

第7章 吹出し・吸込み風量が変化した場合 の気流性状・汚染質拡散性状

第7章 吹出し・吸込み風量が増加した場合の気流性状・汚染質拡散性状

7.1 研究対象モデル及び着目点

7.1.1 着目点

実際の乱流型クリーンルームでは設計上の配慮や施工上のバラツキにより各吹出し口や吸込み口当りの風量が均等とならない場合が多い。このため、室内の気流計画立案に際しては吹出し口や吸込み口における風量のバラツキが室内の流れ場・拡散場へ与える影響を把握しておく必要がある。

本章ではタイプ4のクリーンルームモデル（吹出し口9個、吸込み口4個）において、吹出し、吸込み風量のバラツキのある場合の流れ場・拡散場を解析する^{1),2)}。解析では以下の3点に着目する。

- 1) 局所的な吹出し風量の増減と気流単位の関係
- 2) 全室的に吹出し風量がバラツいた場合の流れ場・拡散場の様相
- 3) 全室的に吸込み風量が増減した場合の流れ場・拡散場の様相

本解析により、吹出し口、吸込み口風量が均等でない場合の室内流れ場・拡散場の様相が明らかになるとともに、風量の増減が流れ場・拡散場の形成に与える影響などが明らかとなった。

7.1.2 対象モデルおよび解析概要

吹出し口9個、吸込み口4個を有するクリーンルームモデル（第5章におけるタイプ4）において吹出し口風量、吸込み口風量が増減した場合を解析する。本解析における各開口の風量の増減は室内への供給総風量を一定（換気回数99.2回）としたまま、開口の通過風速を変化させることにより行う。各解析ケースの内訳を表-7.1に示す。

解析では既述のタイプ4の均等な吹出し、吸込み風量による室内流れ場をケース0とする。これに対し、①周囲の各吹出し口は均等風速とし中央吹出し口の吹出し風速が順次増加する場合（ケース1～3）、②周囲の各吹出し口を均等な風速とし、中央吹出し口の吹出し風速が順次低減する場合（ケース4～6）、③吹出し風速を室全体で増減させた場合（ケース7）、④吸込み風速を室全体で増減させた場合（ケース8）の合計8ケースを検討する。また、一部のケースでは汚染質が壁側の吹出し口下や室中央で発生した場合の濃度分布のほか、各種の換気効率指標（SVE1～3、詳細は文献3）参照）も算出する。なお、各解析ケースでは、吹出し風速が増減しているため、吹出し口の流入乱流エネルギー k の値に関しては、吹出し気流の平均運動エネルギーの1% [$k=0.01 \cdot 1/2 \cdot V^2$ 、 V :吹出し気流速度(m/s)]を用いる。

表-7.1 解析ケース一覧

ケースNO.	ケース0	ケース1~3	ケース4~6	ケース7	ケース8
風量の増加した吹出口・吸込口の位置 (⊕): 風量増大 (⊖): 風量低減					
風量の状況 (風速: m/s)	基本ケース ・均等吹出(1.0m/s) ・均等吸込(2.25m/s) ※既報 ^{2), 3)} のタイプ 4と同一	<ケース1> ⊕: 吹出風速10%増 (1.1m/s) ・他は均等吹出 (0.9675m/s)	<ケース4> ⊖: 吹出風速10%減 (0.9m/s) ・他は均等吹出 (1.0125m/s)	⊕: 吹出風速50%増 (1.5m/s) ⊖: 吹出風速50%減 (0.5m/s) ・他は吹出: 1.0m/s 均等吸込(2.25m/s)	⊖: 吸込風速50%増 (3.375m/s) ⊕: 吸込風速50%減 (1.125m/s) ・均等吹出(1.0m/s)
* 換気回数は 各ケース とも同一 (99.2回/h)		<ケース2> ⊕: 吹出風速30%増 (1.3m/s) ・他は均等吹出 (0.9625m/s)	<ケース5> ⊖: 吹出風速30%減 (0.7m/s) ・他は均等吹出 (1.0375m/s)	<ケース6> ⊖: 吹出風速50%減 (0.5m/s) ・他は均等吹出 (1.0625m/s)	
		・ケース1~3とも 均等吸込(2.25m/s)	・ケース4~6とも 均等吸込(2.25m/s)		

7. 2 吹出し・吸込み風量が均等な場合の気流性状・汚染質拡散性状

吹出し・吸込み風量が均等なケース0の場合の気流性状、汚染質拡散性状を図-7.1に再掲する。本ケースでは各吹出し口に応じて、三連3列ではほぼ等しい大きさの気流単位(1個の吹出し噴流とその周囲の上昇流により構成される気流性状のまとまり)が形成される^{1)~4)}。また、汚染質は各気流単位の内では比較的一様に分布し、各気流単位の境界でその濃度が大きく変化する^{2), 3)}。本ケースに関する流れ場・拡散場の詳細な状況は、第5章)を参照されたい。

7. 3 室中央の吹出し口における風量の変化

7. 3. 1 中央吹出し口の風量増加

中央の吹出し口の風速を1.1m/s(ケース1:ケース0の10%増), 1.3m/s(ケース2:ケース0の30%増), 1.5m/s(ケース3:ケース0の50%増)とし、他の吹出し口の風速を均等(それぞれ、0.9875m/s, 0.9625m/s, 0.9375m/s)とした場合の気流性状の比較を図-7.2に示す。

また、本図中に中央の気流単位の範囲の概略を一点鎖線にて示す。中央吹出し口の風量(風速)の増大に伴い、この吹出し口下部における床面付近の発散流はしだいに大きなものとなる。30%程度(ケース2)までの風量増大では風量の増大した吹出し口に対する気流単位の底部の様相はやや変化するものの、室内に三連3列の気流単位が構成される状況は変わらない。中央吹出し口の風量が50%増大するケース3では、中央の吹出し口による床面発散流は、各々の壁面に達し上昇流となる。このため、本ケースでは、高風速の中央の吹出し噴流に対応する気流単位が、他の8つの気流単位を包含して室内全域に広がった様相を呈し、他のケースとは大きく異なる。

気流性状が大きく変化するケース3において、汚染質が発生した場合を図-7.3に示す。壁面中央の吹出噴流部(A点)で汚染質が発生した場合(図-7.3(c))、室内全体が1つの気流単位となる関係上、天井付近では中央吹出し口へ向かう収束流も強くなり、この影響によりケース0(図-7.1(c))に比べ、室上部にて高濃度領域が室中央側へ増大する。各汚染質発生位置に対する室内平均濃度(SVE1)、平均拡散半径(SVE2)は表-7.2に一括して示す。室中央の吹出し噴流部(B点)で汚染質が発生した場合(図-7.3(d))、室全体が1つの大きな気流単位としての様相を呈する関係上、汚染質は床面及び壁面に沿って広く移流拡散され、各吹出し噴流部を除き室全体に汚染質が広く分布する。このため、本汚染質発生位置の場合、室内平均濃度(表-7.2)は1.19となり、ケース0(1.60)に比べかなり小さいものの、平均拡散半径(表-7.2)は2.90mとケース0(2.60m)に比べ大きくなる。室内一様汚染質発生(SVE3)の場合の濃度分布を図-7.3(e)に示す。中央吹出し口噴流部における風量の増大を反映し、その周囲で濃度が低くなる他はケース0とほぼ同様の様相となる。

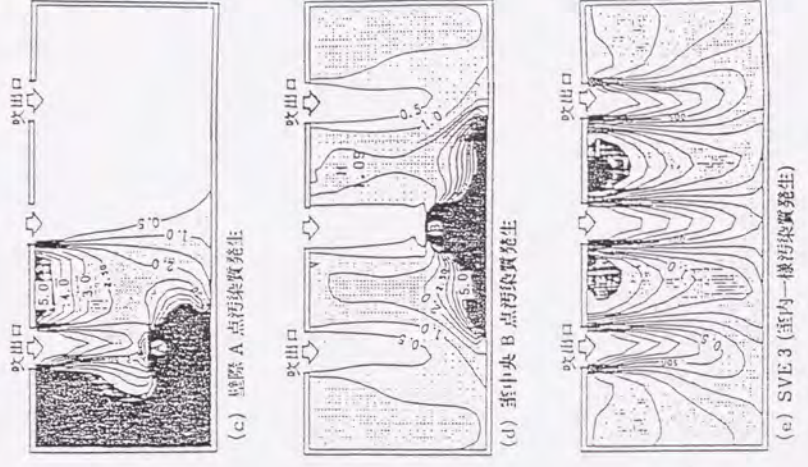


図-7.1 ケース 0 の気流性状・汚染質拡散性状 (均等吹出し、均等吸込み)

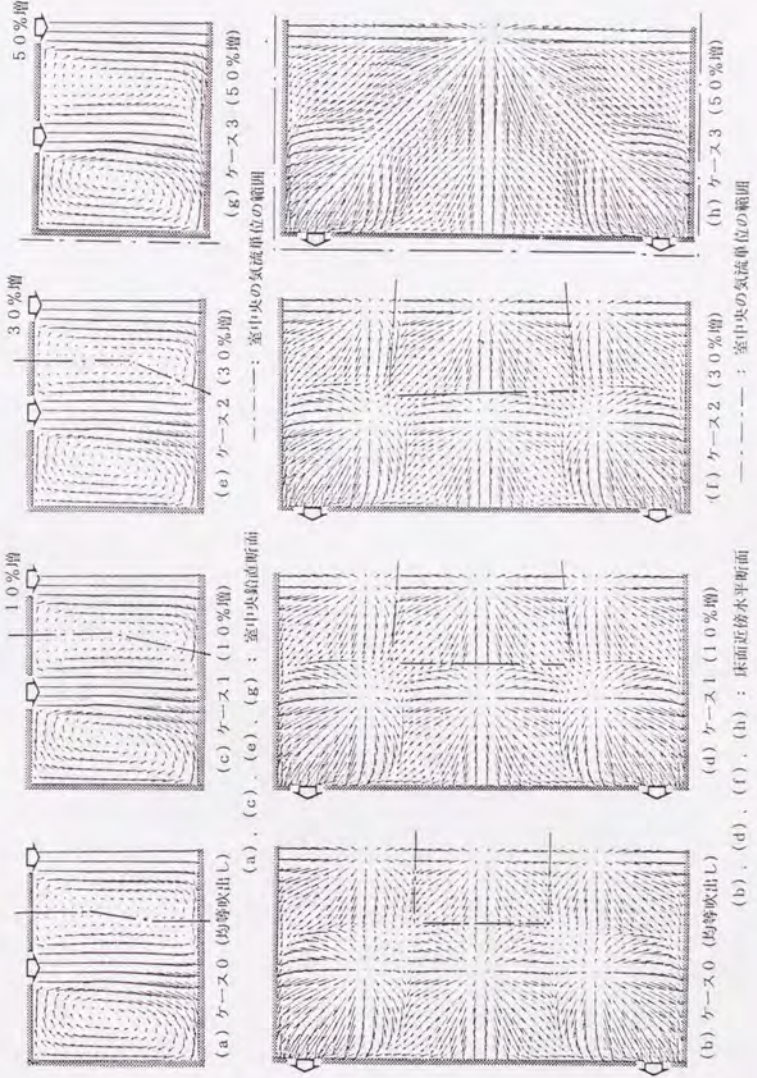


図-7.2 吹出し風量 (風速) が増大した場合の気流性状の比較

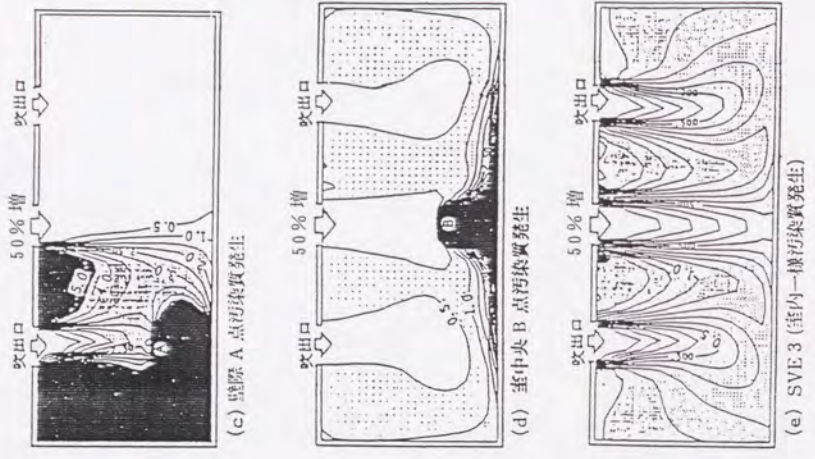


図-7.3 ケース3の気流性状・汚染質拡散性状 (室中央吹出し口の風量50%増)

7. 3. 2 中央吹出し口の風量減少

中央の吹出し口の風速を0.9m/s(ケース4:ケース0の10%減)、0.7m/s(ケース5:ケース0の30%減)、0.5m/s(ケース6:ケース0の50%減)とし、他の吹出し口の風速を均等(それぞれ、1.0125m/s、1.0375m/s、1.0625m/s)とした場合の気流性状の比較を図-7.4に示す。また、本図中に、中央の気流単位の範囲の概略を一点鎖線にて示す。

中央吹出し口の風量(風速)の減少に伴い、この吹出し口における吹出し噴流の到達距離が減少する。吹出し風量が30%減となるケース5では、吹出し噴流は床面まで到達しない。中央の気流単位は風量の減少に応じて、しだいに小さくなり、同時に各壁側中央の吹出し口下の4個の気流単位の領域は室下部で中央側に増大する。中央吹出し口の風量が50%減少するケース6では、風量の減少した吹出し口に対応する気流単位は、室上部のきわめて小さなものとなる。

気流性状が大きく変化するケース6において汚染質が発生した場合を図-7.5に示す。壁側中央の噴流部(A点)で汚染質が発生した場合(図-7.5(c))、壁側の気流単位の領域が増大するのに伴い高濃度領域は室中央まで広がる。室中央(B点)で汚染質が発生した場合(図-7.5(d))、中央の小さな気流単位における上昇流により発生位置から天井面まで汚染質は移流拡散し、その気流単位全体が高濃度となる。室内平均濃度は2.04とケース0(1.60)に比べかなり大きくなる。室内一様汚染質発生の場合(SVE3)の濃度分布を図-7.5(e)に示す。拡大した壁側の気流単位中で、吹出し口より最も遠くなる室中央下部の領域及び天井近傍の領域にて特に高濃度となる。この領域は、汚染された空気の到達する可能性が高い。

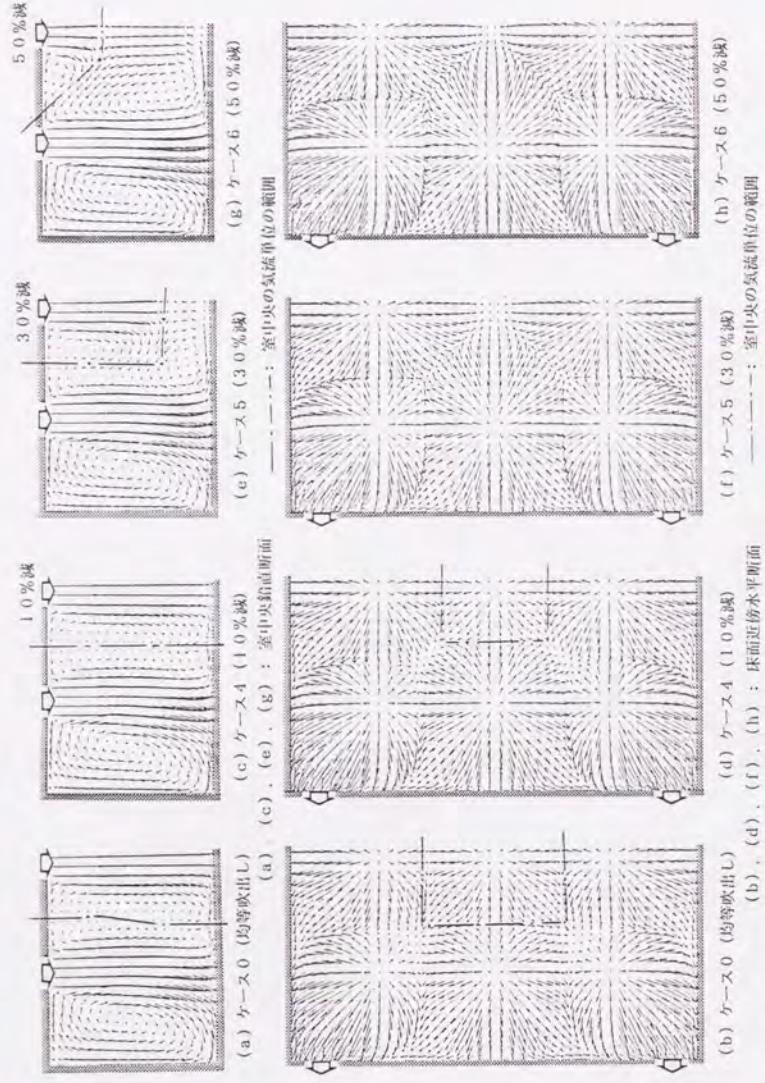


図-7.4 吹出し風量(風速)が減少した場合の気流性状の比較

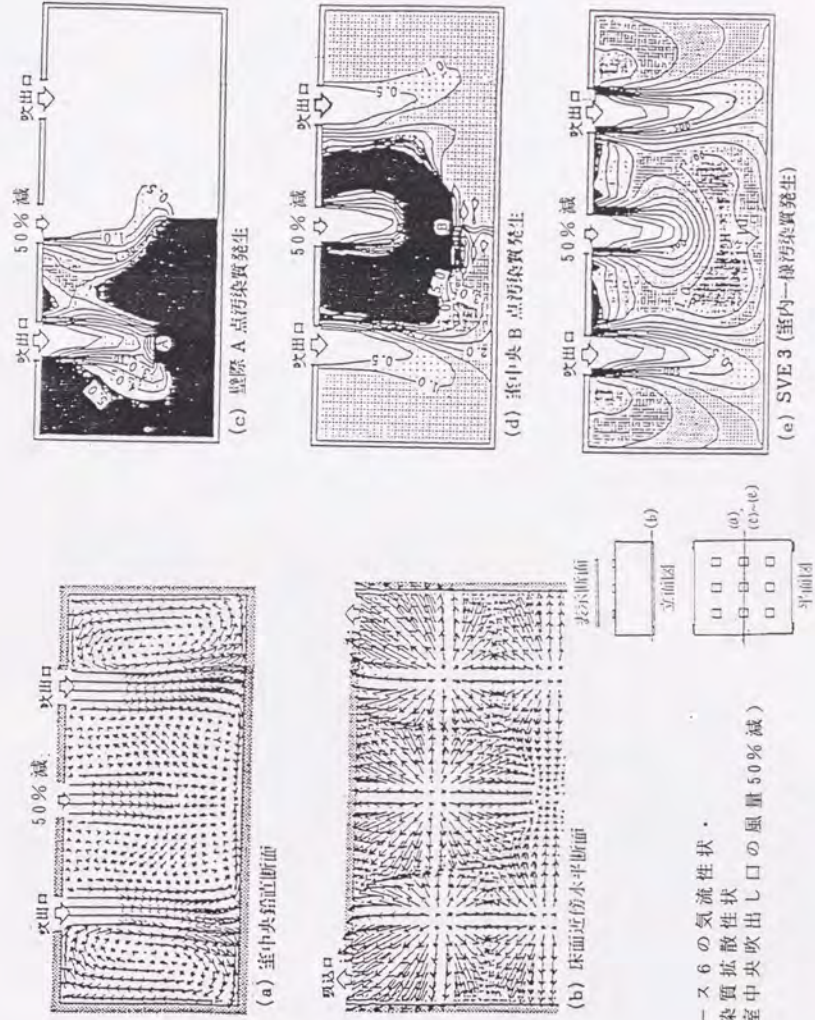


図-7.5 ケース6の気流性状・汚染質拡散性状 (室中央吹出し口の風量50%減)

7. 4 室内全体で吹出し風量が変化した場合

(1) 気流性状

片方の壁側三連の吹出し口(図-7. 6中左側の吹出し口)の風速を1.5m/s(ケース0より50%増)、反対側の壁側三連の吹出し口の風速を0.5m/s(ケース0より50%減)としたケース7の気流性状、汚染質拡散性状を図-7. 6に示す。

本ケースでは、吹出し風速の大きな左側の吹出し噴流と壁面との間に高風速の上下の循環流が(図-7. 6(a))、左側の噴流と中央の噴流の間には床面近くに小さな上昇流が形成される。一方、右側の吹出し口に関しては吹出し風速が小さいため噴流は床面に到達せず、この領域には中央の吹出し噴流と右側壁面に沿った上昇流との間で大きな循環流が形成される。この結果、左壁側吹出し口に対応したやや大きな三連の気流単位、中央の吹出し口による右側に伸びた大きな三連の気流単位が室内に形成される。また、右側の吹出し口からの吹出し気流は、中央の大きな気流単位内に包含され、明確な気流単位を形成しない。

(2) 汚染質拡散性状

ケース7の壁側吹出し噴流部(A点)で汚染質が発生した場合を図-7. 6(c)に示す。左壁側の気流単位の大部分は高濃度領域となる。汚染質のほとんどは、左壁側の気流単位を通して直近の左側吸込み口から排出されるものの、その一部は中央側の気流単位にも拡散する。この室中央から右壁に伸びる気流単位に拡散した汚染質は室の右側へ移流拡散され、室右側の領域全体に低濃度ながら分布する。

本ケースでは室の左側へ多くの風量が供給されながらも各吸込み口は均等風量の吸込みである。このため、吹出し・吸込み風量のバランス上、室の左側から右側へと空気が移動する。すなわち、室中央の気流単位に供給された空気の大部分は、明確な流れの様相を形作らないながらも、右側の吸込み口に吸込まれると考えられる。室の左側で発生した汚染質は、この空気の流れにより室の右側へも移流拡散される。これは、第5章にて均等吹出し・吸込みの流れ場における汚染質の移流拡散の様相として報告した「発生した汚染質は直近の吸込み口に向かって移流拡散される」とはかなり異なるもので、その拡散性状は①対称性を欠き、②室の半分以上のスケール(経路)に亘る、③吸込み口に向かう空気の流れによる拡散の様相として特徴づけられる。本章では以降このような吹出し・吸込み風量のアンバランスにより生じる拡散場を便宜的に(室の左側から右側への)「偏った拡散場」と称する。

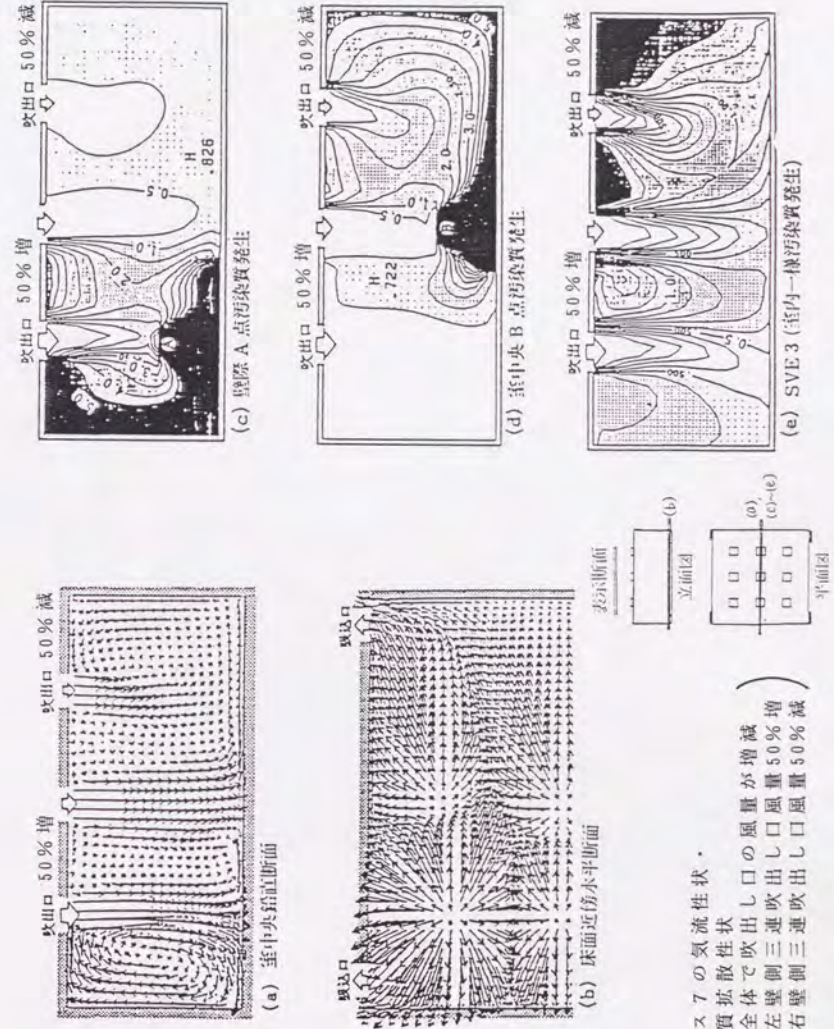


図-7.6 ケース7の気流性状・汚染質拡散性状(室全体で吹出し口風量50%増・左壁側三連吹出し口風量50%減)

室中央噴流部（B点）で汚染質が発生した場合を図-7.6(d)に示す。発生位置より左側では、気流単位の境界まで汚染質が分布する。この境界より左側は前述の”偏った拡散場”の上流側となるため、汚染質拡散は制限される。一方、本気流単位は右側壁面までの領域を占めるため、室の右側では中央の噴流からの流跡に沿って床面から壁面にかけて高濃度となり、室の右半分に広く汚染質が分布する。

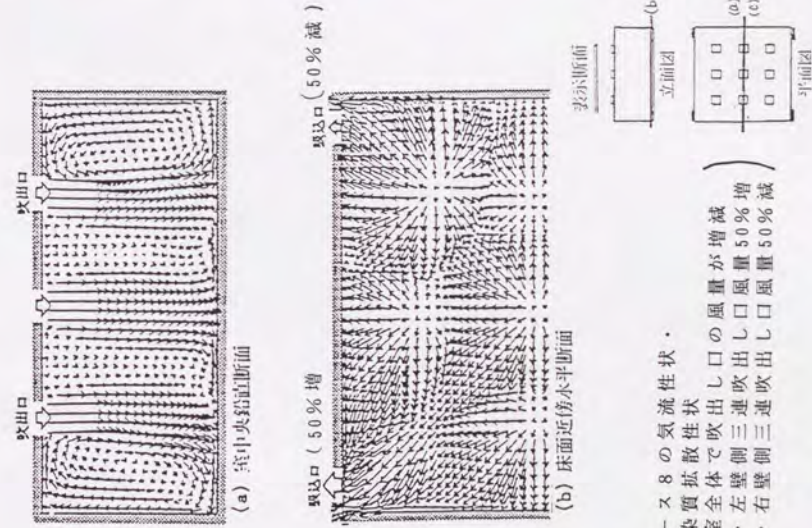
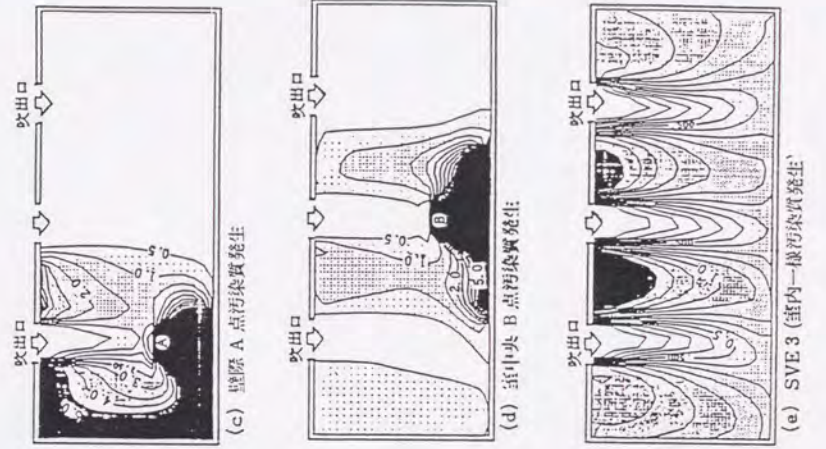
室内一様汚染質発生の場合（SVE3）の濃度分布を図-7.6(e)に示す。各気流単位の大きさが比較的小さく、吹出し空気が直近の吸込み口まで流れる経路が短い室左側の領域は比較的低濃度となる。一方、各気流単位が大きく、吹出し空気が吸込み口まで流れる経路の長い室右側の領域（”偏った拡散場”の下流側）では、やや高濃度となる。特に、この室右側の気流単位において、中央の吹出し口から最速となり、室右端天井付近においては最も高濃度となり、汚染された空気の到達する可能性が高い。

7.5 室全体で吸込み風量が変化した場合

吹出し風速は均等として左側2ヶ所の吸込み口の風速を 3.375m/s （ケース0に比べ50%増）、右側2ヶ所の吸込み風速を 1.125m/s （ケース0に比べ50%減）としたケース8の気流性状、汚染質拡散性状を図-7.7に示す。

(1) 気流性状

吸込み口より離れた室中央断面（図-7.7(a)）の気流性状はケース0と同様となる。吸込み風量の増大による気流性状への影響はほとんどこの吸込み口近傍の気流単位に限られ、各気流単位の占める領域はやや小さくなる（図-7.7(b)）。一方、別の気流単位ではこれらの気流単位の縮小に伴って領域がやや増大する程度である。また、本ケースでは室の左側吸込み口の風量が多く、中央の気流単位内の空気は主に風量の増大した吸込み口から排出されるため、（室の右側から左側への）”偏った拡散場”が形成されている。



ケース8の気流性状、汚染質拡散性状
 室全体で吹出し口の風量が増減
 ・左側吹出し口風量50%増
 ・右側吹出し口風量50%減

図-7.7

(2) 汚染質拡散性状

吸込み口風量増大側の噴流部(A点)で汚染質が発生した場合(図-7.7(e))、発生位置を含む壁側三連の気流単位が小さくなるため、汚染質の分布はケース0に比べやや狭い領域となる。なお、室内平均濃度は0.96、平均拡散半径は1.74mとなり、格段に小さな値となる。

中央の吹出噴流部(B点)で汚染質が発生した場合(図-7.7(d))、中央の気流単位内に汚染質が高濃度で滞留する。また、これより右側の気流単位は“偏った拡散場”の上流側となるため、汚染質の流れ込むことが少なく、比較的清浄となる。室内平均濃度は1.49、平均拡散半径は2.49mとなり、ケース0(1.60(-), 2.60m)よりやや小さな値となる。

室内一様汚染質発生の場合(SVE3)の濃度分布を図-7.7(e)に示す。吸込み口風量の多い左側の領域(“偏った拡散場”の下流側)でやや高い濃度となる。吸込み風量の多い左側吸込み口へは左側吹出し口からの空気の全部のほか室中央の三連の吹出し口からの空気のほとんどが吸込まれる。これらの空気は、中央の吹出し口から吸込み口までの比較的長い経路(時間)を経ており、汚染されている可能性が高い。

7.6 換気効率指標の検討

各ケースの室内平均濃度及び平均拡散半径を表-7.2に示す。吹出し風量や吸込み風量のバラツいた流れ場・拡散場における各換気効率値の特徴は以下の通りである。

(1) 室内平均濃度(SVE1)

吹出し風量の減少した吹出し口下部で汚染質が発生する場合、室内平均濃度は大きくなる傾向を有する(ケース3のA点、ケース6のB点における汚染質発生など)。また、汚染質発生のある気流単位の大きさは室内平均濃度の値には直接影響しないものの、気流単位が大きくなり直接吸込み口に接するような場合(ケース3のB点における汚染質発生)や汚染質の発生する気流単位の比較的近傍に大風量の吸込み口を有する場合(ケース8のA点における汚染質発生)には、発生した汚染質が直接またはあまり拡散されずに排出されることを反映し、室内平均濃度の値は特に小さくなる。

(2) 平均拡散半径(SVE2)

吹出し風量の増大や吸込み口が隣接する場合の吸込み風量の減少は、近接する気流単位の領域を増大させる。この気流単位で汚染質が発生する場合、比較的高濃度の汚染質の分布範囲が大きくなり、これを反映し平均拡散半径も、より大きな値となる(ケース3のB点やケース7のA点における汚染質発生)。

(3) 室内一様発生の場合の濃度分布(SVE3)

“偏った拡散場”が形成される場合、室内一様発生の場合の汚染質濃度は下流側で上昇する。従って、各種の異なった風量を有する吹出し・吸込み口や複数の気流単位を有する複雑な室内流れ場に関しても、この濃度分布より、“偏った拡散場”の状況を推察することができる(図-7.6(e)、図-7.7(e))。

表-7.2 各ケースの室内平均濃度 (SVE1) と平均拡散半径 (SVE2)

ケース	左壁側中央 吹き出し噴 流中 [A点] 汚染質発生	室中央吹き 出し噴流中 [B点] 汚染質発生
ケース0	1. 55 2. 08 m	1. 60 2. 60 m
ケース3	1. 66 2. 08 m	1. 19 2. 90 m
ケース6	1. 82 2. 14 m	2. 04 2. 36 m
ケース7	1. 61 2. 55 m	1. 46 2. 28 m
ケース8	0. 96 1. 74 m	1. 49 2. 49 m

*各欄上段:室内平均濃度 (SVE1, 単位無し)
各欄下段:平均拡散半径 (SVE2, 単位m)

7.7 結論

吹き出し口や吸込み口の風量に変化した乱流型クリーンルームモデル内の流れ場・拡散場の性状を詳細に解析し、吹き出し口や吸込み口当りの風量変化が、室内の流れ場・拡散場を与える影響を考察した。吹き出し風量・吸込み風量がバラツいた場合の流れ場・拡散場の特徴は以下の通りである。

- (1) 吹き出し風速の±30~50%程度のバラツキは、室内の気流単位の様相を大きく変化させる。特に、隣接する吹き出し噴流に対し約半分の風速の吹き出し噴流に関しては、形成される気流単位は吹き出し口付近の小さなものとなり、気流単位は別の気流単位に包含される場合がある。
- (2) 風量の大きな噴流部には大きな気流単位が形成される。その気流単位内で汚染質が発生する場合、汚染質の平均拡散半径も大きくなる。
- (3) “偏った拡散場”が形成されている室内において、その上流側の汚染質発生は、汚染質の分布範囲が広がるため、好ましくない。
- (4) “偏った拡散場”の把握には室内一様発生の場合の濃度分布 (SVE3) の検討が有効である。

* 第7章の参考文献

- 1) 加藤信介、村上周三、須山喜美、中川浩之
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20)
吹出・吸込風量にバラツキのある流れ場・拡散場に関する数値解析
空気調和・衛生工学会学術論文集、1987年10月6日～8日、東京
- 2) 村上周三、加藤信介、須山喜美、中川浩之
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
-室内障害物および給排気分配のバラツキの影響の数値解析-
生産研究第40巻1号、1988年1月
- 3) 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
シュミ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. (1986), p.91

第8章 気流障害物を有する乱流型クリーン ルーム内の気流性状・汚染質拡散

第8章 気流障害物を有する乱流型クリーンルーム内の気流性状・汚染質拡散性状

8.1 研究対象モデル及び着目点

(1) 着目点

クリーンルームでは各種の生産装置や作業員等の気流障害物が存在するため、室内の気流計画の立案に際してはこれら気流障害物による室内流れ場への影響を把握しておくことが必要である。また、これらの障害物は汚染源となる場合が多いため、障害物周囲の気流性状や汚染質拡散性状を詳細に把握しておくことも必要である。本章ではタイプ4のクリーンルームモデル内に生産装置等をモデル化した気流障害物を設置した流れ場・拡散場に関する解析結果^{1)~8)}を示し、以下の3点を考察する。

- ① 数値シミュレーションと模型実験の整合性、
- ② 気流障害物周囲の流れ場・拡散場の様相、
- ③ 全室的なスケールでの気流障害物設置の影響の範囲と程度。

本解析により、気流障害物を有する室内流れ場全体の様相が明らかになるとともに、障害物設置が室内の流れ場・拡散場の形成に与える影響などが明らかとなった。

(2) 対象モデル及び解析の概要

吹出し口9個、吸込み口4個を有するタイプ4クリーンルームモデルに気流障害物を設置した場合を解析する。室形状と気流障害物形状を図-8.1に示す。解析では、気流障害物の設置状況や汚染質発生位置を変化させたケース9~ケース13を検討する。各ケースの内容一覧を表-8.1に示す。これらは、気流障害物を設置しない場合(ケース0)に対し、1個の箱型障害物の設置した場合(ケース9~11:それぞれ壁際、吹出し口下、吹出し気流間)、机型障害物を設置した場合(ケース12:壁際)の他、3個の箱型障害物を設置した場合(ケース13:壁際及び室中央)である。

各ケースにおける汚染質発生位置を表-8.1中に○印で示す。汚染質拡散解析では、汚染質が障害物上面の点発生源で発生する場合、室内一様発生の場合(SVE3(換気効率指標3):吹出空気の到達時間(行程)を検討するための指標。詳細は文献9)参照)の解析を行なう。更に、多数の障害物を有するケース13では、汚染質が障害物上部や床で面的に発生した場合の解析も行なう。

また、気流障害物の設置された室内ではこれまでの解析例以上に室内の気流

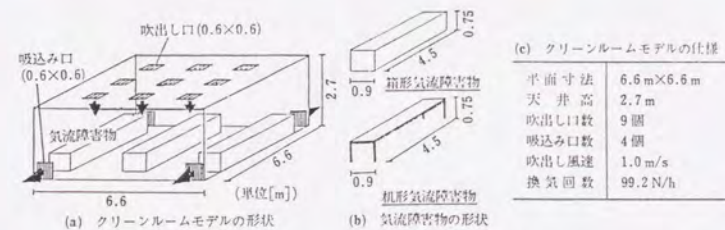


図-8.1 クリーンルームモデルと気流障害物の形状

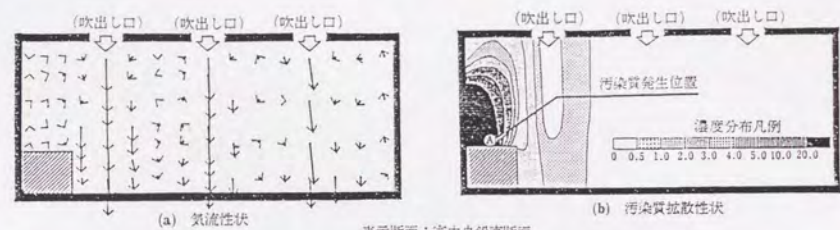


図-8.2 模型実験によるケース9の気流性状・汚染質拡散性状

表-8. 1 解府ケース一覧

ケースNo.	ケース0	ケース9	ケース10	ケース11	ケース12	ケース13
気流障害物	なし	箱形1個	箱形1個	箱形1個	机形1個	箱形3個
設置位置	(正面) ①②③④⑤	(正面) ①②③④⑤	(正面) ①②③④⑤	(正面) ①②③④⑤	(正面) ①②③④⑤	(正面) ①②③④⑤
な	なし	壁際	壁際	壁際	壁際	壁際および室中央
な	なし	壁際	壁際	壁際	壁際	壁際
汚染質発生位置 (○)	① 壁際(障害物上面) ② 中央の位置 ③ 吹出し口下 ④ 障害物間中央 ⑤ 吹出し気流間 ⑥ 室中央	① 壁際(障害物上面) ② 壁際(障害物上面中央) ③ 室内一様発生	① 吹出し口下(障害物上面中央) ② 室内一様発生	① 吹出し気流間(障害物上面中央) ② 室内一様発生	① 壁際(障害物上面中央) ② 室内一様発生	① 壁際(障害物上面中央) ② 障害物間中央 ③ 室内一様発生 ④ 中央障害物上面 ⑤ 室内一様発生
汚染質発生位置	① 壁際(障害物上面) ② 中央の位置 ③ 吹出し口下 ④ 障害物間中央 ⑤ 吹出し気流間 ⑥ 室中央	① 壁際(障害物上面) ② 壁際(障害物上面中央) ③ 室内一様発生	① 吹出し口下(障害物上面中央) ② 室内一様発生	① 吹出し気流間(障害物上面中央) ② 室内一様発生	① 壁際(障害物上面中央) ② 室内一様発生	① 壁際(障害物上面中央) ② 障害物間中央 ③ 室内一様発生 ④ 中央障害物上面 ⑤ 室内一様発生

性状が複雑になると考えられるため、ケース9に関しては模型実験も合わせて行い、本数値シミュレーション結果が妥当であることも予め示す。

8. 2 数値シミュレーションと模型実験結果の整合性

壁際に箱型気流障害物を設置したケース9の模型実験結果を図-8. 2に、数値シミュレーション結果を図-8. 3, 4に示し、両者の整合性を検討する。

8. 2. 1 気流性状の整合性

気流性状を図-8. 2(a), 図-5(a)にて比較する。気流障害物の無い室右側部分はもちろんのこと、障害物周辺に関しても障害物上部の壁際上昇流や手前の循環流の状況、天井付近の滞留域の状況など、数値シミュレーション結果は実験結果に良く整合している。

8. 2. 2 汚染質拡散性状の整合性

汚染質拡散性状を図-8. 2(b), 図-8. 4(a)にて比較する。気流障害物上A点より汚染質発生に関し、汚染質の分布範囲(室内左側の1/3の領域)、障害物上部の高濃度領域・天井付近の低濃度領域の状況など、数値シミュレーション結果は実験結果と室内全体の様相に関してかなり対応している。なお、数値シミュレーション結果は実験と異なり障害物前面で床面まで高濃度域が分布している。このような不一致は室内に障害物を設置しない場合(前章5, 6参照)に比べの流れ場が複雑になったことや障害物周囲の差分分割がこの程度での細分割でもまだ不足気味であることの影響と考えられる。

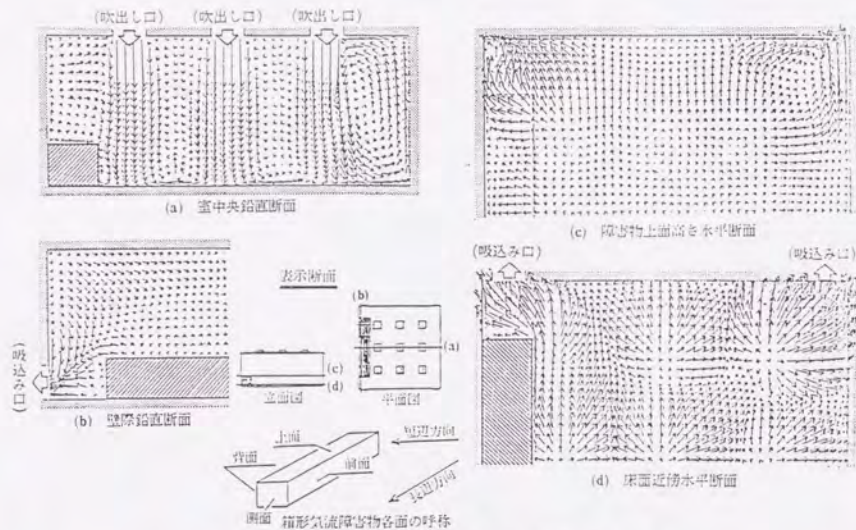


図-8.3 ケース9の気流性状(壁際に箱形障害物設置)

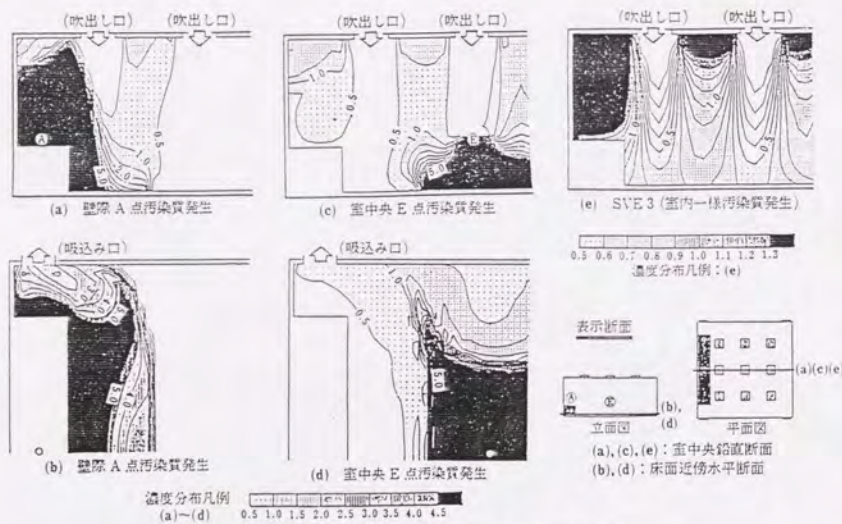


図-8.4 ケース9の汚染質拡散性状(壁際に箱形障害物設置)

8.3 単数の気流障害物を設置した場合の気流性状・汚染質拡散性状

8.3.1 箱型気流障害物の場合

1個の箱型気流障害物を室内床上の各位置に設置した場合(ケース9~11)を検討する。また、気流障害物を設置しないケース0の気流性状と汚染質拡散性状^{2,3)}をそれぞれ図-8.5, 8.6, 表-8.2に再掲する。

(1) 壁際に設置した場合

壁際に箱型障害物を設置したケース9の気流性状、汚染質拡散性状をそれぞれ図-8.3, 8.4, 表-8.3に示す。また、本文中で用いる障害物各面の呼称を図-8.3中に示す。

a) 気流性状

障害物上部の壁際では、障害物上面からの上昇流と室の両隅部より壁際上部に沿った水平流が衝突し(図-8.3(b))、吹出気流上部に向かう水平成分を有する流れとなる(図-8.3(a))。この流れは吹出し気流に誘引されて下降し、障害物上部には長手方向を軸とする循環流が形成される。障害物上面では壁面に向かう方向の様な流れとなる(図-8.3(c))。障害物前面では吹出し気流と床面からの上昇流が衝突し(図-8.3(a))、その一部は障害物前面に沿って室隅角部の吸込み口に向かう(図-8.3(d))。気流障害物を設置しないケース0では、壁際には床面から天井までの強い上昇流が生じており(図-8.5(a), (b))、障害物の設置によりその領域の気流性状は大きく変化する。一方、障害物から十分離れた領域では、ケース9とケース0には大きな差異はなくほぼ同様の気流性状となっており(図-8.3(a), (d)の右側と図-8.5(a), (d)の右側の比較)、障害物設置の影響はその比較的近傍領域に限られる。すなわち、室内の気流性状を1個の吹出気流とその周囲の上昇流を1単位とする気流単位が吹出し口の個数分合成されたものとみなす場合、障害物設置の影響は比較的その障害物を有する気流単位内に限られ、他の気流単位は影響を受けない。

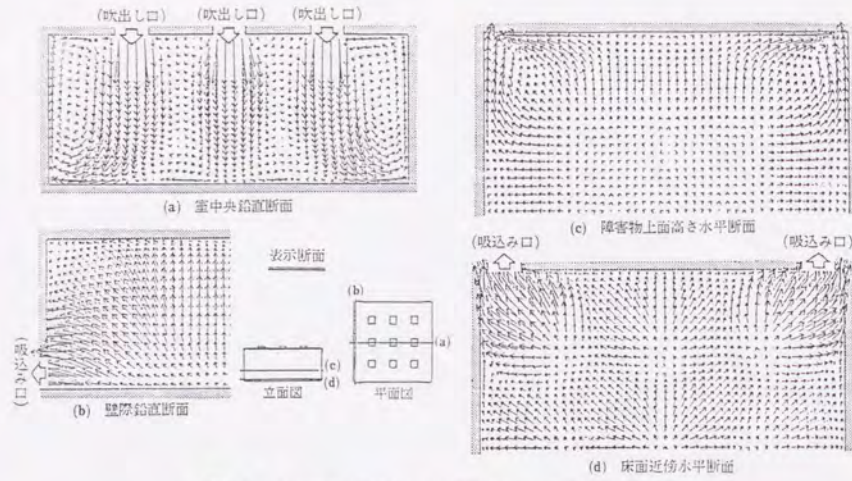


図-8.5 ケース0の気流性状[障害物なし, 文献3) 参照]

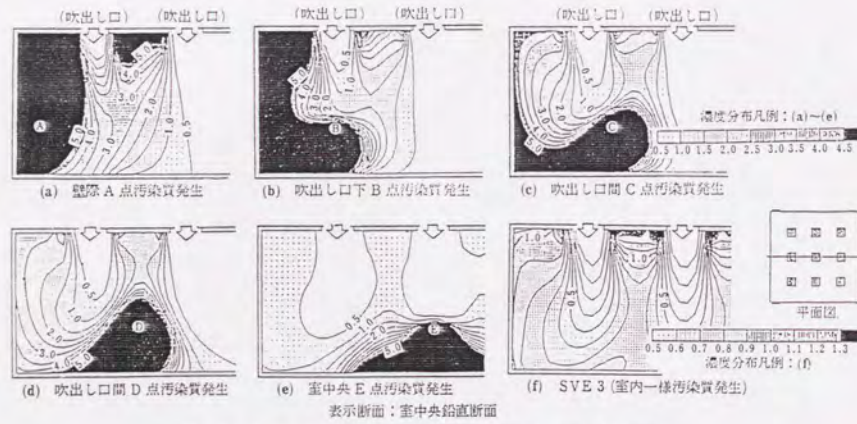


図-8.6 ケース0の汚染質拡散性状[障害物なし, 文献3) 参照]

表-8.2 気流性状と汚染質拡散性状の特徴

ケース0の気流性状(図-8.5)		汚染質拡散性状(図-8.6)		
図番	汚染源	分布範囲(高濃度領域)	関連する気流性状	
(a)	A	左側1/3(壁際空間)	左側3)	
(b)	B	左側1/3(噴流下部, 壁際)	左側1), 3)	
(c)	C	左側1/2(汚染源周囲, 床面)		
(d)	D	左側1/2(汚染源周囲)		
(e)	E	室全体(汚染源下部)	左側1)	
(f)	SVE 3	室上部まで高濃度		

- 1) 各吹出し気流は床面まで到達し, 周囲に上昇流が形成される(a).
- 2) 室内には吹出し口に対応し9個の気流単位が形成される(d).
- 3) 壁際では床面から天井まで上昇流が形成される(b).
- 汚染質拡散の形成状況と汚染質分布状況を参照すること、汚染質分布状況が概略予測できる。

表-8. 3 気流性状と汚染質拡散性状の特徴

ケース9の気流性状(図-8. 3)		汚染質拡散性状(図-8. 4)		
図	汚染源	分布領域(高濃度領域)	関連する気流性状	
(a),(b)	A	左側1/3(障害物上部, 前面)	左側1/3(左側1)~3)	
(c),(d)	E	室全体(汚染源下部) 注) 障害物周囲は清浄となる		
(e)	SVE3	障害物上部, 天井付近で高濃度	左側2), 4)	
汚染質 拡散の まとめ			・循環流中で発生した汚染質は滞留する。 ・障害物周囲の気流性状の変化に伴い、障害物より離れた領域、汚染質発生に関しても、汚染質拡散性状が変化する場合がある。	

- 1) 障害物上部の壁際では上昇流と室隅角部からの水平流が衝突する(b)。
- 2) 障害物上部では長手方向を軸とする循環流(壁際で上昇, 吹出し気流に伴って下降)が形成される((a),(b))。
- 3) 障害物前面では吹出し気流と床面からの上昇流の衝突による小さな渦(a)と前面に沿って室隅角部の吸込み口に向かう水平流が形成される(d)。
- 4) 障害物から離れた領域では、ケース0とはほぼ同様の気流性状となる((a),(d)の右側)。
- 5) 障害物設置の影響は障害物を有する気流単位内に限られ、他の気流単位はあまり影響を受けない。

b) 汚染質拡散性状

障害物上面(A点)で汚染質が発生した場合(図-8. 4(a),(b))、ケース0の壁際(A点)の汚染質発生の場合(図-8. 6(a))と同様に左側の室1/3の領域(壁側三連の気流単位内)に汚染質が分布する。この領域では壁際上部の水平流により室の両隅から清浄空気が導入され、天井付近でやや低濃度となる。SVE1(室内平均濃度:発生した汚染質の排出され易さに対応し、この値が小さい程排出され易い。詳しくは文献9参照)は、1.9となり、ケース0の場合(1.7)よりやや大きくなる。また、SVE2(平均拡散半径:この指標の値が大きい程、発生した汚染質は室内に広く拡散する。詳細は文献9参照)は1.5mとなり、ケース0の場合(1.9m)より小さい。

室中央(E点)で汚染質が発生した場合(図-8. 4(c),(d))、汚染質は室全体に分布するが、障害物周囲には壁側三連の吹出し気流の一部が吹き込むため清浄となる。SVE1は1.6となり、ケース0(1.4)より室換気による汚染質排出能力がやや低下している。SVE2は2.6mとなりケース0(2.5m)とほぼ同様となる。なお、この汚染質発生位置のように、前節で示した障害物設置の影響をあまり受けない気流性状となる領域での汚染質発生でも、汚染質拡散性状に関しては障害物設置の影響を受ける場合がある。

SVE3(室内一様汚染質発生の場合:各点の濃度は吹出し空気とその点へ到達する時間(行程)に対応し、値が大きい程到達時間が長く、汚染された空気の到達する可能性が高いと解釈される。詳しくは文献9参照)の分布に関して、ケース9の障害物上部の分布値(濃度)はケース0より高く(図-8. 4(e))と図-8. 6(f)の比較)、障害物周囲の循環領域は清浄な吹出し空気が到達するまでの時間(行程)が長く汚染された空気の到達する可能性の高いことが判る。

(2) 吹出口下に設置した場合

吹出口下に箱型気流障害物を設置したケース10の気流性状、汚染質拡散性状をそれぞれ図-8. 7、8. 8、表-8. 4に示す。

a) 気流性状

障害物上面に到達した吹出し気流は、四方に発散する(図-8. 7(a),(c))。障害物上部の吹出し気流間では上昇流(図-8. 7(b))が生じ、それ以外は壁面及び中央の吹出気流に向かう水平流となる(図-8. 7(a))。これらの水平流は壁際および中央の吹出気流との間で上昇流となる。これらに伴い障害物背面と壁面の間及び、前面と中央の吹出気流との間では循環流が形成される。障害物を設置しない室の右側半分の部分では、ケース0の気流性状とほぼ同様であり(図-8. 7(a),(d)と図-8. 5(a),(d)の比較)、障害物設置による気流性状への影響はこの場合も障害物の比較的近傍領域に限られる。

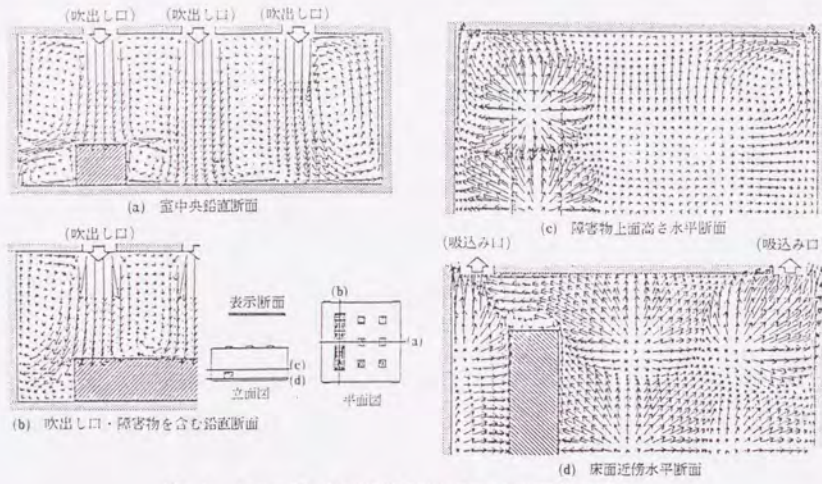


図-8. 7 ケース0の気流性状(吹出し口下に箱形障害物設置)

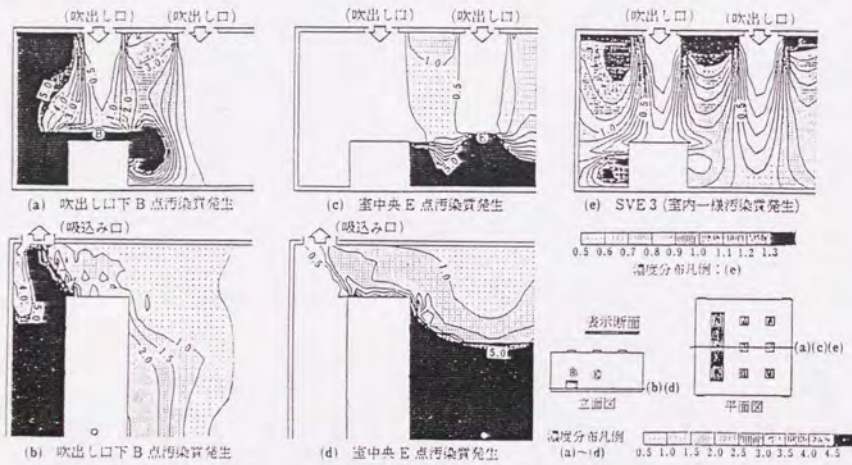


図-8. 8 ケース0の汚染質拡散性状(吹出し口下に箱形障害物設置)

表-8. 4 気流性状と汚染質拡散性状の特徴

ケース0の気流性状(図-8. 7)		汚染質拡散性状(図-8. 8)	
図番	汚染源	分布範囲(高濃度領域)	関連する気流性状
(a), (b)	B	左側1/2(障害物上面, 前面循環流部, 壁際) 注) 障害物上部は清浄	左側1), 3), 4)
(c), (d)	E	右側2/3(汚染源下部, 床面) 注) 障害物より左側は清浄	左側1), 3)
(e)	SVE3	障害物近傍循環流部と天井近傍で高濃度	左側4)
汚染質拡散まとめ		障害物上部の作業域が吹出し気流部となる場合には, その部分の高清浄度実現が期待できる。	

- 1) あたかもケース0の床面がせり上がり, 吹出し気流は障害物上面にて四方に発散する[(a), (c)].
- 2) 上記発散流の一部は障害物上部の吹出し気流間で上昇流となる(b).
- 3) 上記発散流の残りは壁面および中央の吹出し気流に向かう水平流となる(a).
- 4) 障害物の背面と前面にて循環流が形成される(a).
- 5) 障害物から離れた領域では, ケース0とはほぼ同様の気流性状となる[(a), (d)の右側].

b) 汚染質拡散性状

障害物上面(B点)で汚染質が発生した場合(図-8.8(a),(b))、机上面の水平方向の気流により移流・拡散され、高濃度領域は障害物上面から横方向に広がる他、障害物背面及び前面の循環流部分でも高濃度となる(図-8.8(a))。障害物上部の領域には壁側三連の吹出し気流があるため、比較的清浄となる。汚染質の分布範囲はケース0の場合(図-8.6(b))に比べて広く、左側の約1/2の領域となる(図-8.8(a),(b))。SVE1は1.9となりケース0(1.3)よりかなり大きくなる。SVE2も2.1mとなりケース0(1.9m)よりやや大きな値となる。

室中央(E点)で汚染質が発生した場合(図-8.8(c),(d))、汚染質は障害物を設置していない室右側の領域に広く分布する。一方、障害物上部に吹付ける三連の吹出し気流や室下部では障害物自体により汚染質の移流・拡散が妨げられるため、障害物より左側の領域は清浄となる。SVE1は1.6となり、ケース0(1.4)より大きくなる。SVE2は2.5mとなりケース0(2.5m)と同様となる。

SVE3の分布に関して(図-8.8(e))、障害物上部は吹出し噴流部のため極めて低い値が分布する。これは乱流型クリーンルーム内でも、作業部位の選定により局所的には高清浄度実現を期待できる可能性を示している。一方、障害物側面の循環流部には高い値が分布し、この領域は汚染された空気の到達する可能性は高い。

(3) 吹出し気流間に設置した場合

吹出し口間に箱型気流障害物を設置したケース11の気流性状、汚染質拡散性状をそれぞれ図-8.9、8.10、表-8.5に示す。

a) 気流性状

障害物上部は吹出し気流間のため比較的低風速となる(図-8.9(b))。このうち吹出口間隔の短くなる隣接する吹出し気流間では下降流、4個の吹出気流に囲まれた相対的に吹出し口からの距離が遠くなる領域では天井までの上昇流となる(図-8.9(b))。また、中央の吹出し気流の一部は障害物上面で薄い水平方向の流れとなる(図-8.9(a))。一方、中央三連吹出し気流の約半分は床面にて障害物側には発散できず、障害物前面に沿って壁側に流れる水平流となる(図-8.9(d))。また、障害物を設置していない室右側の領域では、ケース0とほぼ同様の気流性状となる(図-8.9(a),(d)と図-8.5(a),(d)の比較)。しかし全体的には障害物が室全体の気流性状に与える影響は小さい。

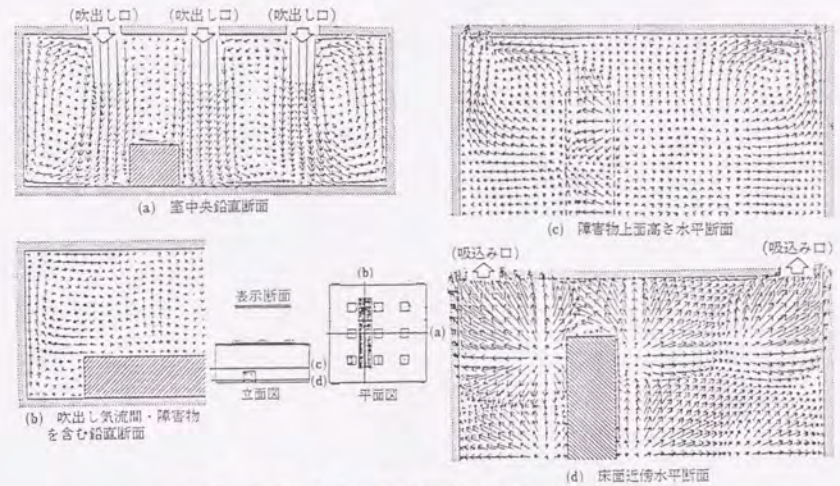


図-8.9 ケース11の気流性状(吹出し気流間に障害物設置)

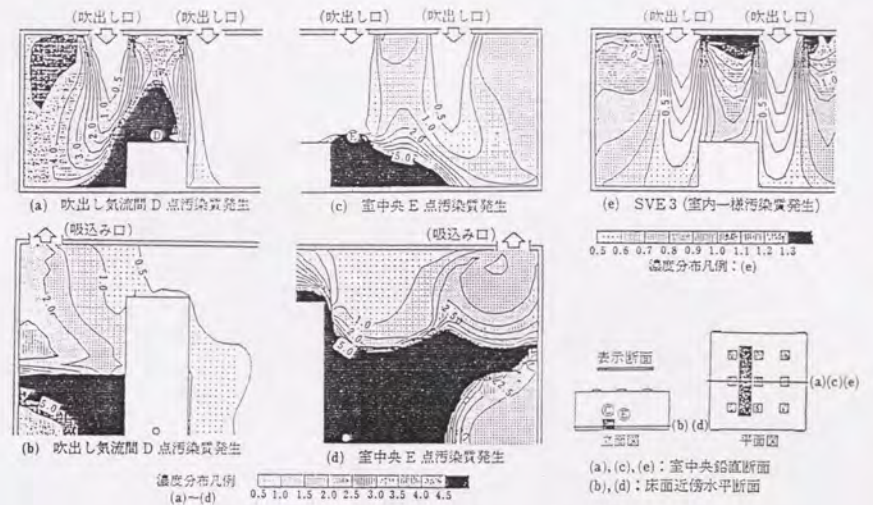


図-8.10 ケース11の汚染質拡散性状(吹出し気流間に障害物設置)

表-8. 5 気流性状と汚染質拡散性状の特徴

ケース11の気流性状(図-8. 9)	汚染質拡散性状(図-8. 10)
ケース11の気流性状(図-8. 9)	汚染質拡散性状(図-8. 10)
図番	汚染源
(a),(b)	D
(c),(d)	E
(e)	SVE3
汚染質拡散のまとめ	分布範囲(高濃度領域)
	左側1/3(汚染源周囲)
	左側2/3(汚染源下部, 床面) 注) 汚染質拡散も障害物に妨げられる
	天井近傍で高濃度
	床面での汚染質拡散性状は箱型障害物に影響を受ける。 障害物上部が低速のため滞留する。
関連する気流性状	左側3)
	左側1)
	左側5)

- 1) 中央の吹出し気流は床面に到達し、障害物側に発散できず前面に沿った水平流となる(d)。
 2) 中央の吹出し気流の一部は障害物上面で薄い水平方向の流れとなる(a)。
 3) 障害物上部は比較的低速となる(図-9(b))。
 4) 障害物から離れた領域では、ケース0とはほぼ同様の気流性状となる[(a),(d)の右側]。
 5) 障害物が気流単位の境界に位置するため各気流単位に与える影響は小さい。

b) 汚染質拡散性状

障害物上面(D点)で汚染質が発生した場合(図-8. 10(a),(b))、汚染質は障害物を含む室の左側に分布する。また、発生位置近傍は低風速のため汚染質は高濃度で滞留する。SVE1は1.7となり、ケース0(1.5)より大きくなる。SVE2は2.0mとなりケース0(2.1m)より小さな値となる。

室中央(E点)で汚染質が発生した場合(図-8. 10(c),(d))、汚染質の移流・拡散は障害物により妨げられ、室右側に分布する。障害物上面は発生位置に近いものの、吹出し気流の一部が流れるため低濃度となる。SVE1は1.5となり、ケース0(1.4)より大きくなる。SVE2は2.4mとなりケース0(2.5m)よりやや小さな値となる。

SVE3の分布に関して(図-8. 10(e))、床面で低い値、天井面で高い値が分布する様相等ケース0とほぼ同様の様相を呈する。

8. 3. 2 机型気流障害物設置の場合

箱型障害物と同じ大きさの上面を有する机型障害物を壁際に設置したケース12の気流性状、汚染質拡散性状をそれぞれ図-8. 11、8. 12、表-8. 6に示す。

(1) 気流性状

机上面からの壁面に沿った上昇流は室隅角部からの水平流と衝突し(図-8. 11(b))、向きを変え、水平方向に流れた後吹出し気流に誘引され下降する(図-8. 11(a))。このため、机上部の領域にはケース9と同様長手方向を軸とする循環流が形成される。一方、机内部は上方を机板に塞がれるため上昇流はあまり生じず、壁面に沿って吸込み口に向かう水平な流れとなる(図-8. 11(a),(b),(d))。障害物のない室右側の領域は、ケース0とほぼ同様の気流性状となり、障害物設置の影響はその近傍の領域に限られる(図-8. 11(a),(d)と図-8. 5(a),(d)の比較)。

(2) 汚染質拡散性状

机上面(A点)で汚染質が発生した場合(図-8. 12(a),(b))、その周囲の床面から天井面まで高濃度領域となり、室の約1/3の領域に汚染質が分布する。SVE1は1.4となり、ケース9(2.1)より著しく小さな値となる。この汚染質発生位置の場合、箱型障害物より、机型障害物の方が汚染質が排出されやすい。SVE2は1.5mとなりケース9(1.5m)と同様となる。

室中央(E点)で汚染質が発生した場合(図-8. 12(c),(d))、汚染質は室全体に広く分布するが、障害物周囲の領域は壁側三連の吹出し気流の一部が吹き付けるためケース9と同様清浄となる。更に、本ケースでは障害物上部の殆

どの領域で清浄となる。これは机型障害物では、床面付近の汚染された空気は上昇することなく机下部空間でスムーズに吸込み口に導かれ排出されることによるものと考えられる(図-8. 12(d))。SVE1は1.3となる。これはケース9(1.6)よりかなり小さな値であり、この汚染質発生位置についても汚染質が排出されやすい。SVE2は2.5mとなりケース9(2.6m)とほぼ同様となる。

SVE3の分布に関して(図-8. 12(e))、障害物上部の空間に高い値が分布し、上部にいくほど汚染されている可能性が高いが、ケース9(図-8. 4(e))より低い値となっている。

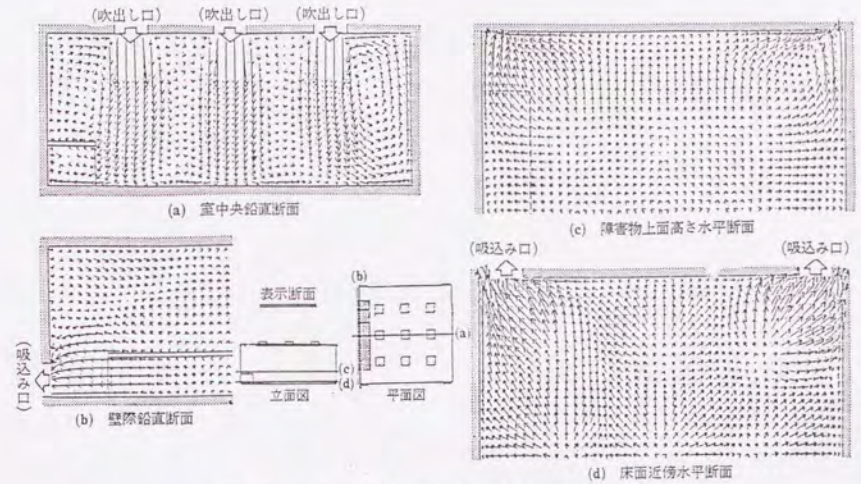


図-8. 11 ケース2の気流性状(壁際に机形障害物設置)

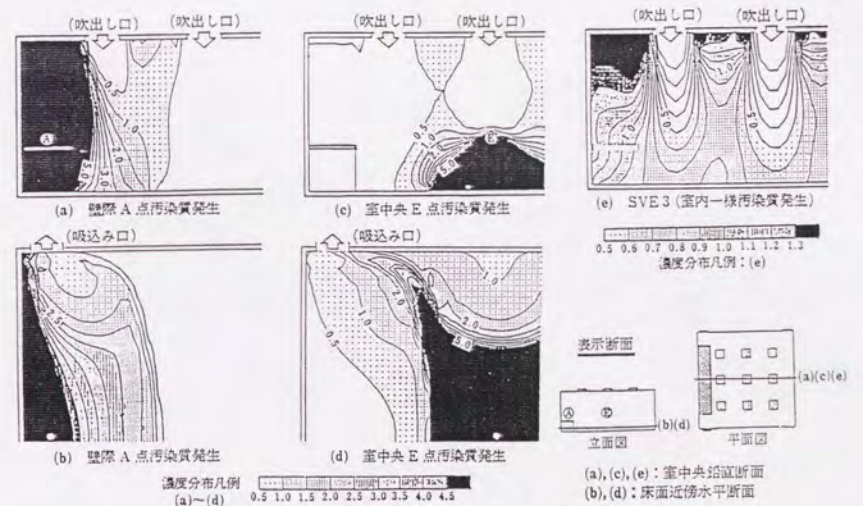


図-8. 12 ケース2の汚染質拡散性状(壁際に机形障害物設置)

表-8. 6 気流性状と汚染質拡散性状の特徴

ケース1,2の気流性状(図-8. 11)		汚染質拡散性状(図-8. 12)		
図 番	汚染源	分布範囲(高濃度領域)	関連する気流性状	
(a), (b)	A	左側1/3(壁際空間)	左側1, 2)	
(c), (d)	E	右側2/3(汚染源下部, 床面) 注) 障害物周囲は清浄	左側3)	
(e)	SVE.3	障害物上部の天井付近で高濃度	左側2)	
ケース1,2の気流性状(図-8. 11)		汚染質拡散性状(図-8. 12)		
1) 障害物上部の壁際では上昇流と室隅角部からの水平流が衝突する(b).		汚染質拡散性状(図-8. 12)		
2) 机上部にはケース1と同様長手方向を軸とする循環流が形成される(a).		汚染質拡散性状(図-8. 12)		
3) 机内部は上方を机板にふさがれるため上昇流はあまり生じず、壁面に沿って吸込み口に向かう水平流が形成される[(a), (b), (d)].		汚染質拡散性状(図-8. 12)		
4) 障害物から離れた領域では、ケース0とはほぼ同様の気流性状となる[(a), (d)の右側].		汚染質拡散性状(図-8. 12)		

8. 4 複数の箱型気流障害物を設置した場合の気流性状・汚染質拡散性状

実際のクリーンルーム内部に近い状況を想定し、室内の壁際及び室中央に箱型気流障害物が合計3個設置されたケース13の気流性状、汚染質拡散性状を図-8. 13、8. 14、表-8. 7に示す。

8. 4. 1 気流性状

壁側中央の吹出し気流の一部は壁際障害物上面に沿って流れた後、壁面に沿った上昇流となり天井面に達する。更に天井面に沿って流れた後、吹出し気流に誘引されて下降する。これらにより壁際障害物上部には天井面までの大きな循環流が形成される(図-8. 13(a))。壁際障害物前面は吹出し気流と床面からの上昇流が衝突し小さな渦を形成する(図-8. 13(a))。中央の障害物上面に吹付けた吹出し気流は四方に向かう水平流となる(図-8. 13(a))。この流れの一部は障害物上の吹出し気流間で上昇流となり(図-8. 13(b))、あたかも障害物を設置しないケース0の気流性状において床面がせり上がったような様相を呈する(図-8. 13(c))。また、この水平流の一部は隣接する吹出し気流部に達し、誘引されて下降する(図-8. 13(a))。これにより中央障害物と壁側障害物の間では循環流が形成され、中央障害物の前面・背面では一様に上昇流となる。本ケースの気流性状は壁際に障害物を設置したケース9ならびに吹出し口下に障害物を設置下ケース10の気流性状をそれぞれ合成した様相と解釈できる。

8. 4. 2 汚染質拡散性状

(1) 汚染質が点発生の場合

壁際障害物上部(A点)で汚染質が発生した場合(図-8. 14(a))、汚染質は室内の約半分の領域に分布し、壁側障害物上部では天井面まで高濃度となる。SVE1は2.6となり、ケース0, 1, 4よりかなり大きくなる。SVE2は1.8mとなりケース0(1.9m)とほぼ同様となる。

障害物間の中央(C点)で汚染質が発生した場合(図-8. 14(b))、汚染質は室内の約半分の領域に分布し、中央の障害物背面の循環流部分で高濃度となる。SVE1は1.5となり、ケース0(1.4)よりやや大きくなる。SVE2は2.4mとなりケース0(2.1m)よりかなり大きくなる。

室中央の障害物上部(E点)で汚染質が発生した場合(図-8. 14(c))、吹出し気流部を除く室全体に汚染質が分布するほか、中央障害物の上面及び前面・背面の循環流部分が高濃度となる。SVE1は2.0となり、ケース0、9～

12よりかなり大きくなる。SVE2は2.6mとなりケース0、9~12とはほぼ同様となる。

(2) 汚染質が面的に発生した場合

中央障害物上面で汚染質が発生した場合(図-8.14(d))、吹き出し気流部を除き室全体に汚染質が分布する。この場合、発生面近傍の薄い領域で特に高濃度となる以外は、比較的低濃度の汚染質が室内に一様に分布する。SVE1は1.3、SVE2は2.7mとなる。

障害物間の床面で汚染質が発生した場合(図-8.14(e))、汚染質は床面近傍の薄い領域および中央障害物前面・背面の循環流部に滞留する。この場合、各障害物上部は比較的清浄となる。SVE1は1.3、SVE2は2.9mとなる。

ウ) SVE3 (室内一様汚染質発生) の分布
SVE3の分布に関して(図-8.14(f))、天井付近及び壁際障害物上部の循環流部に高い値が分布する。

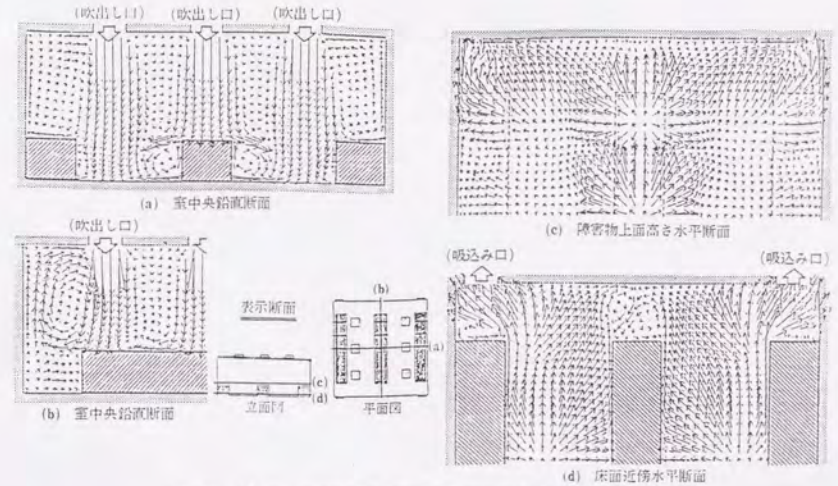


図-8.13 ケース3の気流性状(壁際・室中央に箱形障害物設置)

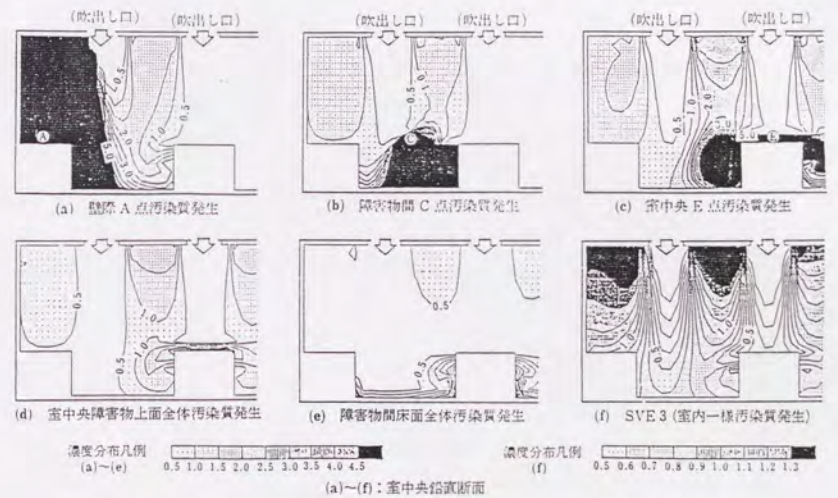


図-8.14 ケース3の汚染質拡散性状(壁際・室中央に箱形障害物設置)

表-8. 7. 気流性状と汚染質拡散性状の特徴

ケース13の気流性状(図-8. 13)		汚染質拡散性状(図-8. 14)		
図 番	汚染源	分布領域(高濃度領域)	関連する気流性状	
(a)	A	左側1/2(壁際空間)	左側1)	
(b)	C	左側1/2(障害物間)		
(c)	E	室全体(中央障害物上面, 前面・背面の循環流部)	左側3)	
(d)	中央障害物上面	室全体(中央障害物上面)		
(e)	障害物間床面	床面近傍(床面近傍)	左側2)	
(f)	SVE3	天井近傍ならびに障害物近傍循環流部で高濃度	左側3)	

1) 壁際障害物上部には長手方向を軸とする天井面までの大きな循環流が形成される(a).	ケース13の気流性状(図-8. 13) 1) 壁際障害物上部には長手方向を軸とする天井面までの大きな循環流が形成される(a). 2) 壁際障害物前面には吹出し気流と床面からの上昇流の衝突による小さな渦(a)と前面に沿って室隅角部の吹き込み口に向かう水平流が形成される(b). 3) 中央の障害物の前面および背面には循環流が形成される(a).
2) 壁際障害物前面には吹出し気流と床面からの上昇流の衝突による小さな渦(a)と前面に沿って室隅角部の吹き込み口に向かう水平流が形成される(b).	
3) 中央の障害物の前面および背面には循環流が形成される(a).	
汚染質拡散のまとめ	・中央障害物上部は吹出し気流のため清浄となる。 ・循環流部には汚染物が高濃度で滞留する。 ・汚染質が面発生の場合、発生面近傍で高濃度となる。

8. 5 換気効率指標の検討

(1) 室内平均濃度 (SVE3)

全タイプについて各点汚染質発生位置における室内平均濃度を表-8. 8中各欄上段に示す。室内平均濃度は、本室形状では壁側の汚染質発生の場合に大きな値となり、室の中央に行くに従いその値は小さくなる傾向を有する。また、気流障害物が増加するほど室内平均濃度は大きくなり、障害物設置により発生した汚染質が排出されにくくなる傾向を有する。

(2) 平均拡散半径

全タイプについて各点汚染質発生位置における平均拡散半径を表-8. 8中下段に示す。平均拡散半径は、本室形状では壁側の汚染質発生位置の場合に小さな値となり、室の中央に行くに従いその値は大きくなる傾向を有する。今回の解析タイプでは、平均拡散半径に関しての気流障害物の有無による有意な差は認められない。

(3) 室内一様汚染質発生

各タイプとも天井付近で高濃度となる。また、設置された障害物の周囲に循環流が形成される場合、その領域は高濃度となる。これらの領域に達する吹出し空気の到達時間(行程)は長く、汚染された空気の到達する可能性が高い。

表-8. 8 各ケースのSVE1とSVE2

発生位置 ケース No.	壁際 (A点)	吹出し 口下 (B点)	障害物間 中 (C点)	吹出し 気流間 (D点)	室中央 (E点)
ケース0	1.7 1.9m	1.3 1.9m	1.4 2.1m	1.5 2.1m	1.4 2.5m
ケース9	2.1 1.5m	—	—	—	1.6 2.6m
ケース10	—	1.9 2.1m	—	—	1.6 2.5m
ケース11	—	—	—	1.7 2.0m	1.5 2.4m
ケース12	1.4 1.5m	—	—	—	1.3 2.5m
ケース13	2.6 1.8m	—	1.5 2.4m	—	2.0 2.6m

注 各欄の上段：SVE1(無次元), 下段：SVE2(単位：[m])

8. 6 結論

生産装置等をモデル化した気流障害物を設置した乱流型クリーンルーム内の気流性状・汚染質拡散性状を主に数値シミュレーションにより解析した。解析により得られた知見は以下の通りである。

- (1) 本数値シミュレーション結果は流れ場の様相に関しては実験結果と良好な整合性を示す。一方、拡散場の様相に関しては全体的には実験結果と整合するものの、障害物周辺などの差分分割が充分細かくない部分において軽微な差異を生ずる。
- (2) 解析対象とした乱流型クリーンルームモデルでは、気流単位の境界に障害物が位置する場合、その流れ場への影響は極めて小さい。一方、境界以外の所に障害物が位置する場合、気流単位自体の配置には影響を与えないものの、障害物を有する気流単位内の気流性状には大きく影響を与える。
- (3) 気流障害物の設置により、その周囲の気流性状は複雑となる。これに伴い障害物近傍で発生した汚染質の排出経路も複雑になり、排出時間は長くなる。また、障害物の近傍に形成される循環流領域に到達する吹出空気の到達時間(行程)は長く、その空気が汚染されている可能性が高い。
- (4) 気流性状に対する障害物設置の影響が比較的小さい場合でも、汚染質拡散性状は障害物設置の影響を大きく受けることがあり注意が必要である。

* 第8章の参考文献

- 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4報-数値解析による生産装置などの気流障害物が
設置された室内流れ場・拡散場の検討
空気調和・衛生工学会論文集、NO.44、1990年10月
- 2) 村上周三、加藤信介、須山喜美
クリーンルーム内の気流性状に関する研究(その11)
室内に気流障害物を有する場合の気流性状・汚染質拡散性状の解析
日本建築学会大会学術講演梗概集、1985年10月
- 3) 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
(その17)
気流障害物を有する流れ場・拡散場に関する模型実験と数値解析
第6回空気清浄とコンタミネーションコントロール研究大会、1987年5月
- 4) 村上周三、加藤信介、須山喜美
第6回空気清浄とコンタミネーションコントロール研究大会予稿集
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4)
-気流障害物を有する流れ場・拡散場に関する模型実験と数値解析-
1987年5月27・28・29日
- 5) 加藤信介、村上周三、須山喜美、鈴木啓泰
層流型クリーンルームの気流性状・汚染質拡散性状に関する研究(その4)
-装置周辺気流に関する数値解析の検討-
日本建築学会大会学術講演梗概集、1987年10月、近畿
- 6) 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
(その17)
気流障害物を有する流れ場・拡散場に関する模型実験と数値解析
日本建築学会大会学術講演梗概集、1987年10月、近畿
- 7) 加藤信介、村上周三、須山喜美、中川浩之
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18)
気流障害物を有する流れ場・拡散場の数値解析
日本建築学会大会学術講演梗概集、1987年10月、近畿

- 8) 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
(その19)
気流障害物を有する流れ場・拡散場に関する模型実験と数値解析
空気調和・衛生工学会学術論文集、1987年10月6日~8日、東京
- 9) 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、(1986)、p.91

第9章 乱流型クリーンルーム内の気流性状 と汚染質拡散性状のまとめ

第9章 乱流型クリーンルーム内の気流性状・汚染質拡散性状のまとめ

本研究で行った系統的な乱流型クリーンルーム内の気流性状と汚染質拡散性状の解析により導出された結論は以下の通りである。

9.1 気流性状の解析手法

- (1) 乱流型クリーンルーム内の流れ場・拡散場を模型実験を併用した $k-\epsilon$ 型2方程式乱流モデルを用いた3次元気流数値シミュレーションにより解析した。両者の結果を比較した結果、整合性は良好であった。これにより、実験を併用する数値シミュレーションにより多数のクリーンルーム内の流れ場や拡散場の性状を詳細に予測することが可能であることが判明した。
- (2) 数値シミュレーションに適用される差分分割の粗密や差分スキームに関して検討を行い、本研究に必要十分な15cm程度の差分分割幅並びに各方程式の移流項差分スキームにはQUICKスキームが適切であることを導出した。

9.2 汚染質拡散性状の解析方法

- (1) 数値シミュレーションでは、汚染質発生等各種の条件を的確に変化させた検討が可能であり、パラメトリックな検討には特に有効である。また、換気効率指標等の算出することにより、室の換気特性などを定量的に把握することができ、より有効な換気計画を立案することが可能である。

9. 3 乱流型クリーンルーム内の気流性状

- (1) 乱流型クリーンルーム内の気流性状は、一つの吹出し噴流とその周囲の上昇気流を1単位とする気流単位が吹出し口の個数分合成された様相となる。これらの各気流単位は汚染質拡散に関しても緩やかな一つの閉じた系となっている。
- (2) 吹出し口に関する変更は、室内の気流単位の形成状況に大きな影響を及ぼす。吹出し口の削減により気流単位が消滅する場合、隣接する単位の領域が拡大する。吹出し風速の±30～50%程度のバラツキは、室内の気流単位の様相を大きく変化させる。特に、隣接する吹出し噴流に対し約半分の風速の吹出し噴流に関しては、形成される気流単位は吹出し口付近の小さなものとなる。風量の大きな噴流部には大きな気流単位が形成される。その気流単位内で汚染質が発生する場合、汚染質の平均拡散半径も大きくなる。
- (3) 吸込み口に関する変更は、室内の気流単位の形成状況にあまり影響を及ぼさない。しかし、吸込み口の削減により汚染質の排出経路が変わる場合には、汚染質の室内平均滞在時間や、吹出し空気の平均到達時間は大きく変化する。
- (4) 気流単位の境界に障害物が位置する場合、その流れ場への影響は極めて小さい。一方、境界以外の所に障害物が位置する場合、気流単位自体の配置には影響を与えないものの、障害物を有する気流単位内の気流性状には大きく影響を与える。

9. 4 乱流型クリーンルーム内の汚染質拡散性状

- (1) 気流単位内で発生した汚染質はその単位内によく拡散し、吹出し噴流上部を除き単位内には高濃度となる。また、気流単位間で汚染質が発生した場合、両側の単位に拡散する。
- (2) 室内に多数の気流単位を有する場合、個々の単位が複合されたさらに大きな系が形成されており、汚染質の分布はその大きな系の内部に留まる。一方、室内の汚染質の分布範囲は汚染質発生位置を有する気流単位と最も近い吸込み口の位置によりおおむね推測できる。すなわち、吸込み口に接しない室中央側の単位で汚染質が発生する場合、その単位から直近の吸込み口までの間に位置する各単位に汚染質が拡散する。
- (3) 気流障害物の設置により、その周囲の気流性状は複雑となる。これに伴い障害物近傍で発生した汚染質の排出経路も複雑になり、排出時間は長くなる。また、障害物の近傍に形成される循環流領域に到達する吹出し空気の到達時間(行程)は長く、その空気が汚染されている可能性が高い。

9. 5 乱流型クリーンルームの気流・汚染質拡散設計方法

- (1) 気流単位は汚染質拡散に関しても一つの閉じた系となっているため、気流単位の様相を把握することにより汚染質の分布範囲などに関してもある程度の子測を行うことが可能である。
- (2) 室内拡散場の検討に関して、点汚染源の場合の濃度分布算出に加え、各種の換気効率指標も算出することにより、さらに定量的な解析・評価が可能となる。
- (3) 千鳥状の吹出し口配置は、汚染質の排出に関し比較的効果的な吹出し口の配置方法である。
- (4) 吸込み風量の不均一により“偏った拡散場”が形成されている室内において、その上流側の汚染質発生は、汚染質の分布範囲が広がるため、好ましくない。この“偏った拡散場”の把握には室内一様発生の場合の濃度分布（吹出し空気の到達時間（行程）：SVE3）の検討が有効である。

9. 6 本研究成果の気流設計・汚染質拡散制御設計への利用方法

本項では本研究成果の利用方法を示す。

乱流型クリーンルームの設計過程では、吹出し・吸込み等の室内の大まかな条件を決定する①簡易設計段階、具体的な設計風量や機器等の使用を定める②詳細設計段階、設計された室内が所定の性能・使用を満たすか確認する③検証段階の3段階において、室内の状況が参照・検討される。これらの各段階に対する本研究成果の寄与を図-9. 1に示す。なお、これらは従来の設計手法にとってかわることを意図したものでなく、これらの不足な点を補間・改良することによる、より高精度・合目的なクリーンルーム室内設計を効率的に実現するための寄与を意図している。

(1) 簡易設計段階

①流れ場・汚染質拡散場のデータベースとしての利用

本研究において系統的に解析・提示された多数の流れ場や拡散場の状況、また、両者の関連を概観することにより、設計者は乱流型クリーンルーム内の流れ場・汚染質拡散場の状況、各種の室内条件の影響に関する基礎的な理解を得ことができ、この理解が気流性状を考慮することや室内に生じる汚染質の濃度分布を意識して有効な汚染質拡散制御を計画するための下地を醸成する。

②気流単位概念の利用（図-9. 2）

吹出し口の配置から気流単位の形成状況を容易に推察できる。これにより、設計者は以下に関する概要を即座に把握できる。

・汚染質の高濃度滞留域

発生した汚染質は、先ず発生位置を含む気流単位内に高濃度で拡散した後、別の気流単位に拡散する。設計者は、汚染質発生位置を含む気流単位を判断することで、高濃度の汚染質滞留域の概略を特定できる。また、これは局所排気などの計画を立案する根拠となる。

・汚染質の排出経路と分布範囲

吹出し・吸込み風量が均等の場合（乱流型クリーンルームでは、将来の生産ライン変更の可能性から、単純な室形状で、均等な吹出し・吸込みの場合が多い）、汚染質は汚染質発生のある気流単位から、直近の吸込み口の間に位置する気流単位に拡散する。設計者は、該当する吸込み口までの各気流単位を選定することで汚染質の排出経路およびそれに伴う汚染質の分布範囲の概略を判断でき、排出途上の汚染質による悪影響を回避できる。

③換気効率指標の値

本研究で示した換気効率指標の値そのもの、室内の場所や条件が変わった場合の変化の傾向、また、SVE3の分布図は、設計者にとって拡散場の様相の是非を具体的に理解するための大きな参考となる。また、生産機器（汚染質の発生源となる）の配置設計等に際し、設計内容の合理性を検討・提示するための根拠として利用できる。

④その他の知見

本研究で示した、千鳥状の吹出し口配置の有効性、机型障害物の効果、障害物周辺に生じる2次的な循環流の悪影響等の知見は、設計者が基礎知識としてそのまま利用できるものである。

(2) 詳細設計段階

①室内条件の変化の影響の理解

具体的な室内条件の決定に際して、設計者は先ず従来の設計手法（瞬時一様拡散の仮定により供給風量の算定を行なう等）を用いて基本的な条件を定める必要がある。次の段階では、各種の着目する条件の増減等の影響程度を考慮しながら室内条件の調整・決定が行なわれる。本研究で示した各種の室内条件の影響に関する結果は、基本的に定められた室内条件を調整・決定する際の設計者に対し有用な示唆を与えるものと考えられる。これにより従来の設計手法では至らなかった、基本条件の調整・増減することによる省エネルギーや信頼性の一層の確保等が可能となる。

②換気効率指標の算出

設計内容がある程度絞りこまれた段階で、設計者はこれらの室内条件の善し悪しを判断・選定する必要がある。判断・選定の段階では、室内条件等の設計案が数案となっているため、室内の流れ場・汚染質拡散場の数値解析を行ない、各種の換気効率指標を算出することが可能である。本研究で示した算出方法や評価方法に準じ、算出された換気効率指標の値より、設計者は各設計案の優劣を判断し、最適なものを選択することができる。すなわち、生産機器等や作業者のからの発塵による汚染が懸念されるような場合には、排気性能を示す換気効率指標SVE1（室内平均濃度）を参照することが有効であり、生産機器への給気や製品周囲の空気の清浄度等が問題にされる場合には換気効率指標SVE3（室内汚染質一様発生の場合の濃度分布；吹出し空気の平均到達時間（行程））を参照することが有効である。

(3) 検証段階

①設計結果の確認（室内気流・汚染質拡散解析）

設計結果に対し、本研究で示した方法に準じて室内気流・汚染質拡散の数値解析を行なうことにより、設計結果の妥当性の検証や内在する問題点の把握を行なうことができる。従来、これらの検証はクリーンルーム建設後に実測などにより行なわれているが、数値解析の利用により建設前の早い段階で、かつ詳細な情報を入手することが可能となる。また、得られる解析結果は、工業生産施設として宿命的な将来の室の用途変更や室内の生産ラインの変更などの可能性を検討する上でも極めて有用な情報を与える。

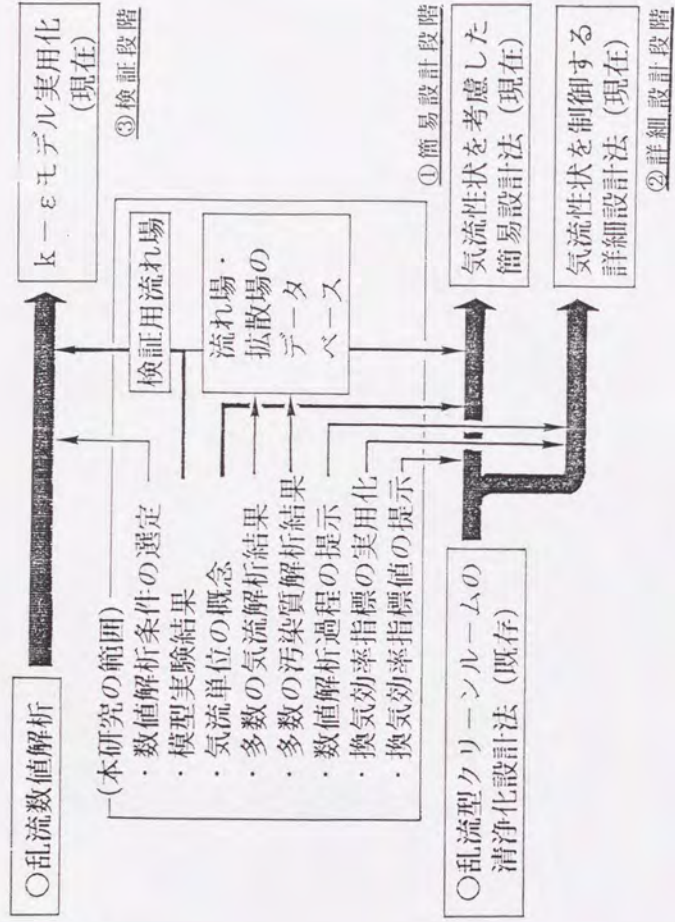


図-9.1 本研究成果の寄与

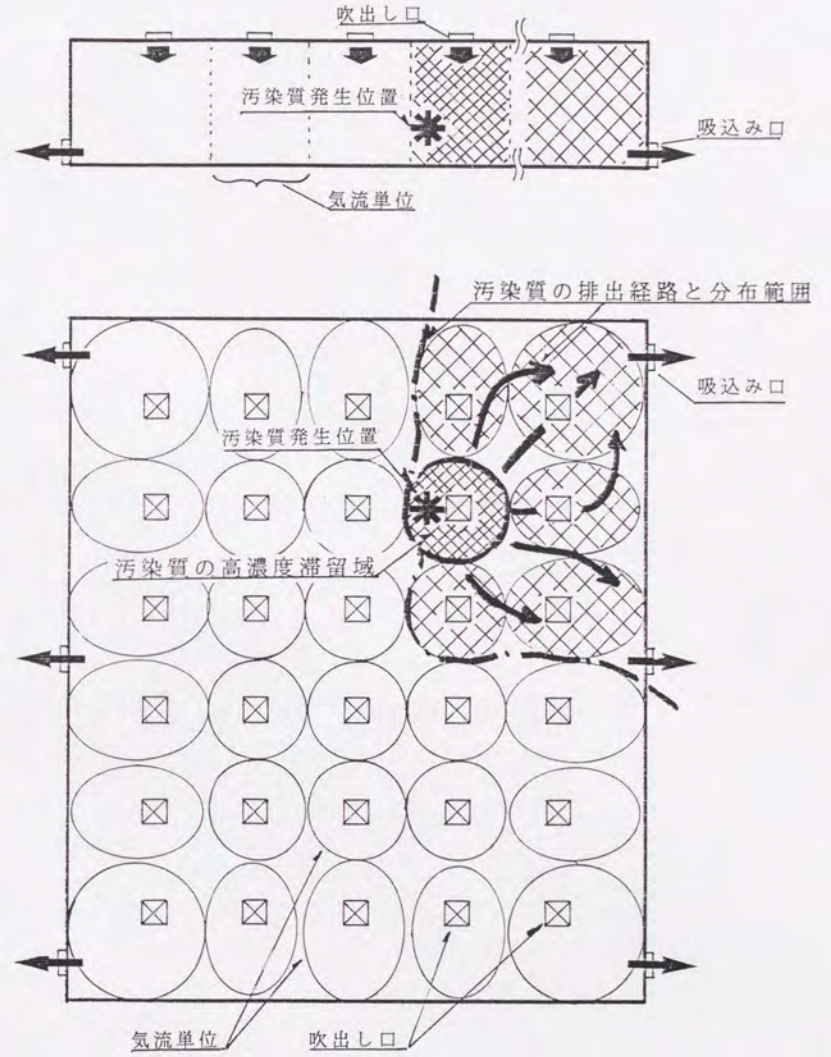


図-9.2 気流単位概念の利用

第10章 結語

第10章 結語

本研究は乱流型クリーンルームを対象として、模型実験を併用した数値シミュレーションにより流れ場と汚染質拡散場の性状の解明を行ったものである。多数の特徴ある室内モデルの解析により、流れ場・拡散場の基本的な様相のみならず、室内条件が気流性状や汚染質拡散性状に与える影響も詳細に把握された。これらの解析結果は、気流制御による室内環境計画立案のための基礎資料として位置付けられる。流れ場・拡散場の具体的な性状の記述は各章に譲るとして、本章では各章における主要な結論と今後の課題について述べる。

第1章では、序論として本研究の目的と特徴について示した。

第2章では、既往の模型実験手法と数値シミュレーションの概要を示すと共に、本研究で採用する流れ場・拡散場の解析手法が示された。

第3章では、本研究で解析される乱流型クリーンルームモデルの1つを対象として、流れ場・拡散場に関する模型実験結果と数値シミュレーション結果が比較され、数値シミュレーションの実施条件が定められた。また、本研究で用いられた数値シミュレーションの整合性の良好なことが示された。これを根拠として、以降の各章では、数値シミュレーションにより流れ場・拡散場の性状が詳細に解析されている。

第4章では解析対象の乱流型クリーンルームモデルの全容がそれぞれの着目点と共に示された。

第5章から第8章に於いては、多数の乱流型クリーンルーム内の流れ場・拡散場の性状が系統的に提示され、それぞれの着目点に対応した流れ場・拡散場の性質がまとめられた。

第5章は本研究中の核となる部分で、各種の単純形状の室内モデルの気流性状・汚染質拡散性状が解析された。これにより、乱流型クリーンルームの気流性状の特徴である'気流単位(吹出し噴流とその周囲の上昇流によって特徴づけられる気流性状の1つのまとまり)'の概念及び、室内全体の気流性状は気流単位が吹出し口の個数分の合成されたものであるとの考え方が新たに導出された。更に、汚染質拡散性状と気流単位の関係が分析され、'各気流単位の境界が汚染質の移流拡散の境界となること'、また、気流単位の構成状況を参照することにより室内全体の拡散場の様相が大略把握できるという考えが示された。

第6章から第8章はクリーンルーム設計者への寄与を考慮し、各種の室内条件の変化が気流性状・汚染質拡散性状に与える影響を示した。解析結果の考察に際しては、気流単位概念が随所に用いられ、複雑な流れ場・拡散場の様相が平易に解説されている。

第6章では、吹出し口・吸込み口位置が室内流れ場・拡散場と与える影響が詳細に提示された。また、室内の換気風量、吹出し口の配置と汚染質の滞留状況の関係が整理され、'同一の換気量の場合、千鳥状の吹出し口配置が好ましい'という方針が示された。

第7章では、吹出し・吸込み風量のアンバランスが室内流れ場・拡散場と与える影響が詳細に提示された。本章ではこれまでの気流単位と汚染質拡散の考察に加え、吸込み風量の偏りに起因する室内の広い範囲に亘る汚染質拡散現象を指摘し、本現象の把握には加藤・村上による換気効率指標SVE3が有効であるとの知見を示した。

第8章では、室内に設置される気流障害物が、室内流れ場・拡散場と与える影響が詳細に提示された。本章では気流障害物設置によりその周囲の気流性状が複雑となり、それに伴って汚染質排出経路が長くなることが示された。また、箱型と机型の障害物では机型障害物の方が汚染質の速やかな排出に関して有効であることが示された。

第9章では、本研究により得られた乱流型クリーンルーム内の流れ場・拡散場に関する各種の知見を整理し、一括提示した。

本研究では多数の室内モデルを解析し、流れ場・拡散場に関する普遍的な知識を導出するという立場から、必要とされる計算資源の比較的少ないk-ε型2方程式モデルによる気流解析を採用している。このため、本論文でも示しているように、概ねの解析結果は整合しているものの、厳密な整合という点では未だ問題を残している。また、現在では、ASM等のより高精度な解析モデルも提案・検証されてきており、昨今・将来の計算資源の伸長のもと、これらに基付きより高精度な流れ場・拡散場の解析を実施する必要性が容易に想起される。

一方、気流制御に基づく環境計画立案の重要性は広く認識されつつあるものの、クリーンルームにおける清浄度設計の多くは現在でも、室内を瞬時一様拡散とみなした手法が採用されている。本研究で示した気流数値シミュレーションや換気効率指標の算出は高級な技術の域にあり、これらを参照した環境設計が行われることは未だ希な状況にある。最適な室内環境実現のためにも、また、前述の高精度な流れ解析手法研究の工学的な必要性を援護するためにも、高精度な予測結果をより実務的な問題に適用可能とするような、中間的な気流設計技術(例えば、室内温熱環境設計における負荷計算プログラムのような役割)の開発や解析事例の広範・多数の提示が必要と考えられる。

謝辞

本論文は、筆者が東京大学生産技術研究所 受託研究員(昭和58年~59年)、民間等共同研究員(昭和60年~62年)として在籍中に取り組んできた研究成果を取りまとめたものであります。この間、東京大学生産技術研究所 教授 村上周三先生からは研究のあらゆる面に於いて、終始懇切丁寧なご指導を賜りました。また、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シミュレーションに関する親切丁寧なご指導を頂きました。また、東京大学生産技術研究所 助手 持田灯先生からは貴重なご意見を頂きました。

筆者が東京大学生産研究所 民間等共同研究員の期間、東京大学生産技術研究所のNST研究グループに参加する機会を頂き、東京大学生産技術研究所 教授 小林俊雄先生、東京大学生産技術研究所 教授 吉澤徹先生をはじめとするメンバーの方々から、乱流の数値シミュレーション手法に関して多くの貴重なご意見を頂きました。

拡散実験に関しては、東京電力(株) 田中俊彦氏、高圧ガス保安協会 附属研究所 難波三男氏のご指導を頂きました。大型計算機の利用に関しては、(株)フジタ 永野伸一郎氏に多大なる協力を頂きました。

第3章の気流可視化に関しては高砂熱学工業(株) 池鯉鮒悟氏にご協力を頂きました。

第7章の数値シミュレーション実施に際しては(株)間組 中川浩之氏のご協力を頂きました。

第8章の数値シミュレーションに関しては Karlsruhe大学のW. Rodi教授から有益なご助言を頂きました。

本論文をまとめるにあたり、(社)空気調和・衛生工学会 外山陽子女史、日本技研コンサルタント(株) 監査役 城内哲彦氏、(株)間組 技術研究所 研究第2部 部長 荻野馨氏、同所 課長 西野昭夫氏、同所 課長 高倉秀一氏に多大なるご援助を頂きました。

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。

1991年 5月

筆者が発表した論文、連名の論文

1. 木村建一、須山喜美
塩化リチウム溶液を用いた太陽熱涼房・給湯システムの提案
日本建築学会大会学術講演梗概集、1980年9月、近畿
2. 木村建一、須山喜美、田村富士雄
塩化リチウム水溶液を用いた太陽熱利用簡易涼房・給湯システムの実験研究
その1. システムの試作と実験による分析
日本建築学会大会学術講演梗概集、1981年9月、九州
3. 木村建一、須山喜美、田村富士雄、山崎慶太
塩化リチウム水溶液を用いた太陽熱利用簡易涼房・給湯システムの実験研究
その2. 再生器内の熱移動と物質移動の分析
日本建築学会大会学術講演梗概集、1981年9月、九州
4. 須山喜美、村上周三、田中俊彦、持田 灯
室内における物質の拡散と濃度変動に関する研究(その8)
実物の住宅居室における拡散実験Ⅳ-自然換気状態における爆発範囲
日本建築学会大会学術講演梗概集、1983年9月、北陸
5. 難波三男、村上周三、田中俊彦、須山喜美、持田 灯
室内における物質の拡散と濃度変動に関する研究(その9)
実物の住宅居室における拡散実験Ⅳ-室内に滞留するガスの排除方法
日本建築学会大会学術講演梗概集、1983年9月、北陸
6. 加藤信介、村上周三、須山喜美
クリーンルーム内の気流性状に関する研究(その5)
モデルクリーンルームにおける実験及び数値シミュレーションによる
基本的気流性状の検討
日本建築学会大会学術講演梗概集、1984年10月
7. 須山喜美、村上周三、加藤信介
クリーンルーム内の気流性状に関する研究(その6)
室形状、吹出口・吸込口位置が気流性状に及ぼす影響
日本建築学会大会学術講演梗概集、1984年10月
8. 村上周三、須山喜美、持田 灯、難波三男
室内に漏洩した可燃性ガスの拡散と排除に関する研究
その1 室内に漏洩した可燃性ガスの拡散について
高圧ガス VOL. 21、NO. 8、1984年
9. 村上周三、須山喜美、持田 灯、難波三男
室内に漏洩した可燃性ガスの拡散と排除に関する研究
その2 自然換気状態の室内における爆発範囲及び、滞留するガスの排除方法について
高圧ガス VOL. 21、NO. 9、1984年

10. 須山喜美、村上周三、加藤信介
クリーンルームにおける気流性状に関する研究
模型実験によるモデルクリーンルーム内の気流の解析
空気調和・衛生工学会学術論文集、1984年10月25日~27日、広島
11. 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
-(13) 特に室形状・吹出口個数と床面からの上昇流の関係について-
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、
1985年2月27日、28日、3月1日
12. 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
-数値シミュレーションによる気流性状及び汚染質拡散性状の解析-
第19回空気調和・冷凍連合講演会講演論文集、1985年4月11~12日、東京
13. 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
-(その7) 数値シミュレーションによる気流性状及び汚染質拡散性状の解析-
生産研究第37巻5号、1985年5月
14. 須山喜美、村上周三、加藤信介
クリーンルーム内の気流性状に関する研究(その8)
吹出口の配置、吸込口設置高さおよび上昇流について
日本建築学会関東支部研究報告集、1985年
15. 加藤信介、村上周三、須山喜美
クリーンルーム内の気流性状に関する研究(その9)
数値シミュレーションによる気流性状・汚染質拡散性状の解析
日本建築学会関東支部研究報告集、1985年
16. 須山喜美、村上周三、加藤信介
クリーンルーム内の気流性状に関する研究(その12)
吹出口の配置、吸込口設置高さおよび上昇流について
空気調和・衛生工学会学術論文集、1985年9月30日~10月2日、宇都宮
17. 加藤信介、村上周三、須山喜美
クリーンルーム内の気流性状に関する研究(その13)
吹出口の配置、吸込口設置高さおよび上昇流について
空気調和・衛生工学会学術論文集、1985年9月30日~10月2日、宇都宮
18. 加藤信介、村上周三、須山喜美
クリーンルーム内の気流性状に関する研究(その10)
室形状が変化した場合の気流性状・汚染質拡散性状の解析
日本建築学会大会学術講演梗概集、1985年10月

19. 須山喜美, 村上周三, 加藤信介
クリーンルーム内の気流性状に関する研究 (その11)
室内に気流障害物を有する場合の気流性状・汚染質拡散性状の解析
日本建築学会大会学術講演梗概集, 1985年10月
20. 村上周三, 加藤信介, 須山喜美
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5報)
吹き出し・吸い込みを持つ室内気流の診断 (その4)
日本建築学会大会学術講演梗概集, 1985年10月
21. 村上周三, 加藤信介, 須山喜美
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2報)
吹出・吸込のある室内気流の数値解析診断
その1-吸込口周辺の振動解並びに室内の対称性を利用した計算領域削減に関する検討
日本建築学会関東支部研究報告集, 1985年度
22. 加藤信介, 村上周三, 須山喜美
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3報)
吹出・吸込のある室内気流の数値解析診断
その2-吹出噴流に関するメッシュ分割の粗密と流入乱流量の検討
日本建築学会関東支部研究報告集, 1985年度
23. 村上周三, 加藤信介, 須山喜美
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4報)
吹出・吸込のある室内気流の数値解析診断
その3-速度及び乱流量の壁境界条件の検討
日本建築学会関東支部研究報告集, 1985年度
24. 村上周三, 加藤信介, 須山喜美
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6報)
吹き出し・吸い込みを持つ室内気流の診断 (その5)
空気調和・衛生工学会学術論文集, 1985年9月30日~10月2日, 宇都宮
25. 村上周三, 須山喜美
トンネル掘削時の切羽付近の換気手法の最適化に関する数値シミュレーション
日本建築学会関東支部研究報告集, 1986年
26. 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 (その14)
数値シミュレーションによる気流障害物がある場合の気流性状および
汚染質拡散性状解析
生産研究第38巻1号, 1986年1月

27. 村上周三, 加藤信介, 須山喜美
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
-吹き出し・吸い込みを持つ室内気流の場合-
生産研究第38巻1号, 1986年1月
28. 村上周三, 加藤信介, 須山喜美
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
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2)
-特に数値シミュレーションによる気流性状の解析について-
1986年4月9・10・11日
29. 村上周三, 加藤信介, 須山喜美
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
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3)
-特に室形状が変化した場合の汚染質拡散性状解析について-
1986年4月9・10・11日
30. 村上周三, 加藤信介, 須山喜美, 鈴木啓泰
層流型クリーンルームの気流性状・汚染質拡散性状に関する研究 (その3)
装置周辺気流に関する数値解析の試み
日本建築学会大会学術講演梗概集, 1986年8月, 北海道
31. 須山喜美, 村上周三, 加藤信介
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16)
吹出口個数・位置と拡散パターン・清浄度に関する数値解析
日本建築学会大会学術講演梗概集, 1986年8月, 北海道
32. 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9報)
移流項差分に関するQUICKスキームと各種スキームの比較-その1
空気調和・衛生工学会学術論文集, 1986年10月2日~10月4日, 新潟
33. 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10報)
移流項差分に関するQUICKスキームと各種スキームの比較-その2
空気調和・衛生工学会学術論文集, 1986年10月2日~10月4日, 新潟
34. 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
-移流項差分へのQUICKスキーム適用に関する検討-
生産研究第38巻12号, 1986年12月
35. 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
-吹出口削減が拡散場に及ぼす影響の数値シミュレーション-
生産研究第38巻12号, 1986年12月

36. 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 (その4)
気流障害物を有する流れ場・拡散場に関する模型実験と数値解析
第6回空気清浄とコンタミネーションコントロール研究大会、1987年5月
37. 加藤信介、村上周三、須山喜美
第6回空気清浄とコンタミネーションコントロール研究大会予稿集
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4)
-気流障害物を有する流れ場・拡散場に関する模型実験と数値解析-
1987年5月27・28・29日
38. 村上周三、加藤信介、鈴木啓泰、須山喜美、
層流型クリーンルームの気流性状・汚染質拡散性状に関する研究 (その4)
-装置周辺気流に関する数値解析の検討-
日本建築学会大会学術講演梗概集、1987年10月、近畿
39. 須山喜美 村上周三、加藤信介
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17)
気流障害物を有する流れ場・拡散場の模型実験と数値解析
日本建築学会大会学術講演梗概集、1987年10月、近畿
40. 須山喜美 村上周三、加藤信介、中川浩之
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18)
気流障害物を有する流れ場・拡散場の数値解析
日本建築学会大会学術講演梗概集、1987年10月、近畿
41. 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 (その19)
気流障害物を有する流れ場・拡散場に関する模型実験と数値解析
空気調和・衛生工学会学術論文集、1987年10月6日～8日、東京
42. 須山喜美 村上周三、加藤信介、中川浩之
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20)
吹出・吸込風量にバラツキのある流れ場・拡散場に関する数値解析
空気調和・衛生工学会学術論文集、1987年10月6日～8日、東京
43. S. MURAKAMI, S. KATO, Y. SUYAMA
THREE-DIMENSIONAL NUMERICAL SIMULATION OF TURBULENT AIRFLOW
IN A VENTILATED ROOM BY MEANS OF A TWO-EQUATION MODEL,
ASHRAE TRANSACTIONS, 1987, Vol. 93, Part 2.
44. 村上周三、加藤信介、須山喜美、中川浩之
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
-室内障害物および給排気分配のバラツキの影響の数値解析-
生産研究第40巻1号、1988年1月

45. 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-数値シミュレーションと模型実験の対応および
基本的な室形状における流れ場・拡散場の解析
空気調和・衛生工学会論文集、NO. 37, 1988年6月
46. 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2報-数値シミュレーションによる室内拡散場の詳細な検討
空気調和・衛生工学会論文集、NO. 37, 1988年6月
47. 村上周三、加藤信介、須山喜美
移流項差分における一次精度風上、QUICK, 中心差分スキーム等の比較検討
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、1988年8月
48. S. MURAKAMI, S. KATO, Y. SUYAMA
NUMERICAL AND EXPERIMENTAL STUDY ON TURBULENT DIFFUSION
FIELDS IN CONVENTIONAL FLOW TYPE CLEAN ROOMS,
ASHRAE TRANSACTIONS, 1988, Vol. 94, Part 2.
49. 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3報-吹出し口・吸込み口の配置が変化した場合の流れ場・拡散場の数値解析
空気調和・衛生工学会論文集、NO. 40, 1989年6月
50. 高倉秀一、須山喜美
ドブラーソーダによる大気境界層の風の観測
その1 既往の計測器との比較並びに風速の鉛直分布の例
日本建築学会大会学術講演梗概集、1990年10月、中国
51. SHUZO MURAKAMI, SHINSUKE KATO, YOSHIMI SUYAMA
NUMERICAL STUDY ON DIFFUSION FIELD AS AFFECTED BY ARRANGEMENT OF
SUPPLY AND EXHAUST OPENING IN CONVENTIONAL FLOW TYPE CLEAN ROOM,
ASHRAE TRANSACTIONS, 1989, Vol. 95, Part 2.
52. 須山喜美、高倉秀一
屋外気流数値解析の実用化に関する研究
その1. 風洞実験との比較並びに問題点の整理
日本建築学会大会学術講演梗概集、1990年10月、中国
53. 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4報-数値解析による生産装置などの気流障害物が設置された
室内流れ場・拡散場の検討
空気調和・衛生工学会論文集、NO. 44, 1990年10月

5 4. 須山喜美、高倉秀一

屋外気流数値解析の実用化に関する研究

その2. 風洞実験との比較並びに実施細目の考察

日本風工学会誌、第47号、平成3年4月

5 5. 高倉秀一、須山喜美、

ドブラーソーダによる気境界層の風の観測

その2. 既往の計測器との比較と大阪・埼玉における平均風速の鉛直分布の例

日本風工学会誌、第47号、平成3年4月

5 6. SHUZO MURAKAMI, SHINSUKE KATO, YOSHIMI SUYAMA

NUMERICAL STUDY OF FLOW AND CONTAMINANT DIFFUSION FIELD AS AFFECTED
BY FLOW OBSTACLES IN CONVENTIONAL FLOW TYPE CLEAN ROOM,
ASHRAE TRANSACTIONS, 1990, Vol.95, Part2.

参考論文

・本論文全体の独文要約(図表は割愛)

Numerische und experimentelle Untersuchung über
Strömungs- und Diffusionsfelder in Räumen

Yoshimi Suyama *1, Shuzo Murakami *2, Shinsuke Kato *2

*1: Technical Research Institute

HAZAMA CORPORATION

4-17-23 Honmachi-nishi, Yono-shi, Saitama 338

Japan

*2: Institute of Technical Science

University of Tokyo

22-1 Roppongi 7-chome, Minato-ku, Tokyo 106

Japan

ABRISS

Turbulenzströmungsfelder von Geschwindigkeit und
Diffusion in verschiedenartigen mechanisch belüfteten
Räumen werden präzise analysiert, und zwar sowohl durch
Modellexperimente als auch durch numerische Simulation
auf Basis des $k-\epsilon$ Zwei-Gleichungen-Turbulenzmodells. Auf
Simulation gestützte detaillierte Analysen der
Schmutzstoffdiffusion erlauben es, die Strukturen der
Geschwindigkeits- und Diffusionsfelder in Räumen
eindeutig zu verstehen.

Die Strömungsfelder in solchen Räumen, wie sie hier
analysiert werden, charakterisieren sich hauptsächlich
durch den Einlaßstrom und die in seinem Umfeld
aufsteigenden Ströme. Die Kombination eines Strahls und
der ihn umgebenden Ströme bildet eine "Strömungseinheit".

Das Gesamtgeschwindigkeitsfeld und das resultierende Diffusionsfeld von Schmutzstoffen in einem Raum lassen sich als serielle Kombinationen dieser "Strömungseinheiten" gut im Modell darstellen.

Die Raumluftverteilung wird von der Anordnung von Einlaßöffnungen und möglicherweise auch der Auslaßöffnungen erheblich beeinflusst. Der Einfluß dieser Anordnungen auf die Strömungsfelder wird untersucht. Wenn die Anzahl von Einlaßöffnungen verringert wird, verschwinden die ihnen entsprechenden Strömungseinheiten, und die verbleibenden Strömungseinheiten dehnen sich aus. Eine Veränderung in der Anordnung oder in der Anzahl der Auslaßöffnungen beeinflusst kaum das gesamte Strömungsfeld. Solche Veränderungen haben allerdings erheblichen Einfluß auf das Schmutzstoffdiffusionsfeld. Die in einem gegebenen Raum angebrachten Gerätschaften haben großen Einfluß auf das Strömungsfeld. Untersucht werden daher auch die Luftstromverteilung und das Schmutzstoffdiffusionsfeld in Räumen mit verschiedenartig angeordneten Strömungshindernissen. Im ganzen betrachtet bleibt der Einfluß von Strömungshindernissen auf das gesamte Strömungsfeld auf ein bestimmtes Maß beschränkt; allerdings ist der Einfluß auf die "Strömungseinheit" signifikant.

NOMENKLATUR

- C_{μ}, C_1, C_2 = Empirische Konstanten im Turbulenzmodell (siehe Tabelle 2)
- C = Mittlere Schmutzstoffkonzentration
- C_0 = Von der Auslaßöffnung definierte repräsentative Konzentration
- E = Empirische Konstante im Logarithmengesetz, im Falle einer glatten Wand 9,0
- h = Intervall finiter Differenz
- h_0 = Länge von der soliden Wandfläche zur Mitte der Fluidzelle der nächstliegenden Wand
- k = Kinetische Turbulenzenergie
- l = Längenskala der Turbulenz
- L_0 = Von der Auslaßöffnungsbreite definierte repräsentative Länge
- P = Mittlerer Druck
- q = Schmutzstoffbildungsrate
- Q = Luftwechsellvolumen
- SVE = Skala für Belüftungseffizienz
- SVE1, Durchschnittskonzentration im Raum
- SVE2, Mittlerer Diffusionsradius
- SVE3, Konzentration im Fall von im ganzen Raum uniformer Schmutzstoffbildung
- U_i, U_j = Komponenten des mittleren Geschwindigkeitsvektors
- U_0 = Durch die Zufuhrluftstrahl-Geschwindigkeit definierte repräsentative Geschwindigkeit
- ε = Turbulenzdissipationsrate
- κ = Von-Karman-Konstante 0,4
- ρ = Fluiddichte
- ν = Kinematische Molekularzähigkeit
- ν_t = Kinematische Wirbelzähigkeit
- $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ = Prandtl/Schmidt-Zahl für Turbulenz von k, ε, C (siehe Tabelle 2)

1. EINLEITUNG

Das Luftstrombild in einem Raum wird hauptsächlich von der Form des Raums und der Anzahl von Einlaßöffnungen bestimmt. Der Luftstrom für solch einen Raum läßt sich daher nur dann präzise bestimmen, wenn man jeden Raum separat analysiert. Es ist allerdings auch wohl bekannt, daß den Strömungsfeldern solcher Räume viele Eigenschaften gemeinsam sind, besonders dann, wenn die Einlaßöffnungen an der Decke angebracht sind. In der vorliegenden Untersuchung werden die Strömungsfelder und resultierenden Diffusionsfelder von Schmutzstoffen in Räumen, wo die Einlaßöffnungen sich an der Decke befinden, genau analysiert.

Die Verteilung der Schmutzstoffdiffusion ist ein nützliches Mittel zum Verständnis des Diffusionsfelds. Allerdings kann das Diffusionsfeld allein nicht ausreichende Informationen zur Auswertung der Belüftungseffizienz ergeben, weil bei zwei gegebenen Schmutzstoffdiffusionsbildern oft schwer zu ersehen ist, welches davon das bessere ist. Wir brauchen daher einen einfachen Index, der die Charakteristiken des Diffusionsbilds als quantitativen Wert ausdrückt. Kato und Murakami (1988) haben ein neues Konzept der Belüftungseffizienz für die Diffusionsfelder von Schmutzstoffen vorgeschlagen und eine Methode vorgelegt, mit der sich die verschiedenen Verteilungen der Schmutzstoffkonzentration als Ganzes schätzen und die Differenzen der Belüftungseffizienz auswerten lassen. Wir werden hier das neue Konzept für Belüftungseffizienz kurz

zusammenfassen und auf die Diffusionsfelder in den zur Diskussion anstehenden Räumen anwenden.

Wie oben erwähnt wird das Luftstrombild in einem Raum hauptsächlich von der Form des Raums und der Anzahl der Einlaßöffnungen bestimmt. In der vorliegenden Untersuchung wird der Einfluß der Anordnung und der Anzahl der Einlaß- und der Auslaßöffnungen auf die Strömungs- und Diffusionsfelder in Räumen sowie die Wirkungen der Strömungshindernisse unter dem Gesichtspunkt der Strömungsstruktur und der Belüftungseffizienz analysiert.

Die numerische Simulation eines turbulenten Luftstroms erlaubt uns die präzise Analyse der Strömungs- und Diffusionsfelder in einem Raum (Murakami et al. 1987). Es wurde bereits bestätigt, daß die Korrespondenz zwischen experimenteller und numerischer Simulation sowohl für die Geschwindigkeitsvektoren und die numerische Konzentration ziemlich gut ist. Die Analyse mit numerischer Methode ist bei parametrischen Untersuchungen äußerst fruchtbar. Die Einflüsse verschiedener Strömungsbedingungen auf die Strömungs- und Diffusionsfelder werden hier parametrisch analysiert. In der vorliegenden Untersuchung werden Strömungsfelder und Schmutzstoffdiffusionsfelder deswegen hauptsächlich mit Hilfe von numerischer Simulation examiniert.

2. ANALYSE VON MODELLRÄUMEN

In der vorliegenden Untersuchung werden acht Arten von Räumen zur Analyse verwendet. In Tabelle 1 werden die Spezifikationen dieser Räume aufgeführt. Diese Räume dürfen als Modelle von konventionellen Strömungs-

Reinräumen angesehen werden. Längen- und Geschwindigkeitsskalen werden durch Teilung mit den repräsentativen Werten, d.h. der Breite der Einlaßöffnung L_0 und der Einlaßöffnungsgeschwindigkeit, entdimensionalisiert. Abbildung 1 zeigt die Planebenen und Querschnitte dieser 8 Raumarten. Die Quellenpunkte des Schmutzstoffs befinden sich unter der Einlaßöffnung nahe der Wand bzw. in der Raummitte. Ihre Höhe vom Boden wurde in beiden Fällen als dimensionsloser Wert bei 1,25 festgelegt. Eine weitere Schmutzstoffquelle befindet sich vor der Einlaßöffnung, wo die Höhe über dem Boden 0,5 beträgt. Da der Schmutzstoff in der vorliegenden Untersuchung als passive Skalargröße angenommen wird und insofern keine Auswirkung auf Impulsgleichungen hat, wird sein Transport oder seine Diffusion völlig vom Luftstrom gesteuert. Strömungsfelder und resultierende Diffusionsfelder werden als Dauerzustände angenommen. Die Schmutzstoffbildungsrate wird ebenfalls als konstant angenommen.

3. MODELLEXPERIMENTE

Modellexperimente wurden mit Hilfe von maßstäblichen Modellen durchgeführt. Die repräsentative Länge, die Breite der Einlaßöffnung L_0 , wurde in allen Raummodellen als 0,1 m gesetzt. Die Geschwindigkeit des Strahls von der Einlaßöffnung U_0 wurde mit 6 m/s festgesetzt. Die Reynolds-Zahl des Zufuhrluftstrahls $U_0 L_0 / \nu$ ist $4,2 \times 10^4$. Die Luftgeschwindigkeit wurde mit einem Tandem-Hitzdraht-Anemometer gemessen, womit die Vektorkomponenten von Wirbelströmung ermittelt werden konnten (Murakami et al. 1980).

Die Verteilung der Schmutzstoffkonzentration wird durch ein Spürgas-Diffusionsexperiment untersucht. Da Äthylen (C_2H_4), dessen Dichte nahezu gleich ist wie die der Luft, als Spürgas eingesetzt wird, kann die Auftriebswirkung des Spürgases vernachlässigt werden. Seine Konzentration wird mittels FID-Gaschromatographie gemessen.

4. NUMERISCHE SIMULATIONSMETHODE

Modellgleichungen (3-D k- ϵ Zwei-Gleichungen-Turbulenzmodell) sind in Tabelle 2 aufgeführt. Die Grenzbedingungen sind in Tabelle 3 dargestellt. Verschiedenartige Grenzbedingungen an der soliden Wand sind in verschiedenen Problemen von technischen Applikationen der numerischen Methode aufgestellt worden. Einige Grenzbedingungen wurden mit Hilfe des Konzept des Logarithmengesetzes (Launder et al. 1974; Chieng et al. 1980; Rodi 1984) abgeleitet. Die vom Potenzgesetz des Geschwindigkeitsprofils abgeleitete Grenzbedingung der soliden Wand wurde angewandt (Autoren siehe Tabelle 3). Letzteres ist sehr einfach und hat zufriedenstellende Ergebnisse gezeitigt (Murakami et al. 1987; Murakami et al. 1988). Die Differenz bei den Simulationsergebnissen zwischen Logarithmengesetz und Potenzgesetz wurde untersucht und als vernachlässigbar gering bewiesen (Kato et al. 1988b; Nagano et al. 1988). In diesem Zusammenhang wird hier die vom Potenzgesetz des Geschwindigkeitsprofils abgeleitete Grenzbedingung der soliden Wand angewandt. Die Strömungsfelder in Räumen, die wie in Abbildung 2 maschenartig unterteilt sind, lassen sich durch die

finite Differenzmethode lösen. Daraus folgt die bei Murakami et al. (1987) vorgestellte numerische Simulationsmethode. Nachdem die Raumströmungsfelder erhalten wurden, konnten die Schmutzstoff-Diffusionsfelder berechnet werden, indem man solche Eigenschaften von Strömungsfeldern wie die Verteilung von Geschwindigkeitsvektoren und Wirbelzähigkeit anwandte. Die simulierten Strömungsfelder sind aufgrund numerischer Instabilität nicht völlig dauerhaft und symmetrisch. Die Asymmetrie der Strömungsfelder ist allerdings äußerst gering und darf vernachlässigt werden. Die berechneten Schmutzstoff-Diffusionsfelder sind in Übereinstimmung mit den Strömungsfeldern also ebenfalls geringfügig asymmetrisch.

5. AUSDRUCKSVERFAHREN FÜR SCHMUTZSTOFF-DIFFUSIONSFELDER UND DEFINITION VON SVE1,2,3

In der vorliegenden Untersuchung werden Schmutzstoff-Diffusionsfelder mit vier Verfahren dargestellt:

1. Verteilung der Schmutzstoffkonzentration im Fall einer Punktquelle: diese Verteilung gewährt intuitives Verständnis des Schmutzstoff-Diffusionsfelds in einem Raum.
2. Raumdurchschnittskonzentration: die erste Skala für Belüftungseffizienz (SVE1). Dieser Wert ist proportional zur durchschnittlichen Anwesenheitsdauer der Schmutzstoffe im Raum und zeigt an, wie schnell die im Raum gebildeten Schmutzstoffe durch das Strömungsfeld ausgestoßen werden.

Diese Tatsache läßt sich wie folgend erklären. Wenn die gebildeten Schmutzstoffe länger brauchen, um durch die Auslaßöffnung abgezogen zu werden, ist es sicher, daß im Raum mehr Schmutzstoffe vorhanden sind und zwar trotz der konstanten Bildung und Ausstoßung von Schmutzstoffen. Abbildung 3 zeigt die Veränderung des Werts von SVE1 in Abhängigkeit von der Quellenposition. Falls die Schmutzstoffe in der Nähe der Auslaßöffnung gebildet werden, bei Punkt C, werden sie ungehindert ausgestoßen und der Wert von SVE1 darf mit Sicherheit als äußerst klein erwartet werden. Falls die Schmutzstoffe allerdings in der Umwälzströmung gebildet werden, also bei Punkt B, bleiben sie wahrscheinlich länger im Raum, weshalb der Wert von SVE1 ansteigt.

3. Mittlerer Radius der Diffusion: die zweite Skala der Belüftungseffizienz (SVE2). Dieser Wert repräsentiert die durchschnittliche Raumverteilung. Abbildung 3 zeigt die Veränderung des Werts von SVE2 in Abhängigkeit von der Quellenposition. Falls die Schmutzstoffe in der Nähe der Auslaßöffnung gebildet werden, bei Punkt C, werden sie ungehindert ausgestoßen und der Wert von SVE2 darf mit Sicherheit als äußerst klein erwartet werden. Falls die Schmutzstoffe allerdings an der Einlaßöffnung gebildet werden, also bei Punkt A, diffundieren sie im ganzen Raum, weshalb also der Wert von SVE2 am größten sein wird.

4. Konzentration im Falle von im ganzen Raum uniformer Schmutzstoffbildung: die dritte Skala der Belüftungseffizienz (SVE3). An einem gegebenen Punkt im Raum ist dieser Wert proportional zur mittleren

Durchlaufzeit der Zufuhrluft zu diesem Punkt. Ein hoher Wert dieser Skala bezeichnet eine hohe Wahrscheinlichkeit von Luftverschmutzung, weil die Luftmasse von der Einlaßöffnung bis zu diesem Punkt einen langen Weg durchlaufen muß. Diese Situation wird in Abbildung 4 angezeigt.

Einzelheiten dieser Skalen werden von Kato et al. (1988a) beschrieben.

6. DIMENSIONSLOSE UNTERSUCHUNG DER KONZENTRATION (MODELLE 1 UND 2)

In der vorliegenden Untersuchung wird die Konzentration dimensionslos, wenn man eine Teilung durch den Wert von C_0 vornimmt, der mittleren Schmutzstoffkonzentration aller Auslaßöffnungen. Der Wert von C_0 ist notwendigerweise gleich dem Verhältnis der Schmutzstoffbildungsrate und der Zufuhrluftvolumengeschwindigkeit. Der Wert von C_0 kann je nach Typ des Raums verändert werden, worin das Verhältnis von Bildungsrate und Zufuhrluftvolumengeschwindigkeit geändert wird. Es werden also zwei Arten (Modelle 1 und 2) von dimensionsloser Konzentration angewandt. Modell 1 wird als die Konzentration definiert, die die durch den individuellen Wert C_0 jeder Raumart entdimensionalisiert wird. In Modell 2 wird zur Entdimensionalisierung allgemein der Wert C_0 eines Grundtyps angewandt. Sowohl Modell 1 als auch Modell 2 sind für die verschiedenen Analysen von Diffusionsfeldern wichtig.

Die Werte von SVE1 werden im allgemeinen mit den durch die numerische Simulation gegebenen dimensionslosen Daten von Modell 1 berechnet, weil diese Skala die individuellen Eigenschaften jedes Diffusionsfelds ausdrückt.

Modell 1 eignet sich für den Vergleich der verschiedenen Diffusionsfelder allerdings nicht, weil der repräsentative Wert von C_0 ihnen nicht gemein ist. Wenn wir zwei Diffusionsfelder dimensionsloser Konzentration vergleichen wollen, muß der Wert von C_0 beiden gemein sein. Falls die zur Entdimensionalisierung angewandte repräsentative Konzentration identisch ist, können die beiden Diffusionsfelder dimensionsloser Konzentration direkt miteinander verglichen werden. Zu diesem Zweck wurde der Wert von C_0 für die Grundart oft als gemeine repräsentative Konzentration verwendet. Diese dimensionslose Konzentration wurde als Modell 2 definiert.

7. KORRESPONDENZ ZWISCHEN EXPERIMENT UND SIMULATION

7.1 Strömungsfeld

Wie in den Abbildungen 5 (a) und (c), 7 (a) und (c) sowie 15 (a) und 16 (a) gezeigt, korrespondieren die Resultate der Simulation des Strömungsfelds gut mit den Resultaten des Experiments. Abbildung 5 (a) und (c) zeigen einen Vergleich der Simulationsresultate mit den Experimentresultaten der Verteilung der Geschwindigkeitsvektoren für einen Raum des Typs 1. Abbildung 7 (a) und (c) zeigen einen Vergleich für den Fall von Typ 2. Detaillierte Vergleiche werden bei Murakami et al. (1988) angeführt.

7.2 Diffusionsfeld

Wie in den Abbildungen 5 (b) und (d), 7 (b) und (d), 15 (b) und 17 (a) dargestellt, korrespondieren die Ergebnisse der Simulation eines Schmutzstoff-Diffusionsfelds gut mit den Resultaten des Experiments. Obwohl die Konturlinien der Konzentration nicht genau gleich sind, werden die Hauptcharakteristika des Hochkonzentrationsbereichs gut wiedergegeben; das heißt, die Form des Hochkonzentrationsbereichs, des Niedrigkonzentrationsbereichs unter der Einlaßöffnung usw. Das Ergebnis der Simulation scheint aber mehr diffus als dasjenige des Experiments zu sein, weshalb die Werte der Schmutzstoffkonzentration für solche Bereiche, wo die Konzentration hoch ist, oft kleiner sind als die aus Experimenten resultierenden, bzw. für Bereiche, wo die Konzentration niedrig ist, oft größer.

8. STRÖMUNGS- UND DIFFUSIONSFELDER FÜR TYP 1 (EINE EINLASSÖFFNUNG, Abbildungen 5, 6)

8.1 Im Fall, wo Schmutzstoffe unter der Einlaßöffnung gebildet werden

Das Strömungsfeld ist in Abbildung 5 (c) und (e) dargestellt. Der Strahl von der Einlaßöffnung beaufschlagt den Boden und divergiert zur Wand. Die divergierten Strömungen erreichen die Seitenwände und werden zur Decke hin gewendet. Die Verteilung der Konzentration in dem Fall, wo die Schmutzstoffe im Zufuhrluftstrahl gebildet werden, wird in Abbildung 5 (d) und (f) dargestellt. Der Quellenpunkt der Schmutzstoffe

ist darin mit A bezeichnet. Die Konzentration ist in den Bereichen zwischen Quelle und Boden sehr hoch. Der Wert der Konzentration ist allerdings über den ganzen Raum eher uniform und beträgt mehr als 0,5 (dimensionsloser Wert), ausgenommen im Bereich unmittelbar unterhalb der Einlaßöffnung, wo er sehr rein ist (Abbildung 5 (d)). Die Raumdurchschnittskonzentration SVE1 ist 0,9 und der mittlere Radius der Diffusion, SVE2, ist 2,8

(entdimensionalisiert durch L_0), was 29% der relevanten Länge des 8,4 großen Raums ist. Die relevante Länge des Raums wird als Quadratwurzel der Summe des Quadrats jeder der drei Abmessungen des Raums definiert.

8.2 Im Falle von Schmutzstoffen, die zwischen Zufuhrluftstrahl und Wand gebildet werden

Abbildung 6 zeigt die Verteilungen der Konzentration im Falle, wo die Schmutzstoffe zwischen Zufuhrluftstrahl und der Wand an den Punkten B, C bzw. D gebildet werden. Die gebildeten Schmutzstoffe werden von der divergierten Strömung nahe dem Boden und von den aufsteigenden Strömen entlang der Wand (Abbildung 6 (a), (b) und (c)) transportiert und diffundiert. Wenn die Luftgeschwindigkeit an der Quelle der Schmutzstoffe relativ gering ist, diffundiert sie in allen Richtungen (Abbildung 6 (b)). Die Raumdurchschnittskonzentrationen SVE1 sind 1,0 (im Falle von Punkt B), 1,3 (im Falle von Punkt C) und 1,6 (im Falle von Punkt D). Diese Werte werden größer, je näher die Quellenpunkte an der Wand

liegen. Die Durchschnittsradien der Diffusion, SVE2, sind 2,4 (im Falle von Punkt B), 2,3 (im Falle von Punkt C) und 2,1 (im Falle von Punkt D). Diese Werte werden kleiner, je näher die Quellen an der Wand liegen.

9. STRÖMUNGS- UND DIFFUSIONSFELD FÜR TYP 2 (VIER EINLASSÖFFNUNGEN, Abbildungen 7, 8)

9.1 Charakteristiken des Strömungsfelds

Die Verteilungen der Geschwindigkeitsvektoren auf mehreren Querschnittsebenen werden in Abbildung 7 dargestellt. Viele Charakteristiken des Strömungsbilds vom Typ 1 erscheinen oft auch bei Typ 2. Das Strömungsbild von Typ 2 darf wohl mit Recht als Kombination der vier Strömungsbilder von Typ 1 angesehen werden. Das Strömungsbild von Typ 1, das sich durch einen von der Einlaßöffnung vertikal nach unten gerichteten Strahl und die darum herum aufsteigenden Ströme auszeichnet, kann mit dem Begriff "Strömungseinheit" bedacht werden, wovon jede ein Viertel des Raums von Typ 2 in Anspruch nimmt.

9.2 Im Falle, wo Schmutzstoffe unter der Einlaßöffnung gebildet werden

Der Zufuhrluftstrahl beaufschlagt den Boden und divergiert in alle Richtungen. Aufsteigende Ströme werden zwischen dem Bereich der Einlaßöffnungen und dem Bereich nahe der Seitenwände gebildet (Abbildung 7 (c)). Die im Zufuhrluftstrahl gebildeten Schmutzstoffe breiten sich entsprechend dieses Strömungsfelds aus. Die Konzentration

ist in dem Bereich unmittelbar unterhalb der Quelle bis zum Boden am höchsten (Abbildung 5 (d)). Der Wert der Konzentration ist größer als 0,5 nur in dem Viertel des Raums, der der einzelnen "Strömungseinheit" entspricht, worin die Schmutzstoffe gebildet werden (Abbildung 7 (h)). Im restlichen Raum ist die Konzentration sehr niedrig (Abbildung 7 (d) und (h)). Die Raumdurchschnittskonzentration SVE1 ist 0,8 und beträgt weniger als der Wert im gleichen Falle von TYP 1. Der Durchschnittsradius der Diffusion, SVE2, ist 3, was 25% von 12,1, der relevanten Länge der Raums, entspricht und relativ weniger als der Wert im gleichen Fall für TYP 1 ist. Diese Ergebnisse werden durch die Tatsache bedingt, daß der Ausbreitungsbereich der Schmutzstoffe auf eine "Strömungseinheit" beschränkt bleibt.

9.3 Im Falle, wo Schmutzstoffe uniform im Raum gebildet werden, SVE3

Abbildung 8 zeigt die Verteilung der Konzentration im Falle, wo die Schmutzstoffe uniform im ganzen Raum gebildet werden. Die Konzentration ist um die Einlaßöffnungen herum und in den Winkeln an der Decke höher, wie in Abbildung 8 dargestellt. In Begriffen von Luftmassenbewegung ausgedrückt: Der Bereich um die Einlaßöffnung herum ist von der Einlaßöffnung am weitesten entfernt, denn die Luftmasse muß den längstmöglichen Weg zurücklegen, um den Bereich um die Einlaßöffnung zu erreichen. Deshalb ist auch die Wahrscheinlichkeit von Luftverschmutzung im Umfeld der Einlaßöffnung am höchsten.

10. STRÖMUNGS- UND DIFFUSIONSFELDER DES TYP 4 (NEUN EINLASSÖFFNUNGEN, Abbildung 9, 10)

10.1 Im Falle, wo Schmutzstoffe am Quellenpunkt gebildet wird

Das Strömungsfeld von Typ 4 ist in Abbildung 9-1 (a) und (b) dargestellt. Wie bei Typ 2 ist es logisch, das Bild von Typ 4 als serielle Kombination einer "Strömungseinheit" zu betrachten, im vorliegenden Fall neun Einheiten. Wenn Schmutzstoffe in einer "Strömungseinheit" gebildet werden, die der Auslaßöffnung gegenüber liegt (Quellenpunkt F, Abbildung 9-1 (c) und (d)), diffundieren die Schmutzstoffe kaum in die anderen Strömungseinheiten hinüber, obwohl die Konzentration in dieser einzelnen Strömungseinheit sehr hoch ist. Die Raumdurchschnittskonzentration SVE1 ist in diesem Fall nur 0,3 und der Durchschnittsradius der Diffusion, SVE2, 2,3, also 14% der relevanten Raumlänge von 16, was einen extrem kleinen Wert darstellt.

Wenn die Schmutzstoffe in der mittleren Strömungseinheit neben der Wand gebildet werden (Quellenpunkt B, Abbildung 9-1 (e) und (f)), breiten sich die Schmutzstoffe aus, und zwar nicht nur innerhalb der mittleren Strömungseinheit, sondern auch in die daneben liegenden Strömungseinheiten, die sich auf dem Weg zur Auslaßöffnung befinden. Dieses eine Drittel des Raums wird verschmutzt, aber die restlichen zwei Drittel des Raums bleiben äußerst rein. Die Raumdurchschnittskonzentration SVE1 ist 1,2 und der Durchschnittsradius der Diffusion, SVE2, beträgt 3,3. Der letztere Wert ist erheblich größer als der von Schmutzstoffen, die bei Punkt F gebildet werden.

Wenn die Schmutzstoffe in der Mitte des Raums an Punkt E gebildet werden, wird der gesamte Raum kontaminiert. Da die Strömungseinheit, worin die Schmutzstoffe gebildet werden, nicht gegenüber der Auslaßöffnung liegt, sondern neben all den anderen Strömungseinheiten, werden die Schmutzstoffe durch die Strömung durch alle anderen Strömungseinheiten zum Auslaß transportiert. Die Raumdurchschnittskonzentration SVE1 ist 1,4 und der Durchschnittsradius der Diffusion, SVE2, beträgt 4,3, also 26% der relevanten Länge des Raums.

Abbildung 9-2 zeigt das Diffusionsfeld, das bei Bildung von Schmutzstoffen an den Punkten A, B, D und E entsteht. Diese Quellenpunkte bewegen sich von dem Bereich nahe der Wand zur Mitte des Raums hin. Die Raumdurchschnittskonzentrationen SVE1 sind 1,7; 1,3; 1,4 bzw. 1,4. Die Durchschnittsradien der Diffusion, SVE2, sind 3,1; 3,3; 3,6 bzw. 4,3. Daher wird die SVE2 größer, wenn die Schmutzstoffquelle weiter von der Wand entfernt wird.

10.2 Im Falle, wo Schmutzstoffe uniform im ganzen Raum gebildet werden (SVE3)

Abbildung 10 zeigt die Verteilung der Konzentration von SVE3. Die Haupteigenschaften des Konzentrationsverteilungsbilds sind nahezu gleich wie bei Fällen von Typ 2. Der höchste Wert wird nahe der Decke um die Einlaßöffnung herum und in den Winkeln an der Decke beobachtet.

11. KONZEPT DER "STRÖMUNGSEINHEIT"

Aus den Ergebnissen der Simulationen läßt sich schließen, daß die mittlere Strömungsstruktur in einem Raum mit Einlaßöffnungen in der Decke aus Serien von Strömungseinheiten besteht, die jeweils einen Zufuhrluftstrahl und die darum herum aufsteigenden Ströme enthält. Solch eine Strömungseinheit eignet sich zum Verständnis des komplizierten Strömungsbilds in Räumen, wo die Einlaßöffnungen in der Decke angebracht sind. Das Konzept der Strömungseinheit hilft auch zu einem besseren Verständnis der Schmutzstoffdiffusion in Räumen. Es ist bekannt, daß die Auslaßströmung nur geringen Einfluß auf das gesamte Strömungsbild hat. Man muß es also nicht als Mangel ansehen, daß dieses Modell einer Strömungseinheit nicht die Funktion der Auslaßöffnung beinhaltet. Wenn in einer Strömungseinheit Schmutzstoffe gebildet werden, bleibt die Schmutzstoffkonzentration auf der ersten Stufe auf diese Strömungseinheit beschränkt. Falls die Strömungseinheit der Auslaßöffnung gegenüber liegt, werden die Schmutzstoffe nicht zu den anderen Strömungseinheiten hin transportiert, d.h. nur eine kleine Menge an Schmutzstoffen breitet sich durch Wirbeldiffusion zu ihnen aus. Falls die Schmutzstoffe in der Strömungseinheit gebildet werden, die keiner der Auslaßöffnungen gegenüber liegt, werden die Schmutzstoffe zu denjenigen Auslaßöffnungen transportiert, die einer Auslaßöffnung gegenüber liegen, und die anderen Strömungseinheiten bleiben unkontaminiert. Selbst wenn sie kontaminiert werden sollten, geschieht dies nur in geringstem Maße, weil solche Kontamination nur durch

Wirbeldiffusion verursacht wird, die im Vergleich zur mittleren Strömungskonvektion viel weniger Schmutzstoffe transportieren kann. Die Reynolds-Turbulenzzahl (Peclet-Zahl), $U_0 L / \nu$, in diesen Fällen hat die Ordnung 100, was im allgemeinen besagt, daß die Fähigkeit, Schmutzstoffe durch Konvektion zu transportieren, hundert Mal größer als die Fähigkeit zur Wirbeldiffusion ist.

Wenn Schmutzstoffe an der Grenze zweier Strömungseinheiten gebildet werden, wo normalerweise starke aufsteigende Ströme gebildet werden, breiten sich die Schmutzstoffe in beide Strömungseinheiten aus und durchlaufen die anderen Strömungseinheiten, die auf dem Strömungsweg zur Auslaßöffnung liegen.

Die qualitativen Charakteristiken der Struktur des oben beschriebenen Diffusionsfelds lassen sich mittels SVE1, 2, und 3, den neuen Maßstäben der Belüftungseffizienz, quantitativ sehr gut beurteilen.

12. EINFLUSS DER ANORDNUNG DER AUSLAßÖFFNUNGEN (TYP 2, 3, Abbildungen 7, 11, 12)

Typ 3, wo zwei Auslaßöffnungen einander diagonal gegenüber liegen, ist ein von Typ 2 abgeleitetes Raummodell, das als Fall zunehmend kleinerer Auslaßöffnungen anzusehen ist. In diesem Raummodell befinden sich nur zwei Auslaßöffnungen an den Diagonalecken (die beiden anderen Auslaßöffnungen wurden eliminiert). Wie in Abbildung 11 (a) gezeigt, gibt es bei diesem Typ, wie auch bei Typ 2 (Abbildung 7), vier "Strömungseinheiten". Im Falle von Schmutzstoffbildung an Punkt A, der in den Strömungseinheiten neben der

Auslaßöffnung und unter der Einlaßöffnung liegt, ist der Wert der Raumdurchschnittskonzentration SVE1 für Typ 3 kleiner als für Typ 2, obwohl der kontaminierte Raum nahezu gleich ist wie bei Typ 2 (siehe Abbildung 7 (h) und 11 (b)) und der Wert des Durchschnittsradius der Diffusion, SVE2, gleich ist. Dies bedeutet, daß die Schmutzstoffe von der stärkeren Strömung zur Auslaßöffnung effizient ausgestoßen werden.

Im Winkel der eliminierten Auslaßöffnungen erscheinen starke aufsteigende Ströme entlang der Wand. Wenn an dieser Stelle Schmutzstoffe gebildet werden (Punkt C), breiten sie sich nach oben entlang der Wand aus, und der große Bereich entlang der Decke wird in extremem Maße kontaminiert (siehe Abbildung 11 (c) und 11 (d)). In diesem Falle sind die Werte der Raumdurchschnittskonzentration SVE1 und der Durchschnittsradius der Diffusion, SVE2, höher als in allen anderen Fällen in diesem Raummodell (1,6 bzw. 3,4).

Die Verteilung der Konzentration im Falle von im ganzen Raum uniformer Schmutzstoffbildung ist in Abbildung 12 dargestellt. Im Winkel nahe der Decke, an der Oberseite der geschlossenen Auslaßöffnungen, wird die Konzentration äußerst hoch.

13. EINFLUSS SYSEMATISCHER VERÄNDERUNGEN DER ANORDNUNG DER EINLASSÖFFNUNGEN (TYP 4, 5, 6, 7, 8. Abbildungen 13, 14)

In diesem Abschnitt werden Strömungsfelder und Schmutzstoffdiffusionsfelder im selben Raum mit verschiedenen Anordnungen von Einlaßöffnungen (Typ 4, 5,

6, 7, 8) verglichen. Diese Anordnungen von Einlässen, deren Anzahl schrittweise verringert wird, wurden auf der Basis aufgestellt, daß die Luftwechselgeschwindigkeit mit der schrittweisen Eliminierung von Einlaßöffnungen abnimmt und nicht durch die Verringerung des Einlaßluftvolumens an jeder Öffnung.

Abbildung 13 zeigt Strömungsfeld und Schmutzstoffdiffusionsfeld für den Fall, wo die Schmutzstoffe in der Raummitte gebildet werden (Punkt E). Der Umriß der Struktur der Strömungseinheiten wird in jeder überlagernden Darstellung mit gestrichelten Kreisen angedeutet.

13.1 Strömungsfelder und Schmutzstoffdiffusionsfelder für den Fall, wo Schmutzstoffe an Punkt E gebildet werden

(1) Typ 4 (Abbildung 13 (a)-(c))

Im Raummodell sind neun Strömungseinheiten vorhanden, und aufsteigende Ströme erscheinen an den jeweiligen Grenzen jeder Strömungseinheit. Die aufsteigenden Ströme im Bereich zwischen den zwei nächsten Strahlen erreichen die Decke nicht. Da die Schmutzstoffe in einer Einlaßöffnung gebildet werden, breitet sich der hoch kontaminierte Bereich unter dem Quellenpunkt E aus. Die Strömungseinheit, die die Kontaminierungsquelle mit einschließt, ist hoch verschmutzt.

(2) Typ 5 (Abbildung 13 (d)-(f))

Sechs Strömungseinheiten umfassen das gesamte Strömungsfeld. In der Mittellinie des Raums, wo drei Einlaßöffnungen geschlossen wurden, erscheinen starke, zur Decke aufsteigende Ströme. Diese Mittellinie entspricht der Grenze der expandierten

Strömungseinheiten. Da die Schmutzstoffe in diesem aufsteigenden Strom entstehen, breitet sich der hoch kontaminierte Bereich vom Quellenpunkt E nach oben hin aus. Der ganze Raum wird mit hoch kontaminierter Luft gefüllt.

(3) Typ 6 (Abbildung 13 (g)-(i))

Die kariert dargestellten Strömungseinheiten umfassen das gesamte Strömungsfeld. Die um die mittlere Strömungseinheit aufsteigenden Ströme breiten sich zur Oberseite der Wände hin aus. Da die Schmutzstoffe im Zufuhrluftstrahl der mittleren Strömungseinheit gebildet werden, erscheint die hoch kontaminierte Region unter dem Quellenpunkt E. Diese kontaminierte Luft wird von dem aufsteigenden Strom zur Oberseite der Wände transportiert, wodurch der größte Teil des Bereichs kontaminiert wird. Die Konzentration wird fast überall größer als 1,0.

(4) Typ 7 (Abbildung 13 (j)-(l))

Vier große Strömungseinheiten umfassen das gesamte Strömungsfeld. In der Raummitte erscheint ein enger, zur Decke aufsteigender Strom. Da die Schmutzstoffe im aufsteigenden Strom gebildet werden, breitet sich der hoch kontaminierte Bereich über Quellenpunkt E aus, und der Großteils des Raums wird mit kontaminierter Luft gefüllt. In dieser Simulation ist das Schmutzstoffdiffusionsfeld leicht asymmetrisch, weil das Strömungsfeld aufgrund der numerischen Instabilität asymmetrisch ist.

(5) Typ 8 (Abbildung 13 (m)-(o))

In diesem Raummodell ist nur eine Strömungseinheit vorhanden. Da die Schmutzstoffe im Zufuhrluftstrahl gebildet werden, breitet sich der hoch kontaminierte Bereich unter dem Quellenpunkt E aus. Ausgenommen im Bereich um den reinen Zufuhrluftstrahl beträgt die Konzentration im ganzen Raum über 1,5.

13.2 Vergleich der Positionen der Einlaßöffnungen unter dem Gesichtspunkt der Belüftungseffizienz (Quellenpunkt E)

In Tabelle 4 werden zwei Arten von Raumdurchschnittskonzentration (Modell 1 und 2) und Durchschnittsradius für jeden Typ berechnet. Modell 1 ist eine dimensionslose Konzentration, die von der mittleren Konzentration C_0 für jeden Typ normalisiert wird. Modell 2 ist ebenfalls eine dimensionslose Konzentration, die im allgemeinen von der mittleren Konzentration von Typ 4 normalisiert wird.

Die Einlaßluftgeschwindigkeit ist bei allen Typen gleich. Die Luftwechselgeschwindigkeit muß daher bei allen Typen natürlich verschieden sein. Bei Modell 1 ist die repräsentative Konzentration (C_0) für die Entdimensionalisierung nicht gleich. Dagegen wird in Modell 2 die repräsentative Konzentration (C_0) des Typs 4 zur Erstellung des dimensionslosen Werts verwendet. Abbildung 14 (a) zeigt die Raumdurchschnittskonzentration jeden Typs für den Quellenpunkt E. Hier wird die dimensionslose Raumdurchschnittskonzentration von Modell 2 dargestellt. Die hyperbolische Kurve drückt die dimensionslose Raumdurchschnittskonzentration von Typ 4

aus, worin die Luftwechselgeschwindigkeit unter der Bedingung konstanter Generierungsgeschwindigkeit graduell verringert wird. Hiermit können wir die Belüftungseffizienz verschiedener Anordnungen von Einlaßöffnungen verständlich machen. Falls in dieser Darstellung der aufgetragene Punkt der Raumdurchschnittskonzentration eines Typs unter der Hyperbel liegt, ist die Belüftungseffizienz dieses Typs derjenigen von Typ 4 bei gleicher Luftwechselgeschwindigkeit überlegen. Dies entspricht dem Vergleich auf Basis von Modell 1, da dieser dieselbe Luftwechselgeschwindigkeit und dieselbe Schmutzstoffbildungsgeschwindigkeit voraussetzt.

Wie in Abbildung 14 (a) dargestellt, kann die Belüftungseffizienz für den Schmutzstoffquellenpunkt E unter den verschiedenen Anordnungen von Einlaßöffnungen wie folgend tabuliert werden: Typ 8 > Typ 4 = Typ 6 = Typ 5 > Typ 7 (siehe Vergleich von SVE1 auf Basis von Modell 1 in Tabelle 4).

Beim Durchschnittsradius der Diffusion weisen Typ 4 und Typ 6 ziemlich hohe Werte auf (siehe Tabelle 4). Der Schmutzstoffquellenpunkt befindet sich in all diesen Fällen im Zufuhrluftstrahl.

13.3 Vergleich der Position der Einlaßöffnungen mit Bezug auf die Belüftungseffizienz (Quellenpunkt B)

Im Falle von Quellenpunkt B (siehe Abbildung 13) werden zwei Arten von Raumdurchschnittskonzentration (Modell 1 und 2) und Durchschnittsradius für jeden Typ in Tabelle 4

tabuliert, und Vergleiche der Belüftungseffizienz werden in Abbildung 14 (b) auf gleiche Weise wie oben aufgeführt.

Da jeder aufgelegte Punkt der Raumdurchschnittskonzentration in Raummodellen Typ 5 - Typ 8 über der hyperbolischen Kurve liegt, dürfen wir schließen, daß die Anordnung der Einlaßöffnungen in Typ 5 - Typ 8 für diese Schmutzstoffquelle bei gleicher Luftwechselgeschwindigkeit derjenigen von Typ 4 unterlegen ist. Bei Schmutzstoffquellenpunkt B wird die Belüftungseffizienz dieser verschiedenen Anordnungen von Einlaßöffnungen wie folgend tabuliert: Typ 4 = Typ 8' > Typ 6 > Typ 5 > Typ 7.

Bei den Werten des Durchschnittsradius der Diffusion scheint nur ein geringer Unterschied vorzuliegen.

13.4 Vergleich der Position von Einlaßöffnungen unter dem Gesichtspunkt der Belüftungseffizienz (Quellenpunkt A)

Für den Fall von Quellenpunkt A (siehe Abbildung 13) wurden zwei Arten von Raumdurchschnittskonzentration und Durchschnittsradius der Diffusion für jeden Typ in Tabelle 4 tabuliert. Vergleiche der Belüftungseffizienz sind in Abbildung (c) wie oben aufgeführt.

Da jeder aufgelegte Punkt der Raumdurchschnittskonzentration in Raummodellen Typ 5 - Typ 8 über der hyperbolischen Kurve liegt, dürfen wir schließen, daß, vom Standpunkt der Belüftungseffizienz aus betrachtet, die Anordnungen der Einlaßöffnungen von

Typ 6 und Typ 7 bei dieser Schmutzstoffquelle und bei gleicher Luftwechselgeschwindigkeit denjenigen von Typ 4 überlegen sind. Es ist besonders zu beachten, daß Typ 6, der nur fünf Neuntel der Luftwechselgeschwindigkeit von Typ 4 aufweist, nahezu die gleiche Belüftungseffizienz wie Typ 4 erbringt. Für den Schmutzstoffquellenpunkt A wird die Belüftungseffizienz dieser verschiedenen Anordnungen von Einlaßöffnungen wie folgend tabuliert:
Typ 6 > Typ 7 = Typ 8 > Typ 4 = Typ 5.

Die Werte des Durchschnittsradius der Diffusion für diese Raummodelle, mit Ausnahme von Typ 4, liegen nahe bei 4,0 und sind damit größer als bei Typ 4 (3,1; siehe Tabelle 4).

14 STRÖMUNGSFELDER MIT STRÖMUNGSHINDERNISSEN

Das hierbei verwendete Raummodell ist Typ 4 mit 9 Einlaßöffnungen und 4 Auslaßöffnungen. In Tabelle 5 führen wir die vier analysierten Fälle auf und illustrieren die verschiedenen Anordnungen von Strömungshindernissen und einige Schmutzstoffquellenpositionen.

In den Abbildungen 16 und 17 sind als Ergebnis numerischer Simulation das Geschwindigkeitsfeld und das Schmutzstoffdiffusionsfeld für den Fall aufgeführt, wo ein Strömungshindernis mit der Seitenwand in Berührung steht. Die Resultate des Experiments für diesen Fall werden in Abbildung 15 gezeigt. Wie oben beschrieben besteht eine recht gute Korrespondenz zwischen Simulation und Experiment. Der Standardfall ohne Strömungshindernis ist in Abbildung 9 aufgeführt. Die für die Seiten des Hindernisses angegebenen Namen sind ebenfalls in Tabelle 5 aufgelistet.

(1) Geschwindigkeitsfeld

Das Strömungsbild vor der Seitenwand ist in Abbildung 16 (b) dargestellt. Wie in Abbildung 16 (a) gezeigt erscheint ein umlaufender Strom über dem Hindernis und einige Ströme in den Zufuhrluftstrahl nahe der Decke. Die Luft über der Oberseite des Hindernisses bewegt sich zur Seitenwand, wie in den Abbildungen 16 (a), (c) gezeigt. Vor dem Hindernis bewegt sich die Luft zur Auslaßöffnung entlang der Vorderseite des Hindernisses, wie in Abbildung 16 (d) dargestellt.

Das Luftströmungsbild nahe der Seitenwand ohne Hindernis wird ebenfalls in Abbildung 9-1 dargestellt. Es unterscheidet sich erheblich von Fall 1. Im offenen Bereich auf der rechten Seite fern vom Hindernis besteht wenig Unterschied zwischen den beiden. Die auffällige Wirkung des Strömungshindernisses ist auf den Bereich um das Hindernis herum beschränkt, nämlich innerhalb der Strömungseinheiten, worin das Hindernis liegt.

(2) Schmutzstoffkonzentrationsfeld

Wenn Schmutzstoffe auf der Oberseite des Hindernisses (Punkt A, Abbildung 17 (a), (b)) gebildet werden, diffundieren die Schmutzstoffe in das linke Drittel des Raums hinüber. Dieses Drittel-Diffusionsbild ähnelt dem Ergebnis ohne Hindernis. Die Konzentration nahe der Decke verringert sich ziemlich stark, weil reine Luft vom Winkelbereich her entlang der Decke transportiert wird. Der Wert von SVE1 ist mit 2,1 viel größer als der Wert im Fall ohne Hindernis (1,7). Der Wert von SVE2 ist mit 2,5 kleiner als im Fall ohne Hindernis (3,1). Die Werte von SVE1 und 2 für alle Fälle werden in der Tabelle 6 tabuliert.

Wenn Schmutzstoffe in der Raummitte generiert werden (Punkt E, Abbildungen 17 (c), (d)), breiten sie sich durch den ganzen Raum aus. Der Bereich um das Hindernis herum bleibt dabei allerdings unkontaminiert, weil die Luft von den drei Zufuhrluftstrahlen nahe der Seitenwand in diesen Bereich strömt. Der Wert von SVE1 ist 1,6 und damit größer als im Fall ohne Hindernis (1,4). Die Belüftungseffizienz beim Ausstoßen der Schmutzstoffe nahm im Fall 1 damit in gewissem Maße ab. Der Wert von SVE2 im Fall 1 ist mit 4,3 fast gleich wie im Fall ohne Hindernis (4,2). Obwohl das Hindernis neben der Wand nur geringe Auswirkung auf das Geschwindigkeitsfeld um Punkt E herum hat, wird das Diffusionsfeld für Schmutzstoffbildung an Punkt E ungeachtet der Anwesenheit oder Abwesenheit des Strömungshindernisses erheblich beeinflusst.

Der Wert von SVE3 wird in Abbildung 17 (e) und Abbildung 10 (a) verglichen. Die Konzentration über dem Hindernis in Fall 1 ist viel höher als im Fall ohne Hindernis, was darauf hinweist, daß die zugeführte reine Luft eine lange Wegzeit braucht, um diesen Umlaufbereich um das Hindernis herum zu erreichen

14.2 Aufstellen eines kastenartigen Hindernisses unter Zufuhrluftstrahlen (Fall 2, Abbildungen 18, 19)

In den Abbildungen 18 und 19 führen wir die Geschwindigkeits- und Diffusionsfelder für den Fall auf, wo ein Strömungshindernis unter die Zufuhrluftstrahle plaziert wird.

(1) Geschwindigkeitsfeld

Der Zufuhrluftstrahl greift die Oberseite des Hindernisses an und divergiert in alle Richtungen

(Abbildungen 18 (a), (c)). Ein kleiner aufsteigender Strom erscheint über der Oberseite zwischen den Zufuhrluftstrahlen (Abbildung 18 (b)). Umlaufende Ströme existieren vor der Rück- und Vorderseite des Hindernisses (Abbildung 18 (a)). Im offenen Bereich rechts ist das Geschwindigkeitsfeld von Fall 2 gleich wie dasjenige im Fall ohne Hindernis, weshalb die beträchtliche Wirkung dieser Plazierung des Hindernisses auf einen eher kleinen Bereich nahe dem Hindernis beschränkt bleibt.

(2) Schmutzstoffdiffusionsfeld

Wenn Schmutzstoffe an der Oberseite des Hindernisses generiert werden (Punkt B), werden sie durch den divergierenden Fluß in diesem Bereich horizontal abtransportiert (Abbildung 19(a)). Die hohe Konzentration breitet sich in den Umlaufbereich entlang der Seitenwand aus und ebenfalls in den Bereich vor der Rück- und Vorderseite (Abbildung 19(a)). Der kontaminierte Bereich okkupiert die linke Hälfte des Raums (Abbildungen 19 (a), (b)). Der Wert von SVE1 im Fall 2 ist mit 1,9 viel größer als im Fall ohne Hindernis (1,3). Der Wert von SVE2 in Fall 2 ist mit 3,7 ebenfalls größer als im Fall ohne Hindernis (3,2).

Wenn die Schmutzstoffe in der Mitte des Raums generiert werden (Punkt E), breiten sie sich in den offenen Bereich auf der rechten Seite aus, wo kein Hindernis steht (Abbildungen 10 (c), (d)). Der Raum zur Linken des Hindernisses ist rein, weil die Ausbreitung der Schmutzstoffe vom Hindernis blockiert wird. Der Wert von SVE1 ist mit 1,6 größer als im Fall ohne Hindernis (1,4).

Der Wert von SVE2 ist mit 4,2 gleich wie im Fall ohne Hindernis (4,2).

Der Wert von SVE3 ist über der Oberseite des Hindernisses wegen der Direktzufuhr reiner Luft sehr niedrig (Abbildung 19 (e)).

14.3 Aufstellung eines kastenartigen Hindernisses zwischen Zufuhrluftstrahlen (Fall 3, Abbildungen 20, 21)

Die Strömungs- und Diffusionsfelder für Fall 3, wo ein kastenartiges Hindernis zwischen den Zufuhrluftstrahlen aufgestellt wurde, sind in den Abbildungen 20 und 21 dargelegt.

(1) Geschwindigkeitsfeld

Das Geschwindigkeitsfeld auf der Oberseite des Hindernisses ist horizontal und fließt hauptsächlich zur Auslaßöffnung hin, wie in den Abbildungen 20 (a), (c) dargestellt. Aufsteigende Ströme erscheinen an einigen Punkten über dem Hindernis (Abbildung 20 (b)). Die Zufuhrluftstrahle in der Mitte greifen den Boden an und divergieren zu dem offenen Bereich rechts, weil die linke Seite vom Hindernis blockiert wird. Das Strömungsbild im offenen Bereich rechts ist ähnlich wie das im Fall ohne Hindernis.

(2) Schmutzstoffdiffusionsfeld

Wenn Schmutzstoffe auf der Oberseite des Hindernisses generiert werden (Punkt D, Abbildung 21 (a)), verharren sie um das Hindernis herum, weil das Diffusionsfeld von den Reihen der Zufuhrluftstrahle auf beiden Seiten des Hindernisses blockiert wird (Abbildung 21 (a)). Der

kontaminierte Bereich ist die linke Hälfte des Raums (Abbildungen 21 (a), (b)). Der Wert von SVE1 ist dabei mit 1,7 größer als im Fall ohne Hindernis (1,5). Der Wert von SVE2 dagegen ist mit 3,2 erheblich kleiner als derjenige im Fall ohne Hindernis (3,6).

Wenn die Schmutzstoffe in der Raummitte generiert werden (Punkt E), diffundieren sie in die rechte Hälfte des Raums, da die Diffusion nach links vom Hindernis blockiert wird (Abbildungen 21 (c), (d)). Die Oberseite des Hindernisses ist rein, weil sie von den Zufuhrluftstrahlen angegriffen wird. Der Wert von SVE1 ist mit 1,5 etwa größer als im Fall ohne Hindernis (1,4). Der Wert von SVE2 (4,0) ist dagegen kleiner als im Fall ohne Hindernis (4,2).

Die Verteilung von SVE3 (Abbildung 21 (e)) ist ähnlich wie diejenige im Fall ohne Hindernis.

14.4 Aufstellung eines tischartigen Hindernisses (Fall 4, Abbildungen 22, 23)

In den Abbildungen 22 und 23 sind die Strömungs- und Diffusionsfelder für Fall 4 aufgeführt, worin ein tischartiges Hindernis die Seitenwand berührt.

(1) Geschwindigkeitsfeld

Über dem Hindernis (Abbildung 22 (a)) erscheint eine große umlaufende Strömung. Das Luftströmungsbild auf der Oberseite ist in Abbildung 22 (c) dargestellt. Die Luft unter der Oberseite bewegt sich entlang der Seitenwand und zur Auslaßöffnung hin (Abbildungen 22 (b), (d)). Das Strömungsbild im offenen Bereich auf der rechten Seite ist gleich wie im Fall ohne Hindernis (Abbildung 22 (a)). Der vom Hindernis beeinflusste Bereich ist also eher klein und bleibt auf das Umfeld um den Tisch beschränkt.

gebildet werden (Punkt A), wird die Region vom Boden bis zur Decke hoch kontaminiert (Abbildungen 23 (a), (b)). Dagegen bleibt der kontaminierte Bereich aber auf das linke Drittel des Raums beschränkt. Der Wert von SVE1 in diesem Falle ist mit 1,4 viel kleiner als in Fall 1 (2,1). Das Strömungsfeld mit einem tischartigen Hindernis ist beim Ausstoßen von Schmutzstoffen also viel wirksamer als mit einem kastenartigen Hindernis. In diesem Fall ist der Wert von SVE2 mit 2,5 gleich wie in Fall 1 (2,5). Wenn die Schmutzstoffe in der Raummitte gebildet werden (Punkt E), breiten sie sich um die Mitte nahe dem Boden aus (Abbildungen 23 (c), (d)). Die Luft um den Tisch ist sehr rein, da die drei Zufuhrluftstrahle entlang der Seitenwand den Tisch angreifen. Der Wert von SVE1 ist mit 1,3 erheblich kleiner als in Fall 1 (1,6). Man darf daher folgern, daß vom Standpunkt der Belüftungseffizienz von SVE1 ein tischartiges Hindernis einem kastenartigen überlegen ist. Der Wert von SVE2 ist mit 4,2 gleich wie in Fall 1 (4,3).

Der Wert von SVE3 (Abbildung 23 (e)) ist im Bereich über dem Hindernis hoch, besonders nahe der Decke, dabei aber kleiner als in Fall 1 (Abbildung 17 (e)).

14.5 Vergleich der Schmutzstoffdiffusionsfelder mittels

SVE1, 2, 3

(1) Untersuchung auf Basis von SVE1

Die Werte von SVE1 für alle Fälle und für alle Schmutzstoffbildungspunkte werden in der jeweils oberen Zeile von Tabelle 6 angeführt. SVE1 zeigt einen größeren Wert, wenn die Schmutzstoffe nahe der Wand generiert werden.

(2) Untersuchung auf Basis von SVE2

Die Werte von SVE2 sind in der jeweils unteren Zeile von Tabelle 6 tabuliert. SVE2 zeigt einen kleineren Wert an, wenn die Schmutzstoffe nahe der Wand generiert werden. Der Wert wird entsprechend größer, wenn der Quellenpunkt zur Mitte des Raums hin bewegt wird.

(3) Untersuchung auf Basis von SVE

Ein hoher Wert für SVE3 erscheint in allen Fällen nahe der Decke. Wenn eine umlaufende Strömung um das Hindernis herum gebildet wird, wird SVE3 in diesem Bereich höher. Die zugeführte reine Luft durchströmt einen längeren Wert, um diese Bereiche zu erreichen, weshalb viel größere Wahrscheinlichkeit besteht, daß die Luft in diesem Bereich kontaminiert ist.

15. SCHLUSSFOLGERUNGEN

Es konnte bestätigt werden, daß die numerische Simulation der Geschwindigkeits- und Diffusionsfelder in einem Raum äußerst nützlich für das Verständnis von Strömungs- und Diffusionsbildern ist. Die Charakteristiken der Strömungen und Schmutzstoffdiffusion in einem Raum mit Einlaßöffnungen an der Decke lassen sich auf folgende Weise zusammenfassen.

(1) Mittlere Strömungsstrukturen der Luftströmung lassen sich sehr gut als serielle Kombinationen von Strömungseinheiten darstellen, die wiederum aus einem Zufuhrluftstrahl und den darum herum aufsteigenden Strömen bestehen.

(2) Das resultierende Diffusionsfeld wird hauptsächlich von der Konvektion der mittleren Luftströmung verursacht.

Auch die Struktur der Diffusionsfelder läßt sich mit Hilfe des Konzepts der Strömungseinheit deutlich darstellen.

(3) Die Zufuhrluftstrahle haben großen Einfluß auf die Strömungsfelder und ebenfalls einen ziemlich großen Einfluß auf Schmutzstoffdiffusionsfelder. Wenn die Anzahl von Einlaßöffnungen verringert wird, verschwinden die den eliminierten Einlaßöffnungen entsprechenden Strömungseinheiten, und die verbleibenden Strömungseinheiten dehnen sich aus.

(4) Die signifikante Wirkung einer Hindernisplazierung in das Strömungsfeld bleibt im allgemeinen auf den Bereich um das Hindernis herum beschränkt. Das Strömungsfeld innerhalb der "Strömungseinheiten", worin das Hindernis aufgestellt wurde, wird allerdings in großem Maße beeinflußt.

(5) Auch wenn die Auswirkung der Hindernisplazierung auf das Geschwindigkeitsfeld gering scheint, wird das Schmutzstoffdiffusionsfeld oft erheblich von der Aufstellung des Hindernisses beeinflußt.

(6) Vom Standpunkt der Belüftungseffizienz aus betrachtet, ist ein tischartiges Strömungshindernis einem kastenartigen Hindernis generell überlegen.

(7) Die neuen Skalen für Belüftungseffizienz, die aus der Raumdurchschnittskonzentration (SVE1) und dem Durchschnittsradius der Diffusion (SVE2) sowie der Konzentration im Falle von uniform im Raum generierten Schmutzstoffen (SVE3) bestehen, sind äußerst nützliche Maßstäbe für den Vergleich verschiedener Diffusionsfelder und für das quantitative Verständnis von

