

第1章 移流の卓越する室内気流における沈降を伴う浮遊微粒子の拡散

1.1 実大クリーンルームにおける実測と模型実験

1.1.1 はじめに

本章は、クリーンルーム内の浮遊微粒子拡散性状を実験および数値シミュレーションによって予測・評価することを目的とする。クリーンルーム内の浮遊微粒子拡散性状を予測し制御することは、高い清浄度を有するクリーンルームを設計し、これを効率良く維持していく上で特に重要となる。一般に、浮遊微粒子はair-borne particle（気流に乗る粒子）という言葉でも表現されるように、気流と一体になって移流・拡散されるものとされている。この仮定は、クリーンルームの浮遊微粒子拡散性状を予測する際には都合がよい。しかしながら、浮遊微粒子は凝集・沈降・沈着などのガスの汚染質とは異なる固有の性質を持つので、これらの点を踏まえた室全体における移流・拡散現象の検討が必要とされている。

クリーンルーム内の浮遊微粒子拡散性状に関しては多くの研究蓄積がある。浮遊微粒子濃度の計測法については、今福ら¹⁾および早川ら²⁾によりサンプリング管内の粒子損失が検討されている。また、層流型クリーンルーム内の浮遊微粒子拡散性状については藤井ら^{3)~5)}の研究のほか、多くの研究^{6)~9)}がある。しかしながら、室全体への浮遊微粒子の拡散性状の予測、その中でも特にコンベンショナルフロー型クリーンルームに関する検討例は、その気流性状が層流型クリーンルームに比べて極めて複雑なこともあり少ない。さらにこれらクリーンルーム内の浮遊微粒子の沈降など、粒子固有の性質に着目して気流と一体になって運ばれ、Passive Contaminantとみなされる汚染質拡散との比較から、室全体の拡散性状を捉えた研究はほとんどない。

本章では、この点に着目して、実測・模型実験および数値シミュレーションによりクリーンルーム内の浮遊微粒子拡散性状を実際のクリーンルームで想定される条件（浮遊微粒子濃度 10^{10} 個/ m^3 以下、粒径 $0.1 \sim 5 \mu m$ ）の下で、予測解析する手法の開発を目的としている。

本節では、主に浮遊微粒子の沈降に着目し、その拡散性状を実際のコンベンショナルフロー型クリーンルームおよび室内模型により検討・考察した結果について述べる。また、実験で用いられる浮遊微粒子濃度計測法についても簡単な検討を行ったので併せて述べる。次節(1.2)では、同じく浮遊微粒子の沈降に着目し、その室内での拡散性状を数値シミュレーションにより予測する方法に関し、検討・考察した結果を述べる。

1.1.2 浮遊微粒子濃度計測法の検討

室内の浮遊微粒子濃度の測定およびその濃度分布の検討に際しては、浮遊微粒子を含む空気を測定対象空間の各測定点からサンプリング管を介してパーティクルカウンタへ導いて計測している。しかし、この方法は管途中での粒子の凝集や管内壁面への沈着などの影響により粒子濃度が実際より低く見積もられる可能性がある。ここでは、この効果について簡単な

確認実験を行う。

なお、クリーンルーム内の浮遊微粒子拡散性状の研究においては、クリーンルームにレーザ光を照射し、浮遊微粒子からの散乱光を利用して粒子自身を可視化し、直接その全体的な様相をビジュアルに解析する手法も開発されている^{10), 11)}。これをパーティクルカウンタを用いた濃度測定と併用することにより、詳細な微粒子拡散性状の解析も可能となっている。

(1) エアロゾル濃度制御供給装置の開発

浮遊微粒子に関する基礎的な実験を行う場合に安定したエアロゾル場を供給することを目的として開発したエアロゾル濃度制御供給装置（以下、供給装置と略す）を図1.1に示す。エアロゾル発生部はポリスチレン標準粒子懸濁液をアトマイザで噴霧し、乾燥させるタイプのエアロゾル発生装置（ROYCO Model 256）を用いた。エアロゾル濃度制御供給装置は主要な構造を銅板で作成しており、次の仕様により作成した。

- i) 粒径分布・粒子数濃度の安定したエアロゾルを定常的に供給する。
- ii) 粒子数濃度を任意の倍率に希釈可能とする。
- iii) 併せて清浄空気の供給を可能とする。すなわち、エアロゾル発生装置以外の部分から微粒子を発生させない。
- iv) 重力沈降による粒子の装置内壁面への沈着を少なくするために、ミックスチャンバ内の気流は鉛直下向きにする。
- v) 静電気による粒子の装置内壁面への沈着を防止するために、装置内壁面に帯電防止処理（導電性塗料の塗布）を施し、さらに装置全体を接地（アース）する。
- vi) 同様の理由で発生粒子の帯電を除去するため、エアロゾル発生部分にエアロゾル中和器（KANOMAX Model 3077S, 放射線源： Am^{241} , 放射能：100 μ Ci未満）を設置する。

(2) サンプル管内の粒子数損失に関する実験

実験種類を表1.1に、実験系統図を図1.2に示す。粒子数濃度の測定には、パーティクルカウンタ [HIAC/ROYCO Model 4102, 吸引流量： $4.7 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$ (0.1 ft^3/min), $4.7 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$ (0.01 ft^3/min)] を使用する。

(i) 管の材質の影響 (図1.3)

エアロゾル中和器（前出）を用いて発生粒子を総体として電気的に中和した場合（破線）としない場合（実線）について検討する。

a. 中和器を使用しない場合

テフロン、軟質ポリスチレンの粒子通過率が特に小さい。テフロンについては今福らも同様の結果をすでに報告している¹⁾。この原因の一つとして、テフロンは電気伝導度が低く、

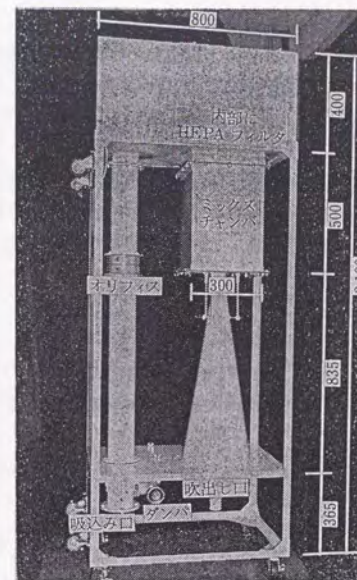


図1.1 エアロゾル濃度制御供給装置（粒子発生部を除く）

（単位：mm）

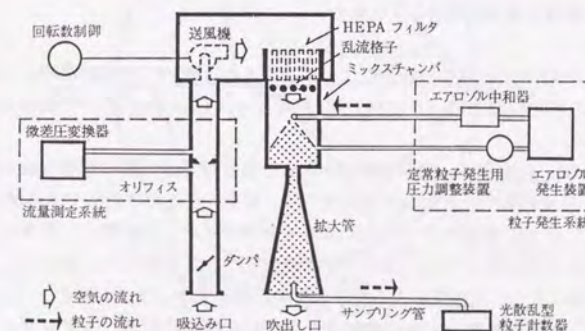


図1.2 エアロゾル濃度制御供給装置を用いた実験システム

通常大きくマイナスに荷電しやすいため、実験時に静電荷電を防ぐことが困難であることが挙げられる。他の材質は粒子通過率0.9以上と良い値を示す。

b. 中和器を使用した場合

テフロンを含め、どの材質も良い通過率を示す。本実験で用いた標準粒子懸濁液のアトマイザ噴霧乾燥方式の粒子発生装置から供給された粒子は、かなり帯電しているものと考えられる。以下の実験では、結果から考慮して粒子数損失の最も少ないタイロン管を使用する。

(ii) 管の長さによる影響 (図1.4)

水平管内で支配的と考えられる重力沈降によって生じる粒子の管壁への沈着による粒子数濃度の変化は、次式で表される (管内流を層流Poiseuille流と仮定)¹²⁾ (補注1.1参照)。

$$\frac{n}{n_0} = \frac{2}{\pi} (-2\alpha\beta + \alpha^{1/3}\beta + \arcsin\beta) \quad (1.1)$$

ただし、 $\alpha = \frac{3V_s L}{4du}$, $\beta = (1 - \alpha^{2/3})^{1/2}$

粒子通過率の計算値を図1.4に実線で示す。実験値と式(1.1)より求めた値は良く一致している。図1.4の右端に長さ3m、内径6mmの管を鉛直に設置した場合の粒子通過率を示す。この場合、粒径に関係なく粒子通過率はほぼ1.0である。したがって、粒径が大きいほど、また吸引流量が少ないほど、重力沈降による影響が大きいことがわかる。

(3) 浮遊微粒子濃度計測法のまとめ

- (i) 0.31および1.0 μ m粒子の場合には、サンプリング管内での重力沈降による粒子数損失は今回の実験の範囲内 (タイロン管、長さ5m、内径6mm) なので実用上無視することができる。
- (ii) 4.5 μ m粒子の場合は、吸引流量が少ないときには重力沈降の影響を受ける。そのため4.5 μ m以上の粒子を対象とする計測では、管をできるだけ短くする必要がある。
- (iii) 本実験のようにポリスチレンラテックスをアトマイザで噴霧し、乾燥させる方法で粒子を発生させた場合には、粒子は全体としてかなり帯電しているため、サンプリング管の材質によっては吸着による粒子損失の影響が大きい場合がある。
- (iv) このような装置を用いて浮遊微粒子を発生させる場合には、エアロゾル中和器の設置が必要である。

1.1.3 実大コンベンショナルフロー型クリーンルームの実測

(1) 実験概要

表1.1 管材質の実験種類

Case No.	材質	長さ [m]	発生粒子径 [μ m]	備考
中和器の効果	1-1 タイロン	3	0.31	管は水平に設置
	1-2 塩化ビニル	3	0.31	
	1-3 ゴム	3	0.31	
	1-4 テフロン	3	0.31	
	1-5 ポリエチレン(軟)	3	0.31	
	1-6 ポリエチレン(硬)	3	0.31	
長さの違い	2-1 タイロン	1	0.31	管は水平に設置
	2-2 タイロン	3	0.31	
	2-3 タイロン	5	0.31	
	2-4 タイロン	1	1.00	
	2-5 タイロン	3	1.00	
	2-6 タイロン	5	1.00	
	2-7 タイロン	1	4.50	
	2-8 タイロン	3	4.50	
	2-9 タイロン	5	4.50	
鉛直	3-1 タイロン	3	0.31	管は鉛直に設置
	3-2 タイロン	3	1.00	
	3-3 タイロン	3	4.50	

注 管内径はいずれも6mm。

タイロン管：耐薬品性に優れた医薬品用管、今村ゴム製

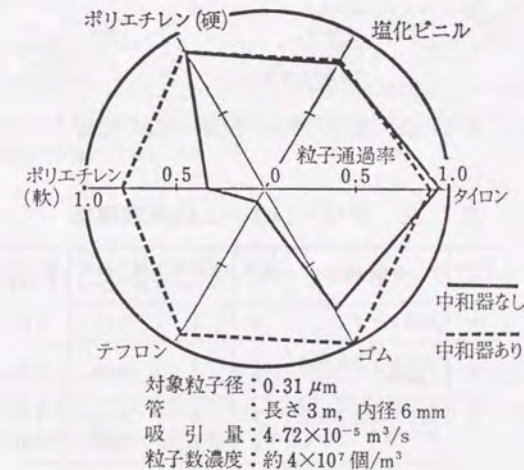


図1.3 管の材質の違いによる粒子通過率
(中和器を介した場合と介さない場合)

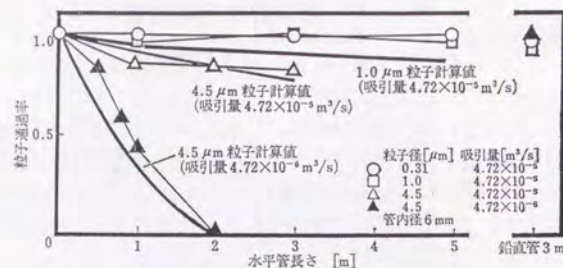


図 1.4 水平管・鉛直管における粒子通過率
(重力による沈着の検討)

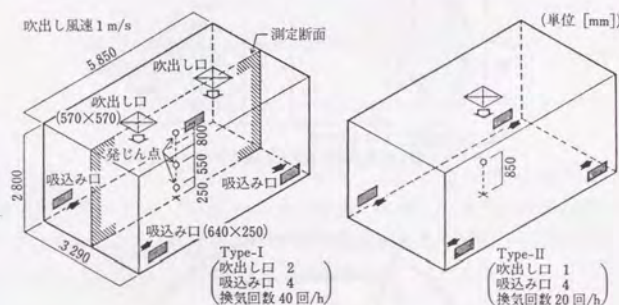


図 1.5 実大クリーンルームの概要

表 1.2 クリーンルーム内実験種類

Case No.	実験項目	測定 No.	室形状 Type	発じん点高さ[m]	粒子径 [μm]
—	基本タイプ	1	I	0.80	0.31
1	発生粒子径を変えた場合	2	I	0.80	1.0
2	発じん点高さを変えた場合	3	I	0.25	0.31
		4	I	1.60	0.31
3	気流障害物を置いた場合	5	III	0.85	0.31
4		6	IV	0.85	0.31
5	吹出し口数の違い	7	II	0.85	0.31

注 粒子発生量約 10^5 個/s.
粒子発生点での粒子数濃度約 6×10^8 個/ m^3 .

測定対象となる実大クリーンルームの概要 (幅3290×奥行5850×天井高2800mmの実験用クリーンルームで最大換気量520 m^3 /min, 換気回数580回/h) を図1.5に、実験種類を表1.2に示す。実験は等温吹出し (吹出し風速1.0m/s) で行う。換気回数はType 1, 3 (吹出し口2個, 吸込み口4個) では40回/h、Type 2, 4 (吹出し口1個, 吸込み口4個) では20回/hとする。Type 3, 4は、それぞれType 1, 2の室中央に気流障害物となる装置モデル (長さ1100×幅650×高さ820mm) を設置した場合である。

気流測定は、スカラー風速値をサーミスタ風速計により、また風向をスモークテストによる目視観測により行う¹⁴⁾。浮遊微粒子濃度の測定には、パーティクルカウンタ (前出) を用いる。サンプリングにはタイロン管 (内径6mm, 長さ5m) を使用し、吸引流量は $4.7 \times 10^{-5} m^3/s$ (0.1 ft^3 /min)、測定時間は60秒とする。粒子はアトマイザによる噴霧乾燥方式 (前出) で発生させ、標準粒子として2種類の単分散ポリスチレン標準粒子 (粒径0.31および1.0 μm) (積水化学製) を用いる (補注1.2参照)。通常のクリーンルーム内で観測される浮遊微粒子濃度を考慮し、粒子発生量は約 10^5 個/s (室内瞬時一様拡散濃度約 3×10^5 個/ m^3)、発塵点での粒子数濃度は 6×10^8 個/ m^3 程度とする。発塵点近傍では粒子数濃度は非常に高いので、この付近の粒子同士の凝集について検討する。1.0 μm 粒子の単分散エアロゾルの場合の乱流凝集 [乱流凝集定数 $K_T^{12)} = 10^{-16} m^3/s$ (乱流散逸率 $\varepsilon_0 = 3.3 \times 10^{-3} m^2/s^3$ と仮定)] による粒子数の半減期を単純な凝集モデル¹²⁾

$$\frac{dn}{dt} = -Kn^2 \quad (1.2)$$

に基づき試算すると約 10^7 秒となる。この値は室内拡散の特徴時間180秒 (換気1回に要する時間) に比べて十分に大きいため、乱流凝集の影響は無視し得ると考えられる。また、ブラウン運動による凝集の影響はさらに小さい¹²⁾。

(2) 実験結果

(i) 気流分布 (図1.6)

a. Type 1

吹出し口2個の場合は、吹出し噴流は減衰せずに床面まで到達し、吹出し口→床→壁→天井へと循環流を形成する。吹出し噴流と吹出し噴流の間の床面近くで多少上昇流を生じる。吹出し噴流内に比べて他の部分の風速は極めて小さい。

b. Type 2

吹出し口1個の場合、吹出し噴流は減衰せずに床面まで到達し、吹出し口→床→壁→天井へと循環流を形成する。他の部分の風速は極めて小さい。

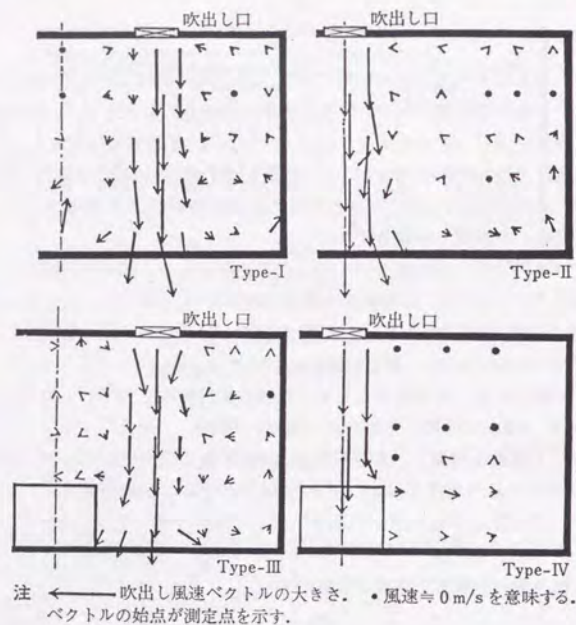


図 1.6 気流分布

c. Type 3

吹出し口 2 個で室中央に気流障害物を置いた場合は、気流性状は Type 1 と似ており、気流障害物を設置したことによる影響は少ない。

d. Type 4

吹出し口 1 個で吹出し噴流直下に気流障害物を置いた場合は、吹出し噴流は気流障害物上面に衝突し、そのから壁面に向かって横向きの気流が生じる。他の部分の風速は極めて小さい。

(ii) 浮遊微粒子微粒子濃度分布 (図 1.7)

a. 基本タイプ (No. 1)

室中央の二つの吹出し口間の中間の高さ 0.8 m の位置から粒径 $0.31 \mu\text{m}$ の粒子を発生させた場合は、吹出し口直下の粒子が検出されない清浄な領域は床面まで広がっている。また室中央で生じる上昇流の影響により発塵点から天井面に向かって高濃度領域が広がっている。

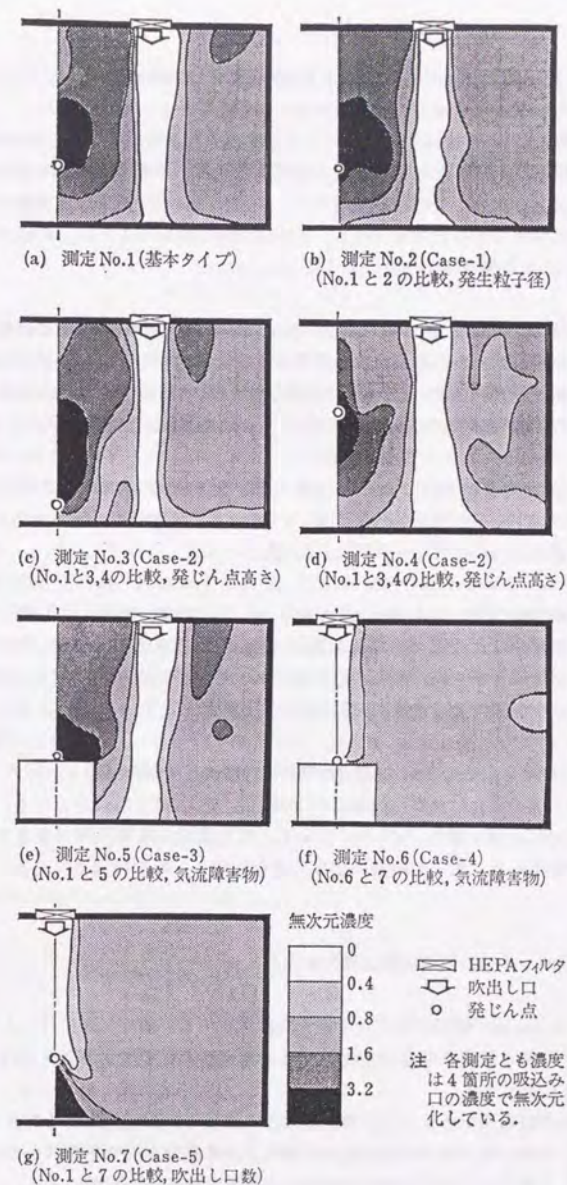


図 1.7 浮遊微粒子濃度の分布

b. Case 1 [粒子径0.31 μm (No. 1)と1.0 μm (No. 2)]の比較

粒径が異なる場合には重力沈降速度の差により濃度分布に差異が生じることが考えられる。1.0 μm 粒子の沈降速度として $3.6 \times 10^{-5} \text{m/s}$ を用いると、天井高 (2.8m) に対応する重力沈降の特徴時間は 7.8×10^4 秒となる。この値は室内の拡散に関する特徴時間180秒 (前出) と比較して十分長いので、この種の時間スケールを持つ現象に着目した実験においては、重力沈降の影響は無視できると考えられる。実験結果からわかるように、粒径の違い (0.31 μm と1.0 μm) による濃度分布の差は全く見られない。

c. Case 2 [発塵点高さ0.8m (No. 1), 0.25m (No. 3)と1.6m (No. 4)の比較 (TYPE 1)]

発塵点を室中央の二つの吹出し口間の中間位置に設定する。発塵点高さが0.25, 0.8mの場合には、高濃度領域は上方へ広がる。発塵点高さが1.6mの場合には高濃度領域は下方へ広がる。両者の差異は室中央の床面近くで生じている上昇流の影響によるものと考えられる。

d. Case 3 [気流障害物：なし (No. 1)とあり (No. 5)の比較 (吹出し口2個)]

室中央の吹出し口間に気流障害物を置いた場合は、気流分布と同様 (図1.6, Type 1, 3の比較) に、濃度分布に大きな差異は見られない。

e. Case 4 [気流障害物：なし (No. 6)とあり (No. 7)の比較 (吹出し口1個)]

吹出し噴流直下に気流障害物がある場合、室全体に高濃度領域が見られない。これは、吹出し噴流が気流障害物上面に衝突する位置において粒子が吹出し気流とよく混合し、そこから壁面に向かう気流によって室内に運ばれ、十分拡散してしまうためと考えられる。

f. Case 5 [吹出し口数の変化, 2個 (No. 1)と1個 (No. 7)の比較]

吹出し口1個の場合は濃度は発塵点の下流で高く、上流では清浄となる。またそれ以外の部分では、ほぼ一様な濃度 (約1.0) を示す。室内濃度が比較的均一となるのは、発塵点が吹出し噴流中にあり、粒子が噴流中でよく混合拡散し、その後室全体に運ばれるためと考えられる。

(3) クリーンルーム内の実験結果のまとめ

- (i) 0.31~1.0 μm の範囲で発生粒子径を変化させても、濃度分布にほとんど差異はない。
- (ii) 吹出し口間で発塵点高さを変化させると、発塵点位置での気流の向きと対応して、濃度分布も変化する。
- (iii) 発塵点位置を変化させると、濃度分布は気流分布の影響を受けて大きく変化する。
- (iv) 吹出し口間における気流障害物の有無による濃度分布への影響は小さい。
- (v) 吹出し口直下での気流障害物の有無による濃度分布への影響は大きい。
- (vi) 吹出し噴流中で浮遊微粒子を発生させると、粒子は噴流中でよく混合してから室内に拡散するため、室内の濃度分布は一様となる。

1.1.4 浮遊微粒子の重力沈降に関する模型実験

重力沈降が浮遊微粒子拡散性状に与える影響をさらに詳細に検討するため室内模型を用いて粒子の沈降速度比 (重力沈降速度と吹出し風速の比 V_s/U_o) を変化させた拡散実験を行い、濃度分布性状を詳細に測定する。

(1) 実験概要

測定対象模型 (長さ1050×幅770×高さ490mm) の概要を図1.8に示す¹⁵⁾。実験種類は表1.3に示す。実験は等温吹出しとして行う。汚染質発生点は、模型室中央の高さ35mm (a点) と245mm (b点) の2箇所に設定する。測定断面は、吹出し・吸込み口を含む模型室中央断面とする。気流測定はタンデム型熱線風速計¹⁶⁾を用いて3方向成分を測定する。

浮遊微粒子濃度の測定にはパーティクルカウンタ (前出) を用いる。浮遊微粒子はアトマイザによる噴霧乾燥方式 (前出) で発生させる。発生粒子は単分散ポリスチレン標準粒子 (平均径0.31, 1.0, 4.5 μm の3種類、密度1.05g/ m^3) を用いる。クリーンルームで問題となる粒径は最大でも5 μm 程度であると考えられるため、これらの粒径を選定している。発生点直後での粒子濃度は $10^8 \sim 10^{10}$ 個/ m^3 程度である。汚染質発生は直径4cmのスポンジ球を介して、室内気流になるべく影響を与えないように方向一様かつ1cm/s以下の排出速度で行う。なお、浮遊微粒子含有空気はアトマイザ噴霧乾燥過程で冷却されるため、実験時はこの温度を模型実験室温と0.1℃以内の誤差で同一となるように特に注意を払っている。浮遊微粒子拡散性状と比較するためトレーサガス (浮力の影響が無視できるもの、エチレン、比重0.97) の拡散実験も併せて行う。トレーサ濃度測定にはFID (水素炎ガスクロマトグラフ) を用いる。なお、気流および浮遊微粒子・汚染質濃度は、測定時間30秒の平均値で示す。

(2) 拡散に関する無次元パラメータ

浮遊微粒子の拡散方程式は次式で与えられる。

$$\frac{\partial n}{\partial t} + \frac{\partial n U_j}{\partial x_j} + \frac{\partial n V_s}{\partial x_3} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(K_r \frac{\partial n}{\partial x_j} \right) + C_r \quad (1.3)$$

C_r : 凝集などによる補正項、本研究では無視

添え字3: 鉛直方向成分

を L 、 U_o で無次元化すれば次の二つのパラメータが得られる。

$$\frac{U_o L}{K_r} \quad (\text{乱流ベクレ数}) \quad (1.4)$$

$$\frac{V_s}{U_o} \quad (\text{沈降速度比}) \quad (1.5)$$

浮遊微粒子の拡散実験ではこれらに着目する必要がある。ここでは L, U_0 を固定してほぼ同一の乱流ペクレ数とみなせる状態の模型室内において、 V_s/U_0 の変化が濃度分布に及ぼす影響について調べる(表1.3)。

(3) 実験結果

(i) 模型室内の気流性状(図1.9)

$U_0=2.0\text{m/s}$, 0.5m/s の両者ともほぼ同様の分布となる。吹出し噴流はほとんど減衰せずに対向壁まで到達し、壁面に沿って床面まで下降する。そこから床面に沿って吸込み口に到達する。他の部分は低風速である。室右側壁面近傍の下降流は、 $U_0=0.5\text{m/s}$ のほうが $U_0=2.0\text{m/s}$ の場合に比べてやや弱い。

(ii) 浮遊微粒子拡散性状

a. Case 1 [$U_0=2.0\text{m/s}$, 汚染質発生点 a, 図1.10(a)~(d)]

吹出し噴流中では空気は清浄であり、汚染質発生点から吸込み口に向かって高濃度となる。エチレンと3種類の粒子径の濃度分布間には有意な差異は認められない。ちなみに、この室内全体の特徴時間スケールを100秒程度($U_0=0.5\sim 2.0\text{m/s}$ のときの換気回数逆数)、室内全体の特徴長さスケールを2.5m(吹出し口から吸込み口までの延長距離)とすると、この移流・拡散場の特徴時間は(特徴長さ/特徴時間) $\approx 0.03\text{m/s}$ となり、 $4.5\mu\text{m}$ 粒子の沈降速度 $6.2\times 10^{-4}\text{m/s}$ に比べて十分大きい。

b. Case 2 [$U_0=2.0\text{m/s}$, 汚染質発生点 b, 図1.11(a)~(d)]

吹出し噴流中では空気は清浄に保たれ、汚染質発生点ごく近傍のみ高濃度となる。エチレンと3種類の粒子の濃度分布間には有意な差異は認められない。

c. Case 3 [$U_0=0.5\text{m/s}$, 汚染質発生点 a, 図1.12(a)~(d)]

分布はCase 1と同様で、エチレンと3種類の粒子の濃度分布間には有意な差異は認められない。

d. Case 4 [$U_0=0.5\text{m/s}$, 汚染質発生点 b, 図1.13(a)~(d)]

吹出し噴流によって生じる清浄領域は対向壁面まで到達しない。Case 2に比べて全体として濃度が高い。図1.14に測定No. 13とNo. 16の各点の濃度の相関を示す。エチレンと $4.5\mu\text{m}$ の粒子濃度分布には有意な差異は認められない。

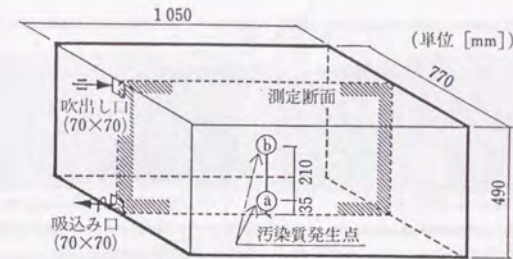
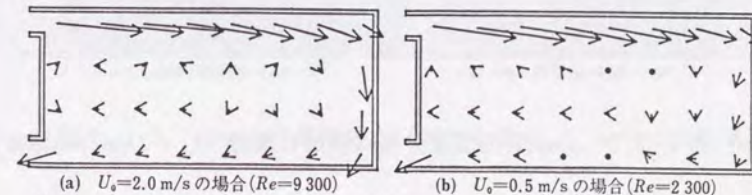


図1.8 室内模型と測定断面

表1.3 模型実験種類

Case No.	測定 No.	吹出し風速 [m/s]	汚染質発生点	汚染質	重力沈降速度 [m/s]	V_s/U_0
1	1	2.0 ($Re=9300$)	a	エチレン	—	—
	2			$0.31\mu\text{m}$ 粒子	4.5×10^{-6}	2.3×10^{-6}
	3			$1.0\mu\text{m}$ 粒子	3.5×10^{-5}	1.8×10^{-5}
	4			$4.5\mu\text{m}$ 粒子	6.2×10^{-4}	3.1×10^{-4}
2	5	0.5 ($Re=2300$)	b	エチレン	—	—
	6			$0.31\mu\text{m}$ 粒子	4.5×10^{-6}	2.3×10^{-6}
	7			$1.0\mu\text{m}$ 粒子	3.5×10^{-5}	1.8×10^{-5}
	8			$4.5\mu\text{m}$ 粒子	6.2×10^{-4}	3.1×10^{-4}
3	9	0.5 ($Re=2300$)	a	エチレン	—	—
	10			$0.31\mu\text{m}$ 粒子	4.5×10^{-6}	9.0×10^{-6}
	11			$1.0\mu\text{m}$ 粒子	3.5×10^{-5}	7.0×10^{-5}
	12			$4.5\mu\text{m}$ 粒子	6.2×10^{-4}	1.2×10^{-3}
4	13	0.5 ($Re=2300$)	b	エチレン	—	—
	14			$0.31\mu\text{m}$ 粒子	4.5×10^{-6}	9.0×10^{-6}
	15			$1.0\mu\text{m}$ 粒子	3.5×10^{-5}	7.0×10^{-5}
	16			$4.5\mu\text{m}$ 粒子	6.2×10^{-4}	1.2×10^{-3}



注 → 吹出し風速ベクトルの大きさを示す。 • 風速 $\approx 0\text{m/s}$ の点を示す。

図1.9 気流分布

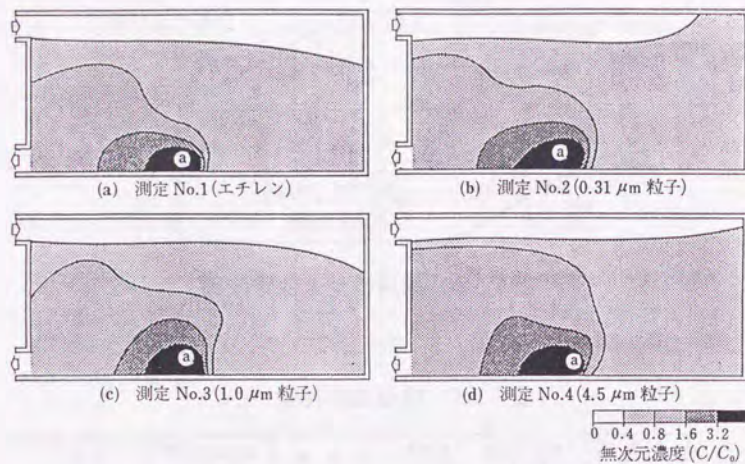


図 1. 10 Case 1 の濃度分布 (吹出し風速 $U_o = 2.0\text{m/s}$ の場合)

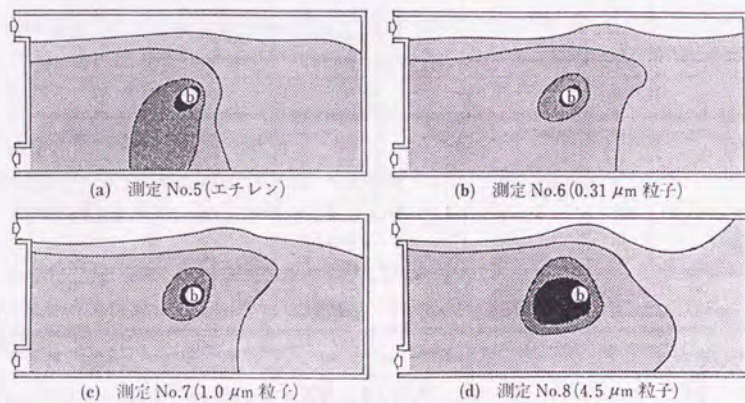


図 1. 11 Case 2 の濃度分布 (吹出し風速 $U_o = 2.0\text{m/s}$ の場合)

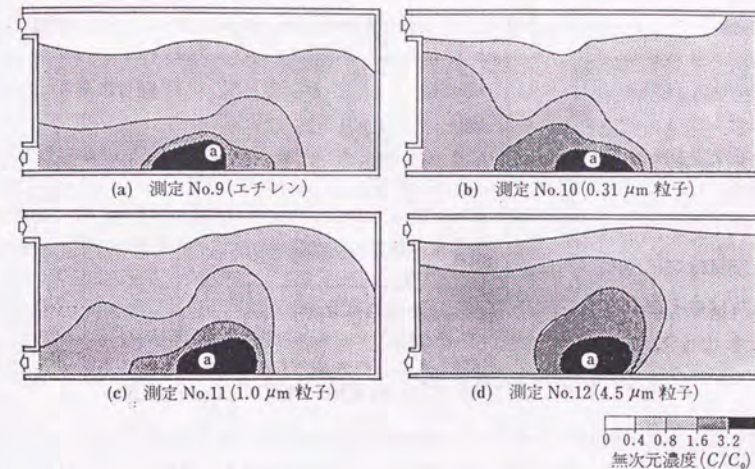


図 1. 12 Case 3 の濃度分布 (吹出し風速 $U_o = 0.5\text{m/s}$ の場合)

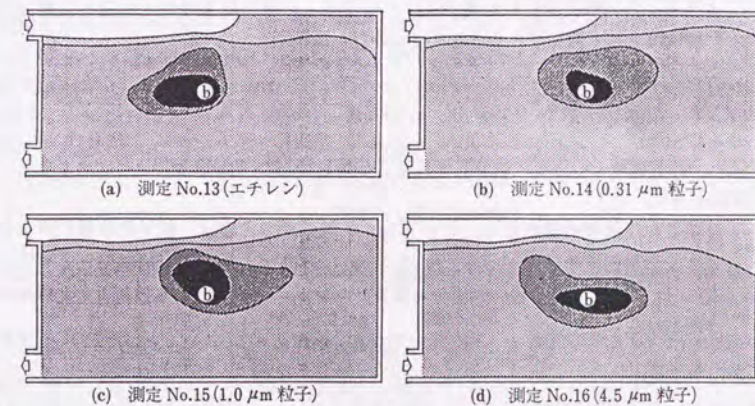


図 1. 13 Case 4 の濃度分布 (吹出し風速 $U_o = 0.5\text{m/s}$ の場合)

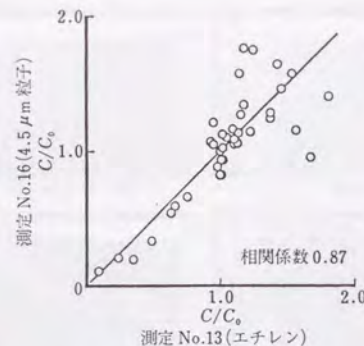


図 1.14 測定No. 13と測定No. 16の C/C_0 の相関

(4) まとめ

- (i) 浮遊微粒子の沈降速度比 V_s/U_0 を $2.3 \times 10^{-6} \sim 1.2 \times 10^{-3}$ まで変化させた拡散実験のいずれも、濃度分布はパッシブスカラーの場合と変わらない。
- (ii) したがって、通常のクリーンルームの吹出し風速を 1 m/s 程度と想定すると、室全体のスケールの拡散に着目した場合には、粒径 $5 \mu\text{m}$ 程度以下の粒子に関して重力沈降の影響はほとんど無視できると考えてよい。

1.1.5 1.1節のまとめ

以上、浮遊微粒子の固有の性質、特に重力沈降に着目して実験を行った結果として、以下の結論を得た。

- (1) 浮遊微粒子濃度の測定には、サンプリング管の長さ・管径、粒子計数器の吸引流量などを十分検討する必要がある。今回の場合、対象粒子径を $1 \mu\text{m}$ 以下として吸引流量を $0.1 \text{ ft}^3/\text{min}$ とする場合、タイロン管で長さ 5 m 、内径 6 mm のサンプリング管を用いると問題は生じない。
- (2) クリーンルームの室全体の規模での浮遊微粒子の拡散を、通常のコンベンショナルフロー型クリーンルームの状態〔浮遊微粒子濃度 $10^{10} \text{ 個}/\text{m}^3$ ($\approx 10^8 \text{ 個}/\text{ft}^3$) 以下、粒径 $0.3 \sim 4.5 \mu\text{m}$ 程度〕で考える場合、凝集・重力沈降など、浮遊微粒子固有の性質の影響は無視しても差し支えないことを、実験的に確認した。
- (3) すなわち、通常のコンベンショナルフロー型クリーンルーム内の浮遊微粒子拡散性状は、Passive Scalar Contaminantの拡散と仮定して予測することについての妥当性を実験的に確認した。

次節では本研究成果を基に行った数値シミュレーションによる浮遊微粒子拡散性状の予測法、特に重力沈降の影響に関する検討結果を報告する。

1.2 数値シミュレーションと実大実験の比較

1.2.1 本節の目的

これまでの研究^{(17), (18)}にて、コンベンショナルフロー型クリーンルーム内気流に関するシミュレーションによる予測法は実用手法として有望であることが示されている。また、前節1.1では、特に移流の卓越するコンベンショナルフロー型クリーンルーム内において重力沈降に着目した浮遊微粒子の拡散性状に関する実験結果を示した⁽¹⁹⁾。

本節では、実験結果に対応して、①気流性状に関しては $k-\varepsilon$ 型2方程式乱流モデル（以下 $k-\varepsilon$ モデルと略称）を用い、②浮遊微粒子拡散性状に関して重力沈降の影響を考慮した数値シミュレーションを行い、その浮遊微粒子拡散解析の有用性を確認するとともに、重力沈降がコンベンショナルフロー型クリーンルーム内の浮遊微粒子拡散性状に与える影響を考察した。

シミュレーションによるコンベンショナルフロー型クリーンルーム内の流れ場、拡散場解析の有効性は、多くの研究により確認されている。流れ場に関しては、 $k-\varepsilon$ モデルに基づくシミュレーションが三次元等温場の室内気流をよく再現することを村上^{(17), (18)}および山口^{(20)~(22)}ほか、多くの研究者が確認している。また室内の汚染物質拡散に関しては、空気と等比重のガス拡散に関するシミュレーションが模型実験結果をよく再現することはすでに数多くの事例で確認されている^{(15), (17), (18)}。しかしながら、浮遊微粒子の拡散に関して、重力沈降など浮遊微粒子固有の物理性状を考慮した室全体の粒子濃度空間分布のシミュレーションを行い、その有効性を実験との比較により検討した例はほとんどない。

本研究は、こうした状況を踏まえてクリーンルーム内の浮遊微粒子に関してシミュレーションの妥当性について検討する。前節でも述べたように実験では、粒子直径（以下、粒径と略称） $5 \mu\text{m}$ 以上の浮遊微粒子を定常均一に発生させることが困難である。したがって、実験ではこのような大粒径の重力沈降が室内拡散に及ぼす影響を検討することが難しい。本研究では、シミュレーションにより、この影響を系統的に解析する。

1.2.2 本研究におけるクリーンルーム内の浮遊微粒子拡散に関する基礎的仮定

本研究では実際のクリーンルームで問題となる粒径を考慮し、検討対象とした粒径を主に $0.3 \sim 4.5 \mu\text{m}$ 程度としている。ただし、重力沈降が拡散に及ぼす影響を検討するために粒径 $100 \mu\text{m}$ の微粒子まで含めて解析する。粒子濃度は最大 $10^8 \text{ 個}/\text{m}^3$ 程度を仮定する。また、対象微粒子は単分散標準ポリスチレン球状粒子（密度 $1.0 \text{ g}/\text{cm}^3$ ）を仮定して重力沈降速度を算出している。

(1) 浮遊微粒子の移流と拡散⁽¹²⁾

浮遊微粒子の緩和時間（relaxation time） τ は密度 $1 \text{ g}/\text{cm}^3$ の粒子で、粒径 $0.1 \mu\text{m}$ の場合約

1×10^{-7} 秒, $1 \mu\text{m}$ の場合 3×10^{-6} 秒, 粒径 $10 \mu\text{m}$ でも 3×10^{-4} 秒と極めて小さい。また、そのブラウン運動による拡散係数も、同じく粒径 $0.1 \mu\text{m}$ の場合 $8 \times 10^{-6} \text{cm}^2/\text{s}$, $1 \mu\text{m}$ の場合 $3 \times 10^{-7} \text{cm}^2/\text{s}$, 粒径 $10 \mu\text{m}$ では $2 \times 10^{-8} \text{cm}^2/\text{s}$ と、空気の動粘性係数 $0.15 \text{cm}^2/\text{s}$ に比べて極めて小さく、その値は粒径が大きくなるほど小さくなる。そのため、室内での浮遊微粒子単体の移流・拡散を考察する際には第一近似として空気と全く同一に移動し、気流の運動に何ら影響を及ぼさない Passive Scalar Contaminant と仮定できる。ただし、微粒子に重力、静電気力などの体積力が働く場合、これを考慮する必要がある。本節では、特に重力による影響に絞って考察する。重力の場合、重力による沈降速度 τ_g [g : 重力加速度 ($=980 \text{cm/s}^2$)] は、粒径が大きくなれば無視し得なくなり、Passive Scalar Contaminant の仮定も成り立たなくなる。[例えば直径 $10 \mu\text{m}$ の場合 0.3cm/s となる (表 1.5 参照)]。

(2) 浮遊微粒子の凝集¹²⁾

凝集の効果は粒子初期濃度に大きく依存し、初期値が本研究で仮定する 10^8 個/ m^3 程度ならば、凝集による粒子濃度の変化はブラウン拡散を含めて極めて小さいと評価できる。したがって各粒径ごとに解析した浮遊微粒子の拡散性状は、実際問題において発生微粒子の粒度分布に応じた単純な重ね合わせで評価することが可能である。

(3) 沈着

一般に、沈着の効果はブラウン拡散沈着など、粒子の拡散速度が小さいか、または静電沈着などで物体間距離により吸引力が変化する場合、極めて小スケールの現象にとどまることが多い。そのため、壁体・装置などのごく近傍での浮遊微粒子の挙動を考察する際には重要となる⁵⁾。しかし室全体における浮遊微粒子の拡散性状を考察する際には沈着による粒子濃度変化の効果は小さいものと考えられる。したがって本研究では沈着は重力沈降による場合のみを考慮する。

1.2.3 粒子拡散シミュレーション

気流性状の三次元解析は $k-\varepsilon$ モデル (表 1.6 参照) を基礎とする数値シミュレーションにより行う。浮遊微粒子拡散性状の数値解析では、前述の前提を基に以下の仮定を行う。

重力沈降速度を 0 と仮定する場合、汚染質拡散は完全な Passive Scalar Contaminant の拡散と仮定する。すなわち、①凝集・沈着による粒子損失、粒度分布の変化は無視する。②重力沈降は無視する。③浮遊微粒子は気流と完全に一体となって輸送される。また、④発塵は初速 0 の定常発生とし、発生量は瞬時一様拡散濃度が 1.0 となるように設定する。

重力沈降を考慮する場合は、上記①の中で拡散による凝集・沈着の分を無視する仮定は設けるが、重力沈降による床面への沈着は考慮して②、③の条件を仮定しない。粒子の拡散は表 1.6 の式 (6) に従うものと仮定し、床面および物体上面では沈降による濃度フラックスによ

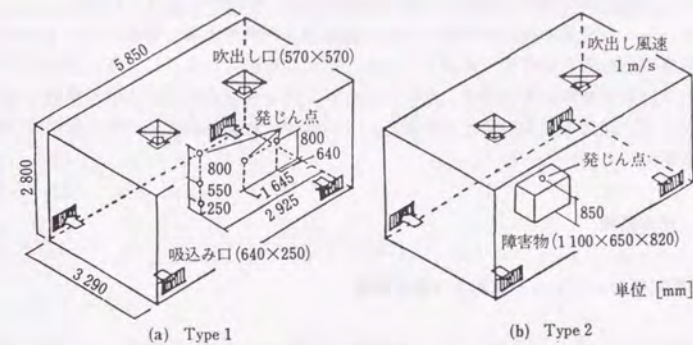


図 1.15 解析対象クリーンルーム

表 1.4 解析種類

クリーンルームの Type	吹出し口 個数	吸込み口 個数	吹出し風速 (m/s)	発塵点高さ (m)	換気量 (m^3/s)	気流障害物
Type 1	2	4	1.0	0.25	0.64	なし
Type 1	2	4	1.0	0.8	0.64	なし
Type 1	2	4	1.0	1.6	0.64	なし
Type 2	2	4	1.0	0.85	0.64	あり

表 1.5 粒径ごとの重力沈降速度 (想定値)

粒径 (μm)	0.31	1.0	4.5	10	50	100
重力沈降速度 (m/s)	4.5×10^{-6}	3.5×10^{-5}	6.2×10^{-4}	3.0×10^{-3}	7.5×10^{-2}	3.0×10^{-1}

注) 粒子密度は 1g/cm^3 のものを想定 (ポリスチレンなど), 球形粒子を想定しストークスの重力沈降速度式により算出した¹²⁾

り浮遊微粒子は定常的に床面に沈着たい積して空気中から分離除去されるものとする。

シミュレーションで重力沈降を考慮する際、床面および物体上面の濃度フラックスは、法線方向の濃度勾配を0と仮定して算出している。ただし前述したように、床、壁面などへのブラウンおよび乱流拡散沈着は考慮しない。シミュレーション結果の妥当性を検討するためシミュレーション結果を実大実験と比較する。この実験は粒径0.31 μmの単分散ポリスチレン標準粒子を用いて行っている¹²⁾。

1.2.4 解析概要

(1) 解析対象クリーンルームおよび解析種類

解析対象クリーンルームを図1.15に、解析種類を表1.4に示す。対象クリーンルームは、前節で実験結果を報告したものと同一である。その諸元は、幅3.28m、奥行5.85m、高さ2.8m、吹出し風速1.0m/s、換気回数43.4回/hである。重力沈降を考慮した浮遊微粒子拡散の解析では浮遊微粒子の重力沈降速度として、表1.5に示すように実験と同じく密度1g/cm³(ポリスチレン標準粒子などを想定)の場合を仮定する¹²⁾。

(2) 数値シミュレーション

基礎方程式および数値定数を表1.6に、また境界条件および差分スキームを表1.7に示す。ただし、これらは別報、文献^{17), 18)}で示した方法とは細部(数値定数、スカラー輸送方程式移流項差分スキーム)で多少異なる。すなわち数値定数は、本解析のように比較的広い差分間隔やスカラー輸送方程式で一次精度風上差分スキームを用いた場合に実験結果と良い対応が得られるようにチューニングされた値である^{23), 24)}。今回解析した流れ場に関しては別報で示す方法^{17), 18)}により、より細かいメッシュ分割で解析した場合でも、ほぼ同様の結果が得られることを確認している。メッシュ分割はType 1: 43(X) × 20(Y) × 23(Z), Type 2: 43(X) × 20(Y) × 20(Z)として流れ場の解析を行う。図1.16にType 1の場合のメッシュ分割を示す。

1.2.5 重力沈降速度を0と仮定する場合の数値シミュレーションと実験の比較

本節で示す実験結果は、前節1.1でその詳細を報告した。浮遊微粒子拡散実験における発生初期粒子濃度は10⁸個/m³としており、凝集などによる粒子損失は比較的小さい条件で行っている。

(1) Type 1における気流性状(図1.17)

シミュレーションを図1.17(a), (c) および(e)に、実験結果(実大実験)を図1.17(b), (d), (f)に示す。両者ともほぼ対称な拡散性状が得られ、平均流の様相もほぼ対応して

表1.6 k-ε型2方程式乱流モデルの基礎方程式

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

$$\frac{\partial U_i}{\partial t} + \frac{\partial U_i U_j}{\partial X_j} = -\frac{\partial}{\partial X_j} \left(\frac{P}{\rho} + \frac{2}{3} k \right) + \frac{\partial}{\partial X_j} \left\{ \nu_i \left(\frac{\partial U_i}{\partial X_j} + \frac{\partial U_j}{\partial X_i} \right) \right\} \quad (2)$$

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \frac{\partial k U_j}{\partial X_j} = \frac{\partial}{\partial X_j} \left(\frac{\nu_i}{\sigma_1} \frac{\partial k}{\partial X_j} \right) + P_k - \varepsilon \quad (3)$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \frac{\partial \varepsilon U_j}{\partial X_j} = \frac{\partial}{\partial X_j} \left(\frac{\nu_i}{\sigma_2} \frac{\partial \varepsilon}{\partial X_j} \right) + C_1 \frac{\varepsilon}{k} P_k - C_2 \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (4)$$

$$\nu_i = C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} = k^2 \ell \quad (5)$$

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial C U_j}{\partial X_j} + \frac{\partial C W}{\partial X_3} = \frac{\partial}{\partial X_j} \left(\frac{\nu_i}{\sigma_3} \frac{\partial C}{\partial X_j} \right) + C_0 \quad (6)$$

$$P_k = \nu_i \left(\frac{\partial U_i}{\partial X_j} + \frac{\partial U_j}{\partial X_i} \right) \frac{\partial U_i}{\partial X_j} \quad (7)$$

各数値定数: $C_\mu = 0.09$, $C_1 = 1.59$, $C_2 = 2.0$, $\sigma_1 = 1.0$, $\sigma_2 = 1.3$, $\sigma_3 = 1.0$

W : 浮遊微粒子の沈降速度(m/s) (粒径を与えることにより決まる一定値。Passive Scalar Contaminantの仮定の場合は、 $W = 0$) U_i : i 方向の気流速度(m/s) ($i = 1, 2, 3$) (添え字3は重力の働く方向を示す。 U_3 と W は同方向) C : 浮遊微粒子の平均濃度(kg/m³) C_0 : 浮遊微粒子の発生項(kg/m³s)

表1.7 境界条件および差分スキーム

(1) 吹出し口	$U_i = 0.0$, $U_n = U_{out}$, $k = k_{out}$, $\ell = \ell_{out}$, $C = C_{out}$ 添え字 i, n : 吹出し口面に対してそれぞれ接線方向, 法線方向を示す U_{out} : 吹出し口風速 (=1 m/s) k_{out} : 流入乱流エネルギー (=0.005m ² /s ²) ℓ_{out} : 乱れの長さスケール (=0.285m) C_{out} : 吹出し空気濃度 (=0kg/m ³)
(2) 吸込み口	$U_i = 0.0$, $U_n = U_m$, $\partial k / \partial n = 0.0$, $\partial \varepsilon / \partial n = 0.0$, $\partial C / \partial n = 0.0$ U_m : 吸込み口風速 (=1 m/s)
(3) 壁面	$(\partial U_i / \partial n)_{n=0} = m \cdot (U_i)_{n=h} / h$, $U_n = 0.0$, $\partial k / \partial n = 0.0$, $\partial C / \partial n = 0.0$ $(\varepsilon)_{n=h} = \left\{ C_\mu \cdot (k)_{n=h}^{3/2} \right\} / (C_\mu^{1/4} \cdot \kappa h)$ h : 壁面から第一セルの差分定義点までの距離 m : U_i がベキ乗分布するとみなしたときのベキ指数 ($m = 1/7$) κ : カルマン定数 ($\kappa = 0.4$)
(4) 差分スキーム	・空間差分: 運動方程式(表1.6式(2))の移流項の吸込み口周辺の領域および k, ε, C の輸送方程式(表1.6式(3), (4), (6))の移流項は一次精度風上差分スキーム、他はすべて中心差分スキーム ・時間差分: Adams-Bashforthスキームによる二次精度スキーム

いる。吹出し噴流は床面に達した後、四方に広がり（図1.17(c), (d)）、壁面に沿って上昇する（図1.17(a), (b), (e), (f)）。吹出し噴流の間では床面に沿う流れが衝突し、小さな上昇流が形成されている（図1.17(a), (b)）。室内中央短辺断面（図1.17(e), (f)）では、吹出し噴流の影響により中央で下降流、壁面上昇流となる循環流が形成されている。ただし、シミュレーションでは室中央上部で明確な下降流が生じるのに対して、実験ではその気流速度が小さく多少異なる（図1.17(a), (b), (e), (f)）。この原因に関しては、 $k-\varepsilon$ モデル自身の弱点を含めて不明の点を残すが、シミュレーションと実験では吹出し口での平均風速分布や乱れの性状を厳密に一致させられないことなども原因の一つと考えられる。なお、シミュレートされた気流分布の差異は、後述するようにこの領域で発塵点高さを変化させた場合の浮遊微粒子拡散性状のシミュレーション結果と実験結果との対応の差として現れる。

(2) Type 1における拡散性状（図1.18～2.20）

実験による粒子濃度分布は、 $0.31\mu\text{m}$ の単分散浮遊微粒子の拡散性状を示す。 $0.31\mu\text{m}$ 粒子の沈降速度は $4.5\times 10^{-6}\text{m/s}$ であり、前節1.1で実験的に検討したようにその重力沈降の拡散性状に対する影響は小さい。実験、シミュレーションとも、得られた濃度の空間分布は排気口での平均濃度（瞬時一様拡散濃度）で除した無次元濃度で示す。図1.18, 1.19に示す場合を除いて拡散性状はほぼ対称な結果を示すため、シミュレーションおよび実験結果とも各々対称面の片側のみを示す。

(i) 発塵位置が壁面近傍にある場合（図1.18）

高濃度領域の分布形状に多少の差異はあるものの、無次元濃度0.4以下の清浄領域の様相は、シミュレーション（図1.18(a)）と実験（図1.19(b)）でよく一致している。

(ii) 発塵位置が吹出し口直下にある場合（図1.18）

無次元濃度等値線の分布形状が多少異なることを除けば、無次元濃度0.4以上の領域の様相は、シミュレーション（図1.19(a)）と実験（図1.19(b)）で良い対応を示す。

(iii) 発塵点高さを0.25, 0.8および1.6mに変化させた場合（図1.20(a), (b), (c)）

発塵点高さが0.25, 0.8mの場合の拡散性状（図1.20(a), (b)）は、吹出し噴流部分に対応する無次元濃度0.4以下の領域および無次元濃度1.6以上の値を示す領域など、シミュレーションと実験はほぼ対応した結果を示す。

発塵点高さが1.6mの場合（図1.20(c)）では、実験に比べてシミュレーションのほうが、無次元濃度1.6以上の値を示す領域が広がっており、両者の対応はやや悪くなっている。この理由としては、前節1.1（図1.7）で述べたように、発塵点高さが1.6m付近では気流ベクトルの様相が、シミュレーションと実験で異なっていることが挙げられる。

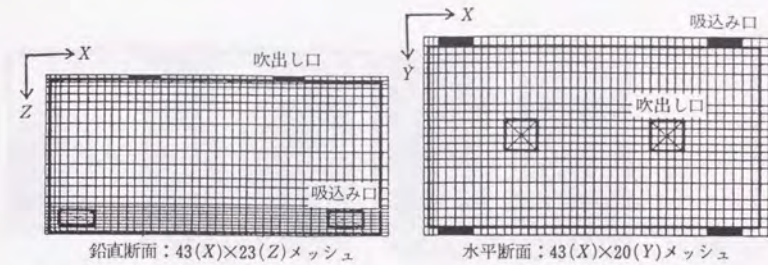


図1.16 メッシュ分割図 (Type1)

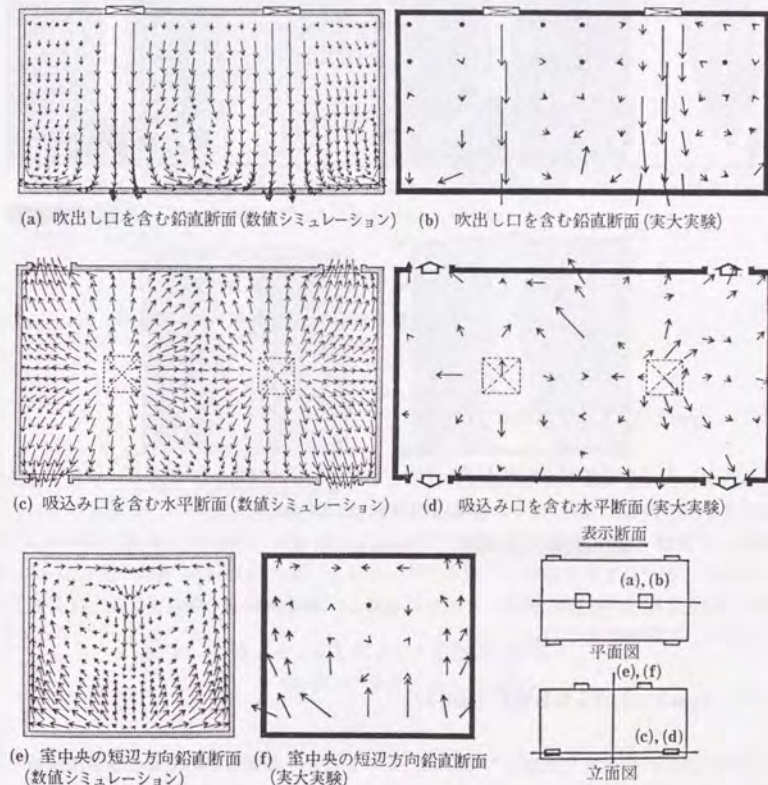


図1.17 Type 1における気流性状

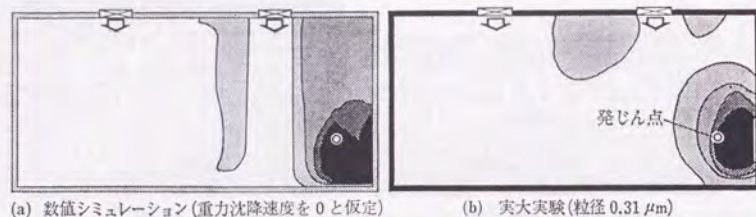


図 1.18 Type 1 における拡散性状
(発塵位置が壁近傍にある場合)

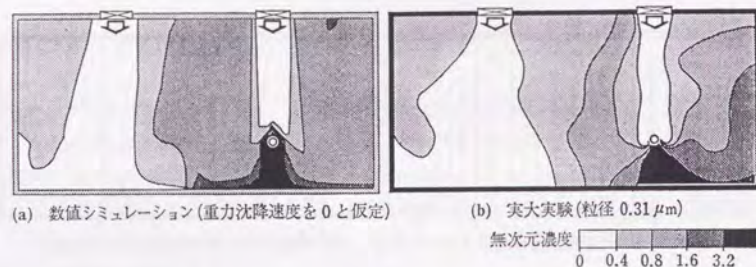


図 1.19 Type 1 における拡散性状
(発塵位置が吹出し口直下にある場合)

(3) Type 2 における気流性状 (図 1.21)

室内中央吹出し噴流間に気流障害物となる物体を置いた場合のシミュレーション結果と実験結果を図 1.21 (a), (b) に示す。物体上部における気流性状において、シミュレーションでは弱い下降流 (図 1.21 (a))、実験ではほとんど風速 0 (多少の上昇流の傾向を示す (図 1.21 (b))) となることを除けば、シミュレーション (図 1.21 (a)) と実験 (図 1.21 (b)) の様相は、吹出し噴流が床面に衝突して四方に発散し、障害物側面や室壁面に沿う上昇流となることなど、ほぼ対応している。

(4) Type 2 における拡散性状 (図 1.22)

物体表面の弱風速域で発塵した場合は、その上部で浮遊微粒子が滞留し高濃度領域を生ずる点など、シミュレーション (図 1.22 (a)) と実験 (図 1.22 (b)) はよく対応した結果を示す。このことは、気流性状が数値シミュレーションと実験結果で良い対応を示している (図 1.21) ことから裏付けられる。

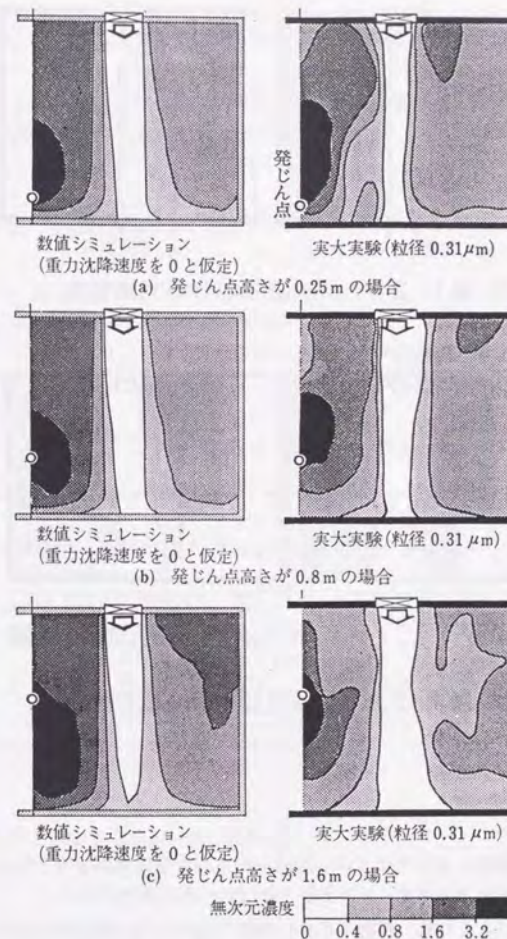


図 1.20 Type 1 における拡散性状
(発塵点の高さが異なる場合)

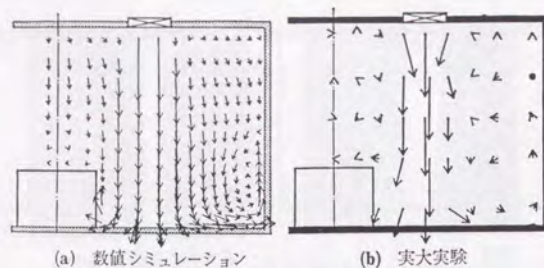


図 1.21 Type 2 における気流性状

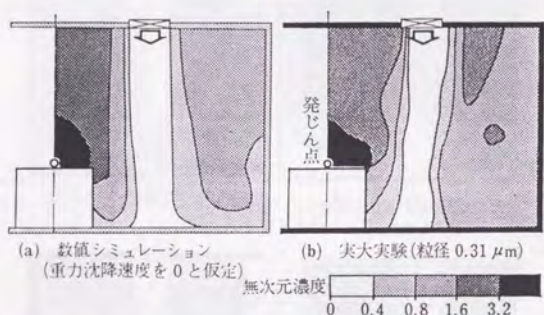


図 1.22 Type 2 における拡散性状

(5) 考察

前節で実験的に確認しているように、時間平均された空間濃度分布に関し、 $0.3\mu\text{m}$ 程度の浮遊微粒子は、空気と等密度のガス拡散とほぼ同一の拡散性状を示す。これは、移流拡散の卓越した流れ場による拡散の時間スケールが重力沈降など、浮遊微粒子固有の性質に基づく運動の時間スケールに比べて十分に小さいことに対応する。したがって、空気と等密度のガスの拡散性状が数値シミュレーションによってよく再現されることから予測されるように、 $0.31\mu\text{m}$ 程度の重力沈降が無視できるような小粒径の浮遊微粒子の空間濃度分布は、シミュレーションによってよく再現される。

1.2.6 重力沈降を考慮した場合の数値シミュレーションと実験の比較

Type 1 と Type 2 の流れ場における重力沈降を考慮した浮遊微粒子の拡散性状の検討を行う。比較のため実大実験と重力沈降速度を 0 と仮定したシミュレーション結果も併せて示す。

(1) Type 1 における拡散性状 (図 1.23)

図 1.23(a) には、実大実験による粒径 $0.31\mu\text{m}$ の単分散ポリスチレン標準粒子の拡散性状を示す。拡散性状はほぼ対称な結果を示すため、シミュレーションおよび実験結果とも各々対称面の片側のみを示す。また、表 1.8 に粒径ごとの室内平均濃度と吸込み口平均濃度を示す。

表 1.8 粒径ごとの室内平均濃度と吸込み口平均濃度

(シミュレーション結果)

クリーンルームの Type	気流障害物	平均濃度	粒径 (μm)						
			Passive Contaminant	0.31	1.0	4.5	10	50	100
Type 1	なし	室内	1.70	1.70	1.70	1.68	1.59	0.52	0.11
		吸込み口	1.00	0.99	0.99	0.98	0.91	0.11	0.00
Type 2	あり	室内	1.84	1.84	1.84	1.77	1.47	0.05	0.01
		吸込み口	1.00	0.99	0.99	0.95	0.77	0.01	0.00

注) 濃度の値は瞬時一様拡散濃度を 1 として基準化している。

(i) 重力沈降を 0 と仮定する場合 (図 1.23(b))

実験とほぼ対応した結果を示していることはすでに 1.2.5 節で述べている。

(ii) 粒径による重力沈降を考慮した場合 (図 1.23(c) ~ (h))

粒径が $0.31\sim 10\mu\text{m}$ の場合 (図 1.23(c) ~ (f)) は、重力沈降速度を 0 と仮定する場合 (図 1.23(b)) とほとんど差異はない。しかし、粒径が $50, 100\mu\text{m}$ と大きい場合 (図 1.23(g), (h))、浮遊微粒子はあまり拡散せず、無次元濃度 0.4 以下の清浄領域が室の大部分を占めるようになり $0.31\mu\text{m}$ 粒子による実験結果と大幅に異なる。また表 1.8 に示すように、浮遊微粒子の室内平均濃度は粒径 $4.5\mu\text{m}$ 以下のとき約 0.5 であり、明らかな差異が生じている。吸込み口平均濃度も粒径が大きくなるにつれて減少するが、これは減少分だけ床面に沈着した結果である。特に粒径 $100\mu\text{m}$ の場合は吸込み口濃度が 0 となることから、発生した粒子のほとんどが室外へ除去されずに床面に沈着・たい積していくものと考えられる。なお、前節に示す実験でも粒径 $4.5\mu\text{m}$ までは重力沈降による影響は見られないことが示されてお

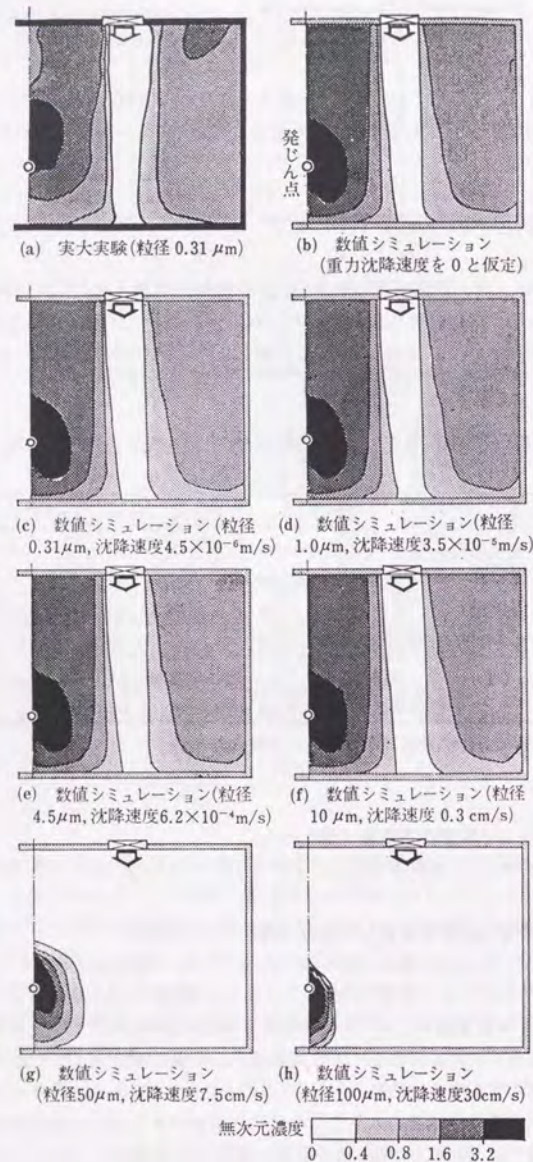


図1.23 Type 1における拡散性状

((c)~(h): 重力沈降速度を考慮している)

り、シミュレーションで観察された傾向と整合している。

(2) Type 2における拡散性状 (図1.24)

発塵は物体上面の弱風速域で生ずるものとする。

(i) 重力沈降を0と仮定する場合 (図1.24(b))

実験と良い対応を示すことは1.2.5節で述べている。

(ii) 粒径による重力沈降を考慮した場合 (図1.24(c)~(h))

粒径が $4.5 \mu\text{m}$ 以下の場合 (図1.24(c)~(e)) は、重力沈降速度を0と仮定する場合 (図1.24(b)) とほとんど差異がない。粒径が $10 \mu\text{m}$ (図1.24(f)) になるとわずかに影響が現れ始め、粒径が $50, 100 \mu\text{m}$ と大きい場合 (図1.24(g), (h)) は、浮遊微粒子はあまり拡散せず、無次元濃度0.4以下の清浄領域が室の大部分を占めるようになる。表1.8に示すように、粒径 $50 \mu\text{m}$ の場合の吸込み口平均濃度はほとんど0となっており、Type 1 の場合の約0.1に比べてさらに小さくなっている。これは発塵点と物体表面の鉛直距離が小さいために、重力沈降による沈着作用が特に有効に働いて浮遊微粒子が物体表面に沈着し、空气中から除去された結果と考えられる。

(3) 考察

今回の場合、室内気流による移流拡散の特徴時間スケールは室内の換気回数 (43.4回/h) を考慮すると約100秒程度とも見積もることができる。一方、Type 1 の場合、発塵点から床面までの高さ (0.8m) で、粒径 $10 \mu\text{m}$ の微粒子沈降速度から算出される重力沈降の時間スケールは約300秒となり、室内気流による拡散の特徴時間スケールの約3倍となる。同様に $50 \mu\text{m}$ および $100 \mu\text{m}$ の沈降の時間スケールは、それぞれ約10秒、3秒となり室内気流の拡散の時間スケールに比べて著しく短い。すなわち、ラフな見積もりではあるが沈降および室内の拡散時間スケールを考えた場合、沈降の時間スケールが室内気流による拡散の時間スケールに比べて等orderもしくはone order小さくなると重力沈降の影響が浮遊微粒子の空間濃度分布に著しく現れる。

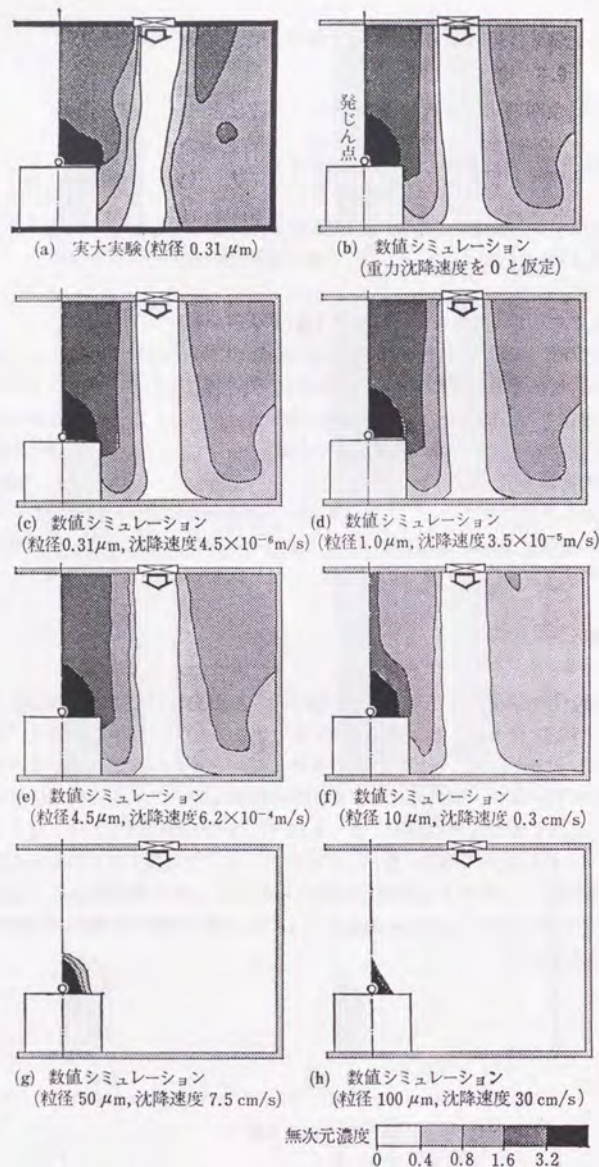


図 1.24 Type 2 における拡散性状
((c)~(h): 重力沈降速度を考慮している)

1.3 第1章結論

コンベンショナルフロー型クリーンルーム内の浮遊微粒子の予測手法として、 $k-\varepsilon$ モデルと重力沈降速度の影響を考慮した場合の拡散モデルを用いたシミュレーション手法を検討した。結果は次のとおりである。

- (1) 流れ場に関し、実験とシミュレーションで良い対応を示す。重力沈降が無視できるような小粒径の浮遊微粒子の平均的な空間濃度分布に関して、汚染質を完全なPassive Scalar Contaminantと仮定した $k-\varepsilon$ モデルによるシミュレーション結果は、実験結果をよく再現する。
- (2) 今回検討した流れ場では粒径が $4.5 \mu\text{m}$ 以下の浮遊微粒子は、重力沈降の影響を考慮してもこれを0と仮定した場合のシミュレーション結果とほぼ同様の拡散性状を示す。粒径が $50, 100 \mu\text{m}$ と大きい場合、室内へほとんど拡散せず、床面などに沈着・たい積し室内の濃度分布は全く異なった様相を示す。粒径が $10 \mu\text{m}$ の場合には重力沈降の影響が現れ始めるが、 $4.5 \mu\text{m}$ の拡散性状には近い様相を示す。
- (3) 室内の流れ場による拡散場の時間スケールは、その換気回数が良い指標となる。浮遊微粒子の沈降の時間スケール（微粒子発生源と物体間の鉛直距離と沈降速度より算出）がこれに比べて等オーダー以上の場合の拡散場の様相は重力沈降速度を0とみなす場合とあまり大きく変わらない。しかし沈降時間スケールのほうが著しく小さくなると重力沈降の影響が現れ、浮遊微粒子の拡散性状は大きく変化する。

第1章補注

1.1 $0.31\mu\text{m}$ 粒子に対しては、重力沈降に比べてブラウン拡散を無視することはできない。しかし、粒子数損失としては十分無視できる程度である。ここでは重力沈降による大粒子 ($4.5\mu\text{m}$ 粒子) の重力沈降による粒子数損失の影響に着目して検討を行っているので、重力沈降のみを考慮した式を示す

1.2 $4.5\mu\text{m}$ 粒子についても測定を行ったが、以下の二つの理由により信頼できる測定結果が得られなかった。

- 1) 実際のクリーンルームでの測定を行うために十分な粒子発生量を得ることが難しい。
- 2) 今回の実測ではサンプリング管を十分短くすることができないので、1.1.2節で述べたように、 $4.5\mu\text{m}$ 粒子ではサンプリング管内での粒子数損失が多く、正確な測定が難しい。

第1章参考文献

- 1) 今福正幸, 萩原弘道, 小林勉, 寒河江淳二, 深尾仁, 大久保喜市: クリーンルームの性能評価に関する研究 (その4)、第3回空気清浄とコンタミネーションコントロールに関する技術研究大会予稿集, pp. 5-8, 1984-2
- 2) 早川一也, 藤井修二, 岩瀬和夫, 伊藤公一, 砂川達也: 室内空間における浮遊微粒子挙動計測, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (環境工学), pp. 201-202, 1984)
- 3) 藤井修二, 早川一也, 岩瀬和夫: 層流型クリーンルーム設計法に関する考察, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (環境工学), pp. 277-278, 1982
- 4) 藤井修二, 早川一也, 岩瀬和夫: 層流型クリーンルーム設計法に関する考察 (微粒子到達率 α に対する理論的考察), 日本建築学会大会学術講演梗概集 (環境工学), pp. 383-389, 1983
- 5) 藤井修二, 早川一也, 岩瀬和夫: 層流型クリーンルーム設計法に関する考察—表面付着機構の理論的考察, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (環境工学), pp. 199-200, 1984
- 6) 深尾仁, 萩原弘道, 潮田宏平, 小林勉, 寒河江淳二, 今福正幸, 鴨原新一: クリーンルームの性能評価に関する研究 (その1) 塵埃分布と気流分布の関係, 第2回空気清浄技術研究大会予稿集, pp. 99-100, 1983
- 7) 内海康行, 宇井幸作, 遠藤康夫, 美馬徹, 田中幸彦: 研究用クリーンルームとその評価, 第3回空気清浄とコンタミネーション・コントロールに関する技術研究大会予稿集, pp. 17-18, 1984
- 8) 高木俊雄, 鈴木亮二, 笠原玲: クリーンルームにおける気流と塵埃の分布 (その1, 2), 第4回空気清浄とコンタミネーション・コントロールに関する技術研究大会予稿集, pp. 9-12, 1985
- 9) 山崎慶太, 松浦肇, 呂俊民: 全面垂直層流クリーンルームにおける粒子と気流の分布について, 第5回空気清浄とコンタミネーション・コントロールに関する技術研究大会予稿集, pp. 97-100, 1986
- 10) 村上周三, 加藤信介, 赤林伸一: レーザー光を用いた室内乱流現象の可視化—浮遊粉塵の拡散過程を中心として, 生産研究, 36-10, pp. 1-6, 1984
- 11) 早川一也, 藤井修二, 岩瀬和夫: レーザー計測技術による粒子挙動および粒子付着の測定, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (環境工学), pp. 203-204, 1984
- 12) 高橋幹二: 改著 基礎エアロゾル工学、養賢堂, 1982
- 13) 空気清浄協会編: 空気清浄ハンドブック, オーム社, 1981
- 14) 美馬徹, 村上周三, 加藤信介, 宗像康光: クリーンルーム内の気流性状に関する研究 (その3) 実在するコンベンショナル型クリーンルーム内の平均流の性状, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (環境工学), pp. 213-214, 1984
- 15) 田中俊彦, 村上周三: 室内濃度分布の数値計算と模型実験の比較, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (環境工学), pp. 303-304, 1982
- 16) 村上周三, 小峯裕己: タンデム型熱線風速計による変動風速の三次元的な測定—建物周

- 辺気流に関する実験的研究(XI), 日本建築学会論文報告集, 第297号, pp. 59-69, 1980
- 17) 村上周三, 加藤信介, 須山喜美: コンベンショナルフロー型クリーンルーム内の気流性状に関する研究(第1報), 空気調和・衛生工学会論文集, No. 37, p. 37, 1988
- 18) 加藤信介, 村上周三, 須山喜美: コンベンショナルフロー型クリーンルーム内の気流性状に関する研究(第2報), 空気調和・衛生工学会論文集, No. 37, p. 49, 1988
- 19) 村上周三, 加藤信介, 田中幸彦, 永野紳一郎: 移流の卓越する室内気流における沈降を伴う浮遊微粒子の拡散(第1報) 実大クリーンルームにおける実測と模型実験, 空気調和・衛生工学会論文集, No. 39, p. 35, 1988
- 20) 山口克人, 吉川あきら, 内藤和夫: 不規則な境界形状に対する室内気流の数値解析(第1報), 空気調和・衛生工学会論文集, No. 29, p. 97, 1985
- 21) 大西潤治, 山口克人, 内藤和夫, 吉川あきら: 規則な境界形状に対する室内気流の数値解析(第2報), 空気調和・衛生工学会論文集, No. 29, p. 107, 1985
- 22) Katsuhito YAMAGUTI, Akikazu KAGA and Akira YOSHIKAWA: Application of $\phi - \omega$ Numerical Method to Two-dimensional, Laminar Air Flow in a Clean Tunnel, Trans. SHASE Japan, No.33, p.75, 1987
- 23) 野村 豪, 松尾 陽, 貝塚正光, 坂本雄三, 遠藤清尊: 室内空気分布の数値解析に関する研究(1~3), 日本建築学会論文報告集, 231, 232, 238号, 1975
- 24) 野村 豪, 村上周三, 加藤信介, 佐藤正章: 3次元乱流数値解析と模型実験, 日本建築学会論文報告集, 298号, 1980

第三編

C F Dによる室内流れ場の制御

第1章 天井面給排気による局所流量バランス方式クリーンルーム

1.1 模型実験による流れ場・拡散場の検討

1.1.1 はじめに

天井面で給排気の両者を処理する方法は、①ブランチングの自由度を向上させること、②工法が単純化すること、などの理由で生産ライン変更の多い工業用クリーンルームでは有効な手法と考えられる。村上、加藤、須山^{1),2)}は、コンベンショナルフロー型クリーンルームに関して系統的に気流性状および汚染質拡散性状を詳細に検討し、①室内気流性状は一つの給気口（吹出し口）を単位とした吹出し気流とその周囲の上昇流、および天井面にある給気口への収束流（補注1.1）により形成される個別の気流単位（以後、気流単位と略称）の合成としてモデル化されること、②排気口（吸込み口）の配置は気流性状に重大な変化を与えないこと、③汚染質の拡散性状はこの給気口ごとの気流単位と排気口の配置関係に大きく影響されること、などを報告している。本研究は上記の“気流単位”の概念を発展させ、排気口を新たに給気口の設置面と同一の天井面に設置した場合に関し、その気流性状・汚染質拡散性状を検討する。

給気と排気を一つの気流単位ごとに対応させる“給排気局所流量バランス方式”の換気システムは、汚染質拡散を汚染質が発生した気流単位内に、ある程度限定させることが可能と思われ、コンベンショナルフロー型クリーンルーム内のコンタミネーションコントロールのための極めて有効な手法となる可能性を有している。

現在のところ、このような天井面給排気による局所流量バランス空調方式の気流性状に関しては天井付けパッケージエアコンを始めとし、事務所建築のシステム天井への応用を含めて多数の応用例がある。しかしながら天井面での排気方式は、①特にクリーンルームでは床面近傍で発生した汚染質が一度天井面まで移流されてから排出されること、②天井給気口から排気口へのショートサーキットなどの概念に対し、気流および汚染質拡散に関する十分な検討が行われていない。

本研究は、以上の点をかんがみて給気と排気を個別の気流単位ごとに対応させる天井面給排気による局所流量バランス方式クリーンルームの特性に関し、模型実験と数値シミュレーションによる気流性状・拡散性状の検討を行い、そのコンタミネーションコントロールの有効性を検討するものである。本章では、その代表例として9個の給気口を持つ室内モデルを対象とした模型実験による天井面給排気による局所流量バランス方式クリーンルームの汚染質拡散の検討結果を報告する。

1.1.2 検討対象クリーンルーム

測定対象クリーンルームの種類を図1.1に示す。Type 1は通常の壁面タイプ、Type 2は天井四隅に排気口を設けたタイプであり、Type 2は可視化実験のみに用いる。Type 5（Type 3、

4については次節1.2で述べる)は本実験の天井面給排気による局所流量バランス方式クリーンルームの基本タイプで、吹出し気流とその周囲の上昇流により形成される気流単位内に給気風量と同量排気する排気口を設けている。Type 6は天井の9個の給気口に囲まれた位置に合計4個の排気口を設けている。

1.1.3 可視化による気流性状の定性的把握

流れ場・拡散場の計測に先立ち、9個の給気口を持つクリーンルーム内の気流性状をレーザーライトシートにより可視化した³⁾。可視化は縮尺1/6の室内模型(図1.2)を用い、実物の吹出し風速を1 m/sとし、Re数を一致させて流れを観測した。排気口が壁面四隅にあるType 1と天井四隅にあるType 2の結果を図1.3~1.6に示す。

(1) 壁面排気方式クリーンルーム (Type 1)

吹出し噴流は床面まで到達し、四方に発散する(図1.3)給気口間の床面では発散流(補注1.2)同士がぶつかりあって上昇流が形成される。この上昇流は壁面中央部では天井面に達するが、隅角部では下降流となる(図1.4)。また9個の給気口のうち各四つの給気口に囲まれた部分の床面では、強い上昇流が観察されている。

(2) 天井面給排気によるクリーンルーム (Type 2)

これは、天井四隅に排気口を設置したものである。室内の気流性状は、壁面排気方式と全く同様である(図1.3と図1.5の比較)。ただし、室四隅では壁面排気方式と異なり、天井排気の影響によって上昇流となっている(図1.4と図1.6の比較)。

この結果から、室四隅など局所的に上昇流と下降流の差異が現れるが、両者のタイプの気流分布を形成する気流単位の全般的な様相はほぼ似たものとなっている。

(3) 考察

Type 1の通常方式のクリーンルームでは、排気口が床面付近に設置されていても室内に強い上昇流が至るところに生じており、床面付近の汚染質は天井面に向かって移流される。これは、既往の研究でも十分確認されている^{1), 2)}。したがって、排気口を天井面に設置することが、汚染質の有効排出、室上部への拡散の観点から直ちに不利となるわけではない。また、天井面給排気によるType 2において、給気口から排気口への気流のショートサーキットは全く観察されず、こうした概念は換気量の多いクリーンルームの場合には特に問題とはならないものと考えられる。

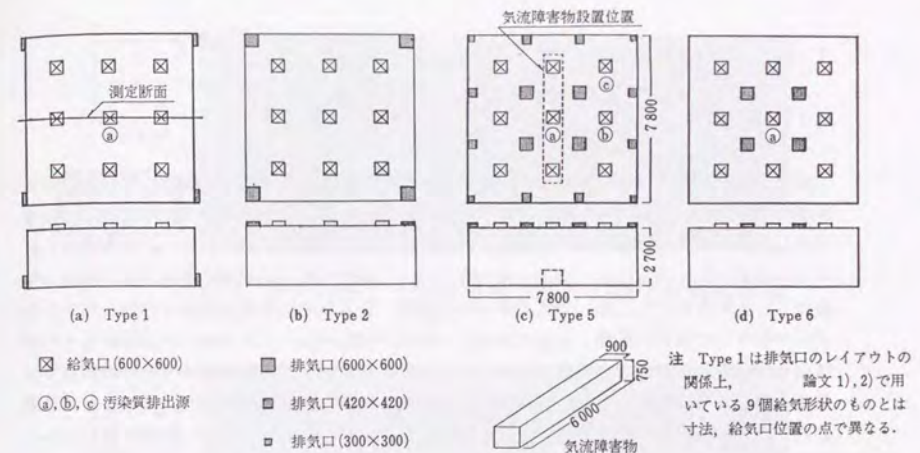
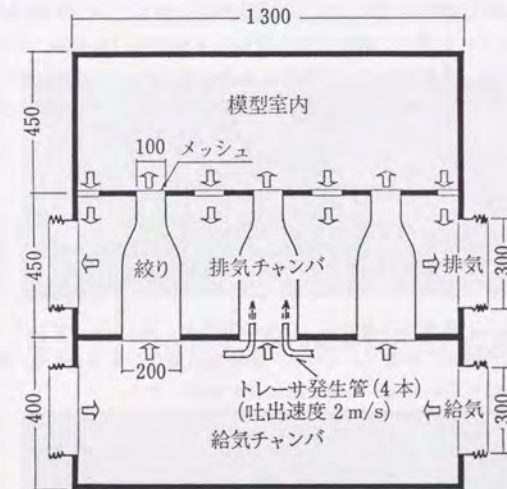


図1.1 クリーンルームの種類 (単位:mm)



注 模型は測定の都合上、室内の天地が逆になっている。

図1.2 模型概要 (単位:mm)

1.1.4 実験概要

(1) 実験目的

本章では実物の1/6の大きさのクリーンルーム模型を用い、そこで実現されている給排気風量のバラツキの範囲（平均風量に対して最大 $\pm 10\%$ 程度）で天井面給排気による局所流量バランス方式クリーンルームの汚染質拡散場に関し、次の4点に着目して、この方式によるコンタミネーションコントロールの有効性について検討する。①壁面（床面近傍に排気口を設ける）排気方式との比較、②気流障害物の影響、③人為的に極端な給排気の局所的アンバランスを与えた場合の影響、④各気流単位で特定の給気口から吹出された汚染質が各々の排気口へ分配される割合、の以上4点である。なお、実験および実際の例では各給排気口での空気分配を正確に等しく調節し、局所的に給排気の流量収支を厳密に満足させることは至難の業である。このような理想状態における検討は数値シミュレーション（次節参照）のみが行いうる。

(2) 測定概要

模型実験はType 1, 5, 6についてのみ行っている。実験模型の概要を図1.2に、実験条件を表1.1に示す。実験は等温吹出しで行う。風速測定はタンデム型熱線風速計により3次元的に、汚染質（エチレングス）濃度はFID（Flame Ionization Detector、水素炎イオン化検出器）により測定する。濃度測定は気流測定点と同位置（図1.8の気流分布の気流ベクトルの始点）で行っており、総数96点である。給排気風量はサーミスタ風速計による風速測定値から算出する。

1.1.5 実験結果

(1) 風量のバラツキ

各タイプの給気口と排気口風量のバラツキの分布を、図1.7に示す。どのタイプもバラツキは平均値 $\pm 15\%$ の範囲に設定されている。室中央給気口の風量を約62%削減した場合（図1.7(c)）、左隣の給気口の風量が極端に増加（ $\pm 26\%$ ）する。

(2) 気流性状

図1.8に各タイプの中央鉛直断面内の平均風速ベクトルを示す。図1.8(b)に示すように、実験で観察された流れはほぼ対称性を満たすので図1.8(a)～(e)は対称面の片側のみを示す。どのタイプも各吹出し噴流とその周囲の上昇流によって一つの気流単位が形成される様相は類似している。Type 1（壁面排気方式）およびType 5, 6（天井面給排気による局所流量バ

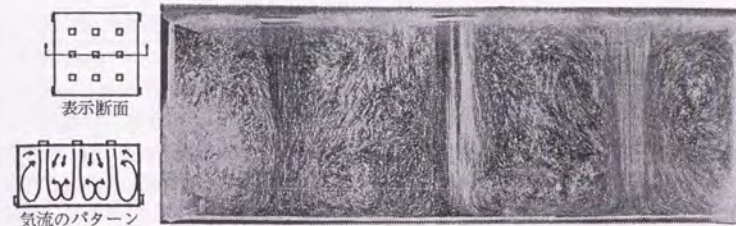


図1.3 Type 1（壁面排気方式）の室中央鉛直断面

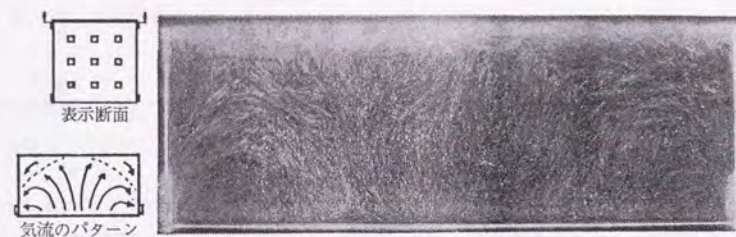


図1.4 Type 1（壁面排気方式）の壁面近傍鉛直断面

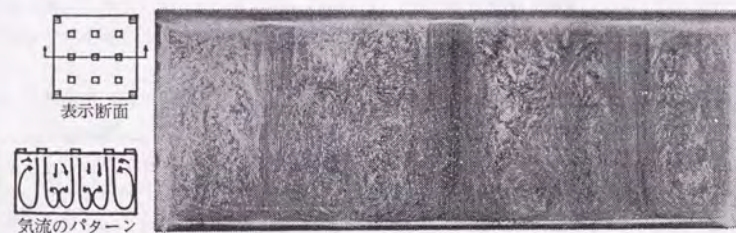


図1.5 Type 2（天井面給排気方式）の室中央鉛直断面



図1.6 Type 2（天井面給排気方式）の壁面近傍鉛直断面

表 1.1 実験条件*1

実験 No.	室形状*2	給気条件	気流障害物	トレーサー 放出給気口
1	Type 1	均等*3	なし	a
2	Type 5	均等	なし	a
3	Type 5	均等	なし	b
4	Type 5	均等	なし	c
5	Type 5	均等	図1.1に示す気流障害物を室中央に1個設置	a
6	Type 5	室中央の給気口の風量を62%削減	なし	a
7	Type 6	均等	なし	a

注 *1 Type 2 は可視化実験のみに用いたため、ここでは省略する。

*2 Type 3, 4 は次節1.2参照のこと。

*3 均等を目標としているが、実際は図1.7に示すようなバラツキがある。

*4 吹出し風速6.0m/s, 給気口Re数40,000。

*5 トレーサーは給気口上流（吹出し口幅の6倍）で混入している。給気口面を9等分割したトレーサー濃度の分布測定では、面内のバラツキは±10%以内である。

*6 汚染質トレーサーの供給量は、換気量0.5m³/sに対して50cc/sであり、これに対応して全排気口平均濃度は100ppmとなっている。

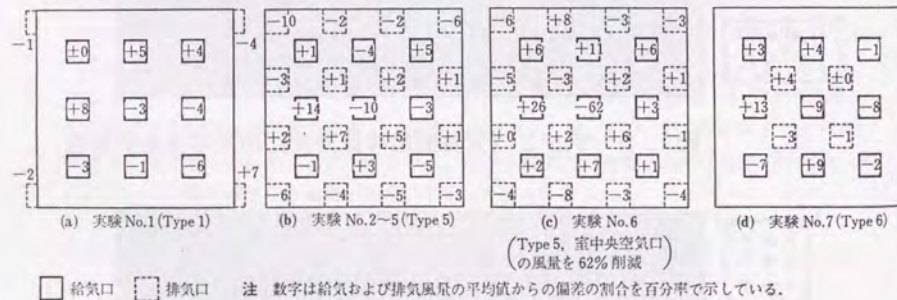


図 1.7 給気および排気風量のバラツキ (単位: %)

ランス方式)の気流性状を比較すると細部に次のような相違点がある。①壁面排気方式(図1.8(a): Type 1)では給気口間の上昇流が天井高の1/3程度の高さまでにとどまる。②天井面給排気による局所流量バランス方式(図1.8(b): Type 5, 図1.8(e): Type 6)では給気口間の上昇流が天井面まで到達する。③室中央給気口直下に気流障害物(図1.1(c)参照)を置いた場合(図1.8(c): Type 5, 実験No. 5)、障害物上面に衝突した噴流が左右に広がる領域で強い横方向の発散流を生じる。④室中央給気口の風量を62%減らした場合(図1.8(d): Type 5, 実験No. 6)、その吹出し噴流は周囲の給気口から噴流の影響で床面まで到達しない。⑤天井面に4個の排気口を有する場合(図1.8(e): Type 6)、給気口間の上昇流が他の場合に比べてかなり強くなる。

(3) 汚染質拡散性状

3種類のクリーンルーム(Type 1, 5, 6)について、室中央給気口a(図1.1参照)で汚染質を排出した場合の室中央鉛直断面の汚染質濃度分布を比較する。濃度はすべて瞬時一様拡散濃度(全排気口平均濃度)により無次元化している。

(i) 室のタイプが異なる場合の比較

a) 壁面排気方式(図1.9(a): Type 1, 実験No. 1)と天井面給排気による局所流量バランス方式(図1.9(b): Type 5, 実験No. 2)の比較

Type 1では壁近傍上部で濃度のやや高い領域(無次元濃度2.0程度)が生じるほか多くの領域で無次元濃度1.0以上を示すが、Type 5では壁近傍の無次元濃度は1.0以下となっており、汚染質の拡散範囲を汚染質発生気流単位内に、ある程度局所的に限定させる効果が確認される。

b) 9個排気(図1.9(b): Type 5, 実験No. 2)と4個排気(図1.9(e): Type 6, 実験No. 7)の比較

Type 5では壁近傍の濃度が0.5~1.0程度であるのに対し、Type 6では0.5以下である。室中央の気流単位内で汚染質が発生するような場合には、Type 6のほうが他の気流単位への汚染質の拡散が少ないものと考えられる。

(ii) 気流障害物の影響

Type 5の気流障害物がない場合(図1.9(b): 実験No. 2)には給気口と壁の間の領域は無次元濃度1.0以下であるのに対し、気流障害物を置いた場合(図1.9(c): 実験No. 5)では1.0以上となり、拡散範囲が広がる。

(iii) 気流単位内の給排気流量バランスが崩れた場合

Type 5の室中央給気口aの風量を62%削減し、その気流単位内の給排気バランスを極端に崩した場合(図1.9(d): 実験No. 6)、その給気口の下に形成される高濃度領域(無次元濃度4.0以上)は周囲の給気口から供給される清浄空気に押し上げられて床面まで到達しない。

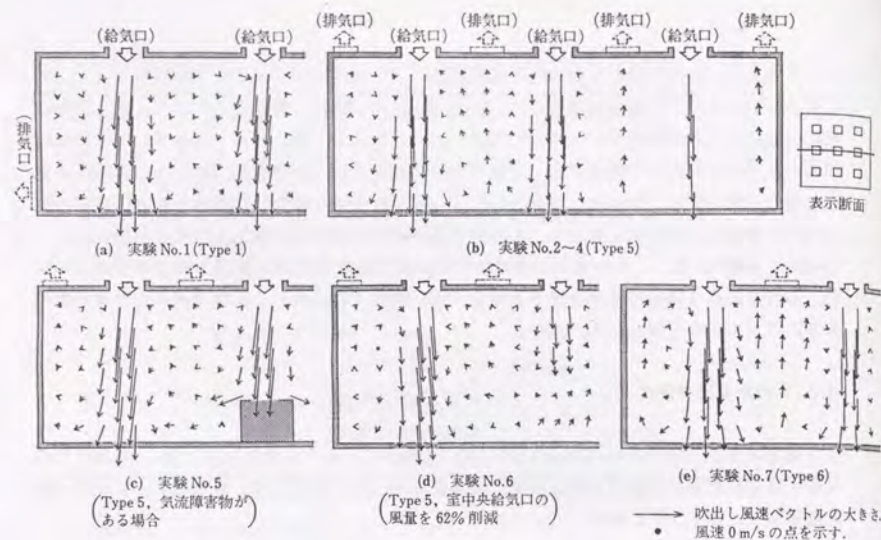


図 1.8 中央鉛直断面の気流分布

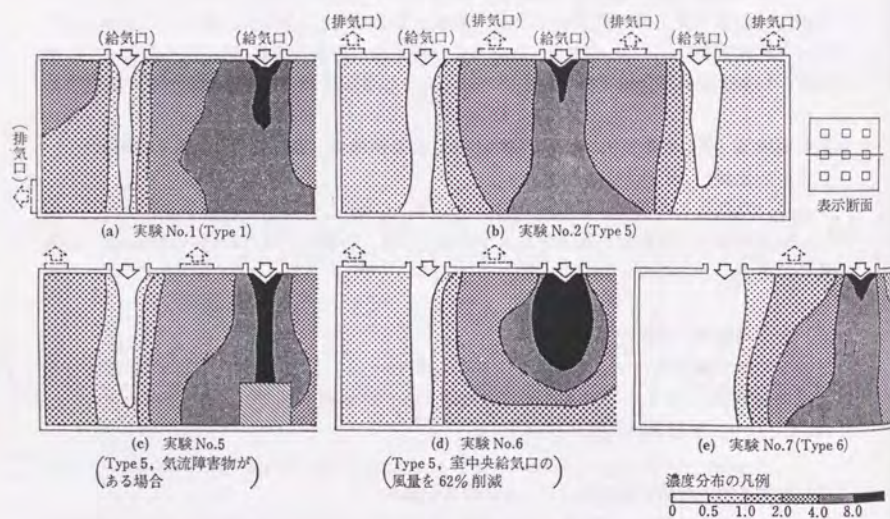


図 1.9 中央鉛直断面の汚染質拡散性状

しかし、他の気流単位の清浄度に変化はみられない。

1.1.6 換気効率の検討

Type 5 の給気口 a, b, c から汚染質を排出し、その換気効率（汚染質の排出効率）を検討する。

(1) 換気効率の評価方法

室内の換気効率を十分に検討するためには、最終的に村上、加藤の提案するSVE (Scale for Ventilation Efficiency) により評価されることが望ましい⁴⁾。しかし、これに関しては実験による計測値から算出することは難しく、今回は評価しない。これに関しては、次節において数値シミュレーションにより詳細に検討する。ここでは、各排気口での排気風量と汚染質濃度から算出した各排気口別の汚染質排出量によって、室内の換気効率を評価する。

(2) 汚染質排出分担率

汚染質発生量に対し、各排気口から排出される汚染質量の百分率を汚染質排出分担率と定義する。図1.10に汚染質排出源を含む気流単位の汚染質排出口 a, b, c の周囲の4個の排気口の汚染質排出分担率の和をその気流単位の分担率として示す。Type 5 の室形状において、もし室全体に汚染質が均一に拡散して各排気口から同じ濃度（瞬時一様拡散濃度）で排気されたとすると、この分担率は、排気口の面積比率からそれぞれ、44% (=4/9) (排出口位置：a)、33% (=3/9) (排出口位置：b)、25% (=2.25/9) (排出口位置：c) となる。しかし、図1.10に示すように、これらの値はそれぞれ67~70% (a：図1.10(b), (e), (f))、62% (b：図1.10(c))、61% (c：図1.10(d)) とかなり高く、排気口でとらえる限り汚染質拡散は局所的にかなり限定されており、局所的に給排気をバランスさせた天井面給排気による局所流量バランス方式の効果は十分に確認されている。さらに、Type 1 の壁面排気方式では、例えば給気口 a から汚染質を排出した場合、室の四隅の排気口へ25%ずつ拡散する（実験No. 1における実験結果（図1.10(a)）では19~32%）ことを考慮すれば、Type 5 の方式は室内への汚染質拡散を限定し、発生した汚染質はできる限りその周辺で処理・排出するというコンタミネーションコントロールの観点から、有効であることがわかる。

気流障害物を置いた場合（図1.10(e)、実験No. 5）および給排気バランスを崩した場合（図1.10(f)、実験No. 6）についても、汚染質排出分担率の観点からは実験No. 2（図1.10(b)）とほぼ変わらない結果が得られている。なお、本節の実験結果では、排出口濃度は汚染物質発生位置からの距離に大きく関連しており、気流障害物の有無（図1.10(b), (e)）や、風量アンバランス（図1.10(f)）の影響は小さい。すなわち、汚染質排出分担率の観点からみた室内の換気効率は、この程度の気流障害物の設置や風量アンバランスの影響は受けない。

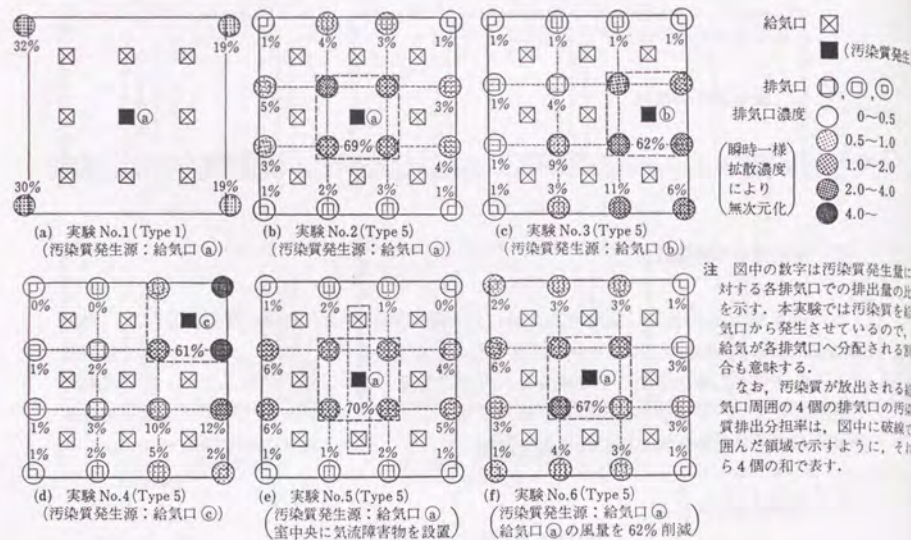


図 1.10 汚染質排出分担率

このことは、この給排気局所流量バランス方式の空調では、①室全体にわたる循環流が形成されにくく、②一つの気流単位内で発生した汚染質の多くは、移流によってその気流単位に対応する排出口から排出され、③乱流拡散や気流単位内の給排気風量のアンバランスにより、別の気流単位に拡散した汚染質もその場でよく排出され、さらに遠くの気流単位まで輸送されることが相対的に小さいこと、などの理由によるものと考察される。また、風量アンバランスに関する実験 No. 6 は、給気を減少させる気流単位（排気量はほぼ同一）で汚染質を発生させており、他の気流単位へ汚染質が移流・拡散する可能性は少なくなっているものと思われる。

これらの考察の妥当性に関しては、すでにシミュレーションなどによって確認しているが、その詳細は次節の数値解析による検討でさらに詳しく報告する。

1.1.7 1.1節のまとめ

コンベンショナルフロー型クリーンルームのコンタミネーションコントロールの観点から、給気と排気を一つの気流単位ごとに対応させる天井面給排気による局所流量バランス方式クリーンルームの気流性状および汚染質拡散性状に関して検討を行った。その結果、次のことが確認できた。

- (1) 天井面給排気による局所流量バランス方式クリーンルームと壁面排気方式クリーンルームの気流性状は、各々給気口ごとに噴流とその周囲の上昇流からなる気流単位の形成など全般的な様相は似ている。しかし、各気流単位間での個々の上昇流の強さなどに個別に無視できない差異が生じている。
- (2) 拡散場および汚染質排出分担率の測定結果から、個別の気流単位（吹出し噴流とその周囲の上昇流）内で局所的に給排気風量バランスを満たすことにより室内全体にわたる循環流形成を抑え、汚染質拡散をかなり効果的に限定できることがわかった。
- (3) 給気口直下に気流障害物を置いた場合と置かない場合、その気流障害物の近傍で流れは大きく変化するが、その影響範囲は比較的限定される。汚染質は気流障害物のない場合に比べてやや広い範囲に拡散される傾向を示すが、汚染質排出分担率はほとんど変わらない。
- (4) 室中央の給気口の風量を62%削減するとその噴流は周囲の噴流の影響で床面まで到達せず、床面近傍では上昇流となっている。
- (5) 各排気口の汚染質排出分担率（汚染質発生量に対する各排気口での排出量の比）は気流障害物の有無や給排気流量のアンバランスにあまり大きな影響を受けず、単純に汚染源からの距離に依存する傾向を示し、汚染源から遠いほど排気濃度は低くなる。このことは、汚染源近傍に排気口設置が容易であり、また室全体にわたる大きな循環流の形成を抑える天井面給排気による局所流量バランス方式クリーンルームが、室内のコンタミネーションコントロールの観点から有効であることを示唆している。

次節では本節の結果を基にして、流れ場、汚染質拡散性状に関し、さらに詳細な数値シミュレーションによる検討を行った結果を報告する。

1.2 数値シミュレーションによる流れ場・拡散場の検討

1.2.1 背景

前節に引き続きコンベンショナルフロータイプクリーンルーム（乱流型クリーンルーム）において効率的な室内の汚染質拡散制御が可能となると思われる天井面給排気による局所流量バランス方式クリーンルーム内の流れ場・拡散場の特性を検討する。前節では、その流れ場および汚染質拡散場を模型実験により解析した。その結果、この給排気システムは室内の各給気口（吹出し口）に対応する気流単位（吹出し噴流とその周囲の上昇流で構成される流れの単位）内で局所的に給排気の流量バランスをとることにより局所的に閉じた流れ場が形成され、汚染質の室内拡散が効果的に限定されて室内のコンタミネーションコントロールの観点から有効な手法となり得ることが示された。しかし、模型実験では流量設定等の条件を多数の給排気口で厳密にコントロールすることが困難であること、また風速・汚染質濃度の空間分布の測定、解析が多岐にわたる手間を要し、分布性状の定量的で詳細な解析が困難であることから、流れ場・拡散場の特性を定量的に詳細に検討することが困難であった。一方、村上、加藤、須山は $k-\varepsilon$ 乱流モデルに基づく数値シミュレーションが、シミュレーションに際して十分な注意を払えば、複雑な3次元の室内流れ場の性状を細部で多少の問題点を残すものの実用上十分な精度で予測することを明らかにしてきた^{1), 2), 5)~8)}。

本節では、模型実験結果に対応して排気口（吸込み口）位置・形状の違い、室内の気流障害物や給排気分配のパラツキがこの給排気局所流量バランス方式の換気システムにどのように影響するかを乱流数値シミュレーションに基づく詳細な流れ場・拡散場の解析により検討する。数値シミュレーションは給排気流量を厳密に制御でき、模型実験に比べ単純化した条件のもとで種々の要因が拡散場に与える影響を解析することが可能となる。また、流れ場・拡散場の詳細な分布データが得られるため、室内の換気効率分布に関し、村上、加藤の提案している換気効率指標SVE¹⁾（Scale for Ventilation Efficiency）1~3を含め、定量的で詳細な評価を行うことが可能となっている。

1.2.2 解析概要

(1) 解析対象クリーンルーム

図1.11に示す9個の給気口を有するコンベンショナルフロー型クリーンルーム内の流れ場、汚染質拡散場を典型例として解析する。

Type 1（在来型の壁面排気方式）は床面近傍壁面に四つの排気口を配置した排気方式、Type 3, 5は本研究の主目的である天井面給排気による局所流量バランス方式のモデルである。Type 2は前節で考察したクリーンルームタイプであり、本節では略す。Type 3は各給気口周囲を排気口とし、Type 4, 5は給気口と排気口を千鳥状に配置するモデルである。Type 3は各気流単位において給気口に向かって収束する天井面沿いの気流を、これが吹出し噴流

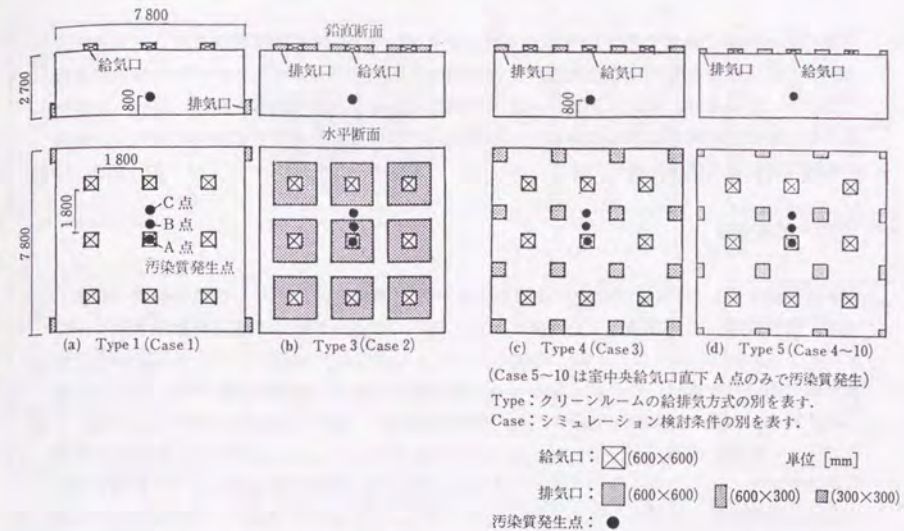


図1.11 検討対象クリーンルーム給排気口配置

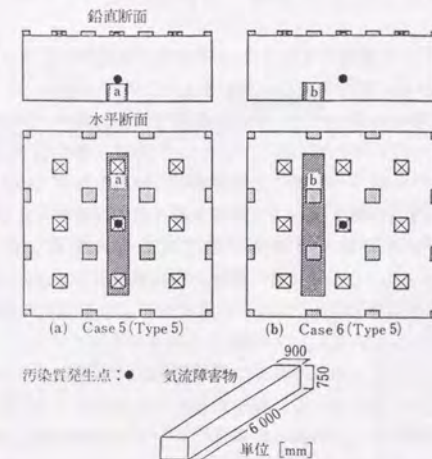


図1.12 室内障害物配置

に誘引される前に排気するという観点から、またType 4, 5は各気流単位において天井面に向かう上昇流が最も強くなる位置に排気口を設けるという観点から、それぞれの排気口を設けている。Type 4は、排気口面積を一定とし排気風速により排気流量を調節、Type 5は排気風速を一定とし排気口面積の調節により各排気口の排気流量を調節するものである。拡散場の検討における汚染源を●点で示す。

(2) 解析種類

解析種類を表1.2に示す。室内の供給風量を一定（換気回数71回/h、給気口Re数（吹出し風速、給気口幅により評価）を約40000とし、排気口位置・形状を変化させた場合について4タイプ（Type 1, 3～5の比較；解析Case 1～4に対応）の比較を行う。次にType 5（模型実験で用いた室形状）のクリーンルームに関し障害物設置の影響を検討する。図1.12に示す障害物をa（室中央給気口直下）、b（排気口直下）にそれぞれ置いた場合（Case 5, 6に対応）の影響を検討する。図1.13に各タイプの解析ケースにおける給気口・排気口の風速設定値を示す。さらにType 5のクリーンルームに関して、流量分配を変化させた影響を検討するため模型実験との対応も含めて図1.13(e)～(h)に示すようにCase 7～10の4ケースの検討を行う。

(3) 解析方法

$k-\epsilon$ 型2方程式モデルを基礎とする3次元等温場の数値解析により検討する。基礎方程式は表1.3、境界条件および差分スキーム等は表1.4に示す（補注1.3）。解析は時間発展方程式を陽的に解いて定常解を算出する。本解析結果では流れ場の一部が多少時間的に振動しており、厳密な意味での定常解は得られていない。汚染質の濃度分布は気流分布を算出後、その速度分布、渦動粘性係数分布を基に汚染質濃度の輸送方程式（表1.3(6)式）により解析を行う。拡散計算では汚染質発生セルにて空気と等比重の汚染質が吐出速度0で発生した状態を想定しており、浮遊微粒子の挙動は重力沈降等の影響を無視したPassive Scalar Contaminantを仮定する^{7), 8)}。その発生量は瞬時一様拡散濃度が1となるように設定し、定常解を算出する。換気効率指標SVE 1, 2はこの濃度分布よりそれぞれ室内平均濃度および平均拡散半径として算出する。SVE 1, 2の定義は文献9によっている。

気流分布のシミュレーション結果は多少時間的空間的に振動しており、これに対応して濃度分布の対称性もわずかに崩れている。解析対象とする室内モデルはほぼ均等メッシュ（一辺0.15m）に分割して解析する。Type 5の場合のメッシュ分割を図1.14に示す。全ケースにおいて、室内は仮想セルを含めて54(X)×54(Y)×22(Z)のメッシュに分割した。

1.2.3 模型実験とシミュレーションの対応

Type 5のクリーンルームの気流性状に対応する模型実験結果を図1.15に示す。この結果の

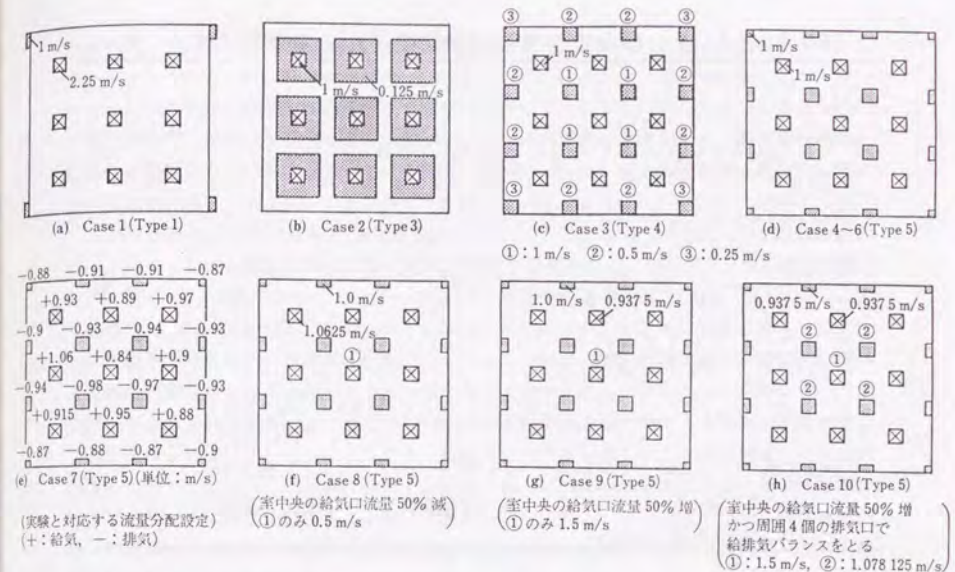


図1.13 給気口・排気口の設定流速

表1.2 解析種類

検討項目	ケース No.	給排気口配 置	障害物	給排気流量 バランス	図 版	備 考
給排気口配置の影響	Case 1	Type 1	なし	バランス	図1.17	汚染質発生はA～Cの3点で行う
	Case 2	Type 3	なし	バランス	図1.22	汚染質は室内空間全体一様発生
	Case 3	Type 4	なし	バランス	図1.18	汚染質発生はA～Cの3点で行う
	Case 4	Type 5	なし	バランス	省略(図1.19と同様)	汚染質発生はA～Cの3点で行う
障害物の設置による影響	Case 4	Type 5	なし	バランス	図1.19	汚染質は室内空間全体一様発生
	Case 5	Type 5	a 位置	バランス	図1.19	汚染質発生はA～Cの3点で行う
	Case 6	Type 5	b 位置	バランス	図1.24	汚染質発生はA点のみ
	Case 7	Type 5	なし	バランス	図1.25	汚染質発生はA点のみ
給排気バランスの影響	Case 4	Type 5	なし	バランス	図1.19	汚染質発生はA～Cの3点で行う
	Case 7	Type 5	なし	実験に対応させた給排気バランス	図1.15	模型実験結果
	Case 8	Type 5	なし	中央給気口流量減	図1.16	汚染質発生は給気口で行う場合とA点で行う場合の2通り
	Case 9	Type 5	なし	中央給気口流量増	図1.26	汚染質発生はA点のみ
	Case 10	Type 5	なし	中央給気口流量増かつ中央の気流単位で流量バランスをとる	図1.27	汚染質発生はA点のみ
					図1.28	汚染質発生はA点のみ

注 換気回数はCase 7（66回/h）を除いて同一（71回/h）

表 1.3 $k-\varepsilon$ 型 2 方程式乱流モデルの基礎方程式

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

$$\frac{\partial U_i}{\partial t} + \frac{\partial U_i U_i}{\partial X_i} = -\frac{\partial}{\partial X_i} \left(\frac{P}{\rho} + \frac{2}{3} k \right) + \frac{\partial}{\partial X_i} \left\{ \nu_t \left(\frac{\partial U_i}{\partial X_j} + \frac{\partial U_j}{\partial X_i} \right) \right\} \quad (2)$$

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \frac{\partial k U_j}{\partial X_j} = \frac{\partial}{\partial X_j} \left(\frac{\nu_t}{\sigma_1} \frac{\partial k}{\partial X_j} \right) + P_k - \varepsilon \quad (3)$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \frac{\partial \varepsilon U_j}{\partial X_j} = \frac{\partial}{\partial X_j} \left(\frac{\nu_t}{\sigma_2} \frac{\partial \varepsilon}{\partial X_j} \right) + C_1 \frac{\varepsilon}{k} P_k - C_2 \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (4)$$

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial C U_j}{\partial X_j} = \frac{\partial}{\partial X_j} \left(\frac{\nu_t}{\sigma_3} \frac{\partial C}{\partial X_j} \right) + C_0 \quad (5)$$

$$\nu_t = C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} = k^2 \ell \quad (6) \quad P_k = \nu_t \left(\frac{\partial U_i}{\partial X_j} + \frac{\partial U_j}{\partial X_i} \right) \frac{\partial U_i}{\partial X_j} \quad (7)$$

各数値定数: $C_\mu = 0.09$, $C_1 = 1.44$, $C_2 = 1.92$, $\sigma_1 = 1.0$, $\sigma_2 = 1.3$, $\sigma_3 = 1.0$

U_i : i 方向の気流速度 (m/s) ($i = 1, 2, 3$) C : 浮遊微粒子の平均濃度 (kg/m^3)

C_0 : 浮遊微粒子の発生項 ($\text{kg/m}^3 \text{s}$)

表 1.4 境界条件および差分スキーム

(1) 給気口	$U_i = 0.0, U_n = U_{out}, k = k_{out}, \ell = \ell_{out}, C = C_{out}$ 添え字 i, n : 給気口, 排気口面に対してそれぞれ接線方向, 法線方向を示す U_{out} : 給気口風速 (図 1.13 参照) k_{out} : 流入乱流エネルギー ($= 0.005 \text{m}^2/\text{s}^2$) ℓ_{out} : 乱れの長さスケール ($= 0.3 \text{m}$) C_{out} : 吹出し空気濃度 ($= 0 \text{kg/m}^3$)
(2) 排気口	$U_i = 0.0, U_n = U_m, \partial k / \partial n = 0.0, \partial \varepsilon / \partial n = 0.0, \partial C / \partial n = 0.0$ U_m : 排気口風速 (図 1.13 参照)
(3) 壁面	$(\partial U_i / \partial n)_{n=0} = m \cdot (U_i)_{n=h} / h, U_n = 0.0, \partial k / \partial n = 0.0, \partial C / \partial n = 0.0$ $(\varepsilon)_{n=h} = \frac{C_\mu^{3/4} k_{n=h}^{3/2}}{2 \kappa h} \ell n \left[\frac{E \cdot 2h (C_\mu^{1/2} k_{n=h})^{1/2}}{\nu} \right]$ h : 壁面から第一セルの差分定義点までの距離 $E = 9.0$ (滑面の場合) m : U_i がベキ乗分布するとみなしたときのベキ指数 ($m = 1/7$) κ : カルマン定数 ($\kappa = 0.4$) ν : 動粘性係数 (空気, $0.15 \times 10^{-4} \text{m}^2/\text{s}$)
(4) 差分スキーム	空間差分 ・運動方程式および k, ε 輸送方程式移流項: QUICK スキーム ・汚染質濃度輸送方程式移流項: 一次精度風上差分スキーム ・各方程式拡散項: 中心差分スキーム 時間差分 Adams-Bashforth スキームによる二次精度スキーム

注 本シミュレーションは実スケールの物理量を用いて行われている

概要に関しては既に前節で述べた。実験で測定した給気口・排気口流量分布を境界条件としてシミュレーションにより求めた結果 (Case 7) を図 1.16 に示す。流れ場に関してシミュレーションは、吹出し噴流の床面衝突域で風速が多少小さく計算されている点など細部での不一致を除けば、給気口間で生じる上昇流の強さや方向の様相や壁面に沿う上昇流の様相等、比較的实验結果と良い対応を示している (図 1.15(a), 図 1.16(a))。拡散場は既往の研究において実験結果とシミュレーション結果で比較的良好な対応が得られているのに対し^{1), 2), 5) ~ 7)}、今回の結果は両者に多少の差異が認められる。すなわち、①濃度 0.5 以下の領域がシミュレーションでは壁側に現れるのに対して実験では現れない。②2.0 以上の高濃度領域の分布に関しては実験よりもシミュレーションの方がやや高めの値を示す (図 1.15(b), 図 1.16(b))。本節で述べるシミュレーションによる拡散場の予測結果は実験結果よりは全般的に非拡散的である。この差異は実験とシミュレーションで流れ場の比較のための前提条件を正確に一致させられていないことに一因があると考えられる。すなわち、実験において給気口における乱れの性状やよりスケールの小さい変動等を正確に測定することが困難であること、またシミュレーションにこれを十分反映させることが難しいこと等が差異の大きな原因として考えられる。ここでいう検討では流量分配、気流障害物等が流れ場に及ぼす影響をパラメトリックに相対比較することにその最大の関心がある。その意味ではある程度種々のケースで実際との対応が確認されたシミュレーション手法を用いた解析・検討は一定の有効性を持つものと考えられる^{1), 2), 7)}。

前節の実験による考察では汚染質を給気ダクト内で発生させ、いわば一つの給気口から供給された空気が室内にどのように移流・拡散されるかを検討した。シミュレーションでは、吹出し気流の移流・拡散というよりも汚染質の室内拡散を検討するという観点から、汚染質を室内の吹出し噴流部その他で発生させている。

図 1.16(c) は A 点で汚染質を発生させた場合のシミュレーション結果を示す。図 1.16(b) の給気口で汚染質を発生させた場合とよく類似した拡散性状を示すが、異なる点もある。汚染質が発生した気流単位における汚染質分布性状は、汚染質が流れの上流、下流のどの位置で発生したかにより大きな影響を受けるが、他の気流単位ではその影響は極めて小さい。これについては 1.2.4 節および 1.2.6 節でも検討する。

1.2.4 排気口位置・形状の変化による影響 (Type 1, 3 ~ 5 の比較)

(1) 気流性状

図 1.17 ~ 1.19 の (a) に Type 1 (壁面排気方式)、Type 3, 5 (天井面給排気による局所流量バランス方式) の気流性状を示す。Type 4 は Type 5 と各給排気口での排気風量が同じであり、気流性状は Type 5 と同様の結果を示すためここでは省略する。はこれらの気流性状は可視化実験、模型実験とも良い対応を示す。Type 1 では給気口間の上昇流が床面から室高の 2/3 程度までに留まり、天井面まで到達しない (図 1.17(a)) のに対して、Type 3 ~ 5 では上昇流が天井面まで到達している (図 1.18, 1.19 の (a))。全体的に、Type 3 ~ 5 の気流性状は

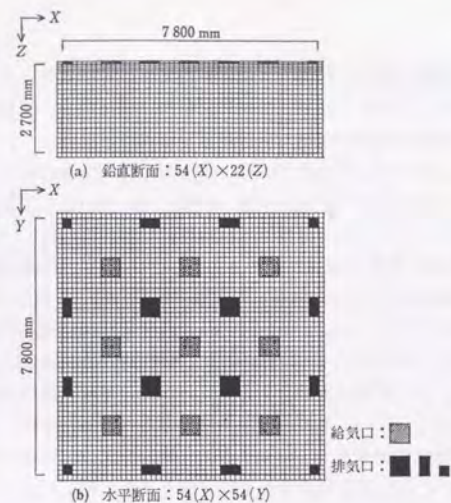


図1.14 メッシュ分割図 (Type 5)
(他のTypeも同様の均等メッシュ分割を用いる)

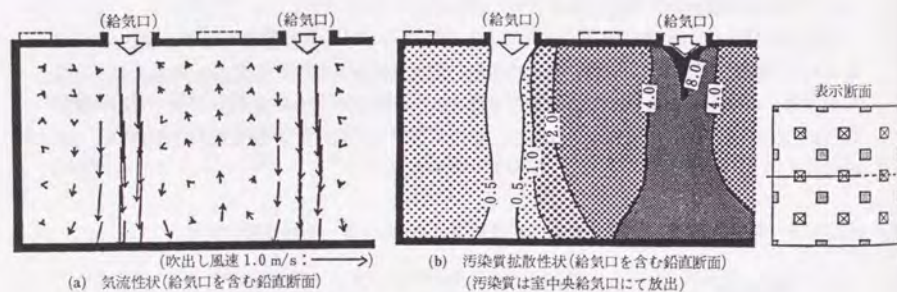


図1.15 模型実験による流れ場・拡散場解析
(Case 7: 給排気口配置はType 5, 左半分を表示)

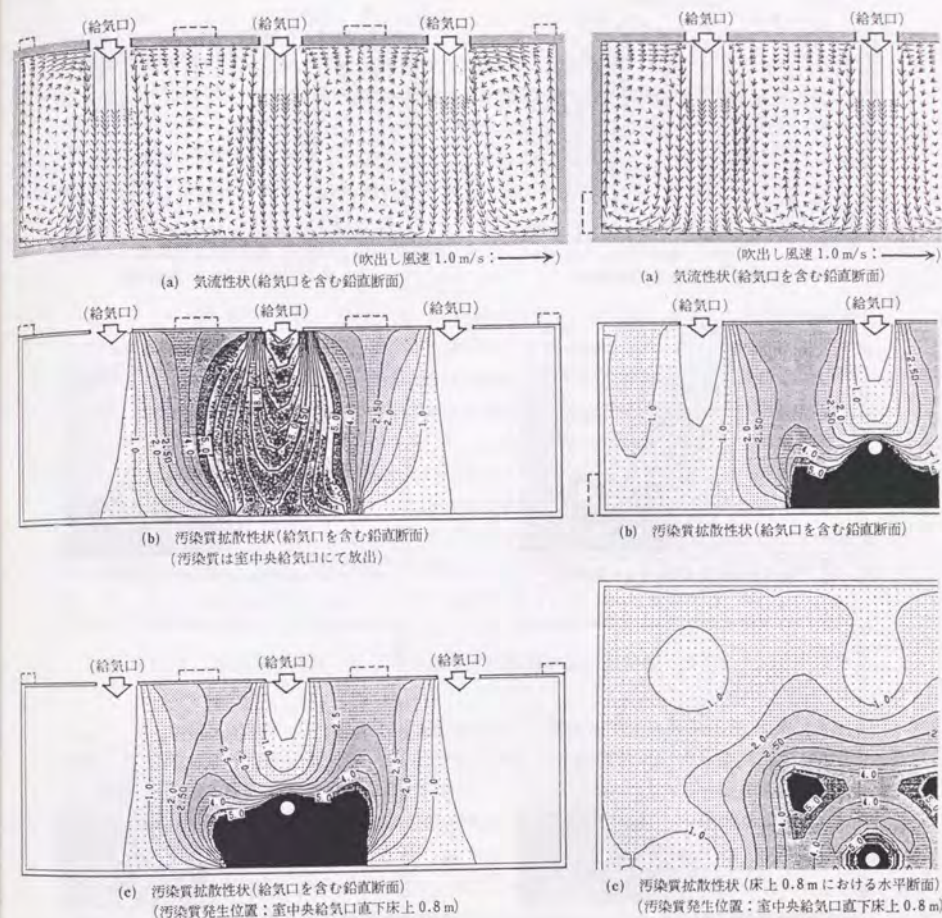
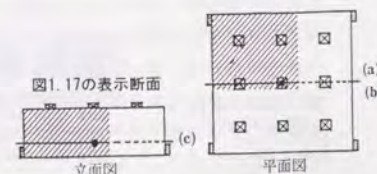
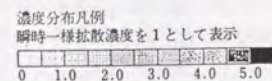
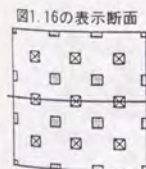


図1.16 シミュレーション結果による
流れ場・拡散場解析
(Case 7: 給排気口配置はType 5)

図1.17 Case 1の気流性状
および汚染質拡散性状
(給排気口配置はType 1)



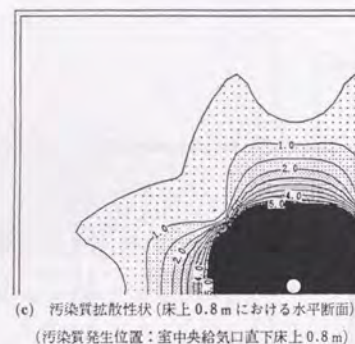
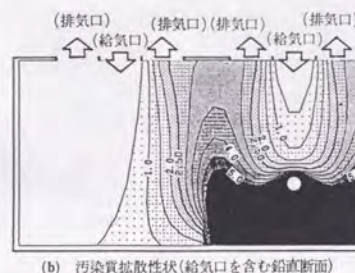
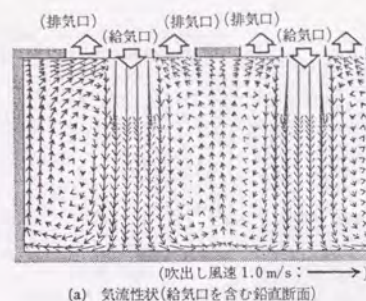


図 1.18 Case 2 の気流性状
および汚染質拡散性状
(給排気口配置は Type 3)

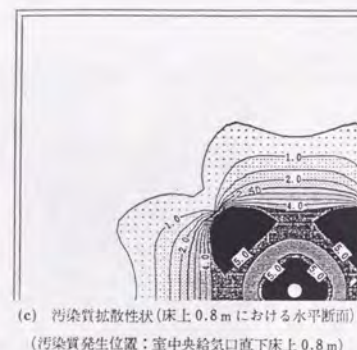
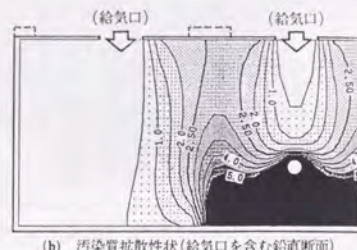
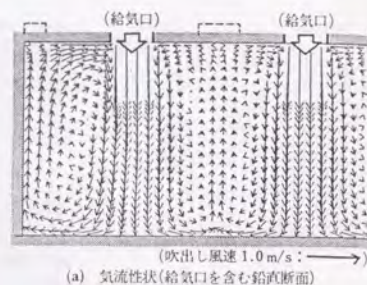
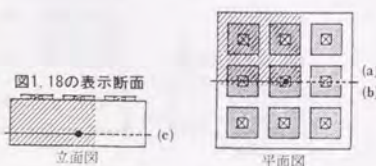
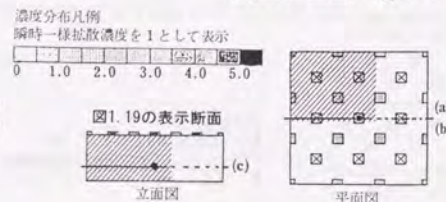


図 1.19 Case 4 の気流性状
および汚染質拡散性状
(給排気口配置は Type 5)



排気口設置位置の違いにより多少の影響を受けるが気流分布の全般的なパターンはよく似ている。各タイプとも、それぞれの吹出し噴流は床面に衝突して発散流となり、その発散流は壁面に到達あるいは他の発散流とぶつかり、噴流を包み込むように上昇流を形成し、天井面沿いに給気口に収束する気流単位を形成する。全体の気流パターンはこれら給気口ごとに生じる気流単位が並んで構成される様相を示す。

(2) 汚染質拡散性状 (point sourceの場合)

図 1.17 ~ 1.19 の (b), (c) に、室内中央 (中央給気口直下) 床面高さ 0.8 m の A 点で汚染質を発生させた場合の Type 1, 3, 5 の汚染質拡散性状を示す。Type 4 の拡散性状は Type 5 と同様の結果を示すため省略する。汚染質拡散性状は瞬時一様拡散濃度を 1 として表示している。Type 1 (壁面排気方式) と Type 3 ~ 5 (天井面給排気による局所流量バランス方式) の気流性状は前述のように類似しているのに対して、汚染質拡散性状は極めて異なる様相を示している。給気口ごとの気流単位内で給排気が完結している Type 3 ~ 5 (図 1.18, 1.19) では、汚染質の拡散が室中央の気流単位とその直近に比較的限定されており、あたかも”見えない空気の壁”が汚染質の拡散を制限しているかのように見える。そのため Type 3 ~ 5 の拡散性状の分布は、Type 1 (図 1.17) のように室全体に汚染質が広く拡散する様相とは著しく異なっている。なお Type 3 は Type 4, 5 に比べて室下部でわずかに拡散が大きくなっている。

(3) SVE1 (室内平均濃度) と SVE2 (汚染質拡散半径) の特性

図 1.20, 1.21 に、各タイプにおいて汚染質の発生位置を室中央 A 点から B, C 点 (図 1.11 参照) に移動した場合の SVE1, 2 (それぞれ汚染質発生位置に対応する室内平均濃度および汚染質の平均拡散半径) を示す。また表 1.5 に各ケースにおける SVE1, 2 の値を示す。B, C 点で汚染質発生させた場合の汚染質拡散分布図は省略する。SVE1 (室内平均濃度) の場合、汚染質が A 点の場合 Type 3 ~ 5 は Type 1 の 1.75 (Case 1) の値に比べて約半分 (図 1.20 : 表 1.5) の 1.05 (Type 3 : Case 2), 0.85 (Type 4 : Case 3), 0.86 (Type 5 : Case 4) となる。SVE1 は発生した汚染質が室内から排出されるまでの平均的な室内滞在時間に対応するが、Type 3 ~ 5 の局所給排気完結型の換気システムでは汚染質の室内滞在時間がそうでないものに比べて約半分の時間に短縮され、排気効率が極めて良いことがわかる。SVE2 (汚染質拡散半径) の場合 (図 1.21) も、在来方式である Type 1 に比較して Type 3 ~ 5 の換気方式の場合に汚染質の室内全体領域への非拡散性が著しくなる。なお汚染質拡散半径は発生位置が室中央 A 点から給気口間中央 C 点へと移動するにつれて値が小さくなる。この理由は在来方式である Type 1 の場合には文献 1), 2) で報告されているように、汚染質発生源が各気流単位ごとの閉じた流れ場の下流側の排気口に近づくにつれて、拡散が限定されるためである。Type 3 ~ 5 の場合、汚染質発生位置 A 点は局所的に閉じた流れ場 (各気流単位内) で相対的に上流に位置する吹出し噴流内にあるため、汚染質はその気流単位内に十分に拡散されてしまう。A 点に比べて C 点は 2 つの気流単位の間の中強い上昇流位置にあり、各気流

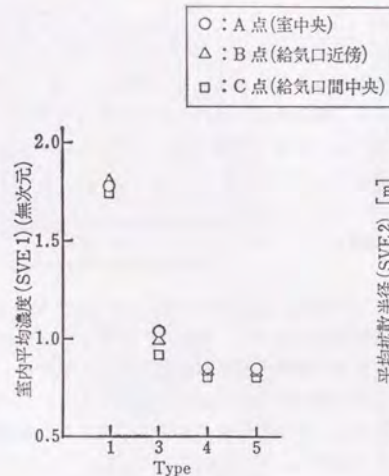


図1.20 給排気口配置と換気効率 (SVE1)

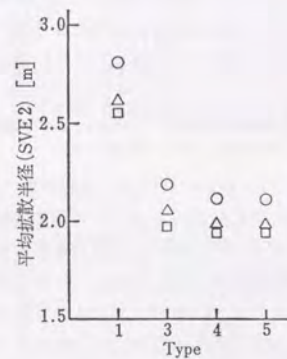


図1.21 給排気口配置と換気効率 (SVE2)

表1.5 各ケースの室内平均濃度 (SVE1) と平均拡散半径 (SVE2) の比較

Case No.	Type No.	汚染質発生点	図版	平均濃度 (無次元)	平均拡散半径 (m)
Case 1	Type 1	A点	図1.17	1.75	2.81
		空間全体一様発生	図1.22	0.97	3.33
Case 2	Type 3	A点	図1.18	1.05	2.19
Case 3	Type 4	A点	省略	0.85	2.12
		(図1.19と同様)			
Case 4	Type 5	A点	図1.19	0.86	2.11
		空間全体一様発生	図1.23	0.84	3.37
Case 5	Type 5	A点	図1.24	0.76	2.30
		(障害物上表面)			
Case 6	Type 5	A点	図1.25	0.87	2.00
		(障害物側方)			
Case 7	Type 5	A点	図1.16	0.95	2.17
		室中央給気口	図1.16	0.87	2.05
Case 8	Type 5	A点	図1.26	1.13	2.34
Case 9	Type 5	A点	図1.27	1.06	2.94
Case 10	Type 5	A点	図1.28	1.06	2.96

単位の流れ場では、相対的に排気口に近い下流側となる。汚染質はこの上昇流により天井まで輸送され、室内に拡散される前に天井面の排気口から効率的に排出されてしまうため拡散半径の値が小さくなると考えられる。なお、Type 3はType 4, 5と比べてSVE 1, 2のいずれも大きく、換気効率は悪くなっている。Type 4, 5は室内の上昇流が最も強くなる位置で排気口に直接対面 (排気口に対し上昇流がちょうど排気口面の法線方向風速成分に対応) しており、これが換気効率の良くなる一因とも考えられる。

(4) SVE3 (空間全体発生の場合) の特性

図1.22, 1.23にType 1, Type 5のSVE3の分布 (空間全体で汚染質発生した場合の濃度分布: 給気口からの新鮮空気 の平均到達時間の分布に対応) を示す。給排気を1つの気流単位ごとに完結させるType 5はType 1に比べて室上部の値が全般的に小さくなっている。

Type 1では天井隅から壁面に沿って床面まで1.0以上の高濃度域が広がっている (図1.22(a))。この部分は給気口からの清浄空気が長い経路を経て到着していることを意味しており、清浄度の確保に際して相対的に問題が生じやすいことがわかる。これに対し、Type 5では1.0以上の領域はほとんどみられず (図1.23(a))、給気口からの新鮮空気が比較的短い経路で到達することが示されている。また、天井面近傍の水平断面 (図1.23(b)) をみると、Type 5の場合の排気口位置に対応する領域において濃度が小さくなっており、Type 1 (図1.22(b)) に比べて天井面への新鮮空気 の平均到達時間が早いことがわかる。

なおこの汚染質空間一様発生の場合の室内平均濃度 (SVE1) は表1.5に示すようにType 1で0.97, Type 5で0.84の値を示す。明らかにType 5の方が値が小さく汚染質排出効率の良いことがわかる。

以上のことからType 5は滞留域がType 1に比べて少なく、給気口からの新鮮空気がより速やかに各場所に到達するという点で、コンタミネーションコントロールに有効な手法であることが定量的に確認される。

1.2.5 気流障害物の影響 (Case 5と6の比較)

図1.24に箱型気流障害物を給気口直下の床面に設置したCase 5の気流、拡散性状を示す。障害物に衝突した噴流は横に発散する (図1.24(a))。この影響のため障害物が設置された場所では、吹出し噴流と周辺の上昇流で閉じた流れ場を形成する気流単位の形成が不十分なものとなる。これに対応して障害物上面で発生した汚染質は横方向に広く拡散し壁側の気流単位でも濃度が0.5以上となり障害物設置により室内への汚染質拡散が助長される (図1.24(b))。一方、障害物を吹出し噴流の間に設置したCase 6 (図1.25(a)) ではCase 4 (図1.19(a)) と比べて気流性状に大きな影響はみられない。この場合、噴流直下で発生した汚染質は、気流単位の形成による“見えない空気の壁”と障害物による二重の遮蔽効果により障害物を越えて拡散していかない (図1.25(b))。表1.5からわかるように給気口直下に障害物を設置したCase 5は、Case 4および給気口間に障害物を設置したCase 6よりも室内平均濃

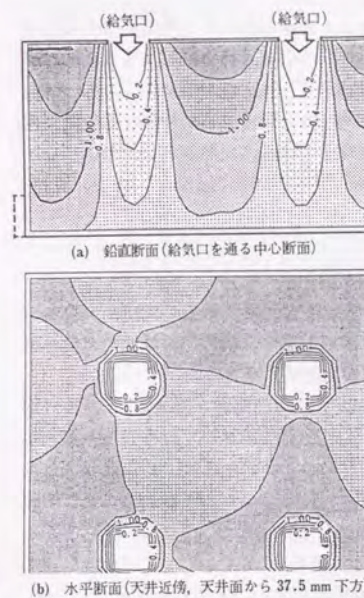


図 1.22 汚染質拡散性状
(給排気口配置Type 1,
汚染質空間一様発生,
SVE 3 分布性状を示す)

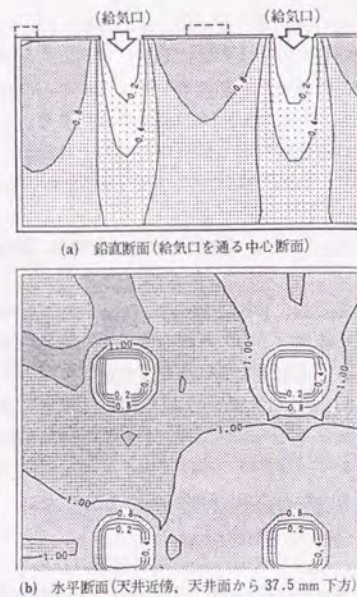
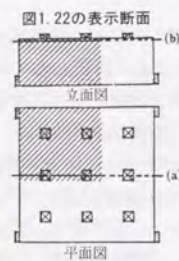


図 1.23 汚染質拡散性状
(給排気口配置Type 5,
汚染質空間一様発生,
SVE 3 分布性状を示す)



濃度分布凡例
瞬時一様拡散濃度を 1 として表示

0	0.4	0.8	1.2	1.6	2.0
---	-----	-----	-----	-----	-----

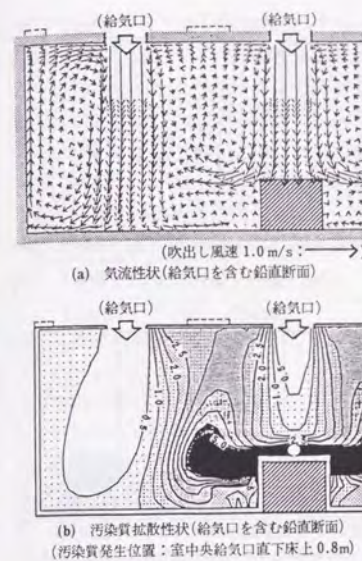


図 1.24 Case 5 の気流性状
および汚染質拡散性状
(給排気口配置はType 5,
室中央の給気口直下に
気流障害物を設置した場合)

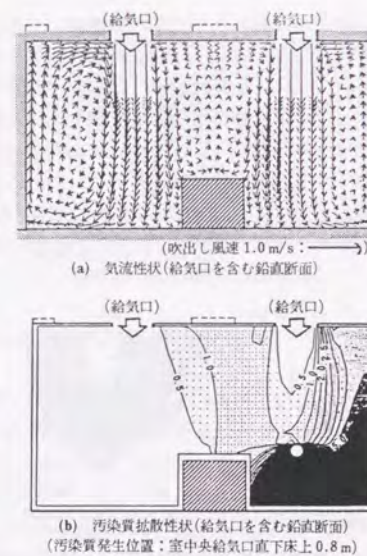
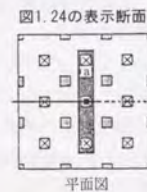
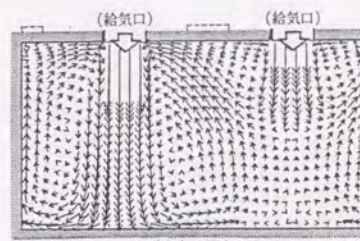


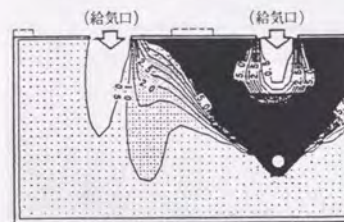
図 1.25 Case 6 の気流性状
および汚染質拡散性状
(給排気口配置はType 5,
給気口間に気流障害物を
設置した場合)

濃度分布凡例
瞬時一様拡散濃度を 1 として表示

0	1.0	2.0	3.0	4.0	5.0
---	-----	-----	-----	-----	-----

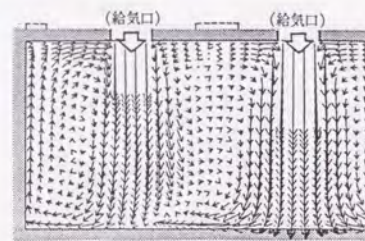


(a) 気流性状(給気口を含む鉛直断面)

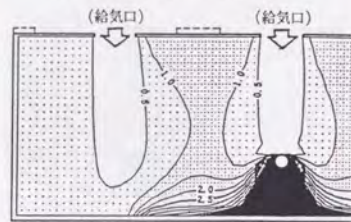


(b) 汚染質拡散性状(給気口を含む鉛直断面)
(汚染質発生位置: 室中央給気口直下床下0.8m)

図1.26 Case 8の気流性状
および汚染質拡散性状
(給排気口配置はType 5,
室中央給気口の流量50%減少)



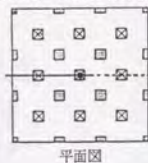
(a) 気流性状(給気口を含む鉛直断面)



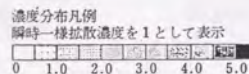
(b) 汚染質拡散性状(給気口を含む鉛直断面)
(汚染質発生位置: 室中央給気口直下床下0.8m)

図1.27 Case 9の気流性状
および汚染質拡散性状
(給排気口配置はType 5,
室中央給気口の流量50%増加)

図1.26, 1.27の表示断面



平面図



度(SVE1)が0.76と小さくなっている(Case 4 (0.86), Case 6 (0.87))。これは噴流が障害物に衝突して噴流により汚染質が十分に希釈混合され高濃度領域が消失したことによる効果が大きかったためと思われる。しかし平均拡散半径(SVE2)がCase 4の場合は2.11, Case 5の場合に2.30であるのに対してCase 6は2.0であり、気流障害物の設置位置によっては効果的なコンタミネーションコントロールが行える可能性が示唆されている。なお障害物を置いた場合でも、表1.5で示すように室内平均濃度(SVE1)、平均拡散半径(SVE2)のいずれもCase 1の従来型のクリーンルームにおける値に比べて顕著に小さい。このことから気流障害物を設置した場合でも局所流量バランス方式の換気システムは従来型に比べて汚染質の排気効率が良いことがわかる。

1.2.6 給排気流量分配のバラツキの影響 (Case 4, 7~10)

実験に対応させて各給気口、排気口の流量分配に10%前後のバラツキを与えたCase 7の結果は既に図1.16(c)で示している。前節(1.1)で述べたように、この給排気流量分配は実験でかなり努力してこれらを均一にしようと調節した結果である。すなわちこの程度の給排気流量分配のバラツキは実際の応用の観点からはかなり小さいものと考えられる。これに対し、図1.26は中央給気流量を50%と大きく減少させたCase 8、図1.27は同じく50%と大きく増加させたCase 9の場合を示す。さらに図1.28は中央給気流量を50%増加させたことに対応してその気流単位の排気流量を50%増加させて、給排気流量をバランスさせたCase 10の気流性状・汚染質拡散性状を示している。

Case 4 (図1.19(b))とCase 7 (図1.16(c))を比較するとほぼ同様の拡散分布を示しているように見える。しかし表1.5からわかるようにCase 7の汚染質の室内平均濃度(SVE1)は0.95とCase 4の0.86に比べて高くなり、汚染質の排出効率が低下している。またCase 7の拡散半径(SVE2)もCase 4の2.11に比べて2.17と多少大きくなり汚染質拡散を限定する効果も低下している。しかしType 3のクリーンルームの場合(Case 2)のSVE1:1.05, SVE2:2.19よりは小さく、Case 7はCase 2よりも良い換気効率を持つことがわかる。

室中央の給気流量を極端に減少させたCase 8では中央給気口からの噴流が床面まで到達せず、逆に左右の吹出し噴流が床面上で中央給気口下まで侵入し、天井に到る強い上昇流を形成する(図1.26(a))。この気流性状に対応して、汚染質は天井面に向かって拡散し天井面で排気されるため床面には1.0以上の高濃度域は見られない。しかし表1.5で示すように、Case 8は他のCase 4~10に比べて汚染質の室内平均濃度(SVE1)が1.13と高く、汚染質排出効率が悪くなり、拡散半径(SVE2)もCase 4の2.11に比べて2.34と大きい。

室中央給気口の供給流量を増加させて給排気アンバランスとなったCase 9およびこの吹出し口への給気分配の不釣り合いにあわせて給排気バランスをとったCase 10は、排気流量の分配が異なるにもかかわらず気流性状・汚染質拡散性状はほぼ同様の様相を呈する(図1.27, 1.28)。すなわちこのように大きく給排気分配の不釣り合いが生じると、それに合わせて給排気流量をバランスさせても汚染質拡散を限定させる効果は小さい。Case 7~10の拡散性状は、いずれも給排気流量を気流単位で均等にバランスさせたCase 4 (図1.19)に比べて拡散

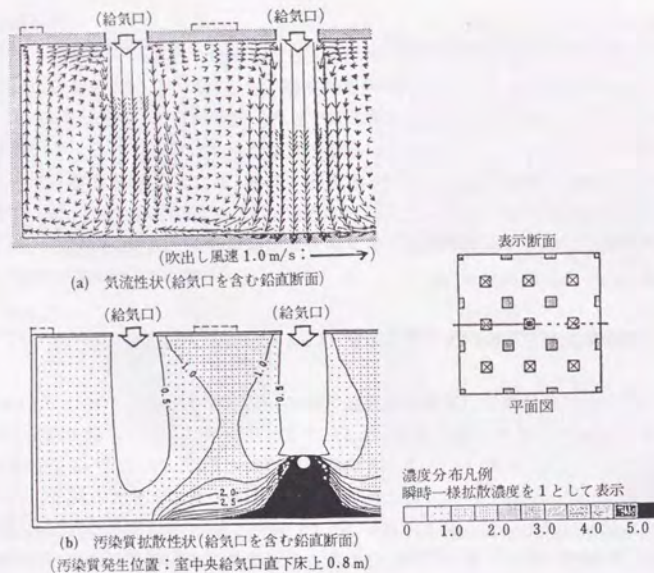


図 1.28 Case 10の気流性状および汚染質拡散性状

(給排気口配置はType 5,
室中央給気口の流量50%増加に伴い,
周囲4個の排気口で流量バランスを保つ場合)

性が強い。特にCase 8～10では壁側の気流単位の汚染質濃度は0.5以上の値を示す。しかしながら、Case 1の従来型のクリーンルームにおける室内平均濃度 (SVE 1) に比べるとCase 9, 10は顕著に小さく、換気効率の良いことが示されている。ただし汚染質の平均拡散半径 (SVE 2) に関してはCase 9, 10はCase 1の従来型のクリーンルームの場合に比べても明らかに悪くなっている。

1.3 第1章結論

- (1) 従来型の乱流型クリーンルームに比べて局所流量バランス方式換気システムは極めて効率的に汚染質排出を行いかつ汚染質拡散の範囲を限定する。
- (2) 局所的に給排気の流量バランスが保たれている場合、多少の排気口の設置位置の変化が気流性状や汚染質拡散性状に及ぼす影響は小さい。
- (3) 流量分配を実験と一致させ、すべての給排気口で10%前後バラツキを与えた場合は、厳密に局所流量バランスさせた流量分配の場合に比べて換気効率は多少悪くなるが、その影響は小さく局所流量バランス方式の換気システムの有効性は失われない。
- (4) 障害物は吹出し噴流間よりも噴流直下に設置するほうが流れ場や拡散場に与える影響は大きい。この場合、特に汚染質の拡散を限定させる効果が小さくなる。
- (5) 想定した気流単位内における給気過多や排気過多により生じる給排気の大きなアンバランスは、室内全体への拡散を増大させる。
- (6) 給気分配に大きなバラツキがある場合は、排気流量を各気流単位ごとにバランスさせても、給排気分配にバラツキがない場合に比べて、汚染質拡散の領域を限定させる効果は小さくなる。

第1章補注

- 1.1 ここでは、給気口からの吹出し噴流の強い誘引効果によって給気口近傍の気流ベクトルが給気口に向かって収束する様相を示す流れ場の状態を指す。
- 1.2 ここでは、給気口からの吹出し噴流が床面などの物体表面に衝突して、気流ベクトルが四方へ発散する様相を示す流れ場の状態を指す。
- 1.3 本研究に関連する既発表論文9)の計算結果は、本節で用いた計算条件とは多少異なる条件となっている。しかし本節に示す全ての計算結果は、ここで示した計算条件により再計算している。なお、計算条件の変更に伴うシミュレーション結果の差異は既報10)に示すように小さい。なお、流入の乱流エネルギー k は吹出し噴流の平均エネルギーの1% ($= 0.01U^2/2$) を用いている。

第1章参考文献

- 1) 村上周三, 加藤信介, 須山喜美: コンベンショナルフロー型クリーンルーム内の気流性状に関する研究(第1報), 空気調和・衛生工学会論文集, No. 37, pp. 37-48, 1988
- 2) 村上周三, 加藤信介, 須山喜美: 室内気流数値解析の診断システムに関する研究(第2報), 日本建築学会計画系論文報告集, 第390号, pp. 1-12, 1988
- 3) 池鯉鮒悟, 村上周三, 加藤信介: 天井給排気型クリーンルーム内の気流性状に関する研究(その2), 空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集, pp. 625-628, 1986
- 4) 村上周三, 加藤信介: 新たな換気効率指標と三次元乱流数値シミュレーションによる算出法, 空気調和・衛生工学会論文集, No. 32, pp. 91-102, 1986
- 5) 村上周三, 加藤信介, 永野紳一郎: 室内気流数値解析の診断システムに関する研究(第1報), 日本建築学会計画系論文報告集, 第385号, pp. 9-17, 1988
- 6) 村上周三, 加藤信介, 須山喜美: 室内気流数値解析の診断システムに関する研究(第2報), 日本建築学会計画系論文報告集, 第390号, pp. 1-12, 1988
- 7) 村上周三, 加藤信介, 永野紳一郎, 田中幸彦: 移流の卓越する室内気流における沈降を伴う浮遊微粒子の拡散(第2報), 空気調和・衛生工学会論文集, No. 40, pp. 37-45, 1989
- 8) 村上周三, 加藤信介, 田中幸彦, 永野紳一郎: 移流の卓越する室内気流における沈降を伴う浮遊微粒子の拡散(第1報), 空気調和・衛生工学会論文集, No. 39, pp. 35-45, 1989
- 9) 加藤信介, 村上周三, 永野紳一郎: 天井給排気型クリーンルーム内の気流性状に関する研究(その3), 空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集, pp. 629-632, 1986
- 10) 永野紳一郎, 村上周三, 加藤信介: 天井給排気型クリーンルーム内の気流性状に関する研究(その5), 空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集, pp. 385-388, 1987

第2章 吸込み渦を利用した室内換気システム

2.1 LESによるオフィスサイズの空間を対象とした吸込み渦の再現性の検討

2.1.1 はじめに

室内気流制御の手法として、吸込み口周囲の空気に旋回を与えて渦を形成させ、渦の吸引力を利用した換気方法が提案されている¹⁾。このときに形成される渦は浴槽の栓を抜いた時にできる排水渦と同等の現象である。ポンプで取水する場合に、空気を吸込んで効率を低下させる空気吸引渦もこれに当たる。この渦は吸込み渦と呼ばれ、渦中心で強い吸引力とその近傍で大きな旋回速度を持ち、その流速分布と圧力分布はランキン渦の特徴を有する。竜巻と吸込み渦の内部の流れの構造は、本質的には異なるが、竜巻の形成メカニズムを解明するために、竜巻を近似的に吸込み渦とみなした実験的研究が行われている^{2,3)}。図2.1に竜巻と吸込み渦の流れ場の様相を概略的に示す。

本研究の目的は、吸込み渦の有する吸引力を利用して効率のよい換気システムを構築することにある。オフィスサイズの室内におけるタバコ煙等の除去を目的とする吸込み渦の特長を利用した商品が既に開発されているが、吸込み渦形成のメカニズムは十分に明らかにされている訳ではなく、未だ数値シミュレーションと模型実験により解明が待たれている状況である。しかしながら、模型実験による検討はコストの点と条件設定において制約が生じる。そこで吸込み渦の形成条件を数値シミュレーションによって把握できれば、吸込み渦の特長を利用した換気システムを効率よく設計することが可能となる。さらに通常の設備として供給されている吹出し・吸込み口を用いて、これらの空間的な配置を決めることにより、居住空間内に吸込み渦を形成することができれば、その吸引力を利用した汎用性の高い空調・換気設計方法を確立することが期待できる。

本研究の事前検討段階において、数値シミュレーションによる吸込み渦再現の可能性を検討した結果、 $k-\epsilon$ モデルでは吸込み渦が再現されず、LES (Large Eddy Simulation) により再現できる可能性が大きいことがわかっている⁴⁾。この違いを図2.2に示す。渦の中心部分での旋回速度分布は両者で明らかに異なり、渦のコア部分での吸込み渦の特徴的な様相がLESで捉えられていることがわかる。吸込み渦のように乱れの非等方向性が強い流れ場を再現するには、等方向性を仮定した $k-\epsilon$ モデルは適切でないことが他の研究により明らかにされている。非等方向性を考慮した代数応力方程式モデル(ASM)や応力方程式モデル(DSM)を用いた解析も考えられるが、本研究では検討しない。LESはASMやDSMに比較して、モデルがシンプルである反面、数値解析手法の中でとりわけメッシュ分割とスマゴリンスキー定数の設定が結果に大きな影響を与える。

このため本節では、実用的な解析に際して特に問題となるメッシュ分割とスマゴリンスキー係数について検討する。差分化誤差の影響を極力避けるため、メッシュ分割は分割幅を変えた3タイプの等方分割を用いる。速度の境界条件の取り扱いが重要であるが、計算に負担がかかることと、渦中心という壁面からの影響を直接受けにくい領域に関して考察を行うこ

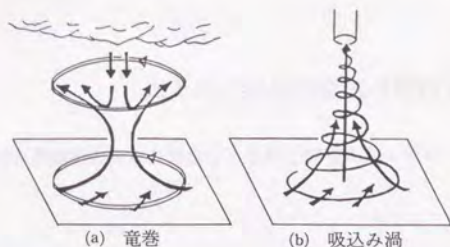


図 2.1 竜巻と吸込み渦の流の様相

(竜巻内部には天空からと地表面から伸びる渦が同時に存在する。
天空から下降した渦の空気は、内部で再び上方に巻きあがる。
これに対し、吸込み渦では吸込み口に向かう一方向流のみである。)

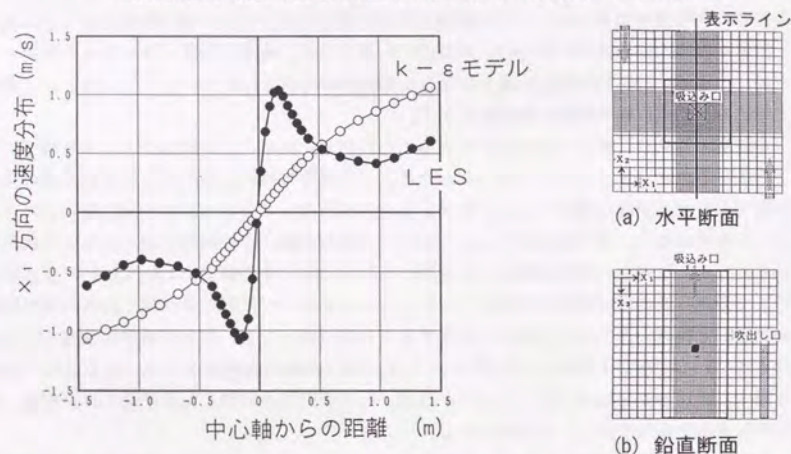


図 2.2 $k-\varepsilon$ モデルとLESの旋回速度分布の比較

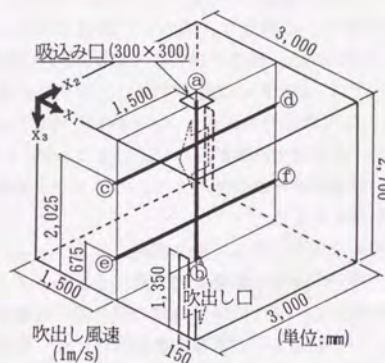


図 2.3 解析した室形状

とを考慮して対数則は用いず、 $1/7$ 乗則を適用した。境界条件の精度への影響については今後の課題とする。

2.1.2 解析概要

本研究で解析に用いた室形状と条件は、オフィス空間内で吸込み渦を形成させることを目的として設定した。吹き出し・吸込み口は、経験的に吸込み渦の形成が予想される配置にした。解析で設定した換気回数は 60 回/h であり、通常の居室換気回数 (7~10 回/h) に比べて大きい。換気回数の変化による影響は、今後の検討課題とする。

検討に用いたモデル室の形状を図 2.3 に示す。LES の基礎方程式は表 2.1 に示す。スマゴリンスキー定数 C_s は、0.1, 0.16^{(5), (6)} の一定値および場の関数である吉澤モデル⁽⁷⁾ の場合について検討する。解析種類と計算条件は表 2.2 に示す。今回用いたメッシュ分割幅による吸込み口の分割数は、Case 1~3 は 16 分割、Case 4~6 は 36 分割、Case 7~9 は 64 分割である。

2.1.3 解析結果

(1) 旋回方向速度分布

紙面に対して法線方向の旋回速度成分の等風速線を図 2.4 に、各 Case との差異を比較するために速度分布を図 2.5 に示す。Case 7 の結果は旋回速度が他の Case に比べて極端に減衰しており、吸込み渦は崩壊している。これは、発生した数値的なく乱が吸込み渦の形成を妨げたものと考えられるが、計算は発散せずに行われており、数値計算上の今後の問題点として残る。これ以外の Case は、3m/s に達する旋回速度分布を示す。

室上部と下部の旋回速度分布の形状は、同じ Case ならばほとんど差がない。メッシュ分割が同じであればスマゴリンスキー定数を関数化した吉澤モデルによる旋回速度が最も大きい。メッシュ分割が細くなるほど速度勾配の大きな領域の分解能が改善されるので、吸込み渦はよりシャープな旋回速度分布を示すようになる。Case 5, 6, 8, 9 の旋回速度の大きさはほとんど同じであり、さらに Case 8, 9 はほとんど同じ分布を示す。流れが吸込み口に近づくにつれて、吸込み速度 (図 2.5(a)) の値は増加し、さらに吸込み口の近傍で大きく増減する。このうち Case 6, 8, 9 は、速度が下向き (負) となる領域を持つ。これは、スパイラルな流れ場であることとメッシュの大きさがこの領域の速度場の激変に対応できずに生じた数値的な現象と考えられる。

(2) 乱流エネルギー k の分布

図 2.6, 2.7 に k の分布を示す。Case 7 は他の Case に比べて渦中心部の乱れが大きく不規則な乱れ構造を持つ (図 2.6(g))。これ以外の Case では、メッシュ分割が細くなるほど中

表 2.1 LESの基礎方程式

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1) \quad \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial \bar{u}_i \bar{u}_j}{\partial x_j} = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\nu + \nu_{SGS}) \bar{e}_{ij} \quad (2)$$

$$\nu_{SGS} = (C_S \Delta)^2 \left[(\bar{e}_{ij})^2 / 2 \right]^{1/2} \quad (3) \quad \bar{e}_{ij} = \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \quad (4)$$

$$\Delta = (\Delta_1 \Delta_2 \Delta_3)^{1/3} \quad (5)$$

Δ_i : i 方向のメッシュ幅を示す $\nu = 0.15 \times 10^{-4} (m^2 / s)$

C_S が定数の場合: $C_S = 0.1$ または 0.16

C_S が吉澤モデルの場合^{5), 8), 9)}: 以下に示す

$$\frac{C_S^*}{C_{SO}} = 1 + \frac{C_A}{S^2} \frac{DS}{Dt} \quad (0 \leq C_S^* \leq 0.27) \quad (6)$$

$$S = \left[\frac{(\bar{e}_{ij})^2}{2} \right]^{1/2} \quad (7) \quad \frac{D}{Dt} = \frac{\partial}{\partial t} + \bar{u}_i \frac{\partial}{\partial x_i} \quad (8)$$

$$C_S(i, j, k) = \sum \sum \sum C_S^*(i+l, j+m, k+n) / 27 \quad (l, m, n = -1 \sim +1) \quad (9)$$

ここで、

$$C_{SO} = 0.16, C_A = -1.8$$

表 2.2 解析種類および計算条件

Case	C_S	メッシュ分割	メッシュ幅
1	0.1	40×40×36	75 mm
2	0.16	40×40×36	75 mm
3	吉澤モデル	40×40×36	75 mm
4	0.1	60×60×54	50 mm
5	0.16	60×60×54	50 mm
6	吉澤モデル	60×60×54	50 mm
7	0.1	80×80×72	37.5 mm
8	0.16	80×80×72	37.5 mm
9	吉澤モデル	80×80×72	37.5 mm

計算条件

- ・吸込み口は圧力境界条件
- ・壁面速度境界条件: 1/7 乗則
- ・空間差分: 中心差分
- ・時間差分: Adams-Bashforth型
- ・計算結果は 1 分間の時間平均値で示す (解析空間の 1 回/h 換気分)

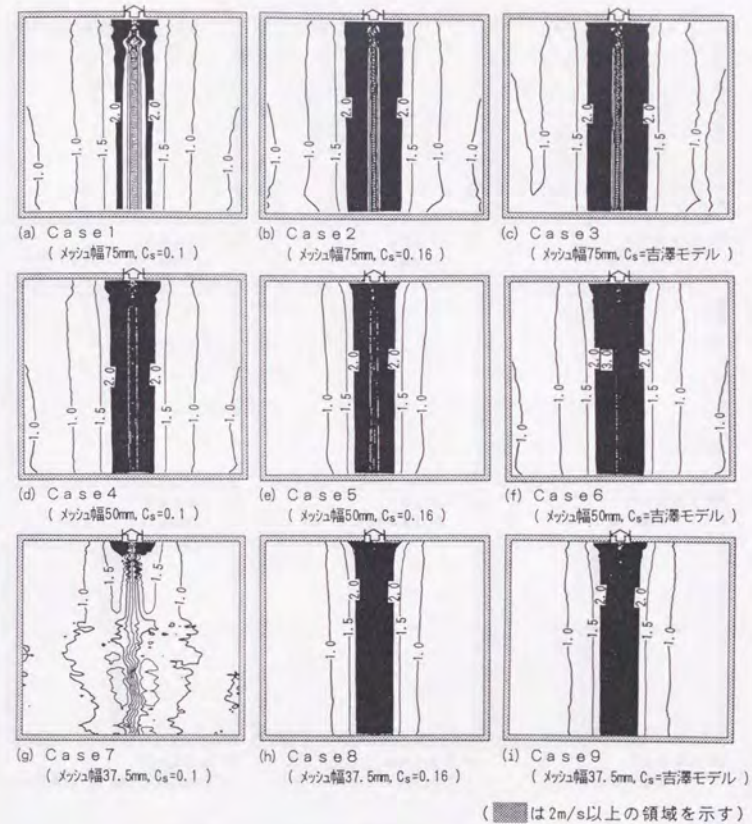


図 2.4 X_1 方向の旋回速度の等速度線図

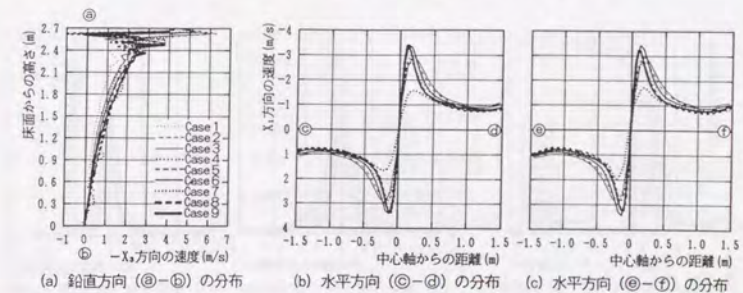


図 2.5 X_1 および X_3 の座標方向の速度分布

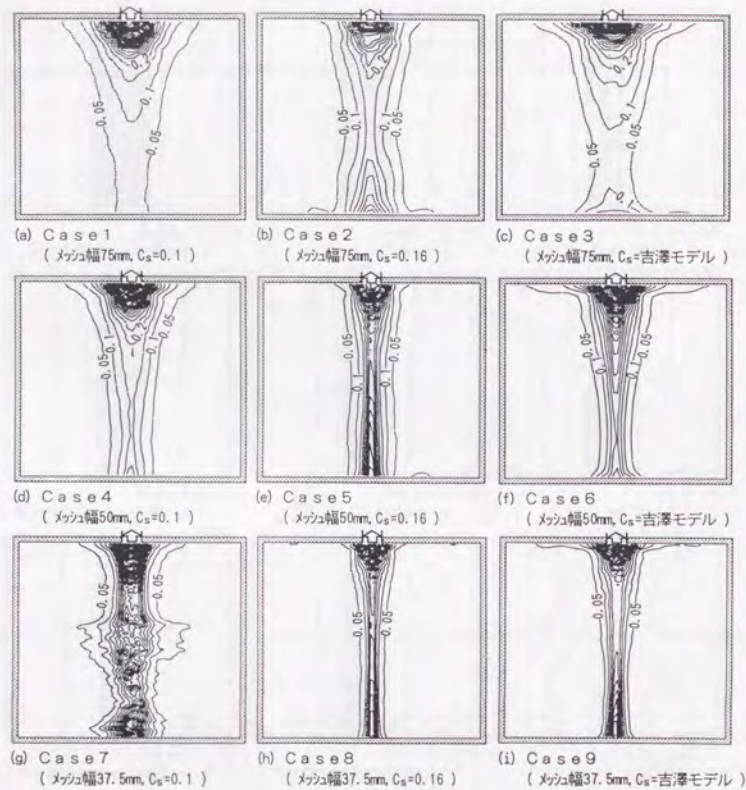


図2.6 乱流エネルギー k の等値線図

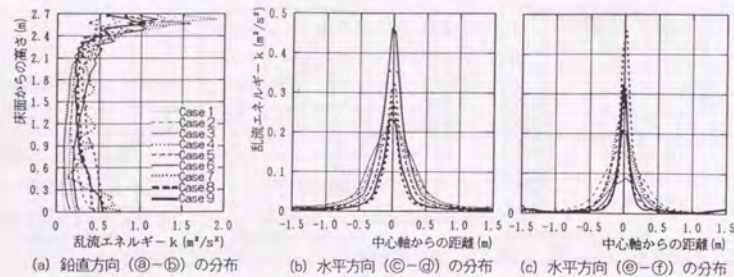


図2.7 乱流エネルギー k の分布

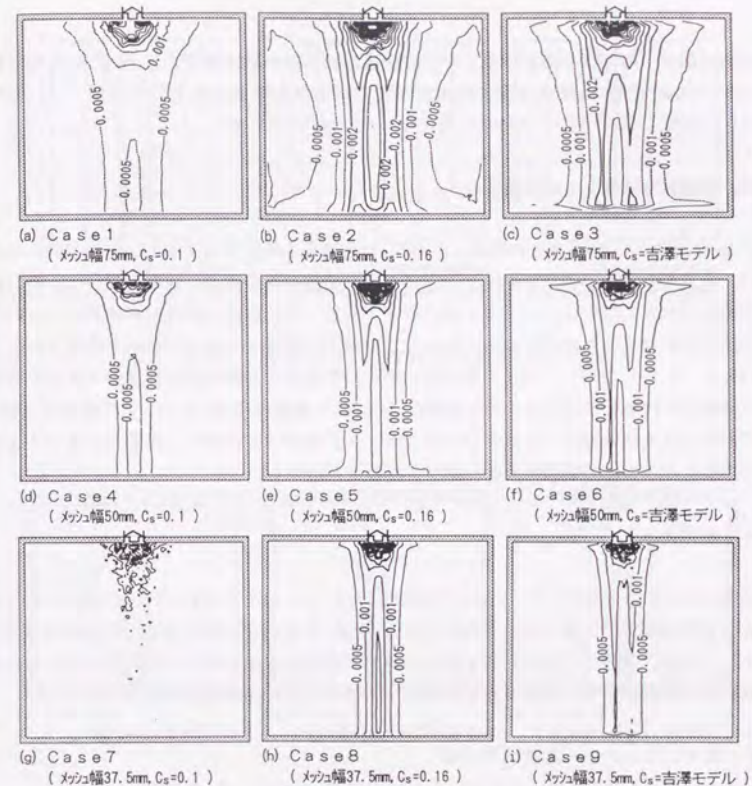


図2.8 渦動粘性係数 ν_{SGS} の等値線図

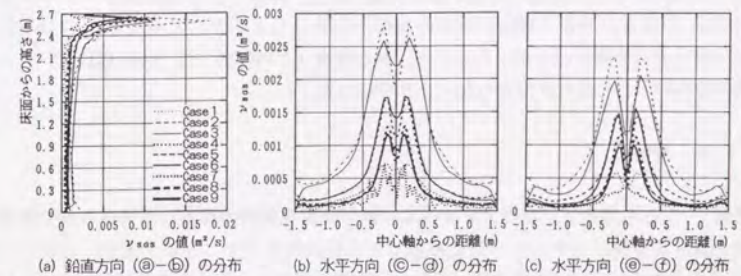


図2.9 渦動粘性係数 ν_{SGS} の分布

中央部から側方への広がり幅が小さくなり、吸込み渦下部の値は増加するという秩序的な様相を示す。Case 8, 9 はほぼ同様な分布を示す。室上部と下部の水平分布 (図 2.7) では、メッシュ分割と C_s の差による分布の変化に一定の傾向はない。

(3) 渦動粘性係数 ν_{SGS} の分布

図 2.8, 2.9 に ν_{SGS} の分布を示す。 C_s が 0.1 の場合を除いて、メッシュ分割が細くなるほど、 ν_{SGS} の分布は小さな値を示すようになる。吸込み渦の領域は速度勾配が大きいため、回転速度が大きいほど ν_{SGS} は大きくなるはずである。その反面、粘性拡散効果の小さい方が回転速度を維持するためには有効である。この両方の要因から ν_{SGS} の分布が決定されと考えられる。しかしながら、 ν_{SGS} の値の大小がそのまま吸込み渦の回転速度の大きさを決定している訳ではなさそうである。たとえば C_s が 0.1 の場合の Case 1, 4, 7 の結果は、吸込み渦が形成されるためには、サブグリッドスケールの渦粘性の直接的な影響 (分布の大きさ) よりも乱れなどの他の要因が大きく関与することを示唆している。

(4) 圧力分布

図 2.10 に圧力分布を示す。Case 7 を除き、メッシュ分割が細かいほど値は小さくなる。Case 8 の場合が吸込み渦の中心で最小となる。Case 9 もほぼ同様である。Case 7 の場合は、室上部で負値、下部で 1 を越える正值となり、下部の圧力値が吹出し口のそれよりも大きな非現実的な結果を示す。Case 7 以外の圧力分布はランキン渦の特徴を示している。

(5) スマゴリンスキー定数 C_s の分布

図 2.11 に Case 3, 6, 9 の C_s の分布を示す。メッシュ分割が細くなるにつれて、吸込み渦下部の C_s の値が大きくなる。室全体の値は 0.13 以上であり、0.16 以上の値の領域はメッシュ分割によらずほとんど変化しない。本節では示していないが、 C_s の鉛直、水平方向の分布の傾向はメッシュ分割によらずほぼ同様である。既報^{8),9)}の検討からメッシュ分割幅が 150mm の場合は分布の傾向が本節の結果とは異なっている。このため C_s の分布がメッシュ分割によらず類似性を示すためには、ある程度 (この解析では 50mm 幅程度) メッシュ分割が細かいものでなければならないことがわかる。

2.1.4 考察

既報^{8),9)}とも併せて、非等方メッシュ分割では再現精度の悪かった吸込み渦の形状が、等方メッシュ分割によりシャープに再現できる可能性を示すことができた。しかしながら Case 7 のように $C_s = 0.1$ の場合は、メッシュ分割が細かいと吸込み渦が崩壊した。これはサブグリッドスケール渦粘性モデルによる ν_{SGS} の算出方法の問題とも考えられ、解析に際して

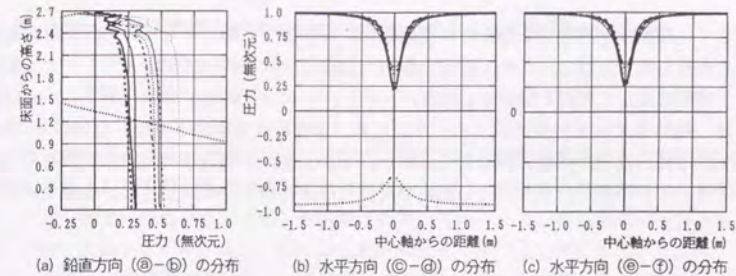


図 2.10 圧力分布 (吹出し口の平均圧力で基準化)

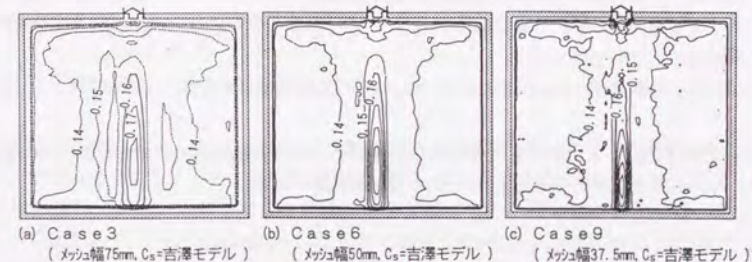


図 2.11 スマゴリンスキー定数 C_s の分布

は予想していなかった現象である。この渦崩壊は、計算上では起こり得ても実際には起きない現象であると考えられる。しかしながら解析では結果の評価の際に問題となるので、数値振動の状態を把握して原因を解明する必要がある。メッシュ分割幅が 50mm の場合と 37.5mm の場合は、巡回速度分布の差はほとんどないため、本節の設定条件下では、分割幅が 50mm 程度であれば吸込み渦の解析には十分であろう。しかしながら吸込み口面積や形状を変更した場合には、さらに細かいメッシュ分割幅でなければ解の精度が保証できない場合もあると考えられる。

2.1.5 2.1 節のまとめ

- (1) 等方メッシュ分割により吸込み渦再現の可能性を示すことができた。
- (2) スマゴリンスキー定数 $C_s = 0.1$ の場合を除いて、メッシュが細かいほど巡回速度は大きく、吸込み渦領域の圧力分布の値は小さい。
- (3) 同じメッシュ分割ならば、巡回速度は C_s を関数化した吉澤モデルの場合が最も大きい。
- (4) メッシュ幅が 37.5mm の場合には、 $C_s = 0.16$ と吉澤モデルの場合は、巡回速度分布の様相がほとんど同じになる。
- (5) メッシュ分割幅が 75mm 以下の場合には、 C_s の分布は類似した様相を示す。

メッシュ分割幅とスマゴリンスキー定数の検討から吸込み渦再現のための知見が得られた。しかしながら設定条件や室形状についても検討が必要である。

2.2 吹出し口位置の変化がアトリウム空間内の吸込み渦形成に及ぼす影響

2.2.1 本節の目的

ドーム球場のような大空間に対して居住域（観客席）の温熱空気環境を良好に保つために循環流を利用した空調・換気手法が提案されている¹⁰⁾。循環流が形成された空気環境の中で、特殊な場合が吸込み渦を形成した状態であると考えられる。吸込み渦の形成メカニズムは、実験や数値シミュレーション等による研究の進展により明らかにされつつある^{1), 8), 9)}。しかしながら、吸込み渦の形成が検討された空間は、居住域が空間のほぼ全体を占めるオフィスやそれよりも小さなサイズの場合がほとんどである。居住域が空間に比べて小さいアトリウム空間を対象とした吸込み渦の検討は、模型実験を除いてあまり例がない¹⁾。

そこで本節では、前節 2.1 のオフィスサイズの検討結果を基にして、LES によるアトリウムを対象とした解析により検討を行った。その結果、矩形のアトリウム内でも吸込み渦の形成が可能であることがわかった。さらに、吹出し口の位置を変化パラメータとした場合の吸込み渦の挙動の変化について考察した。

2.2.2 解析条件

LES による数値シミュレーションにより検討する。基礎方程式および境界条件を表 2.3 に示す。解析対象とするアトリウム空間形状は、図 2.12 に示すように 15 m×15 m×15 m の立方体の空間である。本解析では 3 次元等温場を仮定する。用いた計算セルは、50cm のキューブ状であり、メッシュ分割数は $32 \times 32 \times 32 = 32,768$ である。アトリウム空間内で吸込み渦を形成させるために給気は 4 つの壁面から法線方向に吹出し、床面中央で吸込む換気方式を想定する。解析に際して設定した条件を表 2.4 に示す。4 つの吹出し口の設置位置を壁面近傍から中央に向かって水平方向に移動させた場合に、流れ場にどのような変化が現れるかを比較検討するために、表 2.4 に示すように 11 ケースの解析を行った。吹出し口の高さの変化や吸込み口の位置は、吸込み渦の形成上、非常に重要な設計パラメータであり、今後の検討課題である。

2.2.3 解析結果

最初に壁際に吹出し口を設置した場合を詳しく述べ、その次に吹出し口の位置の変化による影響について述べる。

(1) 吹出し口が壁際にある場合(ケース 1)

(a) 中央鉛直断面の流れ場の様相

図 2.13 に鉛直断面に対して法線方向の気流速度の時間平均値と瞬時値の結果を示す。ア

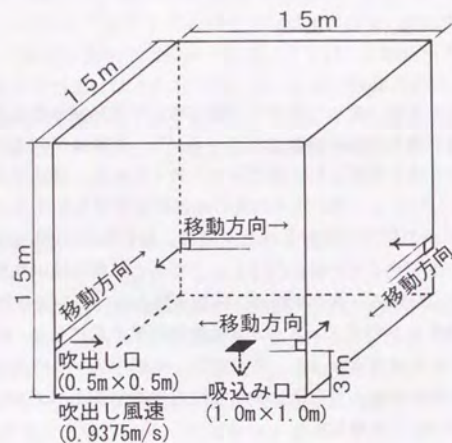
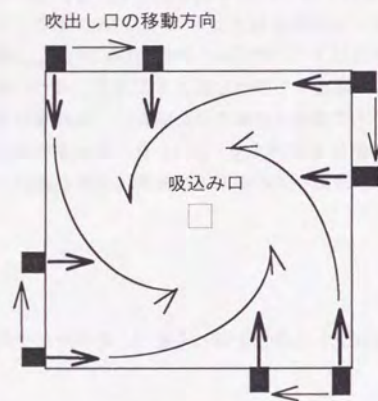


図2.12 アトリウム形状と吹出し・吸込み口位置

- ・吹出し口寸法は計算セルの50cm幅、
- ・吹出し口の移動はセル単位の50cmごと



吹出し口位置の変化： 壁際のケース1からケース11まで
50cmごとに吹き出し口位置を
水平方向に移動させる

表2.3 LESの基礎方程式および境界条件

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1) \quad \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial \bar{u}_i \bar{u}_j}{\partial x_j} = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\nu + \nu_{SGS}) \bar{e}_{ij} \quad (2)$$

$$\nu_{SGS} = (C_s \Delta)^2 \left[(\bar{e}_{ij})^2 / 2 \right]^{1/2} \quad (3) \quad \bar{e}_{ij} = \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \quad (4)$$

$$\Delta = (\Delta_1 \Delta_2 \Delta_3)^{1/3} \quad (5)$$

Δ_i : i 方向のメッシュ幅を示す $C_s = 0.16$ $\nu = 0.15 \times 10^{-4} (m^2/s)$

(1) 吹出し口 速度境界条件 : $\bar{u}_i = 0.0 (m/s)$, $\bar{u}_n = 0.9375 (m/s)$

添え字 t, n : 吹出し口面に対してそれぞれ接線方向、法線方向を示す

(2) 吸込み口 圧力境界条件 : $\partial p / \partial x_n = 0$

(3) 壁面 $1/7$ 乗則 : $\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_n} = \frac{1}{7} \frac{(\bar{u}_i)_1}{h_1}$

添え字 1 は、壁面第一セルを示す

(4) 計算 空間差分 : 中心差分スキーム

スキーム 時間差分 : Adams-Bashforth スキーム

表2.4 解析種類および設定条件

ケース No.	壁面からの 吹出し口中心 位置 (m)	設定条件
1	0.25	・空間内は均一の温度場 (等温度場)
2	0.75	・換気回数は、床上3mの居住域を対象に5回/h
3	1.25	(3375 m ³ /h) に設定
4	1.75	・吹出し口形状は、50cm角のノズルとする
5	2.25	・吹出し口の高さは、床上3mとする
6	2.75	・吹出し噴流は壁面から法線方向に吹出す
7	3.25	・吸込み口は、床面中央に1m角の開口面として設
8	3.75	定
9	4.25	・時間平均化は1回換気要する12分間のデータ
10	4.75	を使用 (吸込み渦が形成された時点から)
11	5.25	・吹出し口の移動は4個とも同時に行う

トリウム中心に、直径5m程度の吸込み渦のコア領域が形成されている。吸込み口近傍を除く床面から天井面まで、ほぼ一定の旋回分布が形成される。瞬時値の結果(図2.13(b))は、非対称的な分布を示す。吸込み口近傍の旋回速度は最大約1.3m/sとなり、渦のコア部分の回転速度には多少偏った傾向が見られる。ところが時間平均的には非常に滑らかな分布(図2.13(a))となり、対称的な様相を示していることがわかる。この中央鉛直断面では、吹出し噴流は約40%減衰して、その速度は0.6m/s程度となるが、吸込み口部分のコア領域の旋回速度は、床面近傍で最大約0.8m/sとなる。このような状況では居住域のドラフトが大きく、対策を講じる必要があると考えられる。

(b) 床上7.5mの鉛直方向の流れ場および圧力場

アトリウム中央の水平断面に対して鉛直方向の気流速度の時間平均値と瞬時値の等高線を図2.14に示す。時間平均化した流れ場の結果(図2.14(a))で特徴的な点は、コア部分では吸込み口に向かう下降流であるのに対して壁面近傍では上昇流となることである。壁面上での上昇流は、吸込みが床面で行われており、天井面から吸引される空気量を補給するために気流循環が形成された結果と考えられる。もし、吸込み口が天井面にあるならば、同じ理由で壁面上では下降流が形成されることになる。瞬時値の結果(図2.14(b))を見ると、壁面近傍の上昇流が時間平均値に比べて大きい場合もあることが示されている。また、流れ場の構造自体には、時間平均値と瞬時値で大きな差異はない。

中央の断面の分布では、図2.15のような鉛直方向の流れ場が形成されている。流量バランスを考えると壁面近傍の上昇分(①領域)を補給するようにその内側(②領域)では下降流となる。これは垂直加熱平板の自然対流時の現象に類似する。また、吸込み口に向かう下降分(④領域)を補給するように、その周囲には上昇流(③領域)が形成されている。このような流れ場の形成は、アトリウムの壁面で生じるゴールドドラフトを解消するという点で有効な手法となる可能性を有する。ただし、上昇速度は0.1m/s程度の大きさであるため、強いゴールドドラフト発生時には打ち消されることが予想される。非等温解析により、冬期の場合ではどの程度このような流れ場を維持できるかを確認したい。

図2.16は、吹出し口面の平均圧力値で基準化した同じ断面の圧力場である。コア部分で大きく低下した分布を示している。このことからアトリウム内では、単なる循環流ではなく吸込み渦が形成されていることがわかる。

(c) アトリウムの居住域の気流分布

図2.17に気流ベクトルを示す。居住域では、気流は壁面に沿って螺旋状に下降しながら床面に向かい、さらに中央の吸込み口に向かう様相を示す。図からアトリウム内では、吹出し口の設置高さの水平面を境として2つの領域(居住域とそれより上部)に分離した二つの循環流域が形成されていることがわかる。そのため噴流は一度居住域に流入した後、周囲の空気と混合しながら上方へ流出するという、居住域に対して新鮮外気の分配に有効な換気経路を採っている可能性がある。新鮮な(年齢が若い)吹出し空気が居住域にどの程度供給されているかは今後の検討課題とする。

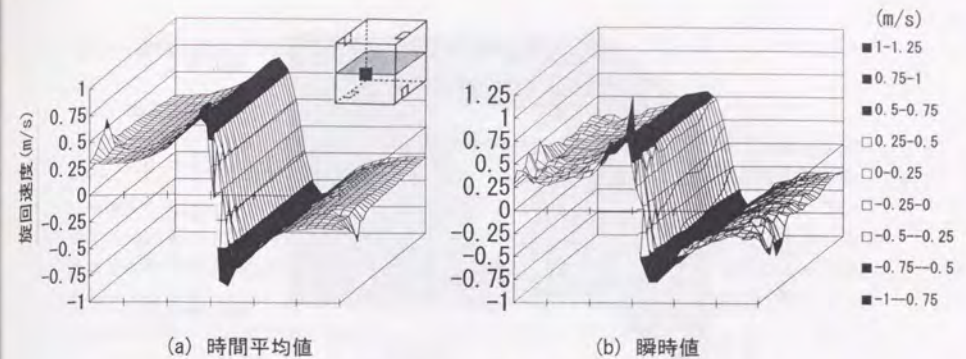


図2.13 ケース1の中央鉛直断面の旋回速度分布

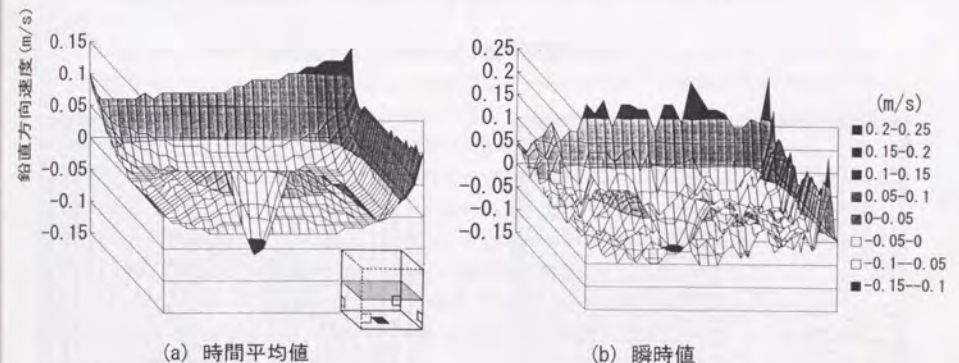


図2.14 ケース1の床上7.5mの水平断面の速度分布

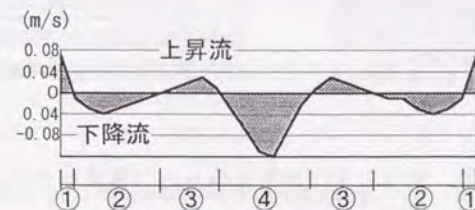


図2.15 ケース1の鉛直方向の流れ場の模式図

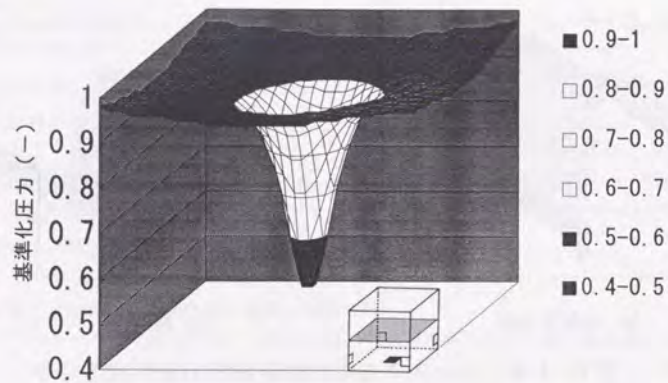


図 2.16 ケース 1 の床上 7.5m の水平断面の圧力分布

(圧力値は吹出し口の平均圧力で基準化)

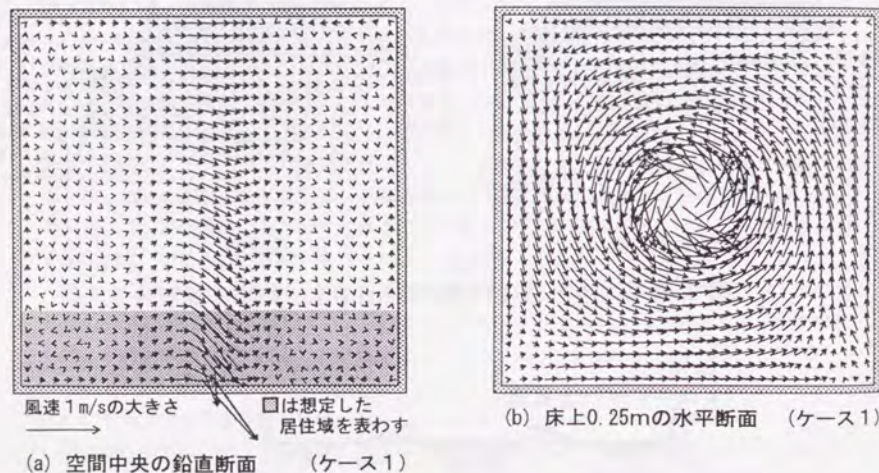


図 2.17 ケース 1 のアトリウム内の気流ベクトル図

(2) 吹出し口位置の変化 (ケース 1 ~ 11)

(a) 旋回速度分布

図 2.18 にケース 1 ~ 11 の水平方向速度分布を示す。場所によらず旋回速度が最大となるのは、ケース 3 の場合である。興味深い点は、ケース 1 からケース 2 へ位置が変化した場合には減少し、ケース 2 からケース 3 へは増加に転じるという極値を持つことである。ケース 3 から 11 までは漸次減少傾向を示す。理由は以下で述べるが、この結果は吸込み渦の旋回速度を制御する上で重要な知見である。また、ケース 1 ~ 5 の群とそれ以外の群は旋回速度の大きさに差異が認められる。ある位置 (ここではケース 5 から 6 に移る時点) を越えると吸込み渦の強さが急に減衰する現象は、気流設計上説明すべき問題と考える。

(b) 循環の強さの比較

省エネルギー的な観点から、吸込み渦を最も効率良く形成できる吹出し噴流位置を検討する必要がある。空間の気流に効率良く回転を与えるためには、噴流を渦回転の接線方向に吹出すことが有効であると考えられる。

剛体に最も効果的に回転を与えるためには、モーメントが最大となる最外周辺部で接線方向に力を与えればよいが、空気のような流体ではそうもいかない。壁際から空気を吹出す場合、コアンダ効果により噴流は壁面に沿って流れるため壁面との摩擦が生じる。このため回転の駆動力となる吹出し噴流の持つ運動量が多大に消費されるので駆動ロスは大い。一方、吹出し口位置が空間中央部分に近づくると吸込み渦と噴流相互の干渉が生じて噴流の吹出し方向が攪乱されるために、この場合にも運動量の減衰が大きくなる。したがって、これらの減衰効果の影響が最も小さい位置で、最も強い吸込み渦が形成されることが考えられる。しかしながら、上に述べたような減衰効果の解析は今後の検討課題とする。

ここでは、中央鉛直断面の面積平均の循環の強さ Γ_{AVE} を比較した結果について述べる。図 2.19 にその結果を示す。図からわかるように、旋回速度と同様にケース 3 の場合が最も循環の強さは大きく、以下ケース 1, 2, 4 ~ 11 の順に値が小さい。ケース 1 ~ 5 とケース 9 ~ 11 では、循環の強さに 2 倍程度の差が生じている。さらに、ケース 5 ~ 11 に関して循環の強さの減衰関数を算出した (補注 2.1)。表 2.4 に示した壁面からの吹出し口中心位置を x (m) とすれば、循環の強さは $\Gamma_{AVE} = 4.423 \exp\{-0.297(x-1.75)\}$ の指数曲線で近似できる (相関係数: 0.999)。

本解析の設定条件では、壁際から吹出し口を 1.25 m 離れた場合が、最も省エネルギー的に吸込み渦を形成できることがわかる。ただし、アトリウムの水平方向の長さが変化した場合や噴流速度が変化した場合には異なる結果となることも予想される。

(3) ケース 3, 5, 11 の中央鉛直断面の流れ場の様相

循環の強さが異なるケース 3, 5, 11 に関して、中央鉛直断面の流れ場を比較する。ケース 3 は循環が最大のものであり、ケース 5 は循環の強さが急に減衰を始める直前のもの、

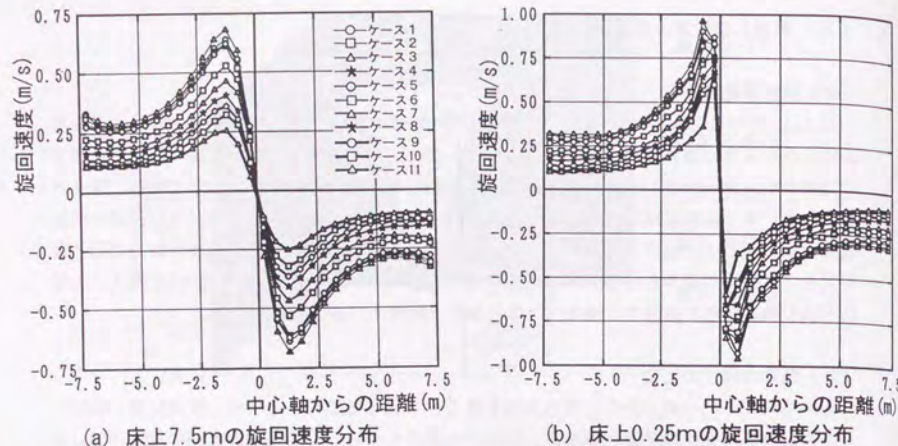


図 2.18 巡回方向の速度分布

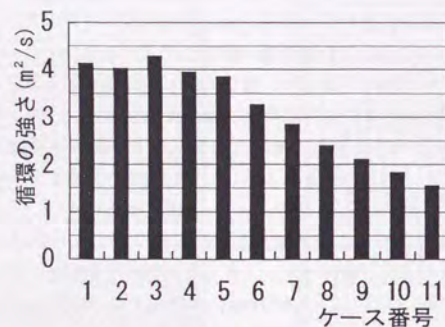


図 2.19 吹出し口位置の変化が
循環の強さ Γ_{AVE} に及ぼす影響

循環の強さは $\Gamma = 2\pi r_i U_i$ で定義。鉛直断面の面積平均値は次式で算出

$$\Gamma_{AVE} = \frac{\int_{A(x)} 2\pi r_x U_x dx}{\int_{A(x)} dx}$$

r_i : i 点の渦中心からの距離 U_i : i 点の巡回速度 x : 位置座標 (i, j)

ケース 11 は検討したケースの中で循環の強さが最小のものである。これらの時間平均値および瞬時値を図 2.20~2.22 に示す。ケース 3 およびケース 5 の場合 (図 2.20, 2.21) は先に述べたケース 1 の場合 (図 2.13) に比べて大きな差はみられないが、ケース 11 の場合 (図 2.22) は明らかに巡回速度分布が小さい。また、この断面での吹出し噴流速度は 0.25m/s に達しておらず減衰が大きいことがわかる。瞬時値の結果は、時間平均値の結果と比較してもその傾向はほぼ類似している。

(4) ケース 3, 5, 11 の床上 7.5 m の鉛直方向の流れ場の様相

ケース 3, 5, 11 の時間平均値と瞬時値を図 2.23~2.25 に示す。ケース 3, 5 の時間平均値の結果 (図 2.23(a), 2.24(a)) をケース 1 の結果 (図 2.14(a)) と比較すると、分布の傾向はほぼ同様であるが、壁際周辺の上昇速度が減少している。また、瞬時値の結果 (図 2.23(b), 2.24(b)) は時間平均値 (図 2.23(a), 2.24(a)) に比べて変動が大きくなる。ケース 5 の場合 (図 2.24(b)) では吸込み口に向かう下降流の大きさは周辺の下降流とそれほど差がなくなっている。この状況は、時間平均値 (図 2.24(a)) が示す構造的な流れ場の様相と異っており、瞬時値の流れ場では下降流の強さが時間的に周期的変動を示すことを示唆している。

ケース 11 の場合 (図 2.25) はケース 1, 3, 5 と異なり、壁際で上昇流、それ以外の領域では下降流となるように明確に流れ場が 2 分されている。さらに、瞬時値 (図 2.25(b)) の下降流領域は流速の変動が大きく、渦中心の吸込み口に向かう下降流の大きさと周囲の下降流が区別できない様相を示す。

2.2.4 考察

以上述べたように、吹出し口の位置が吸込み渦の流れ場の様相に及ぼす影響は極めて大きことが明らかになった。現実への適用を考えた場合には、吹出し方向はある程度変更できることが多いので、吹出し口位置と併せて渦に最も効率的に回転を与える噴流方向を探ることが望ましい。

本節で用いたメッシュ分割は 50cm 角のキューブであるために、実際に吸込み渦が持つ非常に大きな巡回速度を再現できていない可能性がある。吹出し口位置の変化の影響についても同様であり、定量的な比較についてはさらに細かいメッシュを用いて解析する必要がある。また噴流速度ばかりでなく吹出し噴流周囲の super layer から発生した乱れの強さが、吸込み渦の挙動に影響を及ぼしている可能性がある。ゆらぎをもたせた給気方法と吸込み渦形成の関係も興味深い問題である。またアトリウム天井が高くなると気積が増加するので、渦の巡回速度は減少するはずである。給気量と気積の関係についても検討する必要がある。

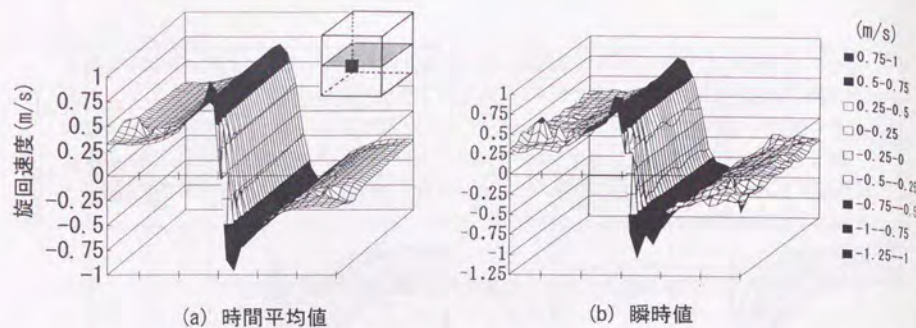


図 2.20 ケース 3 の中央鉛直断面の旋回速度分布

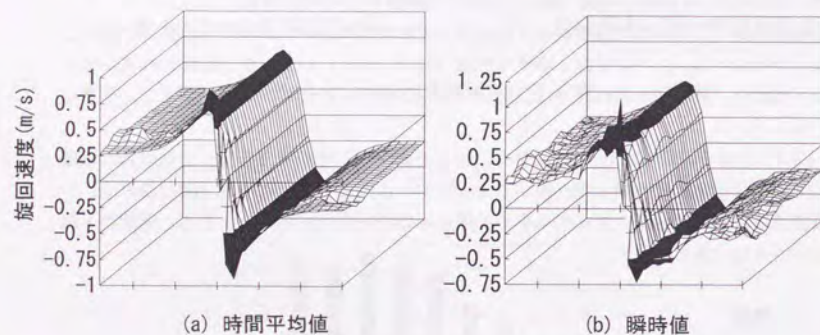


図 2.21 ケース 5 の中央鉛直断面の旋回速度分布

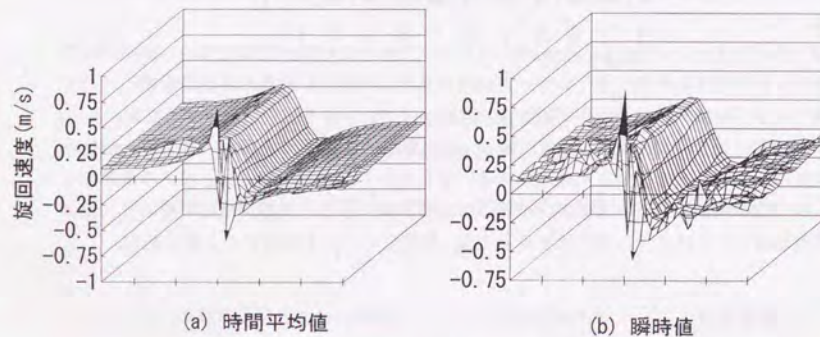


図 2.22 ケース 11 の中央鉛直断面の旋回速度分布

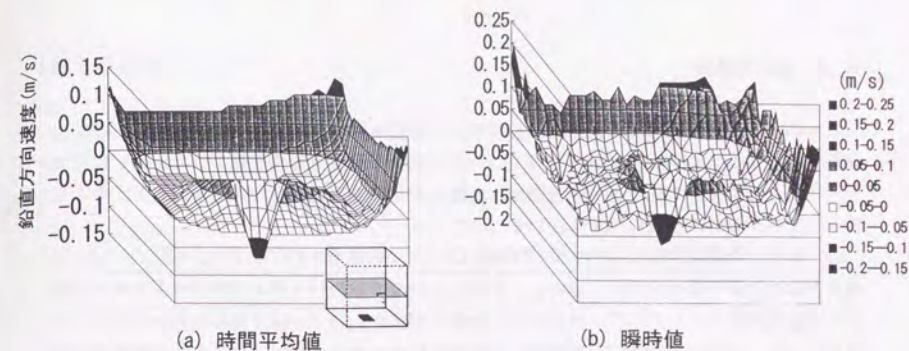


図 2.23 ケース 3 の床上 7.5m の水平断面の速度分布

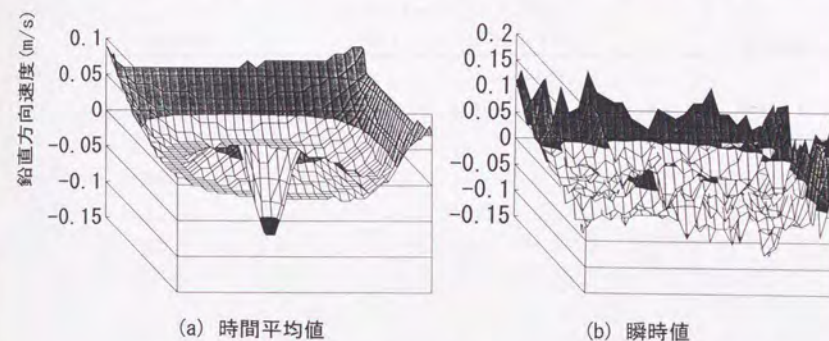


図 2.24 ケース 5 の床上 7.5m の水平断面の速度分布

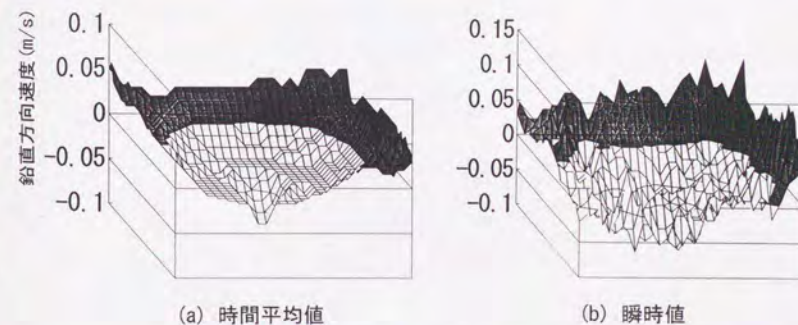


図 2.25 ケース 11 の床上 7.5m の水平断面の速度分布

2.3 第2章結論

2.1 節では、オフィスサイズの空間を対象にして吸込み渦の再現性の検討を行い、LES を適用する場合のメッシュ分割とスマゴリンスキー定数に関する知見を得た。2.2 節では空間サイズがさらに大きなアトリウムを対象にして、吸込み渦形成のための指針を得ることを目的として吹出し口の位置に関する検討を行った。

LESを用いた数値実験により、換気回数が5回/hの給気量でもアトリウム空間内に吸込み渦を形成できる可能性を得た。さらに、吹出し口位置の検討から最大の旋回速度を有する吸込み渦を形成させるためには、吹出し口の位置は壁際から約1mほど離れた場合が良いことがわかった。今回の解析では、等温場の送風換気状態を想定したが、実際には非等温場の空調状態における吸込み渦形成の問題が重要である。実際の空間への適用を目指してさらなる検討が必要とされる。

第2章補注

2.1 減衰の状況を見ると、他の近似式を導出することも可能である。例えば、以下の表2.5に示すような近似式も適用できる。しかしながら、導出した近似式には一般性が与えられていない。空間形状が変化した場合には当然変わることが予想される。

表2.5 ケース5～11の場合の減衰関数の近似式

	近似式 ($2.25 \leq x \leq 5.25$)	R^2
線形	$y = -0.7468(x - 1.75) + 4.0456$	0.9789
2次曲線	$y = 0.1232(x - 1.75)^2 - 1.2396(x - 1.75) + 4.4152$	0.9988
3次曲線	$y = 0.0256(x - 1.75)^3 + 0.278(x - 1.75)^2 - 0.7519(x - 1.75) + 4.5311$	0.9994
対数曲線	$y = -1.1796 \ln 2(x - 1.75) + 3.9885$	0.9815

第2章参考文献

- 1) 長澤佳明ほか：螺旋渦流を利用した建築換気法（その1～3），日本建築学会大会学術講演梗概集（環境工学），1987, 1989
- 2) Lugt H.J. 著，大橋秀雄 監訳，山口信行 訳：渦－自然の渦と工学における渦，朝倉書店，1988
- 3) 文字信貴：竜巻渦の実験的研究，一室内実験の展望一，日本風工学会誌，No. 12，pp. 3-18，1982
- 4) 永野紳一郎，美馬徹：吸込み渦を利用した室内換気システムに関する研究（その1）， $k-\varepsilon$ モデルと LES による吸込み渦の数値シミュレーション，日本建築学会大会学術講演梗概集（環境工学），pp. 487-488，1991
- 5) 水谷国男，村上周三，加藤信介，持田灯：LES による室内気流解析，一Smagorinsky 定数の最適化に関する検討一，空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集，pp. 901-904，1991
- 6) 永野紳一郎，美馬徹：吸込み渦を利用した室内換気システムに関する研究（その2），スマゴリンスキー定数を変数とする LES による解析，日本建築学会大会学術講演梗概集（環境工学），pp. 507-508，1992
- 7) 小林敏雄，森西洋平：LES による乱流の数値的研究，東京大学生産技術研究所報告，第38巻，第3号，pp. 1-41，1993
- 8) 永野紳一郎，美馬徹：吸込み渦を利用した室内換気システムに関する研究（その3），均等メッシュ分割を用いた LES による吸込み渦の再現，日本建築学会大会学術講演梗概集（環境工学），pp. 507-508，1993
- 9) 永野紳一郎：吸込み渦を利用した室内換気システムに関する研究（その4），3タイプの均等メッシュ分割を用いた LES による吸込み渦の再現，空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集II，pp. 93-96，1993
- 10) 高井啓明，高橋紀行，長澤佳明，樋口祥明，岩田英二：大規模ドームにおける循環流の効果，空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集III，pp. 89-92，1993

結論

本研究は、CFDを用いて建築空間における流れ場・拡散場を予測・制御することを目的として、以下の5つの点について検討した。

- ①標準 $k-\varepsilon$ モデルを用いた数値解析手法および解析結果の診断手法を提案すること。
- ②より高精度な非等温解析を目的として標準 $k-\varepsilon$ モデルに高精度なWETモデルを組み込むこと。
- ③クリーンルーム内で重力沈降の影響が問題となる浮遊微粒子の拡散場予測シミュレーション手法を検討し、実験結果からその精度を検証すること。
- ④乱流型クリーンルームにおいて天井面上で給排気風量をバランスさせて換気効率を向上させた流れ場の制御手法を検討すること。
- ⑤吸込み渦を利用した室内の流れ場の制御手法を検討すること。

結論の詳細は、各章に譲ることとしここでは主要な結論と今後の課題について述べる。

はじめに、本研究の結果、標準 $k-\varepsilon$ モデル解析に関して得られた知見についてまとめる。

(1) 計算グリッドと誤差評価

第一編第1章の誤差評価の結果から、 $k-\varepsilon$ モデルの解析では計算グリッドを細かくしても誤差が減少しない場合がある。これは検討に用いたグリッド分割が不十分であり、グリッドを細かくするとさらに解全体が変化することを示している。特に吹出し口周辺および噴流の衝突する領域ではこのことが指摘できる。そのため、この領域のグリッド分割は出来る限り細かくする必要がある。

(2) 各種移流項差分スキームによる圧力損失の評価

第一編第2章の結果から、 k および ε の輸送方程式よりも運動方程式の移流項差分スキームによる影響が特に大きい。圧力損失項の評価値は、吸込み口部分に一次精度の風上差分スキームを適用した場合に比べて二次精度の中心差分やQuickスキームを適用した場合の方が約2倍程度大きくなる。

(3) 速度の壁面境界条件による差異

第一編第3章の速度、 k 、 ε の壁面境界条件の検討から、壁面第一グリッドにおける y^+ が150程度の場合では、速度の壁面境界条件に1/7乗則または一般化対数則のどちらを用いても解析結果はほとんど変わらない。しかしながら、粘性底層を考慮した対数則を用いるとシアーの大きな吹出し口周辺の領域において k と ε の分布は大きな値を示す。

つぎに、本論のまとめを行う。

第一編 CFDの解析手法並びに解析結果の診断：

第1章では、空間の差分化に伴う数値誤差を定量的に把握するために、Solution ErrorおよびTruncation Errorの誤差評価方法を提案した。さらに、4.8m×4.8m×2.7mの室内空間を対象にして、この手法を0方程式モデルおよび標準 $k-\varepsilon$ モデルに適用し、メッシュ分割の粗密

に伴う誤差の定量的把握を行った。

第2章では、運動方程式を差分近似した場合の移流項等における輸送項の運動エネルギーの保存性に関して検討した。標準 $k-\varepsilon$ モデルにおいて中心差分、一次精度風上差分、Quickの各スキームを対象として運動エネルギーの収支を評価する方法を示し、実際に評価した結果について述べた。

第3章では、標準 $k-\varepsilon$ モデルを室内気流解析に適用する際に問題となる固体壁面の境界条件について、壁関数を用いた場合の取り扱いを検討した。まず、速度、乱流エネルギー k および散逸率 ε の各種壁面境界条件について、過去に提案された境界条件モデルおよびLaunder & Spalding, Chiang & LaunderおよびLeschzinerにより提案された境界条件モデルを整理した。その上で、妥当とみなされる境界条件モデルの組み合わせを用いて解析を行い、流れ場および k と ε の乱流量の挙動について検討した。

第4章では、非等温乱流のシミュレーションにおいて重要な乱れによる熱フラックス $\overline{u_i\theta}$ に対して勾配輸送モデルに代わるLaunderの提案するWETモデルを組み込み、これを2次元および3次元の流れ場に適用するための検討を行った。2次元流れ場では、壁面の熱的な境界条件として熱フラックス一定の場合と温度一定の場合を検討した。3次元流れ場では、噴流のある居室モデルについて実験およびASM（代数応力方程式モデル）の結果とも比較し、その有効性を示した。

第二編 CFDによる室内拡散場の制御：

CFDをクリーンルームの拡散場解析に適用する場合に問題となる、重力沈降を伴う浮遊微粒子の拡散現象に関して、実測、模型実験および数値シミュレーションを行い、予測手法の確立を目的とする検討を行った。まず、室内における浮遊微粒子の拡散性について実験的検討を行い、対象浮遊微粒子の粒径・初期濃度によっては、重力沈降や凝集などの浮遊微粒子固有の特性を無視できることを確認した。つぎに、粒径 $0.31\mu\text{m}$ の微粒子に関して数値シミュレーション結果と実験結果との照合を行った。最後に、実験技術上の問題により、模型実験で確認が困難な粒径 $5.0\mu\text{m}$ 以上の浮遊微粒子の室内全体の拡散状況をCFDを適用して検討した。その上で、浮遊微粒子濃度の計測法の改善に関して新たな提案を行うとともに、クリーンルーム室内全体における重力沈降を考慮した浮遊微粒子拡散場の数値シミュレーション手法の有効性を示した。

第三編 CFDによる室内流れ場の制御：

第1章では、“一つの給気口を単位とした吹出し気流とその周囲の上昇流、およびその天井面にある給気口への収束流により形成される気流単位”の概念を乱流型クリーンルームに適用し、この気流単位の形成が容易である天井面での局所給排気方式のクリーンルームについて流れ場・拡散場を検討した。まず乱流型クリーンルーム内の流れ場の形成状態に関してLLS（Laser Light Sheets）による可視化手法を用いて定性的な比較を行い、汚染質排出性能の点で天井面給排気方式が従来型の天井吹出し・壁面吸込み方式に劣らないことを確認した。次に、模型実験により吹出し口の位置と個数を固定し、吸込み口の位置と個数を変化させた

場合について、気流障害物の影響と給排気風量のアンバランスの影響を検討した。さらに、模型実験との対応を確認した上で、数値シミュレーションにより給排気のアンバランスや気流障害物設置の影響を詳細に検討した。以上の検討から、気流単位を形成させた天井給排気方式のクリーンルームが汚染質拡散を局所的に限定させ、換気効率の極めて高いシステムであることを示した。

第2章では、吸込み渦の持つ吸引力を利用した室内換気システムの数値シミュレーション手法に関して検討を行った。まず、CFDによる吸込み渦の特徴の再現のためには、乱流モデルとして標準 $k-\varepsilon$ モデルが不適であることを確認するとともに、LES（Large Eddy Simulation）により解析を行う際に問題となるメッシュサイズおよびスマゴリンスキー定数に関して検討を行った。さらに、アトリウムのように空間容積が大きい建築空間内で吸込み渦を効率良く発生させるために、吹出し口位置に関する検討を行い、吸込み渦を利用した換気システムの可能性について述べた。

以上により、CFDを用いて建築空間内の流れ場・拡散場制御のための手法を開発し、その有効性を確認した。

しかしながら、NS（Navier-Stokes）方程式を基礎とする乱流数値シミュレーションの精度保証の問題は、多くの研究者の努力にもかかわらず未だ解決が困難な状況にある。その原因のひとつにはNS方程式が非線形であることが挙げられる。たとえば、設定した境界条件がわずかでも変化すると解析対象とした空間全体にその影響が敏感に反映され、解析結果の流れ場がまったく異なる様相を示す場合がある。 $k-\varepsilon$ モデルに代表される時間平均化乱流モデルを用いて建築空間を解析する場合でさえも、ある条件下で別解が存在することが示されている。また、対称的な形状の空間を解析する場合に、流れ場が非対称的な様相になることはしばしば経験する。これらのことが、CFDによる解析結果を全面的に信頼して工学的な判断を下すということを気流設計者に躊躇させている。

このようなことから、CFDの結果を基に工学的な判断を得ようとする際、特に実験・実測が容易でない空間内の環境予測を行う場合には、CFD手法および得られた結果に付随する誤差の要因を定量的に示す手法の開発が、今後ますます必要になるものと考えられる。

上記の点を考慮して、今後さらに建築分野への新たな乱流モデルの適用、CFDの結果の評価手法の開発を行い、現実の設計の場にCFDから得られた知見を反映させる所存である。

謝 立

謝 辭

謝 訢

謝 辞

本論文は、筆者が㈱フジタから東京大学生産技術研究所に受託研究員および民間等共同研究員として派遣され、主としてその在籍期間中に行った研究を取りまとめたものである。

東京大学生産技術研究所・教授・村上周三先生からは、研究テーマの設定および研究推進の諸段階における的確な判断を含め、研究のあらゆる面での要諦に関しまして、終始懇切丁寧なご指導を賜りました。

東京大学生産技術研究所・助教授・加藤信介先生からは、数値解析の手ほどきとその面白さをお教え頂くとともに、終始ひとかたならぬ懇切丁寧なご指導を賜りました。

東京大学生産技術研究所・教授・吉澤 徹先生、教授・小林敏雄先生を始めとするNST研究グループのメンバーの方々からも貴重な意見を戴きました。

九州大学大学院時代の恩師、九州大学大学院総合理工学研究科熱エネルギーシステム工学専攻・教授・片山忠久先生からは、大学院時代に建築環境工学、特に風に関する知識、研究者としてのあるべき姿、研究の面白さをご教示戴きました。また、本研究を進めるに当たって励ましの言葉を戴きました。

研究全般を通じて、東京大学生産技術研究所・講師・持田灯先生、同・技官・高橋岳夫先生、武蔵工業大学工学部建築学科・助教授・近藤靖史先生（当時東京大学生産技術研究所・民間等共同研究員）を始め、東京大学生産技術研究所・村上研究室、加藤研究室の皆様から種々のご協力・ご助力を戴きました。

本研究におけるコンピュータの使用に当り、㈱間組・須山喜美博士に多大なるご協力を戴くとともに、研究の諸段階において有益なご意見を賜りました。

第三編第1章のLLSを用いた気流の可視化に関しては、高砂熱学工業㈱・池鯉鮒悟氏にご協力戴きました。

第二編および第三編の浮遊微粒子の拡散実験および気流実験に関しては、㈱フジタ・田中幸彦氏の多大なるご協力・ご助力を戴きました。

本研究の機会は、㈱フジタ・故 上田寛 技術研究所長、同社・宇井幸作 部長、同社・美馬徹 部長から与えて頂くとともに、同社・技術研究所・設備研究部の皆様から多大なるご援助を戴きました。また、コンピュータの使用に際しては、同社・片山和行 室長を始めとする数値解析室の皆様にご協力戴きました。

ここに記して、お世話になった方々に深く感謝の意を表します。

英語要約・ドイツ語要約

英語要約・ドイツ語要約

Summary

Study on Indoor Airflow and Diffusion Field Control by Means of CFD

by Shinichiro NAGANO

If it is possible to achieve the "required level of accuracy" in model analysis of architectural spaces with their complex shapes and patterns utilizing the limited computer resources available, this will lead to a major enhancement of the utility of techniques for air current control by means of computational fluid dynamics (CFD) as a suggestive and strategic tool in architectural design. For this purpose, one has first to establish the criteria to be used when judging whether the analysis results satisfy the "required accuracy level".

In the present study, investigations are conducted on the analysis procedures adopted when applying the standard $k-\varepsilon$ model to indoor air current analysis, and the analysis results are examined, with the aim of assessing the level of accuracy achieved when utilizing CFD as a tool. This is followed by comparisons of numerical simulation and test results with a view to proposing new methods for application of CFD to diffusion field and airflow field control on the basis of the observations made.

The main portion of the paper, between the introductory and concluding sections, has a tripartite composition.

Introduction : In the introductory section of the paper, discussions on the aim of the study are followed by a brief outline of the study.

Part 1 : Examination of CFD Analysis Methods and Results

In Chapter 1, methods are proposed for the evaluation of solution errors and truncation errors, as a means of quantifying numerical errors arising from spatial differentiation. These evaluation methods are applied to the zero-equation model and standard $k-\varepsilon$ model for quantitative assessment of the errors dependent on the size of mesh divisions.

In Chapter 2, investigations are conducted on how the kinetic energy of transportation terms in convection terms etc. is conserved when equations of motion are subjected to difference approximation. A presentation of the evaluation methods for the balance of kinetic energy for the first order upwind differential, central differential and Quick schemes in the standard $k-\varepsilon$ model is followed by an account of the actual evaluation results.

Chapter 3 is concerned with the treatment of the boundary conditions for solid walls in the standard $k-\varepsilon$ model when employing wall functions. Here, an account of the boundary condition models proposed in the past is followed by an account of the analyses conducted using combinations of boundary condition models that are deemed appropriate, and investigations on the behaviour of the statistical quantities for airflow fields and turbulent flows.

In Chapter 4, investigations are conducted on the use of the WET model, proposed by Launder as a model for gradient transportation of the thermal flux $\overline{u_i\theta}$ due to turbulence, in the standard $k-\varepsilon$ model with a view to its application to two-dimensional and three-dimensional airflow fields. The validity of the modified model for analysis of three-dimensional airflow fields is demonstrated through comparison of the analysis results for a living room with jet flow with test and algebraic stress model (ASM) values.

Part 2: Control of Indoor Diffusion Fields by Means of CFD

A problem encountered in the application of CFD to clean rooms is the diffusion of minute airborne particles subject to gravitational settlement. Investigations are conducted on their diffusion through actual measurement, model tests and numerical simulation with a view to the establishment of a prediction method. Experimental investigations are conducted on the indoor diffusion characteristics of minute airborne particles, the results of which confirm that it is possible, given certain particle size and initial concentration conditions, to ignore behaviour patterns characteristic of minute airborne particles such as gravitational settlement and concentration. This is followed by a comparison of the numerical simulation and test results on the behaviour of $0.32\mu m$ particles. In the final part of the chapter, CFD is applied to investigations on the diffusion conditions in the room as a whole of airborne particles exceeding $5.0\mu m$ in size, a case where technical problems hinder the confirmation of behaviour through model tests.

Part 3: Control of Indoor Airflow Fields by Means of CFD

In Chapter 1, the concept whereby "the current supplied from a single outlet, the surrounding upward current and the current entrained into the same outlet on the ceiling are made to form an airflow unit" is applied to clean rooms subject to turbulence, and investigations are conducted on the flow and diffusion fields in a clean room with local inlets and outlets on the ceiling, a setup facilitating the formation of such airflow units. Through a qualitative comparison of the conditions relating to the formation of airflow fields in a turbulence-type clean room, where the currents were visualized by means of laser light sheets

(LLS), it is confirmed that the system in which both the inlets and outlets are installed on the ceiling is not in any way inferior to the conventional ceiling outlet/wall face inlet type system in terms of its capacity for removal of contaminants. This is followed by the account of a model test in which the positions and numbers of the inlets were varied while maintaining the same number of outlets in the same positions. The aim of this test was to study the effects of objects obstructing the currents and the effects of the imbalance between the air supply and exhaust volumes. The effects of the supply-exhaust imbalance and obstructions were then investigated in greater detail by numerical simulation after a confirmation of the equivalence of the simulation to the model test. On the basis of these investigations, it is demonstrated that this system of ceiling inlets/outlets forming airflow units is a most effective means of limiting the diffusion of contaminant in a clean room.

Chapter 2 is concerned with investigations on numerical simulation methods for indoor ventilation systems utilizing the suction force of suction vortices. Firstly, it is shown that the standard $k-\varepsilon$ model is unsuitable as a turbulence model for the purpose of representing the characteristics of suction vortices by means of CFD, and investigations are conducted on the mesh size and the Smagorinsky constant which are the items of concern in analysis by means of large eddy simulation (LES). Investigations are also conducted on the desirable positions of outlets for efficiently generating suction vortices in architectural spaces with large air volumes such as atria.

Conclusion : The overall results of the study and future tasks are summarized in the concluding section.

Zusammenfassung

Studie über die Luftströmungs- und Diffusionsfeldregelung in Innenräumen mittels CFD

von Shinichiro NAGANO

Wenn es bei der Modellanalyse architektonischer Räume mit all ihren komplexen Umrissen und Formen möglich ist, mit den gegenwärtig zur Verfügung stehenden und noch beschränkten EDV-Mitteln den "erforderlichen Genauigkeitsgrad" zu erreichen, so wird dies zu einer ausschlaggebenden Erweiterung der Anwendbarkeit der Verfahren zur Luftströmungsregelung mittels rechnergestützter Strömungslehre (computational fluid dynamics - CFD) als hinweisendes und strategisches Entwurfswerkzeug der Architektur führen. Hierzu müssen allerdings erst die Kriterien festgelegt werden, nach denen Ergebnisse als dem "erforderlichen Genauigkeitsgrad" genügend betrachtet werden können.

In der vorliegenden Studie werden Analyseprozeduren untersucht, die bei der Anwendung des Standard $k-\varepsilon$ Modells für die Innenraum-Luftströmungs-Analyse benutzt werden, wie auch die entsprechenden Analyseergebnisse. Ziel hierbei ist, den bei der Anwendung von CFD erreichten Genauigkeitsgrad zu bestimmen. Die hierauf folgenden Vergleiche zwischen rechnerischen Simulationen und Testergebnissen haben zum Ziel, anhand der Beobachtungsergebnisse neue CFD-Anwendungsverfahren für die Diffusionsfeld- und Luftströmungsregelung vorzuschlagen.

Der zwischen der Einführung und des abschließenden Teiles der Studie befindliche Hauptteil ist in drei Teile gegliedert.

Einführung : Im einführenden Teil wird das Ziel der Studie erwägt und ein kurzer Überblick über die Studie gegeben.

1. Teil : Betrachtung der CFD-Analyseverfahren und -ergebnisse

In Kapitel 1 werden Verfahren für die Auswertung von Lösungs- und Rundungsfehlern vorgeschlagen. Anhand dieser Verfahren können durch räumliche Differenzierung bedingte rechnerische Fehler quantitativ ausgedrückt werden. Die Auswertungsverfahren werden auf das Null-Gleichungs-Modell und das Standard $k-\varepsilon$ Modell für die quantitative Auswertung von Fehlern, die von der Rasterunterteilung abhängig sind, angewandt.

In Kapitel 2 wird untersucht, wie die kinetische Transportenergie in Bezug auf Advektion usw. erhalten wird, wenn die Differenzannäherung sich auf Bewegungsgleichungen auswirkt. Auf die Darstellung der Auswertungsverfahren für das Gleichgewicht der kinetischen Energie des übergeordneten Aufwinddifferentials, Mitteldifferentials und den Quick-Schemata für das Standard $k-\varepsilon$ Modell folgt eine Aufstellung der eigentlichen Auswertungsergebnisse.

Kapitel 3 behandelt die Randbedingungen für feste Wände im Standard $k-\varepsilon$ Modell bei Anwendung von Wandfunktionen. Nach einer Schilderung der zuvor vorgeschlagenen Randbedingungsmodelle werden einerseits die mittels für angemessen befundenen Kombinationen von Randbedingungsmodellen durchgeführten Analysen und andererseits Untersuchungen über das Verhalten statistischer Quantitäten bei Luftströmungsfeldern und turbulenten Strömungen dargestellt.

Kapitel 4 untersucht die Anwendung des WET-Modells, von Launder als Modell für den Gefälletransport des Wärmeffluxes $\overline{u_i \theta}$ aufgrund von Turbulenzen beim Standard $k-\varepsilon$ Modell hinsichtlich seiner Anwendung auf zweidimensionale und dreidimensionale Luftströmungsfelder. Die Allgemeingültigkeit des modifizierten Modells für die Analyse dreidimensionaler Luftströmungsfelder wird durch den Vergleich der Untersuchungsergebnisse für ein Wohnzimmer mit Strahlströmung unter Angabe von Test- und (Algebraisches Spannungs Modell) ASM-Werten dargelegt.

2. Teil : Regelung von Innenraum-Diffusionsfeldern durch CFD

Ein Problem, das sich bei der Anwendung von CFD auf staubfreie Räume ergab, war die Diffusion kleinster Schwebepartikel, die der gravitationsbedingten Absetzung unterliegen. Die Diffusion dieser Partikel wird untersucht durch direkte Messungen, Modelltests und rechnerischen Simulationen, um somit ein Voraussageverfahren bestimmen zu können. Aufgrund der Ergebnisse experimenteller Untersuchungen der Innenraum-Diffusionseigenschaften dieser Schwebepartikel kann bewiesen werden, daß es bei einer bestimmten Partikelgröße und einer bestimmten Anfangsdichte dieser Partikel möglich ist, die für kleinster Schwebepartikel typischen Verhaltensmuster, wie z.B. die gravitationsbedingte Absetzung und Dichte, zu ignorieren. Hierauf folgt ein Vergleich der rechnerischen Simulation und den Testergebnissen bezüglich des Verhaltens von Partikeln mit einer Größe von $0.32 \mu m$. Am Ende des Kapitels wird CFD auf die Diffusionsbedingungen im Raum als Ganzem von Schwebepartikeln über $5.0 \mu m$ angewandt. In diesem Falle wird die Bestätigung des Verhaltens durch Modelluntersuchungen verhindert.

3. Teil : Regelung von Innenraum- Luftströmungsfeldern durch CFD

In Kapitel 1 wird das Konzept, demzufolge "die von einem einzigen Abzug erzeugte Strömung, die diese umgebende Aufwärtsströmung und die sich in diesen in der Decke angebrachten Abzug begebende Strömung zur Bildung einer Luftströmungs-Einheit gebracht werden", auf staubfreie Räume angewandt, die Turbulenzen ausgesetzt sind; weiterhin werden Strömungs- und Diffusionsfelder in einem staubfreien Raum mit örtlichen, in der Decke angebrachten Einlässen und Abzügen untersucht. Diese Anordnung unterstützt die Bildung solcher Luftströmungs-Einheiten. Durch einen quantitativen Vergleich der mit der Bildung von Luftströmungsfeldern in einem staubfreien Raum vom Turbulenztyp, in dem Strömungen durch die Anwendung von Laserlichtvorhängen sichtbar gemacht wurden, zusammenhängenden Bedingungen wird bewiesen, daß in Hinsicht auf die Fähigkeit, Luftverunreinigungen abzuführen, das System, in dem sowohl Einlässe als auch Abzüge in der Decke montiert sind, keineswegs dem herkömmlichen Deckenabzug-/Wandeinlaßsystem unterlegen ist. Hieran anschließend findet sich eine Darstellung eines Modelltests, bei dem eine wechselnde Anzahl und veränderliche Positionierung der Einlässe benutzt wurde, während die Anzahl und Positionen der Abzüge gleichgehalten wurde. Ziel dieses Tests war es, einerseits die Wirkung von Hindernissen in den Strömungen und andererseits die Auswirkung einer Ungleichheit zwischen dem Luftzufuhr- und dem Abluftvolumen zu untersuchen. Die Auswirkungen der Hindernisse und der Ungleichheit zwischen Luftzufuhr- und dem Abluftvolumen wurden dann mittels rechnerischer Simulation nach Bestätigung der Äquivalenz der Simulation gegenüber dem Modelltest näher untersucht. Aufgrund der Untersuchungen wird in der Folge dargestellt, daß dieses System von in der Decke angebrachten Einlässen/Abzügen, bei dem sich Luftströmungseinheiten bilden, ein äußerst wirksames Mittel zur Eingrenzung der Diffusion von Luftverunreinigungen in staubfreien Räumen ist.

Kapitel 2 befaßt sich mit Untersuchungen von rechnerischen Simulationsverfahren für Innenraumventilationssysteme, die die Saugkraft von Saugwirbeln benutzen. Hier wird zuerst dargelegt, daß das Standard $k-\varepsilon$ Modell sich nicht als Turbulenzmodell für die Darstellung der Eigenschaften von Saugwirbeln mittels CFD geeignet ist. Weiterhin werden die Rastergröße und die Smagorinsky-Konstante, also die ausschlaggebenden Elemente der Analyse, mittels großer-Wirbel-Simulation (large eddy simulation - LES) untersucht, wie auch die angemessensten Positionierungen für Abzüge, um in architektonischen Räumen mit großen Luftvolumen wie Vorhallen wirksame Saugwirbel zu erzeugen.

Zusammenfassung : Die Gesamtergebnisse der Studie und Aufgaben für die Zukunft werden im abschließenden Teil zusammengefaßt.

発表論文・連名論文リスト

1. 本論文に関係する審査を受けた論文

- (1) 1988. 03 村上・加藤・永野：室内気流数値解析の診断システムに関する研究（第1報）差分間隔に伴う数値誤差の推定・評価方法、日本建築学会計画系論文報告集、第385号、pp. 9-17
- (2) 1989. 02 村上・加藤・田中・永野：移流の卓越する室内気流における沈降を伴う浮遊微粒子の拡散（第1報）実大クリーンルームにおける実測と模型実験、空気調和・衛生工学会論文集、No. 39、pp. 35-45
- (3) 1989. 06 村上・加藤・永野・田中：移流の卓越する室内気流における沈降を伴う浮遊微粒子の拡散（第2報）数値シミュレーションと実大実験の比較、空気調和・衛生工学会論文集、No. 40、pp. 37-45
- (4) 1990. 02 村上・加藤・田中・永野・池鯉鮒：天井面給排気による局所流量バランス方式クリーンルームに関する研究（第1報）模型実験による流れ場・拡散場の検討、空気調和・衛生工学会論文集、No. 42、pp. 1-8
- (5) 1990. 06 村上・加藤・永野・田中：天井面給排気による局所流量バランス方式クリーンルームに関する研究（第2報）数値シミュレーションによる流れ場・拡散場の検討、空気調和・衛生工学会論文集、No. 43、pp. 27-38
- (6) 1992 MURAKAMI S., S. KATO, S. NAGANO, Y. TANAKA : DIFFUSION CHARACTERISTICS OF AIRBORNE PARTICLES WITH GRAVITATIONAL SETTLING IN A CONVECTION -DOMINANT INDOOR FLOW FIELD, ASHRAE TRANSACTIONS, V.98, Part.1
- (7) 1992 KATO S., S. MURAKAMI, S. NAGANO : NUMERICAL STUDY ON DIFFUSION IN A ROOM WITH A LOCALLY BALANCED SUPPLY-EXHAUST AIRFLOW RATE SYSTEM, ASHRAE TRANSACTIONS, V.98, Part.1

2. 上記以外の審査を受けた論文

- (1) 1993. 06 NAGANO S., T. MIMA : Ventilation Efficiency in a Two-Dimensional Enclosure with a Supply Output in the Ceiling or in the Floor, Room Air Convection and Ventilation Effectiveness, ASHRAE, Inc.

3. 上記以外の論文

- (1) 1983. 09 永野・片山・石井・堤・大町・福田：建物近傍における風の特性と住宅の通風に関する調査研究（その3）開口面流速と通風量、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp. 473-474
- (2) 1984. 10 永野・片山・梅干野・塩月・森川：風および日射の複合利用と住棟配置に関する研究（その1）風洞模型実験、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp. 747-748
- (3) 1985 村上・加藤・永野：クリーンルーム内の浮遊微粒子拡散性状に関する研究（その3）実大実験と数値シミュレーションの比較、日本建築学会関東支部研究報告集、pp. 121-124
- (4) 1985. 10 村上・加藤・永野：クリーンルーム内の浮遊微粒子拡散性状に関する研究（その6）実大実験と数値シミュレーションの比較、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp. 269-270
- (5) 1985. 09 村上・加藤・永野：クリーンルーム内の浮遊微粒子拡散性状に関する研究（その8）実大実験と数値シミュレーションの比較、空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集、pp. 713-716
- (6) 1986. 01 村上・加藤・永野：クリーンルーム内の浮遊微粒子拡散性状に関する研究（その9）沈降速度を考慮した浮遊微粒子濃度分布の数値シミュレーション、生産研究、38-1、pp. 58-61
- (7) 1986. 07 村上・加藤・永野：乱流数値シミュレーションの診断システムに関する研究（第7報）吹出・吸込のある室内気流の診断（その6）メッシュ分割の粗密に関する検討、日本建築学会関東支部研究報告集
- (8) 1986. 08 村上・加藤・永野：乱流数値シミュレーションの診断システムに関する研究（第8報）吹出・吸込のある室内気流の診断（その7） $k-\varepsilon$ 型2方程式モデルの数値定数に関する検討、日本建築学会大会学術講演梗概集（環境工学）
- (9) 1986. 08 永野・村上・加藤：クリーンルーム内の浮遊微粒子拡散性状に関する研究（その11）沈降速度を考慮した浮遊微粒子拡散性状の数値シミュレーション、日本建築学会大会学術講演梗概集（環境工学）、pp. 395-396
- (10) 1986. 10 永野・村上・加藤：クリーンルーム内の浮遊微粒子拡散性状に関する研究（その13）沈降速度を考慮した浮遊微粒子拡散性状の数値シミュレーション、空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集、pp. 637-640
- (11) 1986. 10 加藤・村上・永野：天井給排気型クリーンルーム内の気流性状に関する研究（その3）、空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集、pp. 629-632
- (12) 1986. 12 村上・加藤・永野：室内気流の乱流の数値シミュレーションの診断システムに関する研究（第11報） $k-\varepsilon$ 型2方程式乱流モデルの数値定数に関する検討、生産研究、38-12、pp. 90-93

- (13) 1986. 12 村上・加藤・大和田・永野：大架構建築内の風力換気性状に関する研究、風洞模型実験と圧力境界型屋内気流数値解析の組み合わせによる検討、日本気象学会、風工学シンポジウム
- (14) 1987. 04 村上・加藤・永野・Ferziger：室内気流数値解析の診断システムに関する研究（第12報）差分分割に伴う数値誤差の推定、評価方法について、生産研究、39-4、pp. 35-38
- (15) 1987 永野・村上・加藤：室内気流数値解析の診断システムに関する研究（第13報）差分分割に伴う数値誤差の推定、評価方法について、日本建築学会関東支部研究報告集、pp. 61-64
- (16) 1987. 05 永野・村上・加藤：クリーンルーム内の浮遊微粒子拡散性状に関する研究（その2）数値シミュレーションによる検討、第6回空気清浄とコンタミネーションコントロールに関する技術研究大会予稿集、pp. 151-156
- (17) 1987. 06 加藤・村上・永野：大空間の換気、拡散の数値シミュレーション、日本シミュレーション学会、第6回シミュレーション・テクノロジー・コンファレンス
- (18) 1987. 10 永野・村上・加藤：室内気流数値解析の診断システムに関する研究（第14報）差分分割に伴う数値誤差の推定、評価方法について、日本建築学会大会学術講演梗概集（環境工学）、pp. 1033-1037
- (19) 1987. 10 村上・加藤・永野：室内気流数値解析の診断システムに関する研究（第15報）差分分割に伴う数値誤差の推定、評価方法について、空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集、pp. 253-256
- (20) 1987. 10 永野・村上・加藤：天井給排気型クリーンルーム内の気流性状に関する研究（その5）、空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集、pp. 385-388
- (21) 1987. 12 村上・加藤・永野：室内気流数値解析の診断システムに関する研究、運動エネルギー保存に関する各種差分スキームの検討、第1回数値流体力学シンポジウム講演論文集、pp. 179-182
- (22) 1988. 09 加藤・村上・永野：室内気流数値シミュレーションの診断システムに関する研究（第17報） $k-\varepsilon$ モデルの壁面境界条件も各種タイプの検討—その1、空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集、pp. 573-576
- (23) 1988. 09 永野・村上・加藤：室内気流数値シミュレーションの診断システムに関する研究（第18報） $k-\varepsilon$ モデルの壁面境界条件も各種タイプの検討—その2、空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集、pp. 577-580
- (24) 1988. 10 永野・村上・加藤：室内気流数値解析の診断システムに関する研究（第16報）運動エネルギー保存に関する各種差分スキームの検討、日本建築学会大会学術講演梗概集（環境工学）、pp. 753-754
- (25) 1988. 12 村上・加藤・永野：コンベンショナルフロー型クリーンルーム内の気流性状に関する研究（その21）室内に局所的に大きな発熱源がある場合の流れ場・温度場の数値解析、生産研究、40-12、pp. 28-31

- (26) 1989. 01 村上・加藤・永野： $k-\varepsilon$ モデルに基づく室内気流数値解析における壁面境界条件、生産研究、41-1、pp. 3-10
- (27) 1989. 10 永野・村上・加藤：温度フラックス高精度近似 $k-\varepsilon$ モデルによる非等温室内気流の数値解析（その1）、日本建築学会大会学術講演梗概集（環境工学）、pp. 475-476
- (28) 1989. 12 加藤・村上・永野・近藤：熱フラックスに局所平衡型のWETモデルを用いた $k-\varepsilon$ モデルによる非等温室内気流の数値解析、第3回数値流体力学シンポジウム
- (29) 1990. 01 村上・加藤・永野：温度フラックスの局所平衡型のWETモデルを用いた $k-\varepsilon$ モデルによる非等温室内気流の数値解析、生産研究、42-1、pp. 75-78
- (30) 1990. 10 永野・美馬・伊藤：室内における非定常拡散場の予測手法に関する研究（その1）層流定常拡散場における拡散方程式の各種移流項差分スキームの検討、空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集、pp. 1129-1132
- (31) 1990. 10 永野・村上・加藤： $k-\varepsilon$ WETモデルによる非等温室内気流の数値解析（その2）室内3次元非等温水平噴流に関する実験との比較、日本建築学会大会学術講演梗概集（環境工学）、pp. 487-488
- (32) 1990. 10 永野・伊藤・美馬：室内における非定常拡散場の予測手法に関する研究（その2）乱流非定常拡散場における拡散方程式の各種移流項差分スキームの検討、空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集、pp. 1133-1136
- (33) 1991. 09 永野・美馬：吸込み渦を利用した室内換気システムに関する研究（その1） $k-\varepsilon$ モデルとLESによる吸込み渦の数値シミュレーション、日本建築学会大会学術講演梗概集（環境工学）、pp. 487-488
- (34) 1991. 10 永野・美馬・伊藤：室内における非定常拡散場の予測手法に関する研究（その3） $k-\varepsilon$ モデルとLESによるステップアップ時の濃度経時変化解析、空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集、pp. 889-892
- (35) 1991. 10 伊藤・美馬・永野：室内における非定常拡散場の予測手法に関する研究（その4）数値シミュレーションと模型実験の比較、空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集、pp. 893-896
- (36) 1992. 07 NAGANO S., T. MIMA: Ventilation Efficiency in a Two-Dimensional Enclosure with a Supply Output in the Ceiling or in the Floor, International Symposium on Room Air Convection and Ventilation Effectiveness (ISRACVE), pp. 189-194
- (37) 1992. 08 永野・美馬：吸込み渦を利用した室内換気システムに関する研究（その2）スマゴリンスキー係数を変数とするLESによる解析、日本建築学会大会学術講演梗概集（環境工学）、pp. 507-508

- (38) 1992. 08 伊藤・永野：香り空調における濃度分布性状の数値解析による検討、吹出し、吸込み口のレイアウトの影響、日本建築学会大会学術講演梗概集（環境工学）、pp. 1579-1580
- (39) 1992. 10 永野：天井面多数配列スロット吹出し口・吸込み口のショートサーキット形成に関する研究（その1）二次元等温場における天井高さおよびユニット個数の変化による影響、空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集、pp. 321-324
- (40) 1992. 10 伊藤・美馬・永野：室内における非定常拡散場の予測手法に関する研究（その5）模型実験におけるRe数、障害物の拡散性状への影響、空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集、pp. 713-716
- (41) 1993. 02 永野：シンポジウム“換気効率の評価手法について”報告—モデリング手法の動向と適用例、空気調和・衛生工学会誌、第67巻、第2号、pp. 13-17
- (42) 1993. 04 永野：Large Eddy Simulation による室内における吸込み渦再現のための検討、吸込み口流出条件とスマゴリンスキー定数の検討、第27回空気調和・冷凍連合講演会講演論文集、pp. 73-76
- (43) 1993. 09 永野・美馬：吸込み渦を利用した室内換気システムに関する研究（その3）均等メッシュ分割を用いたLESによる吸込み渦の再現、日本建築学会大会学術講演梗概集（環境工学）、pp. 751-752
- (44) 1993. 10 永野：吸込み渦を利用した室内換気システムに関する研究（その4）3タイプの均等メッシュ分割を用いたLESによる吸込み渦の再現、空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集、pp. 93-96
- (45) 1994. 09 永野：吸込み渦を利用した室内換気システムに関する研究（その5）非等方メッシュ分割のためのアスペクト関数を用いたLESによる吸込み渦の検討、日本建築学会大会学術講演梗概集（環境工学）、pp. 15-16
- (46) 1994. 10 永野：アトリウム空間における吸込み渦を利用した空調・換気システムの研究、その1 吹出し口位置の変化が吸込み渦形成に及ぼす影響、空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集、pp. 869-872

