準定常速度場における拡散シミュレーションの高速化とその送風方式検討への応用

正 員 吉 原 郁 夫 (日 立)

1. はじめに

電子工業、精密加工工場など先端産業分野で使われるクリーンルームにおいては、温度・湿度だけでなく空気清浄度の維持が重要となっている。清浄度が製品の信頼性、歩どまりを支配する主要因になってきたからである⁽¹⁾。

現在のクリーンルームは外気取入れ比率が高く、循環回数も多い⁽²⁾。循環回数は毎時数百回に及ぶことも珍しくない。外気取入れが多い理由は、室内の気圧を外気より高めに維持するためロスが生じやすいからである。循環回数が多い理由は、要求が厳しいためであるが、そのほかに万一の機会損失を避けるため安全サイドの運転をしている面もあると考えられる。しかし、現在主流となっている層流形クリーンルームは、じんあいを清浄空気で稀釈するのではなく押し流すものであるから、単に循環回数を増やしても意味がない⁽³⁾。動力費が大きくなると風量を下げ経済性を向上させたい、という要求が出てくるのも当然である。風量の適正化、すなわち風量を必要最小限に抑えるには、給排気の位置や風量変更により清浄度がどのように変わるかを推定しておかなければならない。数値シミュレーションは、そのための有力手段である。

室内気流シミュレーションが行われ始めた昭和40年代のころは、単に気流性状の良否を判断する方法が採られ、拡散については実験に頼っていた⁽⁷⁾⁽⁸⁾。計算機の発達に伴い、気流モデルに汚染質の拡散を付加したシミュレーションが実用的に行えるようになり、汚染質の定常分布が把握できるようになってきた⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾。しかし、風量の変更はじんあいの分布パターンより

も、むしろ過渡特性に大きく影響するので、その検討には非定常解析が必要である。

清浄度の空間分布や時間変動を検討するには、じんあいの拡散現象を表す物理モデルと、換気空調システムの除じん特性を表す制御モデルの二つが必要である。本論文では、微量のじんあいは流れ場に対し速度分布を変えるような影響を及ぼすことなく気流に乗って流れる、との考えに基づき、じんあいの漂動を二方程式モデルから得られる渦動粘性係数をパラメータとする拡散方程式で表す。また、空調システムの特性を表すため、外気と還気との混合比およびフィルタの捕集率をモデルに取入れ、循環気流の汚れの影響および時間遅れ特性を表す。

動的シミュレーションは特に計算量が多いため、CPU タイム短縮が実用上重要な課題である。本論文では、換気条件が一定のときは、シミュレーションを定常速度場を求める部分と拡散の時間経過を追う部分とに分け、演算量の低減を図ると共にベクトル処理効率を高めるようプログラム設計に工夫する。

2. シミュレーションモデル

〈2・1〉 室内気流分布とじんあいの拡散モデル

空気中に浮遊する粒子は様々な力を受けるが、その影響の度合いは粒子の大きさによって異なる⁽⁵⁾⁽⁶⁾。表1に粒子の大きさと動力学的特性値の関係を示す。

表 1 エアロゾル粒子の動力学的特性⁽⁵⁾
Table 1. Kinematic property of aerosol.

粒 径 (μm)	質 量 (g)	重力沈降速度 (cm/s)	緩和時間 (s)	ブラウン 拡散係数 (cm^2/s)
0.1	5.24×10^{-16}	9.55×10^{-5}	9.75×10^{-8}	7.52×10^{-6}
0.2	4.19×10^{-15}	2.25×10^{-4}	2.30×10^{-7}	2.22×10^{-6}
1.0	5.24×10^{-13}	1.37×10^{-3}	1.40×10^{-6}	2.81×10^{-7}
2.0	4.19×10^{-12}	4.98×10^{-3}	5.09×10^{-6}	1.28×10^{-7}
10.0	5.24×10^{-10}	3.00×10^{-1}	3.07×10^{-4}	2.37×10^{-8}

注) 20°C, 1気圧の空气中、粒子の密度 1.0 g/cm³

A Fast Simulation Method of Particulate Diffusion in Quasi-Stable Velocity Field and its Application to Ventilating System.
By Ikuo Yoshihara, Member (Systems Development Laboratory, Hitachi Ltd.).

吉原郁夫：正員、(株)日立製作所システム開発研究所

半径が数 μm 以上の大きな粒子は、自らの慣性と重力の影響で重力沈降し、空気分子の平均自由行程（付録 1 参照）より小さい粒子は、ブラウン運動をする。クリーンルームで問題となるじんあいの大きさは、これらの中間にあり、空気の摩擦力の影響を最も強く受ける。同表のとおり緩和時間は短いので、粒子の速度はすぐ風速と一致すると考えてよい。

じんあいの混入により風の流れが変わるはずであるが、その変化は極めてわずかで無視しても差しつかえない。なぜなら、じんあいの質量濃度は高々 $1.9 \times 10^{-11} \text{ g/cm}^3$ 、空気の密度は $1.2 \times 10^{-3} \text{ g/cm}^3$ 程度であるから、じんあいの質量は空気の 1.5×10^{-8} 以下であり、空気密度の増加および運動量の変化は問題にならないからである（付録 2 参照）。

以上の動力学の考察に基づき、じんあいは風に随伴して流れるが、気流には影響を及ぼさないと考え、じんあいの挙動を表すモデルを構築する。気流はじんあいの影響を受けないので、支配方程式は室内気流の方程式とじんあいの拡散を表す方程式を連立すればよい。ここで、室内気流の乱流状態を表すため、いわゆる $k-\varepsilon$ 形二方程式モデルを導入する^{(11)~(13)}。このモデルは、比較的広い範囲に適用され良好な結果が得られているものである。

〈連続式〉

$$\frac{\partial U_j}{\partial x_j} = 0 \dots\dots\dots (1)$$

〈ナビエ・ストークス方程式 ($i=1, 2, 3$)〉

$$\begin{aligned} \frac{\partial U_i}{\partial t} = & -\frac{\partial}{\partial x_j} (U_i U_j) - \frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \\ & \times \left\{ (\nu_T + \nu) \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \right\} - \rho \beta \Delta T \delta_{i3} \\ & \dots\dots\dots (2) \end{aligned}$$

〈温度の輸送方程式〉

$$\frac{\partial T}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial x_j} (T U_j) + \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ \left(\frac{\nu_T}{\sigma_T} + \nu \right) \frac{\partial T}{\partial x_j} \right\} \dots\dots\dots (3)$$

〈渦の輸送方程式〉

$$\begin{aligned} \frac{\partial q}{\partial t} = & -\frac{\partial}{\partial x_j} (q U_j) + \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ \left(\frac{\nu_T}{\sigma_q} + \nu \right) \frac{\partial q}{\partial x_j} \right\} \\ & + \nu_T \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial U_i}{\partial x_j} - \varepsilon \dots\dots\dots (4) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} = & -\frac{\partial}{\partial x_j} (\varepsilon U_j) + \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ \left(\frac{\nu_T}{\sigma_\varepsilon} + \nu \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right\} \\ & + C_1 \frac{\varepsilon}{q} \nu_T \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial U_i}{\partial x_j} - C_2 \frac{q \varepsilon}{\nu_T} \\ & \dots\dots\dots (5) \end{aligned}$$

$$\nu_T = C_D \frac{q^2}{\varepsilon} \dots\dots\dots (6)$$

〈じんあいの拡散方程式〉

$$\begin{aligned} \frac{\partial C}{\partial t} = & -\frac{\partial}{\partial x_j} (C U_j) + \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ (\kappa_T + \nu) \frac{\partial C}{\partial x_j} \right\} + S \\ & \dots\dots\dots (7) \end{aligned}$$

ここで、 U_i は速度、 P は圧力、 q は乱れの運動エネルギー、 ε は粘性消散率、 ν_T は渦動粘性係数、 κ_T は渦拡散係数（数値的には ν_T に等しいとする⁽¹⁰⁾）、 S はじんあいの発生率であり、これらはいわゆるレイノルズの方法に従う時間平均量である。 g は重力加速度、 β は体膨張係数、 ΔT は温度差、 δ_{ij} はクロネッカーのデルタである。また、 C_D 、 C_1 、 C_2 、 σ_T 、 σ_q 、 σ_ε は普遍定数で、それぞれ 0.09、1.45、1.90、1.0、1.3 とする^{(9)~(11)}。

以上の連立方程式を解くことにより、じんあい濃度分布の時々刻々の値が求まる。

〈2・2〉 換気システムのモデル クリーンルーム

は、気流方式によって垂直層流形、水平層流形、非層流形などに分類される。半導体工業など、特に高い清浄度が要求されるところでは、垂直層流形クリーンルームが広く用いられている。垂直層流形クリーンルームを例に、送風システムを説明しよう。

外気は、プレフィルタで粗いごみを落された後、空調機に送られる。空調機で温湿度が調和された後、更に中性能フィルタに通され、細かいじんあいが除去され、サプライエアチャンバ（クリーンルームの天井裏の空間）へ送られる。サプライエアチャンバでは、クリーンルームからの還気と混合され、高性能フィルタ（HEPA フィルタ）を通して天井部からクリーンルームに吹出される。吹出し方式には、天井全面から均一に吹出す方式、天井一部から吹出す方式などがある。床は二重床になっており、排気は床グレーチングを通して、リターンチャンバ（床下の空間）に集められ、サプライエアチャンバに戻される。一部は、リターンチャンバから直接空調機へも戻される。トンネルモジュールやベイと呼ばれるクリーンルーム内クリーンルーム方式では、床下だけでなくメンテナンスルームの側壁からも排気することが多い。

このようなダクトシステムを、図 1 に示すモデルで表す。直接空調機へ戻るルート（破線）は、本モデルでは省略する。空気中に含まれるじんあい量を Q 、じんあい濃度を C 、風量を V 、捕集率を η とすれば、次の保存関係が成り立つ。

$$Q_1 = C_1 V_1 \dots\dots\dots (8)$$

図 1 クリーンルーム換気システムモデル

Fig. 1. A model of cleanroom ventilating system.

$$Q_2 = (1 - \eta_1) Q_1 \dots \dots \dots (9)$$

$$Q_4 = (1 - \eta_2) (Q_2 + Q_3) \dots \dots \dots (10)$$

ただし、添字は系統の位置を表すもので、1: 外気、2: 調和空気、3: クリーンルームからの還気、4: クリーンルームへの給気位置である。還気に含まれるじんあいの総量 Q_3 は、質量保存の考えから次のように算出される。

$$\begin{aligned} Q_3(t) &= \sum_i Q_{3i}(t - \tau_i) \\ &= \sum_i C_{3i}(t - \tau_i) V_{3i}(t - \tau_i) \dots \dots \dots (11) \end{aligned}$$

i は還気位置 (メッシュ番号) であり、 τ_i は風がその位置から高性能フィルタに至る時間である。以上まとめると

$$\begin{aligned} C_3(t) &= \frac{Q_3(t)}{V_3(t)} = \frac{\sum_i C_{3i}(t - \tau_i) V_{3i}(t - \tau_i)}{\sum_i V_{3i}(t - \tau_i)} \dots \dots \dots (11)' \\ \therefore C_4(t) &= (1 - \eta_2) \\ &\quad \{ (1 - \eta_1) C_1(t) V_1(t) + \sum_i C_{3i}(t - \tau_i) V_{3i}(t - \tau_i) \} \\ &\quad \times \frac{V_1(t) + \sum_i V_{3i}(t - \tau_i)}{V_1(t) + \sum_i V_{3i}(t - \tau_i)} \dots \dots \dots (12) \end{aligned}$$

外気取入れ比率 $\lambda = V_1 / (V_1 + V_3)$ は、短時間に頻繁に変えたりはしないのが普通である。特に、じんあい発生後の数秒～数十秒程度のシミュレーション時間内では一定としてよいであろう。また、還気がメンテナンスルームなどを経て、高性能フィルタに至る時間は比較的長く、それに比べ τ_i のばらつきは小さい。従って τ_i は、 i によらず一定 (τ) と近似してよい。 τ は風量と経路の長さから決まるタイムラグである。

λ と τ を一定とすれば、吹出し風のじんあい濃度は下記の簡易モデルで表される。

$$\begin{aligned} C_4(t) &= (1 - \eta_2) \{ \lambda (1 - \eta_1) \\ &\quad \times C_1(t) + (1 - \lambda) C_3(t) \} \dots \dots \dots (13) \end{aligned}$$

ただし、

$$C_3(t) = \frac{\sum_i C_{3i}(t - \tau) V_{3i}(t - \tau)}{\sum_i V_{3i}(t - \tau)} \dots \dots \dots (14)$$

3. 数値解法とシミュレーション

ナビエ・ストークス方程式の離散化法としては、差分法や有限要素法がよく用いられる。本シミュレーションが対象とする空間の形状は、直方体またはその組合せで容易に表せることから、ここでは離散化が単純で安定性に優れた差分法を採用する。

定常解を求める方法としては、支配方程式に含まれる時間微分項に着目し、時間発展形に解き、収束した値を定常解と見なす方法を採用⁽¹⁵⁾。この解法は時間に関し陽的であり、時間微分項を初めから消去した陰解法に比べ、メモリー所要量が少なく、アルゴリズムが単純という点で優れている。

〈3・1〉二段階シミュレーション 空間を直方体状のメッシュに分割し、各メッシュにおける状態量を、スタガード・メッシュ上で定義する⁽¹¹⁾⁽¹⁴⁾。すなわち、図2に示すようにスカラー量 $P, T, q, \epsilon, \nu T$ をメッシュの中心で定義し、ベクトル量 U, V, W (テンソル表現の U_1, U_2, U_3 に対応) を各流れ方向に垂直な境界面の中心で定義する。定義されていない位置での値が必要な場合は、近傍の定義点の値から線形近似して求める。

差分スキームは、項によって適宜使い分ける必要がある。空間微分項は、中央差分を用いるが、移流項だけは流れに乗った輸送現象を忠実に表すため、風上差分とする。時間微分項については、時間発展的に解けるようにするため前進差分をとるが、安定性を向上させるため、予測子-修正子法 (Adams-Bashforth 近似) を用いる。すなわち、

$$U_i(t + \Delta t) = U_i(t) + \frac{3}{2} \frac{\partial}{\partial t} U_i(t) \Delta t$$

図 2 スタガード・メッシュ

Fig. 2. Staggered mesh.

$$-\frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial t} U_i(t-\Delta t) \Delta t \dots\dots (15)$$

$$C(t+\Delta t) = C(t) + \frac{3}{2} \frac{\partial}{\partial t} C(t) \Delta t - \frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial t} C(t-\Delta t) \Delta t + S \dots (16)$$

などとする。求解の容易さや収束の安定化のため種々の差分を混用するが、離散化の精度を二次にそろえてあり問題はない（ただし風上差分は一次）。 $U_i(t)$ は陽に求まるが、常に連続式(1)を満たす必要があり、そのため毎時刻ポアソン方程式 $\nabla^2 P = R$ を解かねばならない。計算量が多いこの求解を、毎時刻繰返すため計算時間は膨大である⁽¹⁵⁾。

一定の条件で送風しており、動くものがほとんどない場合、風の流れは定常的と見なせ、じんあいの発生とそれに伴う拡散だけが時間的に変動する、と考えても差しつかえないであろう。このような定常速度場の仮定が許される場合は、初めに速度場を求めておき、次に速度分布が既知との前提のもとに、じんあいの拡散を求めればよい。すなわち、図3に示すようにシミュレーションを二段階に分けることができる。このようにすると、多大の演算を要する気流分布求解を繰返さなくてよいので、CPU タイムを大幅に削減できる。

〈3・2〉 演算高速化 二段階シミュレーションにすると濃度 C 以外の状態量は、いずれも時間によらず一定となるので、毎時刻計算するのは C に関してだけでよい。

$$C_{ij}(t+\Delta t) = C_{ij}(t) + \frac{3}{2} F_{ij}(t) \Delta t$$

図3 シミュレーション・システムの構成

Fig. 3. Simulation system.

$$-\frac{1}{2} F_{ij}(t-\Delta t) + \frac{\Delta t}{\Delta x \Delta y} S(t) \dots\dots\dots (17)$$

ここで、 F_{ij} は(7)式の移流項および拡散項をまとめたものである。 F_{ij} を具体的に求めると次式のとおりであるが、ここでは添字の複雑化を避けるため、二次元問題で説明する。

$$F_{ij}(t) = \frac{1}{\Delta x} \left\{ C_{ij} \frac{U_{i+1/2j} + |U_{i+1/2j}|}{2} + C_{i+1j} \frac{U_{i+1/2j} - |U_{i+1/2j}|}{2} - C_{i-1j} \frac{U_{i-1/2j} + |U_{i-1/2j}|}{2} - C_{ij} \frac{U_{i-1/2j} - |U_{i-1/2j}|}{2} \right\} + \frac{1}{\Delta y} \left\{ C_{ij} \frac{U_{ij+1/2} + |U_{ij+1/2}|}{2} + C_{ij+1} \frac{U_{ij+1/2} - |U_{ij+1/2}|}{2} - C_{ij-1} \frac{U_{ij-1/2} + |U_{ij-1/2}|}{2} - C_{ij} \frac{U_{ij-1/2} - |U_{ij-1/2}|}{2} \right\} + \frac{1}{(\Delta x)^2} \left\{ \frac{\kappa_{i+1j} + \kappa_{ij}}{2} (C_{i+1j} - C_{ij}) - \frac{\kappa_{ij} + \kappa_{i-1j}}{2} (C_{ij} - C_{i-1j}) \right\} + \frac{1}{(\Delta y)^2} \left\{ \frac{\kappa_{ij+1} + \kappa_{ij}}{2} (C_{ij+1} - C_{ij}) - \frac{\kappa_{ij} + \kappa_{i-1j}}{2} (C_{ij} - C_{i-1j}) \right\} \dots (18)$$

(18)式の右辺の状態量は $t=t$ の値である。ここで、 U や κ はすべて一定（時間非依存）である。拡散に関する時間進行計算に入る前に、 C にかかる係数をあらかじめ計算しておき、(18)式を C_{ij} , $C_{i\pm 1j}$, $C_{ij\pm 1}$ の線形式と見なして整理すると

$$F_{ij} = \overset{(1)}{a_{ij}} C_{ij-1} + \overset{(2)}{a_{ij}} C_{i-1j} + \overset{(3)}{a_{ij}} C_{ij} + \overset{(4)}{a_{ij}} C_{i+1j} + \overset{(5)}{a_{ij}} C_{ij+1} \dots\dots\dots (19)$$

となる。(19)式右辺の評価は、乗算5回、加算4回の演算で済み、(18)式をそのまま解くの比へ、更に演算量を71%減らすことができる。

更に好都合なことに、(19)式は内積形の演算で、スーパーコンピュータの性能を引出ししやすい形をしてい

る。スーパーコンピュータでは長い DO ループほど処理効率が高いので、二次元配列を一次元化して計算すると効率的である。例えば、下記のようなプログラミングスタイルで計算するとよい。

DO 10 K=1, KMAX

L=LIST (K)

$F(L)=a(L, -2)C(L-MX)$
 $+a(L, -1)C(L-1)+a(L, 0)$
 $\times C(L)+a(L, 1)C(L+1)$
 $+a(L, 2)C(L+MX)$

10 CONTINUE

ここで、 $A(L, J)$ は(19)式の係数、LIST は計算すべき C のメッシュ番号を格納しているリストベクトル、KMAX は計算するメッシュ数、MX は配列 C の X 方向の宣言寸法である。この方法は、単にベクトル長を長く取れるだけでなく、空間中に置かれた装置や障害物などに対応する計算不要なメッシュを除外することができ、その意味でもむだがない。

4. クリーンルーム送風方式の検討

図4に示す垂直層流形半導体クリーンルームを例に送風方式の検討を行う。じんあいシミュレーションの前提となる風速分布は付録3に示す模型実験で検証している。風は天井全面から吹出し、床グレーチングとメンテナンスルーム側壁の開口から吸い込まれる。ウェーハ加工が行われるのは、製造装置の上面であり、この付近でのじんあい濃度が問題になる。以下の検討では、じんあい発生源を作業者の頭部と想定し、そこから出たじんあいがどのように広がるかを見る。図5にクリーンルーム内のじんあい濃度分布を求めた例を示す。

じんあい濃度を見るための点①～⑧を選び(図4)、これを監視点と呼ぶ。①は吹出し口直下の点、②は製

図4 クリーンルーム断面図

Fig. 4. A section of cleanroom.

図5 じんあい分布シミュレーション例

Fig. 5. Simulation result of particulate distribution.

図6 じんあい濃度の時間変化

Fig. 6. Time-dependence of contamination.

装置直上の点、③は作業者の傍の点、④は製造装置前面の点、⑤は製造装置裏側の点、⑥は製造装置直下の点、⑦⑧はリターンチャンパ内の点である。

(1) じんあい除去の状況 図6は、作業者の頭髮などから微量のじんあいが連続的に発生しているとき、各監視点における濃度がどのように変わるかを見たものである。初期条件として $C=30$ 個/ft³ のじんあい濃度を与えているが、吹出し口近くの①では、じんあい濃度はすぐ低下する。製造装置付近の②や③でも、若干のタイムラグの後じんあい濃度はすぐ低下する。それに対し、床下の点⑦⑧では、濃度の低下は緩慢であり、なかなか下らない。これはじんあいは拡散したり、風に運ばれて薄められるものの、結局はリターンチャンパに流入するためと考えられる。

(2) 排気風量配分比の検討 クリーンルームからの排気は床グレーチングだけでなく、メンテナンスルーム側の隔壁の開口部から行うこともできる。それぞれの風量配分をどの程度にすればよいかを検討してみよう。図7右側は、メンテナンスルーム側への風量

図 8 排気の風量配分比の影響 (2)
Fig. 8. Effect of exhaust air ratio (2).

図 9 循環回数と到達清浄度の関係
Fig. 9. Air circulation ratio vs. saturated cleanliness.

図 7 排気の風量配分比の影響 (1)
Fig. 7. Effect of exhaust air ratio (1).

図 10 循環回数と除じんの時間特性
Fig. 10. Air circulation ratio vs. recovery time.

が多い場合の、製造装置付近の監視点③④⑤の濃度変化である。同図左側は、メンテナンスルーム側への風量が少ない場合の、同じ点の濃度変化である。両図の比較から、メンテナンス側風量が小さいほうが、いくぶん除じん効果が大きいことがわかる。では、どの程度の風量配分が望ましいのか？ 風量配分比を 0~1 まで 0.1 刻みで振ってシミュレートしてみると、装置前面の点④でのじんあい濃度は風量配分比が 0.6 以下が望ましいが、装置裏側の点⑥でのじんあい濃度は④点とは逆の傾向にあることがわかる (図 8)。両者のトレードオフから風量配分比は 0.3~0.6 程度がよいと考えられる。

(3) 循環回数と到達清浄度 次に、風量により到達清浄度がどのように変わるかを調べて見よう。循環回数を 200 回/時から 800 回/時まで変えたときの、製造装置周囲の監視点における濃度変化を図 9 に示す。装置裏側の点⑤と下側の点⑥では、風量を増すに

従い濃度は単調に減少する。前面の点④では、200 回/時と 400 回/時の差は顕著であるが、それ以上風量を増やしても、清浄度はあまり向上しない。しかし、直接ダウンフローが当たる製造装置上側の点②では、ほとんど変わらない。

(4) 循環回数と復元時間 次に、循環回数によって維持すべき清浄度に戻る時間 (復元時間) がどのように変わるかを調べて見よう。維持すべき清浄度の値は、製造品目の加工精度などから決まるもので、一概には言えないが、復元時間の長短が評価の目安となる。④点におけるじんあいの除去過程を図 10 に示す。仮に目標レベルが 10 個/ft³ であれば復元時間は、循環回数 200 回/時で 4.5 秒、400 回/時以上では 0 秒である (一度も 10 個/ft³ には達しない)。仮に目標レベルが一桁厳しい 1 個/ft³ であれば復元時間は、循環回数 200 回/時で 10.5 秒、400 回/時で 3 秒、800 回/時で 0.8 秒で明確な差がある。

このようにして、維持すべき濃度清浄度に応じた送風量（循環回数）の適正化の基礎資料が得られる。

5. 終りに

室内浮遊物質の拡散を模擬するシミュレータを開発した。シミュレーションモデルは、じんあい拡散を表す物理モデル（現象モデル）とじんあい除去を表す制御モデルとからなる。前者は、 $k-\epsilon$ 形二方程式モデルにより風速分布を求め、同時にその乱流パラメータを用いてじんあいの拡散を表すものである。後者は、還気と外気の混合および高性能フィルタの効率を取入れ、汚染質を含む空気が再び還流してくる過程を表すものである。これら現象モデルと制御モデルを融合し、時間発展形に解くことにより、じんあい分布の時間経過が推定できる。

非常定解シミュレーションは多大の計算時間を要するが、本論文では速度場がほぼ定常と見なせる場合、先に風速分布を求めてから拡散方程式を解くことにより、CPU 時間の短縮を図る。この方法は、演算量を削減できるだけでなく、ベクトル長の長い計算が可能で、スーパーコンピュータに適しており、その面でも高速化が図れる長所がある。

垂直層流形のクリーンルームの送風方式を検討した結果、①床下への排気量と側方への排気量には、最適配分比が存在すること、②到達清浄度は循環回数を増してもあまり向上しない（飽和傾向にある）こと、③しかし、循環回数の増加により、復元時間の減少が顕著なこと、などを見出した。

このような解析から、じんあい除去が吹出しの位置と風量、プロセス機器の配置や大きさ、吸込みの位置などによりどう影響を受けるか、定量的に把握することができる。その結果から計画中の設備の事前評価、あるいは既存設備の診断が可能となり、ひいては送風量の適正化、すなわち動力費の低減が可能となる。

終りに、本研究の機会を与えてくださった日立システム開発研究所前所長 川崎 淳博士、副所長 春名公一博士、有益な助言をいただいた松橋誠壽主任研究員、ならびに実験を担当していただいた日立プラント建設研究所 浅見欽一郎課長はじめ関係各位に、厚くお礼申しあげます。

（昭和62年10月19日受付、同63年4月21日再受付）

文 献

- (1) 早川：「スーパークリーンルームとその問題点」，建築設備と配管工事，84.1号，41（昭59）
- (2) 牟田：「最近のクリーンルームシステムの動向と技術開発について」，同上，84.1号，87（昭59）
- (3) 藤井他：「クリーンルームにおける表面汚染測定のためのレーザースキャン計測」，建築論文，371号，38（昭62）
- (4) 柴田他：「スーパークリーンルーム」，信電誌，84.1号，49（昭59）
- (5) 高橋：改著 基礎エアロゾル工学（昭57） 養賢堂
- (6) 江見：「エアロゾル粒子の捕集」，粉体工学学会誌，19,135（昭57）
- (7) 野村，他：「室内気流分布の研究と最近の展」，空調衛生，51, 21（昭52）

- (8) 「ハイテクの多様な要求に対応より詳しく把握，新たな現象を応用」，日経メカニカル，3.25号，60（昭60）
- (9) 村上，他：「実大実験と数値シミュレーションの比較」，昭60日本建築学会関東支部研究報告集，p.121
- (10) 野村，他：「室内汚染物質濃度分布と気流パターン」，空調衛生，54, 49（昭55）
- (11) 野村，他：「乱流の数値解析と風洞実験」，建築論文，252号，p.57（昭52）
- (12) B.E. Launder & D.B. Spalding: Lectures in Mathematical Models of Turbulence (1972) Academic Press
- (13) F.H. Harlow & P.I. Nakayama: "Turbulence transport equations", *Phys. Fluids*, 10 (1967)
- (14) F.H. Harlow & J.E. Welch: "Numerical Calculation of Time Dependent Viscous Incompressible Flow of Fluid with Free Surface" *ibid.*, 8 (1965)
- (15) 吉原：「スーパーコンピュータによる室内気流分布のシミュレーション」，情報処理，27, 1250（昭61）

付 録

〔付録1〕 20℃，1気圧の平均自由行程は， $6.45 \times 10^{-2} \mu\text{m}$ 。

〔付録2〕 クリーンルームで問題となる清浄度をクラス1～1000程度，じんあいの見かけの密度を $1\text{g}/\text{cm}^3$ とすれば，粒径 $0.1 \sim 10 \mu\text{m}$ の微粒子の質量濃度は $1.9 \times 10^{-20} \sim 1.9 \times 10^{-14} \text{g}/\text{cm}^3$ 。20℃，1気圧の空気の密度は $1.205 \text{mg}/\text{cm}^3$ 。

〔付録3〕 長さ1.2m，幅1.0m，高さ0.6mの模型実験装置を作り，長手方向に風を流し，風の循環パターンがシミュレーション結果とよく一致することを確認した。また，吹出し口から0.2m，0.6m，1.0mの位置における垂直断面，水平断面の風速分布をシミュレーション結果と比較すると，付図1のようであり，微風速の領域は別として，軸心をはじめ全般によく一致していることがわかる。

付図1 速度プロファイルの比較

app. Fig. 1. Velocity profile simulated and measured.