

クリーンルーム内気流および塵埃挙動解析

Numerical Analysis of Flow and Dust Dispersion in a Clean Room

半導体や磁気ディスクなどの製造はクリーンルーム内で行われる。このクリーンルームの清浄度を保持するためには、各種装置や作業員などから発生した塵埃(じんあい)が、製品を汚染することなく、クリーンルーム外へ排出されるような気流分布の実現が必要である。

そのような気流分布を実現するための手段として、クリーンルーム内の気流分布と、気流中に浮遊する塵埃が拡散していく様子を解析するコンピュータプログラムを開発した。

これらのプログラムを用いることによって、気流分布や塵埃拡散のようすを詳細に予測し、さらに、パラメータサーベイを行って、クリーンルーム内の気流最適化が容易にできるようになった。

都築浩一* *Kōichi Tsuzuki*
 田中晃** *Akira Tanaka*
 浅見欽一郎** *Kin'ichirō Asami*
 飯野利喜* *Toshiki Iino*
 高橋耕造*** *Kōzō Takahashi*

1 緒言

半導体や磁気ディスクまたはバイオテクノロジーなどのハイテクノロジー産業では、製造空間を高清浄に保つことが非常に重要な技術課題となっている。例えば半導体工業の場合、製造過程でウェーハ上に塵埃が付着すると製造不良の原因となる。しかも、半導体の高集積度化とそれに伴うパターンの微細化によって、これまでは問題とならなかったような微小な塵埃までが製造不良の原因となるため、今や環境清浄化技術は微細加工技術とともに、VLSI製造技術を支える主要な基礎技術であると言える。

環境清浄化技術は、発塵の防止、塵埃の拡散防止、洗浄など多くの技術から構成される総合技術であるが、その構成技術の一つに、クリーンルーム内の気流最適化技術がある。半導体工業を例にとれば、各種製造装置や作業員などから発生した塵埃がウェーハに付着しないように、クリーンルーム外へ流し去ってしまうような気流分布を実現しなくてはならない。

従来、この分野の研究、開発は実験によるものが主流であった。しかし、クリーンルーム内の気流分布の最適化には、空気流入口、流出口の配置や換気回数、あるいは室内レイアウトなど多くのパラメータを調整する必要があり、実験的手法だけでは十分なパラメータサーベイを実施するのが困難である。そこで最近では、実験の一部を計算機シミュレーションで代替させるようになってきた。今後は、環境の清浄化に対してこれまで以上に高い水準が求められることが予想されるため、本分野での計算機シミュレーションの占める比重が

ますます大きくなっていくと考えられる。

以上のような背景のもとに、日立製作所と日立プラント建設株式会社では、クリーンルーム内の気流分布を解析するプログラムと、気流中に浮遊する微小塵埃の挙動を解析するプログラムを開発した。

2 気流解析

2.1 室内気流のモデル化¹⁾

一般にクリーンルーム内の気流は流体力学的には乱流である。最近ではこの乱流を解く試みとして、ナビエ-ストークス方程式を直接解いて流れを予測しようとする直接シミュレーションや、ラージエディシミュレーションに関する研究も行われている。しかし、これらの解析手法が工学実用段階に入るまでには、まだ時間がかかるものと思われる。そこでここでは乱流を解く手段として、現在もっともよく用いられているK-ε形二方程式モデルを採用する。

K-ε形二方程式モデルを用いると、気流を表す基礎方程式は次のようになる。なお、式はテンソルで表示してある。

連続の式

$$\frac{\partial U_i}{\partial X_i} = 0 \dots\dots\dots(1)$$

運動方程式

$$\frac{DU_i}{Dt} = -\frac{\partial \pi}{\partial X_i} + \frac{\partial}{\partial X_j} \left\{ (\nu + \nu_t) \left(\frac{\partial U_i}{\partial X_j} + \frac{\partial U_j}{\partial X_i} \right) \right\} \dots\dots(2)$$

* 日立製作所機械研究所 ** 日立プラント建設株式会社 *** 日立製作所中条工場

ここで ν は分子動粘性係数

ν_t は乱流動粘性係数 (5)式

乱流エネルギー K の輸送方程式

$$\frac{DK}{Dt} = \frac{\partial}{\partial X_j} \left\{ \left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial K}{\partial X_j} \right\} + \nu_t \left\{ \left(\frac{\partial U_i}{\partial X_j} + \frac{\partial U_j}{\partial X_i} \right) \frac{\partial U_i}{\partial X_j} \right\} - \epsilon \dots \dots \dots (3)$$

乱流散逸率 ϵ の輸送方程式

$$\frac{D\epsilon}{Dt} = \frac{\partial}{\partial X_j} \left\{ \left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial X_j} \right\} + C_1 \frac{\epsilon}{K} \nu_t \left\{ \left(\frac{\partial U_i}{\partial X_j} + \frac{\partial U_j}{\partial X_i} \right) \right\} - C_2 \frac{K\epsilon}{\nu_t} \dots \dots \dots (4)$$

乱流動粘性係数 ν_t の定義式

$$\nu_t = C_D K^2 / \epsilon \dots \dots \dots (5)$$

なお、上式に含まれる σ_k , σ_ϵ , C_1 , C_2 , C_D は定数であり、実験的に値が定められている。

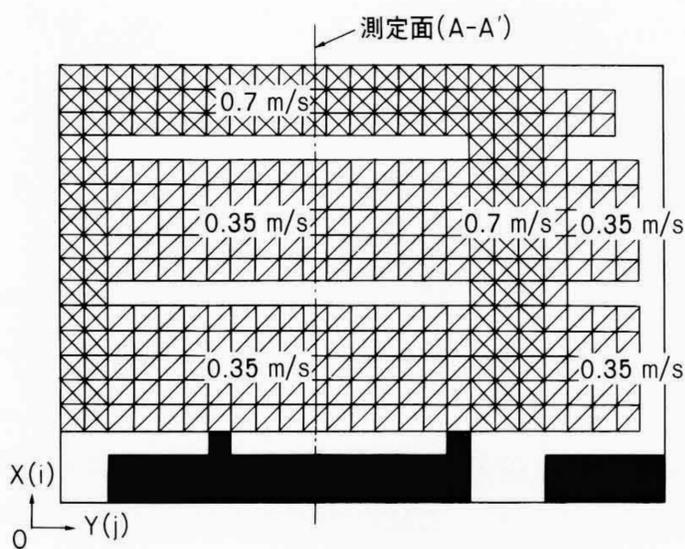
室内の気流分布は、(1)式から(2)式までで表される非線形の方程式系を数値的に解くことによって求まる。数値解析としては、長方形メッシュで解析対象を離散化する差分法と、複雑形状に対応できる、任意形状メッシュで離散化する有限要素法に大別できる。差分法を用いたものは、同じ要素分割数

の有限要素法を用いた解析に比べて計算時間が短く、しかも、計算に必要な記憶容量が少なく済むという経済的な利点がある。しかし、この方法では複雑な形状を持つ空間内の解析を行うには適用しにくいという問題がある。その点、有限要素法は差分法に比べて有利である。したがって、それぞれの解析は一長一短を持っており、解析対象に応じて使い分けることが望ましい。

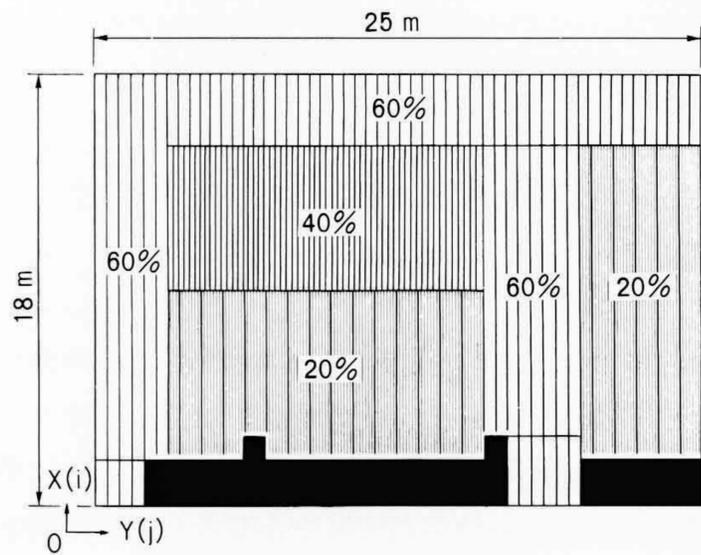
2.2 応用例

2.2.1 垂直層流形クリーンルームの偏流防止(差分法)²⁾

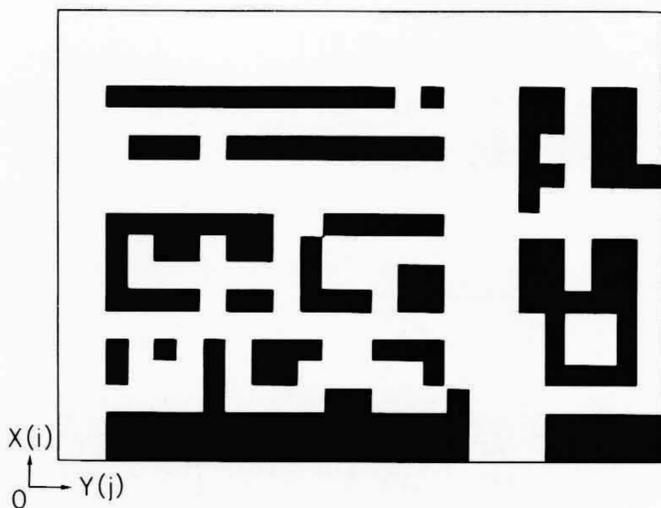
半導体製造工場などでは、天井から清浄空気を吹き出し、発生塵埃をグレーチングと呼ばれる格子状の開口床から除去する垂直層流形クリーンルームが広く採用されている。この方式のクリーンルームでは偏流を防止し、できるだけ一様な垂直下降流とすることが塵埃拡散を抑止することできわめて重要な問題となる。この垂直下降流を得る簡便な方法として開孔率の異なったグレーチング床を配置し、気流の一様性を高める方法が考えられる。この場合、クリーンルーム内の気流分布を事前に予測し、偏流を最小限にする床開口率の最適な選定を行う必要がある。そこで、数値シミュレーション手法を用いて、床開口率と室内気流との関係について検討した。



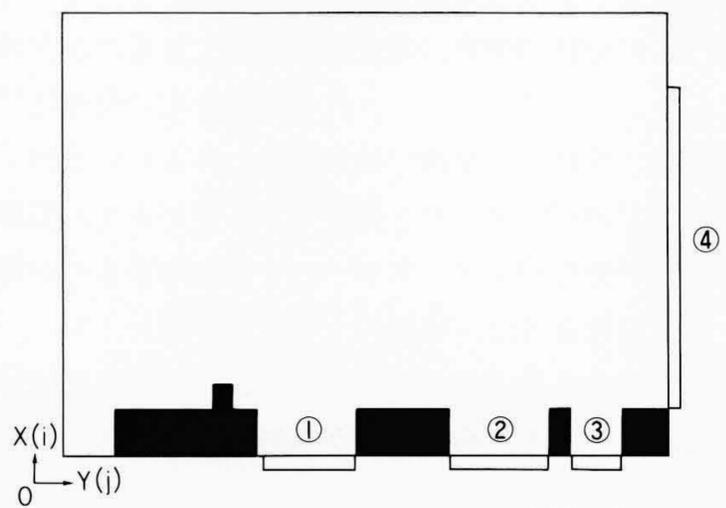
(a) フィルタ配置



(b) グレーチング配置



(c) 機器配置



(d) 吸込口配置(床下)

図1 対象クリーンルームのレイアウト(水平断面) 垂直層流形クリーンルームのフィルタ配置(吹出し速度0.35 m/s, 0.7 m/s), グレーチング配置(20%, 40%, 60%), 機器配置および吸込口配置(床下)を示す。

今回対象とした間仕切りなしの垂直層流形クリーンルームの概要を図1に示す。吹出速度は通路域を0.7 m/s, そのほかは0.35 m/sとし, 床の開口率は60%, 40%, 20%の3種類の異なったグレーチング床から成る。また, 吸込口は床下の側壁に4か所設けてある。まず, 気流シミュレーションの妥当性を確認するために, 機器搬入前のクリーンルーム内の3次元気流解析を行い, シミュレーション結果と実測結果の比較を行った。計算は全体的な流れを把握するために差分法を用いて室内を18×33×15メッシュに分割し, 吸込速度は吹出し風量と吸込風量が一致するように与えた。気流分布の実測は, 図1(a)に示す垂直断面(A-A')で風速および風向を測定した。気流分布のシミュレーション結果と実測結果の比較を図2に示す。シミュレーション結果の全体的な気流パターンは実測結果とおおむね一致しており, またフィルタのない部分では気流が滞留しているようすもよく再現されている。このように, 数値シミュレーション手法を用いることによって実際の気流分布をよく再現できることを確認した。次に, 稼動中のクリーンルームでは, 製造機器が複雑に設置された状態での気流分布が問題となることが多い。そこで, 機器が設置されたクリーン

ンルーム内の気流が, できるだけ垂直下降流になるような床開口率の配置方法について検討した。床開口率の配置を図3に示す。タイプ1のように床開口率を配置した場合の3次元気流シミュレーション結果を図4に示す。同図(a)は垂直断面(YZ断面)の気流分布を, 同図(b)はグレーチング床から0.75 mの位置での水平断面(XY断面)の気流分布のようすを示したものである。気流は吸込口④に向かって偏流していることからわかる。この偏流を防止するために, 吸込口④付近の床開口率を10%と小さくしてシミュレーションした結果を図5に示す。タイプ1に比べて吸込口④付近の床抵抗が大きくなり, 偏流が大幅に改善されることがわかる。このように, 床開口率を変えた場合の気流分布を3次元的に解析することによって, 適正な気流分布を見いだすことが可能となった。

2.2.2 作業者周りの気流(有限要素法)

クリーンルーム内に作業者がいるときに, 気流がどのような影響を受けるかを検討することは, クリーンルーム内清浄度保持のうえで重要である。このような解析では, 複雑な形状の空間が解析対象となるので, メッシュ形状の自由度が大きい有限要素法を用いるのが便利である。

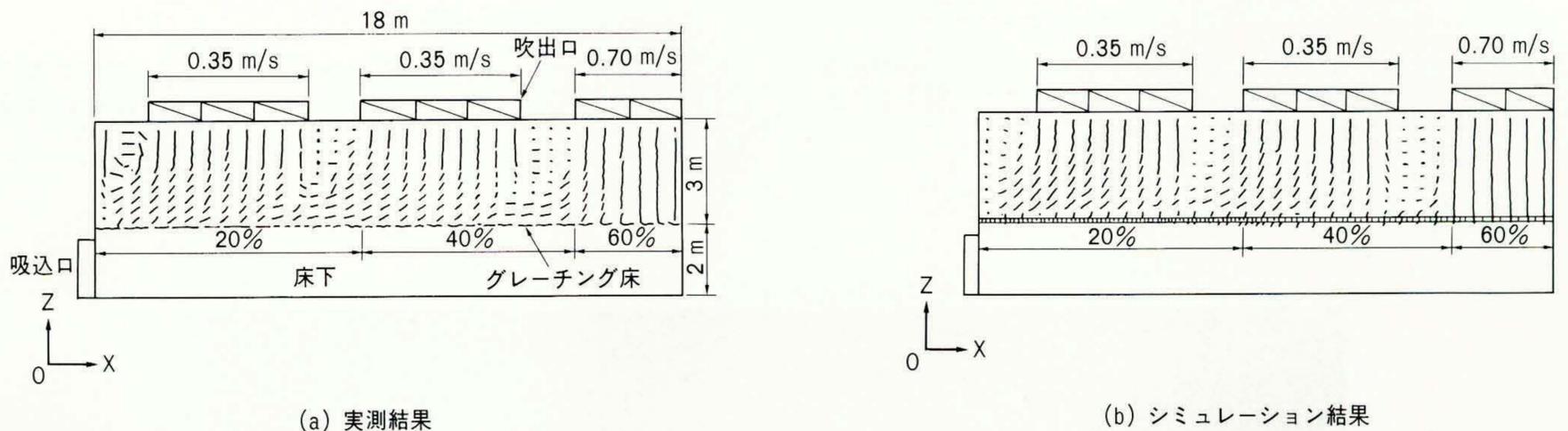


図2 実測結果とシミュレーション結果の比較 気流分布の実測結果とシミュレーション結果を比較したもので, シミュレーション結果は室内全体の気流の傾きやフィルタ間での滞留状態をよく再現している。

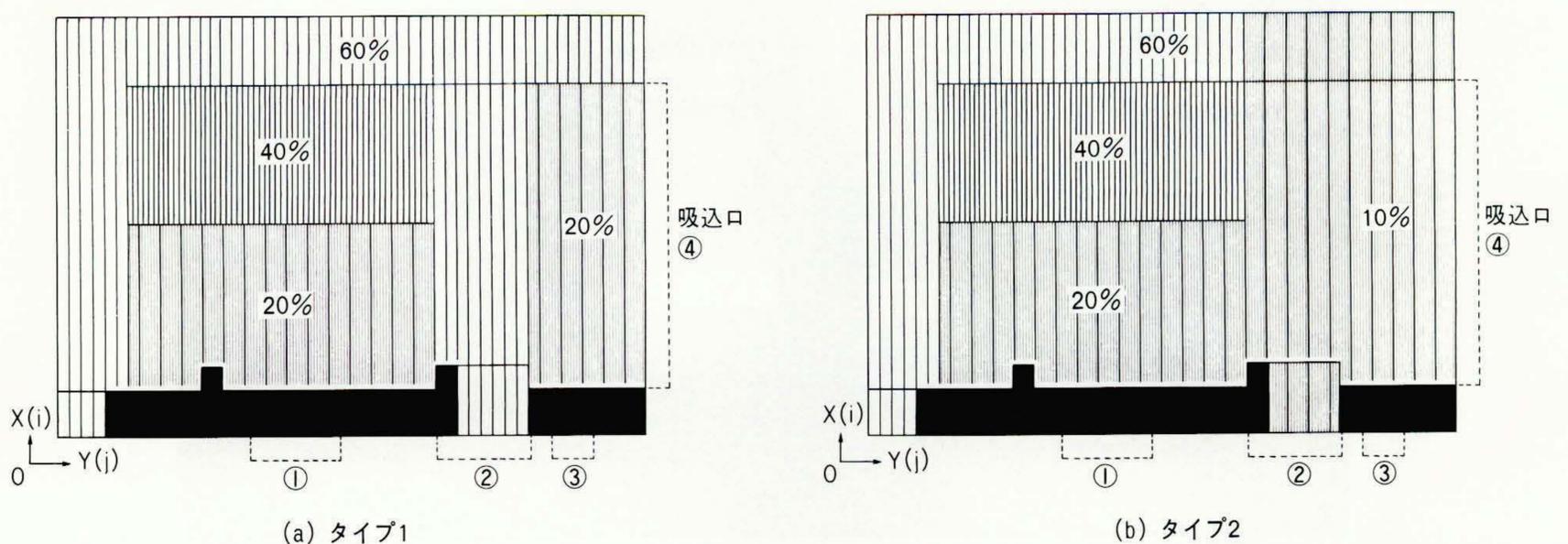


図3 グレーチング床の開口率配置 室内の偏流を抑える目的で, 吸込口に近づくに従って床開口率を小さくして配置したもので, ケーススタディとしてタイプ1とタイプ2を選んだ。

垂直層流形クリーンルーム(クリーントンネル)内の通路に、作業者が装置に向かって立っている場合の3次元気流解析を行った例を図6に示す。天井からの吹出し流速は0.3 m/sである。また、作業者が立っている床は開口率50%のグレーチング床である。

図6中の白い線は流線を示す。同図から明らかなように、

気流は装置の側から作業者の側に向かっているため、作業者起因の塵埃汚染が発生する可能性は小さい。このことは次章で述べる塵埃挙動解析によっても確認される。作業者と装置の間のすき間は30 cmであり、この程度のすき間があれば、作業者がいても、装置上の気流はそれほど大きな影響を受けないことがわかる。

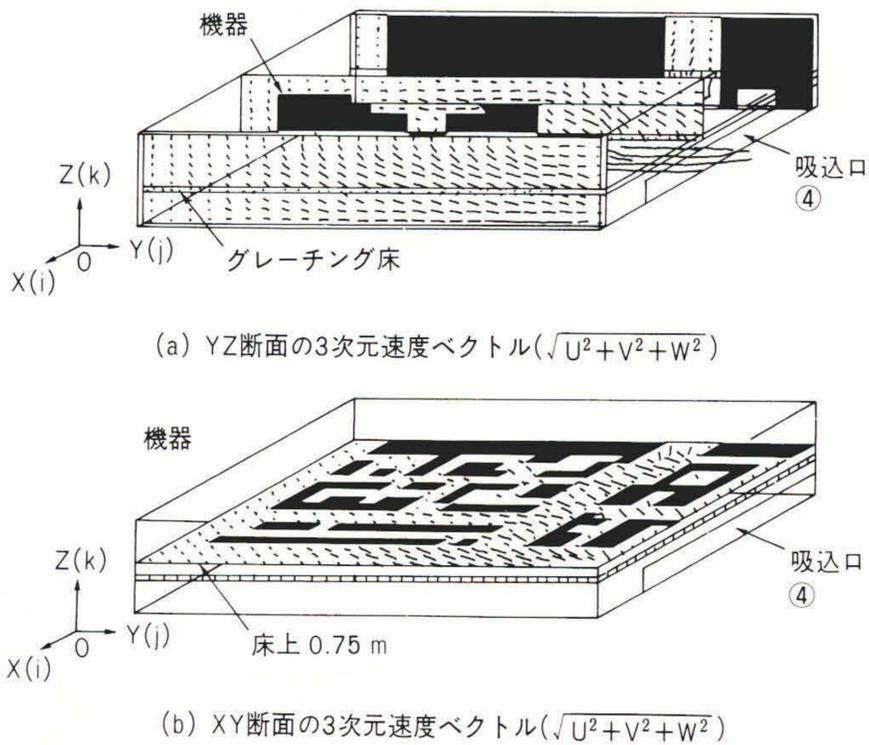


図4 3次元気流シミュレーション結果(タイプ1:床開口率20%, 40%, 60%) 機器を設置した場合の室内気流を3次元でベクトル表示したもので、全体的に偏流しているようすがわかる。

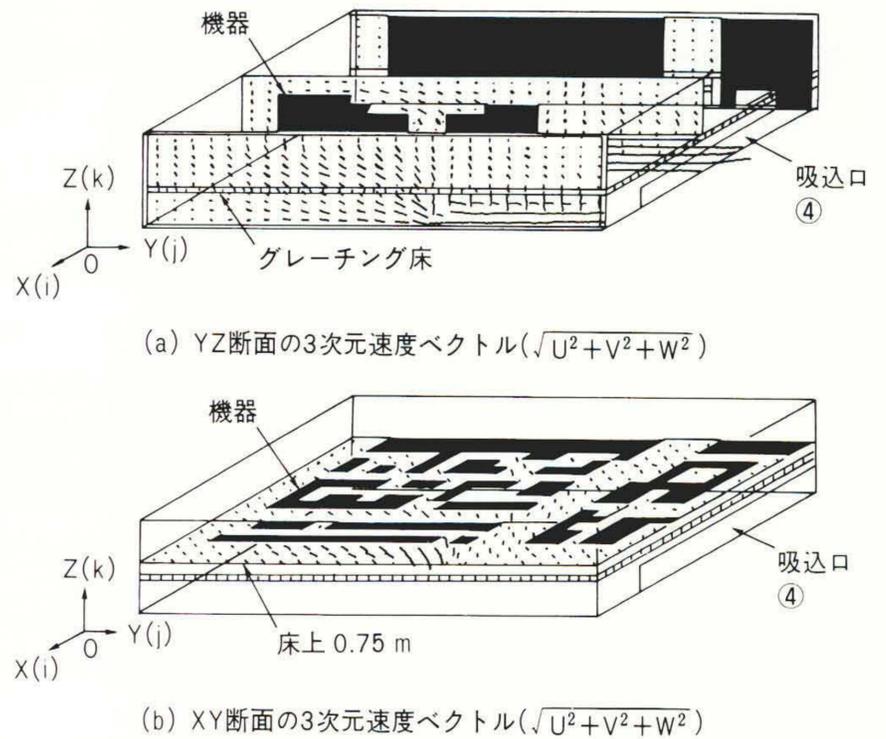


図5 3次元気流シミュレーション結果(タイプ2:床開口率10%, 40%, 60%) タイプ1に比べて、偏流が大幅に防止されているようすがわかる。

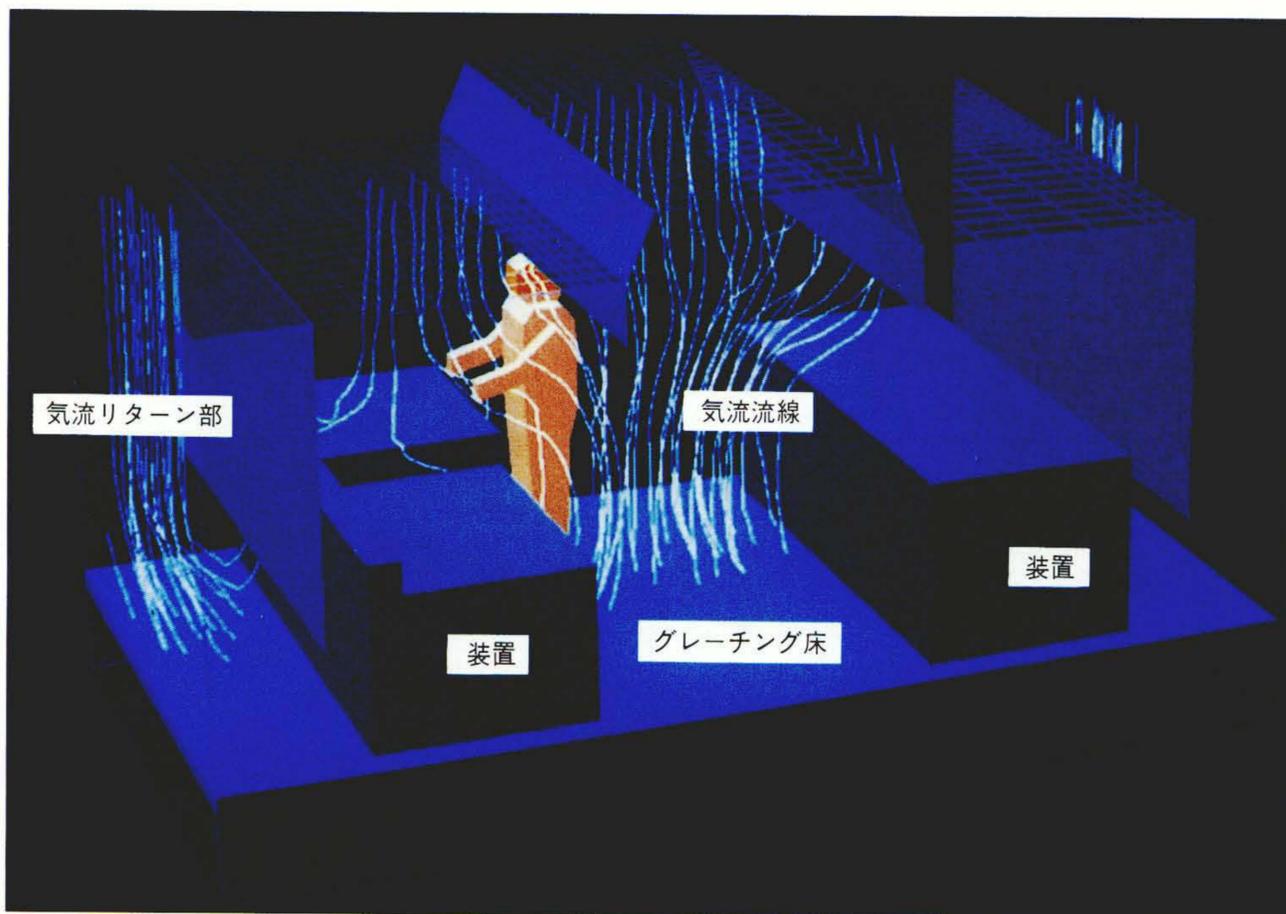


図6 作業者周り気流分布の3次元解析 クリーントネル内に作業者が立っている場合の気流分布を有限要素法で解析した。白い線が流線を示す。

解析結果の妥当性を検証するために、解析モデルをまったく同じ形状のクリーンルームと作業員模型を用いて可視化実験を行った。作業員周りの気流流線について、実験とシミュレーションの比較を図7に示す。このように複雑な形状を対象とする場合でも、解析によってかなり精度よく気流分布を予測できることがわかる。

なお、解析に用いたメッシュ数は約2万である。

3 塵埃挙動解析³⁾

クリーンルーム内の気流最適化には、気流分布だけでなく、各種発塵源から放出された塵埃がどのように拡散していくかを検討することが有効である。

気流内に浮遊する塵埃の拡散を解析する方法として、オイラー的計算とラグランジュ的計算の二通りが考えられる。オイラー的計算では、塵埃個数濃度を変数にとり、塵埃個数濃度に対する輸送方程式を解く。一方、ラグランジュ的計算では、個々の塵埃粒子に着目し、それぞれについての運動方程式を解く。両者を比較すると、ラグランジュ的計算のほうがオイラー的計算よりも、プログラミングの方法によっては、計算に必要なメモリ量が少なく済むため、本解析プログラムではラグランジュ的方法を採用している。

クリーンルームに限らず、一般に室内で浮遊している塵埃は、その個数濃度がそれほど大きくないので、塵埃どうしの衝突や塵埃があることによる気流状態変化は無視できる。そこで、塵埃の挙動は、既知の流れ場の中での次の運動方程式によって表すことができる。

$$\frac{dV_p}{dt} = -\beta(V_p - U_g) + F + X \dots \dots \dots (6)$$

ここで V_p は塵埃速度、 U_g は気流速度、 F は重力などの外力、 X はブラウン運動の原因となるランダム力、 β は抵抗係数である。いま、(6)式を積分する時間刻み Δt の間に塵埃が移動する範囲では U_g や F が一定であるとみなせるならば、(6)式は解析的に積分可能であり、 X に起因する確率的に定まる広がり(ブラウン拡散)を持った形で、塵埃の速度と位置を求めることができる。ブラウン運動による速度と位置の確率的な広がり、数値計算上モンテカルロ法によって計算する。

クリーンルーム内の気流は、たとえそれが「層流形クリーンルーム」と呼ばれている場合でも、流体力学的には乱流状態にある。したがって、(6)式中の U_g には乱流速度成分が含まれ、その乱流速度成分による輸送が塵埃の乱流拡散となる。乱流拡散のスケールは、ブラウン拡散のスケールに比べてはるかに大きいので、その扱いは重要である。 U_g は、平均値



(a) 可視化実験

(b) シミュレーション

図7 作業員周りの気流分布(可視化実験と解析の比較) 解析と同一形状のクリーンルーム、作業員模型を用いて気流の可視化を行った。写真は作業員周りの気流流線を示すが、実験と解析はよく一致している。

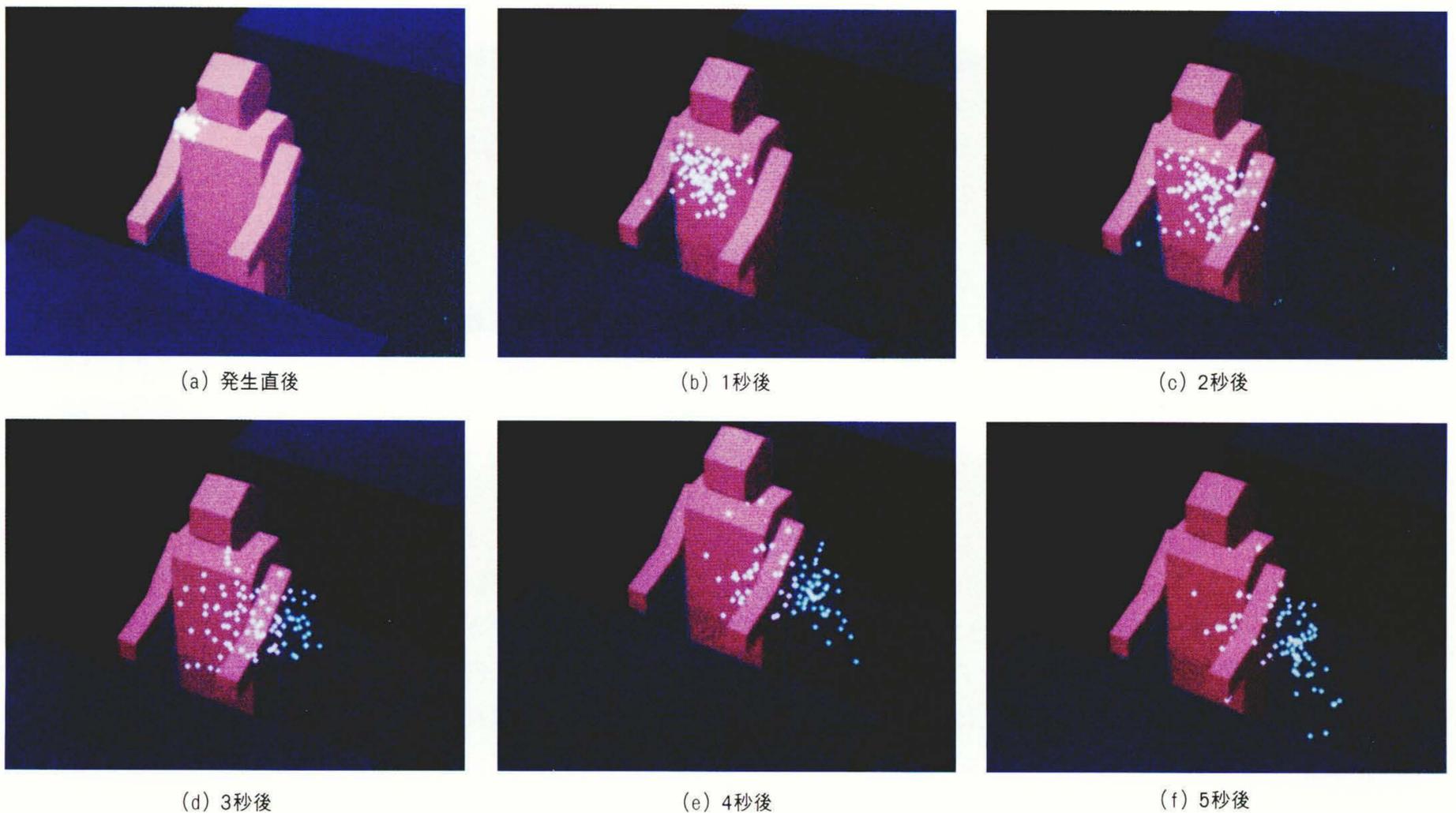


図8 作業者頭部から発生した塵埃の拡散 作業者頭部から発生した塵埃が拡散していくようすを解析した。図6で示したように、気流は写真手前の装置側から作業者のほうに向かっているため、塵埃は装置を汚染することなく流れ去る。

$\langle U_g \rangle$ と、乱流速度成分 u の和として表される。前章で述べた気流解析で求まる流速は上記 $\langle U_g \rangle$ であり、乱流速度成分 u は直接は計算されない。そこで、 u については、気流解析で求まる乱流エネルギー K から確率的に算出する。

気流が乱流の場合、(6)式を積分する時間刻み Δt は、乱流特性諸量の関数となる。外力に比べて流体力が支配的な場合について、時間刻み Δt に関して検討した結果、次式によって定義される Δt を用いると、乱流中の微粒子拡散の実験と良い一致を示す計算値を得ることが明らかになった。

$$\Delta t = l/u, \quad l = \gamma u / \epsilon \dots \dots \dots (7)$$

ここで ϵ は気流解析から求まる乱流散逸率であり、また、 γ は定数で0.032を用いている。

クリーンルーム内の作業者頭部から発生した塵埃が拡散していくようすを解析した例を図8に示す。塵埃挙動解析に先立つ気流解析は2.2.2項で述べたもの(図6)である。

図8から、塵埃が拡散しながら流れていくようすがよくわかる。図6の気流分布で示したように、気流は装置の側から通路の側に流れているので、作業者から出た塵埃も、拡散はするものの装置を汚染することなく、気流によって除去されることがわかる。

4 結 言

クリーンルーム内の気流分布と気流中に浮遊する塵埃の挙動を解析するプログラムを開発した。本論文で紹介したように、これらのプログラムによって、クリーンルーム内の気流分布や塵埃の拡散を詳細に予測することが可能である。これらのプログラムはすでに多くのクリーンルームの設計で有効に活用されている。

なお本論文で述べたのは、気流が時間的に定常な場合の解析についてである。クリーンルームでは、作業者などの動作に起因する非定常な流れによる塵埃の拡散が問題になることも多い。そのような非定常な流れを解析するプログラムが、今後必要になるであろう。

参考文献

- 1) Ikegawa, M., et al.: Three-Dimensional Turbulent Flow Analysis in a Cleanroom by The Finite Element Method, Advances and Applications in Computational Fluid Dynamics (Edited by O. BAISAL, ASME The Winter Annual Meeting 1988), pp.161~167(1988)
- 2) 田中, 外: 等価流動抵抗を考慮した垂直層流型クリーンルーム内の気流解析, エアロゾル研究, 2-1, pp.28~34(昭62)
- 3) 都築, 外: 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), 53-493, pp.2771~2776(昭62)