

# 気流の数値解析によるクリーンルームの性能評価

西岡利晃 竹本靖

## Study on Performance of Clean Room by Computer Simulation

Toshiaki Nishioka Yasushi Takemoto

### Abstract

Computer simulation of the flow field is used to assess the performance of a clean room and to improve its design. The flow pattern of an existing conventional type clean room which has outlet openings at the floor and horizontal laminar flow clean booths equipped at one side of the room along a wall is presented. The numerical simulation displayed graphically in the form of velocity vector plots is provided to select the appropriate boundary conditions and to compare numerical predictions with measurements and to examine the effect of inlet opening configurations on the flow field. The numerical study shows the flow field in the clean room is well-controlled and this makes the cleanliness better than expected at such low rate of ventilation. It is found that numerical predictions of the flow field in a clean room are very good and provide an excellent tool for examining the performance of a clean room and for investigating new designs for this type of room.

### 概要

気流の数値解析により、既存のクリーンルームの評価や改良点の探索を行なった。対象としたクリーンルームは“床吸い込み”のコンベンショナル(いわゆる乱流)タイプであり、室の片側に水平流クリーンブースが設けてある。計算は、市販の流体数値解析コードを用いた。

結果は主に速度ベクトルの図形出力で表し、これを用いて境界条件、実測値との比較、吹き出し口形状の違いによる気流パターンへの影響などを検討した。気流パターンの比較より現状のシステムは、気流のコントロールに優れており、このことは少ない換気量にもかかわらず高い清浄度を示すことに表れている。数値解析は実測とよく一致しており、実験実測と併せ用いればシステムの評価や開発の有力な手段になることを示した。

### 1. はじめに

半導体メモリーチップの集積度の不断の向上に象徴されるICの技術革新は、その製造設備であるクリーンルームにも不断の技術革新を強いる。これを空気の清浄度でみれば、制御対象の粒子の大きさはより小さく、塵埃濃度はより低くが求められる。これに応えるためには、ろ過粒径を細かくし、捕集効率を高めるなどのフィルター性能の向上と室内気流の細部までの整流化が必要である。とくに後者のためには、気流解析が不可欠である。気流分布の情報により、室内気流に定常的に存在する渦の有無を判定し、存在する場合には気流の整流化によりこれを消滅させる。

一方、クリーンルームの清浄度設計は、方式のいかん

にかかわらず塵埃の一樣拡散を前提とした濃度計算に基づいている。この方法では、塵埃濃度は、換気量により一義的に決まり、吹き出し口や吸い込み口の位置、個数、形状、寸法などのシステムの形態的な比較はできない。これらによる清浄度の差は、気流解析と同様、実験的にしか得られなかった<sup>1)</sup>。

流体の数値計算の発展と計算機能力の向上に伴い、室内気流の数値計算が実用的になり、気流分布や塵埃濃度分布も比較的容易に求められるようになってきた。クリーンルームの設計には、気流分布の詳細なデータが直接役立つ数少ない例であり、気流の数値解析はクリーンルームの技術革新を進める上で有力な手段になる。本文では、市販のプログラムを用いて、既存のクリーンルームの気流の数値解析を行ない、実測との比較やシステム、

運転方法の評価などを行なった

## 2. 解析の概要

### 2.1. プログラムの概要

2.1.1. 基礎式 流体の基礎方程式であるナビエ・ストークスの式を時間平均し、乱流計算用に近似化したレイノルズの方程式を、基礎式として用いる。渦動粘性係数は、乱流エネルギーなどの輸送式である  $K-\epsilon$  型方程式(2方程式モデル)を同時に解いて求める。

2.1.2. 方程式の離散化 基礎方程式の離散化は、コントロールボリューム法による<sup>2)</sup>。移流項は、風上差分(1次精度風上差分)、時間は後退差分を採用している。座標は直交座標系を用いる。変数の配置は、速度のみ空間的に格子点からずらすスタッガード格子である。

2.1.3. 離散化方程式の計算法 離散化した方程式は、格子点の数と変数の数を掛けただけの元数の連立方程式となる。このプログラムでは、圧力を逐次仮定し、速度と乱流量だけの連立方程式を解く方法が採用されている。すなわち、圧力結合方程式の半陰解法(Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equation 略してSIMPLE法)<sup>2)</sup>と呼ばれる逐次近似計算を用いる。

速度と乱流量の連立方程式は、JACOBI法とSOR法の2種類が用意されている。圧力補正式は、MICCG(Modified Incomplete Cholesky Conjugated Gradient)法での計算も可能である。

### 2.1.4. 境界条件

#### (a) 速度の境界条件

壁面に並行な速度成分の、壁面に垂直な方向の変化の離散化が問題である。①滑りなし(Non Slip) ②対数則 ③滑り(Free Slip)が用意されている。①は層流の場合、③は対称な現象で対称な面(仮想壁)に適用される。

#### (b) 乱流量

乱流の場合のみ必要であるので、上述の②と③が用意

されている。

### 2.2. 計算条件

2.2.1. 計算対象 計算対象のクリーンルームの模式図を図-1に示す。室の片側に水平吹き出しのクリーンブースが8区画つらなつた、天井吹き出し床吸い込みのコンベンショナルタイプのクリーンルームである。

このクリーンルームでは、クリーンブースで高い清浄度を必要とする作業が行なわれており、 $0.5\mu\text{m}$ でクラス100、その他の部分はクラス1万である。1Mビット以上の集積度の半導体チップ製造用のクリーンルームとして必要な改造を検討するため、気流性状や清浄度などを実測した。実稼動のクリーンルームのため、換気量や吹き出し口形状などを変化させる実験を行なうことができないので、これを数値シミュレーションによって行なうのがこの研究の主たる目的である。

2.2.2. メッシュシステム メッシュシステムを図-2に示す。 $18 \times 14 \times 57 = 14,364$ メッシュである。

2.2.3. 境界条件 使用した境界条件を表-1に示

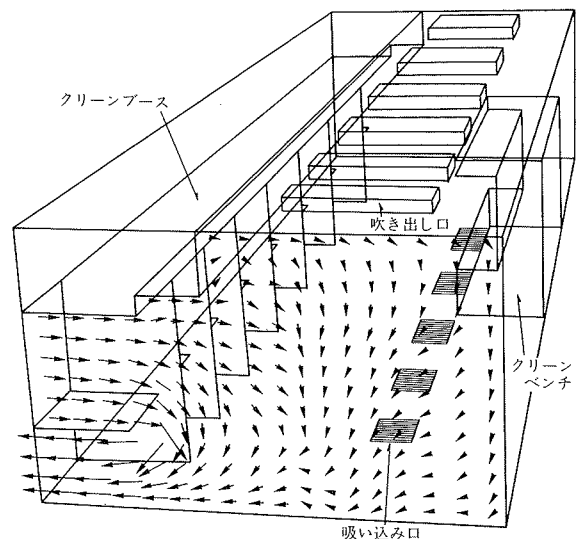


図-1 計算対象の乱流式クリーンルーム

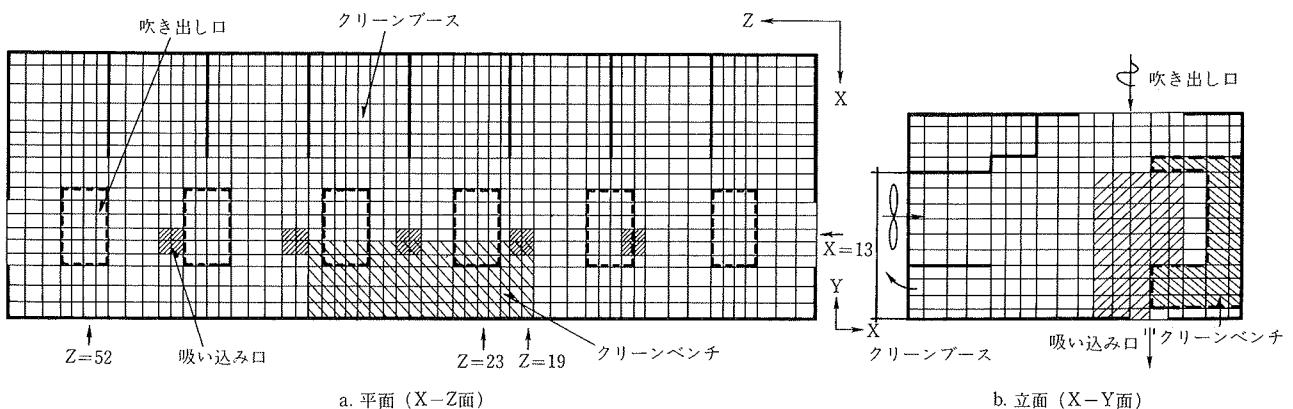


図-2 メッシュシステム

す。

2.2.4. 物性値

空気の比重量  $\gamma = 1.1847 \text{ kg/m}^3$  (25°Cの空気)

// 動粘性係数  $\nu = 1.584 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$  (25°Cの空気)

3. 計算結果

3.1. 計算条件の検討

3.1.1. 定常化の判定 計算対象は、定常状態であるが数値計算では、非定常式を用い、定常になるまで時間を進める計算を行なう。そのため、計算結果が定常に達したか否かを判定する必要がある。ここでは、ある特定の位置の速度のベクトルの変化を観察し、変化がほとんど見られなくなった時点をもって定常化=計算完了とした。これを図-3に示す。図より明らかなように時間きざみ0.5秒, 200サイクル, 実時間100秒で定常に達したとみなすことができる。

3.1.2. 対称性と計算領域 計算対象の室は、z=28とz=29の境界のxy面でほぼ左右対称である。従って、

		$u_n$	$u_t$	$\kappa, \epsilon$	
開口	天井(吹き出し)	0.27	0	$1.0^{-4}$	
	床(吸い込み)	0.86	0	$1.0^{-4}$	
	クリーンブース	(吹き出し)	0.45	0	$1.0^{-4}$
		(吸い込み)	0.58	0	$1.0^{-4}$
	クリーンベンチ	(吹き出し)	0.77	0	$1.0^{-4}$
		(吸い込み)	1.16	0	$1.0^{-4}$
	扉・隙間(吸い込み)	0.09*1	0	$1.0^{-4}$	
壁面	Case A	0	Free Slip		
	Case B	0	対数則		
	仮想壁(対称面)	0	Free Slip		

表-1 境界条件

計算の経済性を高めるため、右側半分の領域だけで計算を行ない全体で計算したものと比較した。結果を図-4, 図-5に示す。図より明らかなように、その差はほとんどみとめられず、以降の計算はすべて半分の領域で行なった。

3.1.3. 壁面での境界条件 乱流モデルの計算で、壁面の境界条件の与え方は、Free Slipと対数則速度分布の二つあり、これによる計算結果の違いを検討した。結果を図-6に示す。その他の境界条件は前出の表-1のとおりである。壁面に対してのみ同表のCase A“滑り(Free Slip)”とCase B“対数則”に対して計算した。図-5と図-6より明らかなように、速度ベクトルで比較する限りその差はあまり認められない。

3.2. 実測との比較

実測したクリーンルームの主な仕様を表-2に示す。熱線風速計のプロープの先端にタフトを取り付け、風速と風向を測定した。結果を図-7に示す。風速は一致しないところもあるが風向は良く一致しており、数値計算は十分実用的であると言える

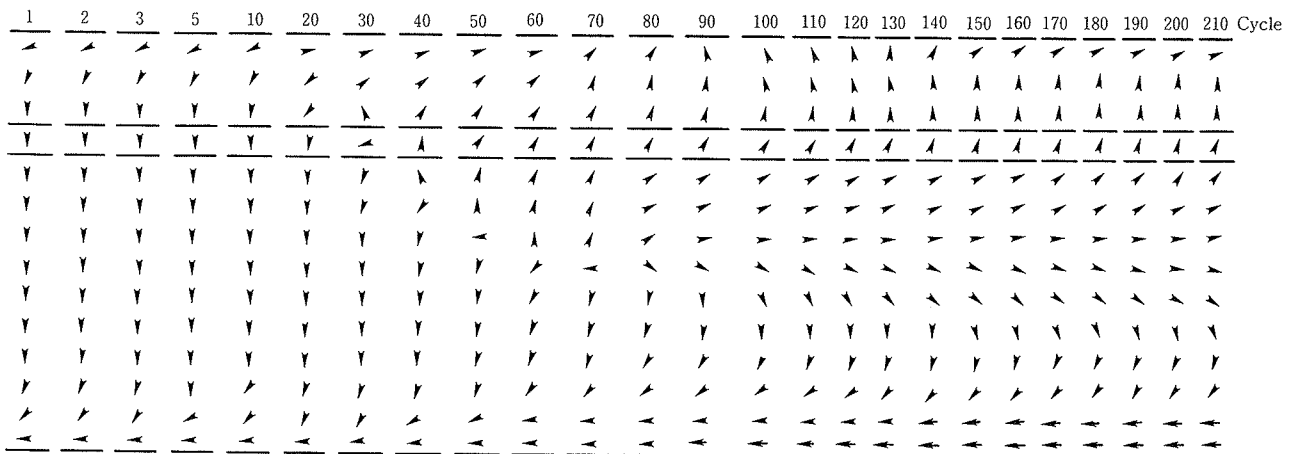
3.3. 気流の数値計算によるシステムの評価

表-3に示すような種類の計算を行ないシステムの評価を行なった。結果を図-8~12に示す。

3.3.1. クリーンブースのカーテンの有無 図-8と図-9の比較より明らかなようにカーテンによってブースと通路は完全に分離される。通路部では、カーテンに沿う上昇流が生じ、床の塵埃を巻き上げる可能性がある

床面積 (m <sup>2</sup> )	天井高 (m)	換気回数 (1/n)	給気量 (m <sup>3</sup> /h)	排気量 (m <sup>3</sup> /h)	方式
65.28	3.100	29.6	6000	3000	乱流

表-2 実測クリーンルームの仕様



X=13, Z=17

図-3 定常化(計算終了)判定用風速ベクトルの変化

る。カーテンがある場合、クリーンブースの流れがカーテンで下方に向けられ床に衝突し、左右に分かれる。この結果床直上に強い流れが形成される。これはカーテンを固定した壁と想定して計算したためと思われる。実際にもこの様な流れが存在するかどうか実測で確かめる必要がある。

**3.3.2. 吹き出し口の差** 図-8, 図-10の比較より明らかなように、吹き出し口3の場合、天井付近の渦が消滅し、一方のダウフローが形成される。これは、高い清浄度を維持するためには非常に望ましい。実測したクリーンルームはこの形式を採っており、高い清浄度が実現されているのは、このことにもよると思われる。

**3.3.3. クリーンベンチの影響** 図-11より明らかなように、カーテンが無くともクリーンブースとクリーンベンチは相互に影響を及ぼしていない。また図-12より明らかなようにカーテンの有無は、この相互の関係に影響がない。

#### 4. まとめ

水平吹き出しクリーンブースと床吸い込みをもつコンベンショナルタイプのクリーンルームの気流の数値計算を行ない、以下の結果を得た。

定常化の判定は、特定の位置の速度ベクトルの変化で判定した。今回の計算では200サイクル前後で定常に達する。

対称性を利用して計算領域を1/2に削減できる。

壁面での境界条件は、滑り (Free Slip) と対数則で顕著な差は認められなかった。

実測との比較では、風向は比較的良く一致したが、速度は一致しないところも認められた。これは、実測法の不備にも一因がある。

カーテンは気流の遮断には有効だが、乱流式の室ではカーテンに沿う上昇流が生じる。カーテンを固定した間

仕切りとした計算上の仮定にも問題があり、今後さらに検討が必要である。

水平方向にも吹き出す形式の吹き出し口は、天井付近の渦を消滅させるのに効果的である。

以上より、気流の数値解析は、クリーンルームのシステムや形状を評価し、最適なシステムを選定するのに有

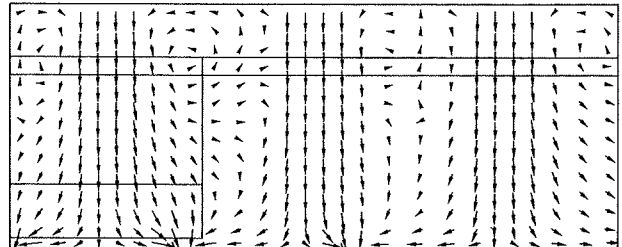


図-4 y-z面 (x=13) 風速ベクトル, 全メッシュ, Free slip

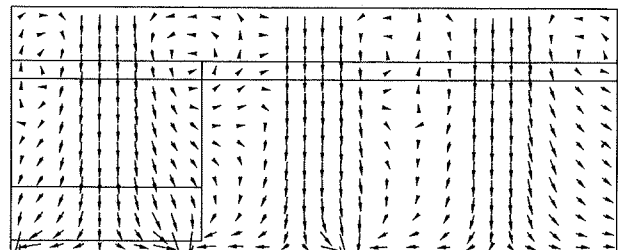


図-5 y-z面 (x=13) 風速ベクトル, 半分メッシュ, Free slip (Case A)

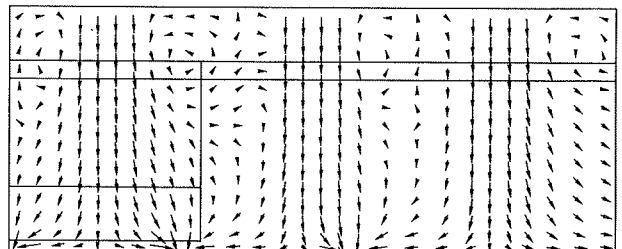
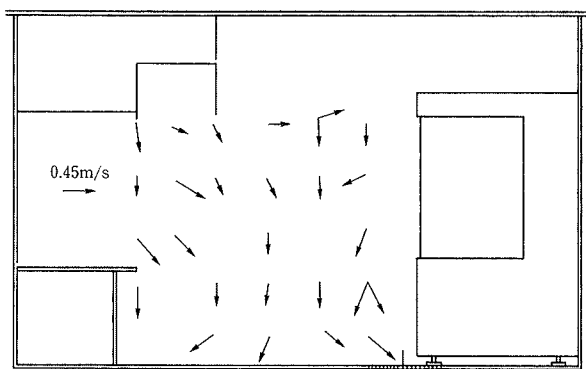
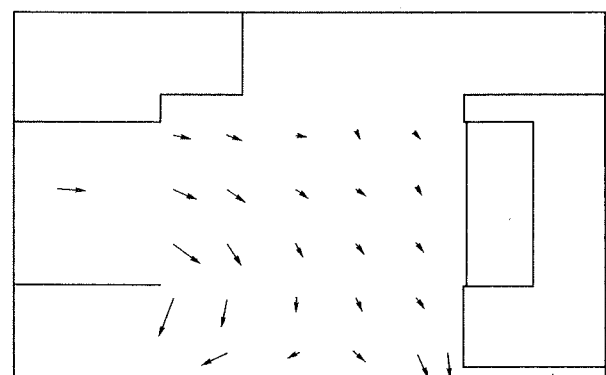


図-6 y-z面 (x=13) 風速ベクトル, 半分メッシュ, 対数則 (Case B)



(注) 風向が二つあるのは、タフトが矢印の間で変動していることを示す。

(a) 実測 (Z=19)



(b) 計算 (Z=19)

図-7 x-y面での風速ベクトルの実測との比較

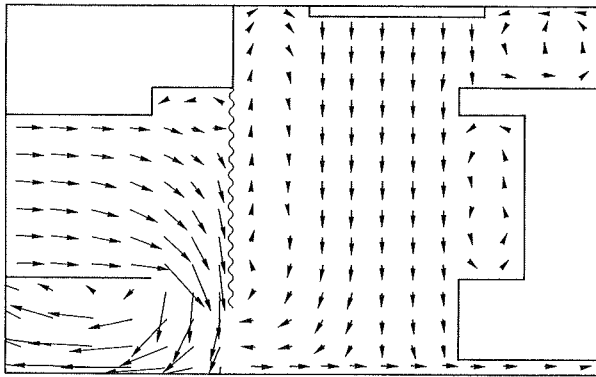


図-8 Case 2 (カーテン, 吹き出し口 2)

	吹き出し口	カーテン	クリーンベンチ
CASE 1	1	なし	OFF
CASE 2	2	あり	OFF
CASE 3	3	なし	OFF
CASE 4	3	あり	OFF
CASE 5	3	なし	ON
CASE 6	3	あり	ON

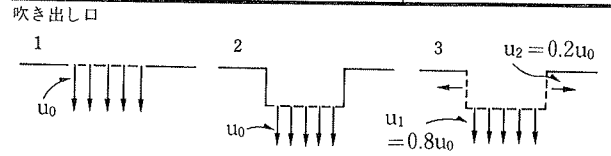


表-3 計算の種類

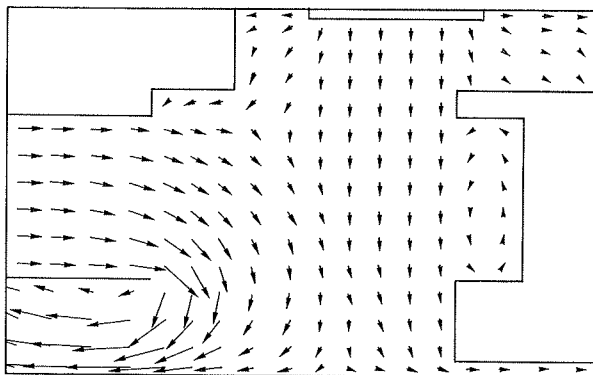


図-9 Case 3 (吹き出し口 3)

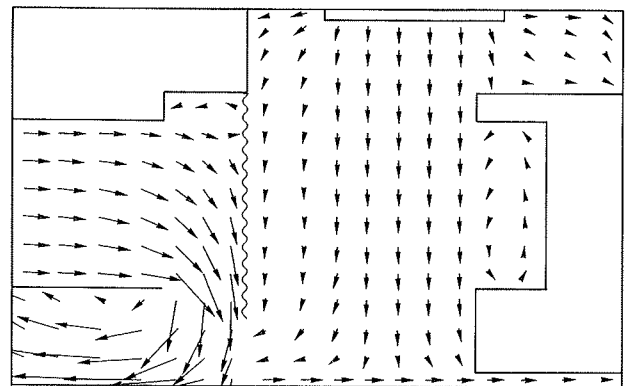


図-10 Case 4 (カーテン, 吹き出し口 3)

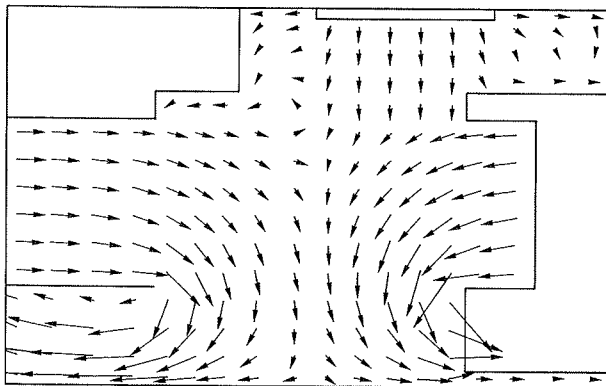


図-11 Case 5 (吹き出し口 3, クリーンベンチ)

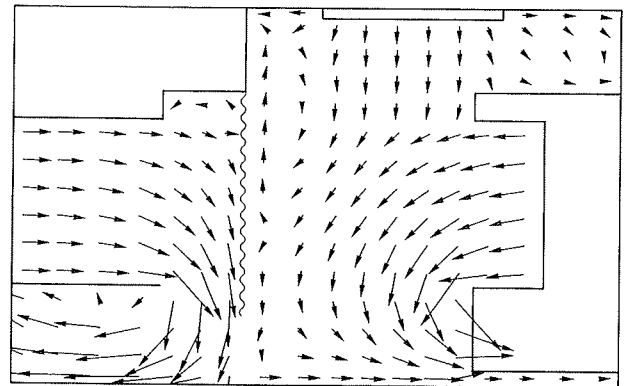


図-12 Case 6 (カーテン, 吹き出し口 3, クリーンベンチ)

効な手段になることを示した。

### 参考文献

- 1) 西岡, 竹内, 一橋: クリーンルームに関する研究(その3) 一垂直層流方式の性能と吹き出し口面積および吸い込み口面積一, 大林組技術研究所報, No. 31,

(1985), p.166~170

- 2) S, V, Patanker: Numerical Heat Transfer and Fluid Flow (日本語版; 水谷, 香月訳; コンピューターによる熱移動と流れの数値解析, (1985), 森北出版 p. 29