田中：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
- 2) 田中、前田、斎木：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
- 3) 高橋、伊藤、岡田：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
- 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) 勝田、土屋：室内空気分布の模型実験に関する研究、第1報～第3報、空気調和・衛生工学会論文集、No.17、p.1～28、1981.10
- 6) 村上、加藤、孔、中川：大架構建築内の温熱・空気環境に関する研究、模型実験による予測法、生産研究、東京大学、39巻9号、p.361～370、1987.9
- 7) 鈴木、村上、加藤、ロンダー：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
- 8) Lauder, B. E. and Spalding, D. B.: Mathematical models of turbulence, Academic Press, London and New York, 1972
- 9) 野村、村上、加藤、佐藤：3次元乱流数値解析と模型実験、数値解析手法を用いる室内空気分布予測法に関する研究、その2、日本建築学会論文報告集、No.298、1980.12
- 10) Leonard, B. P.: The QUICK algorithm: A uniformity third-order finite-difference method for convective flows, Computer Method in Fluids, Pentech Press, 1980
- 11) Patankar, S. V.: Numerical heat transfer and fluid flow, McGraw-Hill, New York, 1980
- 12) 老川、鈴木、梶間、加瀬：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

(1993年9月8日原稿受理、1994年1月31日採用決定)