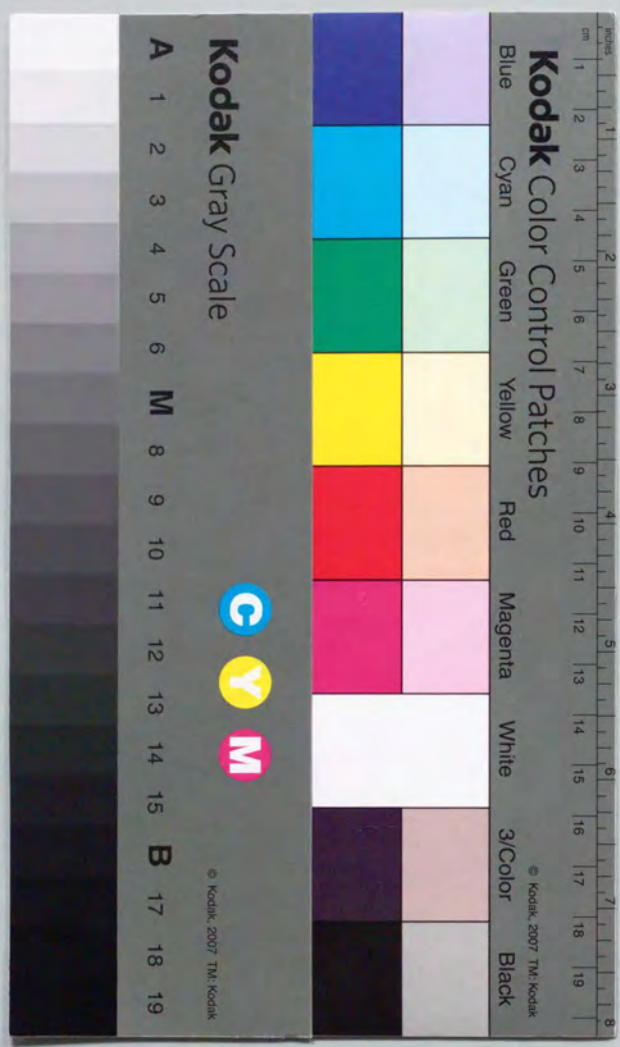


乱流型クリーンルーム内の気流性状並びに
汚染質拡散性状に関する研究

須山 喜美



①

乱流型クリーンルーム内の気流性状 並びに汚染質拡散性状に関する研究

平成 3年 5月

須山 喜美

論文の内容の要旨

論文題目 乱流型クリーンルーム内の気流性状
並びに汚染質拡散性状に関する研究

氏名 須山 喜美

本研究は、乱流型クリーンルームを対象とし、その気流性状と汚染質拡散性状を系統的に解析したものである。研究では先ず、詳細な模型実験と数値シミュレーションによる流れ場と汚染質拡散場の解析結果の対照により、これまで研究段階であった数値シミュレーションによる予測手法が実用的な予測手法として確立され、流れ場と汚染質拡散場の詳細かつ合理的な解析が可能であることが示される。更に、多数の乱流型クリーンルーム内の流れ場・汚染質拡散場の解析を行い、室内に生じる汚染質の拡散過程を気流性状の構造から明らかにすることで、クリーンルームのコンタミネーションコントロールの指針を詳細に論じている。すなわち、天井吹出し乱流型クリーンルーム内の流れ場は、吹出し気流とその周囲に生じる上昇流を1つの単位とする“気流単位”により構成されるものとし、この気流単位概念の導入により、効果的な汚染質の移流・拡散の制御が可能であることを論じている。

室内に浮遊する粉塵等の汚染質を著しく低減したクリーンルームは、精密電子工業を始めとし、医薬・食品工業においても、必要欠くべからざる生産施設となっている。特に、天井等に吹出し口を有する乱流型クリーンルームは建設される規模・数量とも多く、重要な生産施設として位置づけられる。乱流型クリーンルームでは室内における拡散混合がある程度許容されており、その清浄度確保に関する設計は、室内に発生すると想定した汚染質が瞬時一様拡散する

ものとみなし、これに対し多量の清浄空気を室内に供給して希釈するという方法、また、實際上局所的に生じると思われる汚染質の高濃度領域を懸念して、更に、希釈に関する安全率を乗じてより過大な風量を供給する方法が採用されている。これらでは清浄度向上が供給風量の増大による空調エネルギーの増大をもたらすという構造となっており、省エネルギー的な最適制御が考慮される状況には未だ至っていない。このようにコンタミネーションコントロール手法が未発達な状況は、乱流型クリーンルーム内の気流性状並びに汚染質拡散性状に関する検討の不足に起因するものと考えられる。

室内の気流性状、汚染質拡散性状の予測技術に関する数値シミュレーション技術に関しては個別に多くの研究があり、予測結果の信頼性は研究段階としてはかなり高いものとなっている。しかし、数値シミュレーションに関する研究の多くは解析結果の精度の追求を目的としたモデルの開発や数値定数のチューニング等に力点があり、実用的な予測手法としての観点からは十分とは言えない。また、実験結果との対応に対しても十分踏まえられた研究は未だ少数であり、複雑な3次元の乱流流れ場・拡散場自体の性状を詳細に解析・検討しているものは殆どない。

本研究はこの様な現状を踏まえ、乱流型クリーンルーム内の流れ場・拡散場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解析を行う。これは、詳細な実験による測定結果を信頼性のベースとして、数値シミュレーションにより詳細・系統的な解析を行うもので、信頼性・詳細さ・経済性のそれぞれに優れた解析となっている。また、多数の室内モデルを対象とした解析により、乱流型クリーンルームに共通する普遍的な流れ場・拡散場の性状を解明し、クリーンルーム設計者に有用な各種の情報を提示している。

本論文は以下の10章から構成されている。

第1章では、まず序論として本研究の目的と内容が述べられる。

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について概説すると共に、本研究で採用する流れ場・拡散場の解析手法が述べられる。

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る。また、本研究で用いられる数値シミュレーションの精度が良好であることが示される。これを基礎として、以降の各章では流れ場・拡散場の性状が詳細に解析され、相互に関連させながら分析・提示される。

第4章では本研究で解析する多数の乱流型クリーンルームモデルの全容並びに各章の系統的な解析における着目点が示される。

第5章では、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

析される。本章は本研究中の核となる部分である。本章の解析結果より、天井吹出しの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）の概念が新たに導入される。そして、室内全体の気流性状はこの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モデル化が示される。また、室内の汚染質拡散と気流単位の関係が示され、“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”や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る。更に、汚染質拡散場に関しては、濃度分布状況の分析の他に、加藤・村上による汚染質の空間分布に基づいた各種の換気効率指標を適用することにより、これまで評価尺度が曖昧であった流れ場・拡散場の状況に対し、定量的な相互比較や評価が行われる。

第6章から第8章では乱流型クリーンルームの有効な設計資料を得るため、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に関する解析結果が気流単位の概念や各種の換気効率指標を用いて分析・まとめられている。

第6章では、吹出し口・吸込み口位置が室内流れ場・拡散場に与える影響が詳細に提示される。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る。

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・拡散場に与える影響が詳細に提示される。本章ではこれまでの気流単位と汚染質拡散の状況の考察に加え、新たに、吸込み風量の偏りにより生ずる室内の広い範囲に亘る汚染質拡散現象に着目し、本現象の把握には加藤・村上による換気効率指標SVE3が有効であるとの見解を示している。

第8章では、室内に設置される気流障害物の室内流れ場・拡散場に与える影響が詳細に提示される。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、汚染質の排出経路が長くなること、また、箱型より机型障害物の方が汚染質の速やかな排出に有効であることなどの解析結果が示される。

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が整理され、一括提示されている。

第10章は全体のまとめであり、本研究により得られた結論と今後の課題が総括されている。

乱流型クリーンルーム内の気流性状並びに
汚染質拡散性状に関する研究

須山 喜美

| | 目次 | ページ |
|-------|----------------------------|-----|
| 第1章 | 序論 | 1 |
| 1.1 | 研究の背景 | 1 |
| 1.2 | 研究の目的 | 3 |
| 1.3 | 研究の特徴 | 4 |
| 1.3.1 | 研究内容の特徴 | 4 |
| 1.3.2 | 研究手法の特徴 | 5 |
| 1.3.3 | 研究対象の特徴 | 5 |
| 1.4 | 本論文の構成 | 8 |
| | * 第1章の参考文献 | 9 |
| 第2章 | 室内気流・汚染質拡散の模型実験・数値シミュレーション | 11 |
| 2.1 | 模型実験及び数値シミュレーションの目的 | 11 |
| 2.2 | 既往の研究 | 11 |
| 2.2.1 | 室内気流模型実験 | 11 |
| 2.2.2 | 室内数値シミュレーション | 12 |
| 2.3 | 模型実験の概要 | 13 |
| 2.4 | 数値シミュレーションの概要 | 15 |
| | * 第2章の参考文献 | 17 |
| 第3章 | 数値シミュレーション結果の検証 | 18 |
| 3.1 | 解析の着目点 | 18 |
| 3.2 | 数値シミュレーションの条件 | 18 |
| 3.3 | 比較される模型実験結果 | 19 |
| 3.4 | 差分分割方法に関する検討 | 19 |
| 3.5 | 差分スキームに関する検討 | 23 |

| | |
|-----------------------------------|----|
| 3. 6 数値シミュレーション結果と模型実験結果の整合性の検討 | 29 |
| 3. 7 結論 | 33 |
| * 第3章の参考文献 | 34 |
| 第4章 研究対象クリーンルームモデル及び解析方法 | 35 |
| 4. 1 乱流型クリーンルームモデル | 35 |
| 4. 2 各解析タイプ・ケースの着目点 | 38 |
| 4. 3 解析方法・結果の表示方法 | 40 |
| 4. 3. 1 解析方法の概要 | 40 |
| 4. 3. 2 解析結果の表示方法の概要 | 40 |
| 4. 3. 3 換気効率指標 | 41 |
| * 第4章の参考文献 | 47 |
| 第5章 単純形状の乱流型クリーンルーム内の気流性状と汚染質拡散性状 | 48 |
| 5. 1 研究対象モデル及び着目点 | 48 |
| 5. 2 気流性状・汚染質拡散性状の解析結果 | 48 |
| 5. 2. 1 タイプ1の気流性状・汚染質拡散性状 | 48 |
| 5. 2. 2 タイプ2の気流性状・汚染質拡散性状 | 53 |
| 5. 2. 3 タイプ3の気流性状・汚染質拡散性状 | 60 |
| 5. 2. 4 タイプ4の気流性状・汚染質拡散性状 | 66 |
| 5. 3 各基本タイプの気流性状・汚染質拡散性状の特徴 | 71 |
| 5. 3. 1 気流性状の特徴 | 71 |
| 5. 3. 2 汚染質拡散性状の特徴 | 71 |
| 5. 3. 3 気流単位 | 72 |
| 5. 3. 4 換気効率指標の特徴 | 77 |

| | |
|--|-----|
| 5. 4 結論 | 78 |
| * 第5章の参考文献 | 79 |
| 第6章 吹出し口・吸込み口の設置状況が変化した場合の気流性状・汚染質拡散性状 | 80 |
| 6. 1 研究対象モデル及び着目点 | 80 |
| 6. 2 吹出し口の設置状況が変化した場合の気流性状・汚染質拡散性状 | 80 |
| 6. 2. 1 室形状の変更(タイプ9) | 80 |
| 6. 2. 2 吹出し口の削減(タイプ10) | 83 |
| 6. 3 吸込み口の設置状況が変化した場合の気流性状・汚染質拡散性状 | 85 |
| 6. 3. 1 吸込み口高さの変更(タイプ5、6、7) | 85 |
| 6. 3. 2 吸込み口の削減(タイプ8) | 87 |
| 6. 4 吹出し口・吸込み口の設置状況変化のまとめ | 89 |
| 6. 5 吹出し口の配置と汚染質拡散性状 | 90 |
| 6. 5. 1 室中央で汚染質が発生した場合 | 90 |
| 6. 5. 2 壁面と室中央の中間で汚染質が発生した場合 | 93 |
| 6. 5. 3 壁際で汚染質が発生した場合 | 94 |
| 6. 5. 4 吹出し口配置の変化のまとめ | 97 |
| 6. 6 結論 | 98 |
| * 第6章の参考文献 | 99 |
| 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 | 100 |
| 7. 1 研究対象及び着目点 | 100 |
| 7. 1. 1 着目点 | 100 |
| 7. 1. 2 対象モデル及び解析概要 | 100 |

| | |
|---------------------------------------|-----|
| 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 | 102 |
| 7. 3 室中央の吹出し口における風量の変化 | 102 |
| 7. 3. 1 中央吹出し口の風量増加 | 102 |
| 7. 3. 2 中央吹出し口の風量減少 | 106 |
| 7. 4 室内全体で吹出し風量が増加した場合 | 109 |
| 7. 5 室内全体で吸込み風量が増加した場合 | 111 |
| 7. 6 換気効率指標の検討 | 113 |
| 7. 7 結論 | 116 |
| * 第7章の参考文献 | 117 |
| 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 | 118 |
| 8. 1 研究対象モデル及び着目点 | 118 |
| 8. 1. 1 着目点 | 118 |
| 8. 1. 2 対象モデル及び解析の概要 | 118 |
| 8. 2 数値シミュレーション結果と模型実験結果の整合性 | 121 |
| 8. 2. 1 気流性状の整合性 | 121 |
| 8. 2. 2 汚染質拡散性状の整合性 | 121 |
| 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 | 123 |
| 8. 3. 1 箱型気流障害物の場合 | 123 |
| 8. 3. 2 机型気流障害物の場合 | 133 |
| 8. 4 複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 | 137 |
| 8. 4. 1 気流性状 | 137 |
| 8. 4. 2 汚染質拡散性状 | 137 |

| | |
|----------------------------------|-----|
| 8. 5 換気効率指標の検討 | 141 |
| 8. 6 結論 | 143 |
| * 第8章の参考文献 | 144 |
| 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 | 146 |
| 9. 1 気流性状の解析手法 | 146 |
| 9. 2 汚染質拡散性状の解析方法 | 146 |
| 9. 3 乱流型クリーンルーム内の気流性状 | 147 |
| 9. 4 乱流型クリーンルーム内の汚染質拡散性状 | 148 |
| 9. 5 乱流型クリーンルームの気流・汚染質拡散設計方法 | 149 |
| 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 | 150 |
| 第10章 結語 | 155 |
| 0 | |
| 謝辞 | 157 |
| 筆者発表の論文・連名論文のリスト(年代順) | 158 |
| 参考論文(本論文全体の独文要約) | 165 |

第1章 序論

第1章 序論

1.1 研究の背景

クリーンルームは室内空気中のごみ（粉塵等）を極小にするように考案された室で、昭和36年頃アメリカで開発されたものである¹⁾。その後直ちに、クリーンルーム技術は日本にも導入され、トランジスタ工場などに普及し、現在は超LSI等の生産施設などとして重要な役割を担っている。昨今とも、クリーンルーム技術に関する空気調和技術者の最大関心事は室内の清浄度の実現と維持である。

クリーンルーム内の生産機器や作業員から発生した粉塵等の汚染質は、室内の気流により移流・拡散される。したがって、有効なコンタミネーションコントロールを計画し、効率的に室内の清浄度を実現するためには、クリーンルーム内の気流性状・汚染質拡散性状に関する予測と制御が不可欠である。

これまでクリーンルーム内の環境制御に関しては各種の研究例が報告されている。しかし、これらはフィルタの性能調査²⁾、局所的な微粒子の挙動³⁾や実物クリーンルーム内の汚染質濃度の検証例⁴⁾に関するものが多く、気流性状に着目し、室内の気流制御によりコンタミネーションコントロールを行おうとしているものは極めて少ない。これらの一つには吉沢らの均一方向流中の汚染物拡散を検討した模型実験⁵⁾、早川らによる手術室内の気流性状・汚染質拡散性状の実測および層流二次元の数値シミュレーション⁶⁾、美馬らによる実物乱流型クリーンルーム内の気流性状の実測⁷⁾などがある。最近では気流制御の重要性の認識の高まりやコンピュータ利用技術の進展に伴い、山口らによるクリーントンネルの内気流の二次元層流解析⁸⁾や八島らによる有限要素法を用いた乱流型クリーンルーム（コンベンショナルフロー型クリーンルーム）の三次元層流解析⁹⁾、田中らによるラミナーフロー型クリーンルーム内気流の二次元乱流解析¹⁰⁾などの気流性状の予測に着目した研究例も報告されるようになってきている。しかし、これらの研究例でも、最重要な汚染質の拡散に関して拡散係数が一定の層流状態を仮定していたり、二次元解析であるなど、クリーンルーム内の流れ場・拡散場に関する普遍的な情報を提供するという観点に基づく研究例は少ない。

今や、三次元乱流の気流性状を詳細に考慮した新たな汚染質拡散制御手法の確立がクリーンルーム建設技術者の最大関心事となりつつある。特に、乱流型クリーンルーム（コンベンショナルフロー型クリーンルーム）は、その建設される規模・件数がともに大きいこと、また、室内に局所的な多くの吹出し・吸込みを持つため室内の流れ場が極めて複雑な様相となり、汚染質分布もそれに応じて複雑となるため予測が難しいことなどにより、極めて重要な研究対象となっている。

一方、クリーンルームの清浄度に関する設計手法としては、高性能フィルタで濾した多量の超清浄空気を室内に供給し、室内で発生すると仮定された汚染質量が瞬時一様拡散すると見なして、希釈するという方法が旧態依然として行われている。この方法では「室内の清浄度追求は、供給風量の増大による空調エネルギーの増大をもたらす」という単純な構造となっており、未だ、省エネルギーや最適制御等を考慮できる状況には至っていない。この様にクリーンルーム室内設計技術が未開発の状況は、クリーンルーム内の気流性状や汚染質拡散性状に関する情報の不足に起因するものと考えられる。このためクリーンルーム内の流れ場・拡散場に関する詳細な解析結果を提示することは工学上、極めて有意義なことと考えられる。

1. 2 研究の目的

本研究は、乱流型クリーンルーム（コンベンショナルフロー型クリーンルーム）を対象として、室内環境の清浄化計画立案時に有用となる室内流れ場・拡散場の性状に関する情報を整備・提示することを主要な目的とする。

研究では、吹出し・吸込みの状況、障害物など各種の室内条件が変化した多数の乱流型クリーンルームモデル内の流れ場・汚染質拡散場の性状を模型実験と三次元乱流数値シミュレーションを併用して解明する。

本研究実施上の具体的な過程としては、第一段階として模型実験と三次元乱流数値シミュレーションの両手法の比較により、本研究で主として用いる数値シミュレーションが実用的な室内気流予測手法であることを示す。引き続き、第二段階として室内流れ場・拡散場の基本的な性状を解明する。また、第三段階として、吹出し・吸込み状況や障害物設置などの室内条件を変化させた場合を比較し、これらの条件が流れ場・拡散場に与える影響を把握する。

1. 3 研究の特徴

1. 3. 1 研究内容の特徴

本研究は大きく3段階に分けて構成されており、系統的に変化する多数の乱流型クリーンルーム内の流れ場・拡散場が解析される。

第1段階では、室の大きさおよび吹出し口の個数の順次増加する2種類のクリーンルームモデル(基本タイプ)を対象として、模型実験と数値シミュレーションが行われる。数値シミュレーション結果は模型実験結果と比較され、①室内流れ場・拡散場の実用的な予測手法の検証、並びに以降本研究で用いられる整合性の高い数値シミュレーション条件が導かれる¹¹⁾。

第2段階では、室の大きさおよび吹出し口の個数が順次増加する4種類のクリーンルームモデル(基本タイプ)の流れ場が詳細に検討され、②乱流型クリーンルーム内の基本的な流れ場の性状が解明される。また、室内の各種の汚染質発生位置による拡散性状が解析され、③汚染質発生位置による室内汚染質分布状況の特徴が詳細に把握される¹²⁾。

第3段階では、クリーンルーム設計上有用となる資料の提供を意図する。ここでは基本タイプに対して、吹出し口などの設置状況を変化させた10種類の室内モデルの解析を行い、④吹出し・吸込みなどの空調条件の変化が流れ場・拡散場に与える影響を明らかにする¹³⁾。また、各汚染質発生位置に対処するための空調条件改良の可能性について、村上・加藤によって提案された換気効率指標¹⁴⁾を用いて検討を行う。さらに、より実的な展開として、吹出し・吸込み風量の変化した室内モデル、生産機器(気流障害物)の設置された室内モデルの解析を行い、室内流れ場・拡散場に対する、⑤吹出し・吸込み風量のばらつきによる影響¹⁵⁾、⑥気流障害物設置の影響を明らかにする¹⁶⁾。

1. 3. 2 研究手法の特徴

主として数値シミュレーションにより流れ場・拡散場の解析が実施される。また、縮小模型を用いた気流・拡散実験が適宜併用され、数値シミュレーション結果の精度の確認検証が行われる。

気流数値シミュレーション手法に関しては、高精度なASM¹⁷⁾や時間変化する流れが算出されるLES¹⁸⁾なども利用され始めている。しかし、本研究ではより多くの流れ場・拡散場を3次的に解析し、設計者に分かりやすく提供する、また、実務的な研究者や設計者に解析手法を簡易に提示し利用を促すという立場から、比較的ポピュラーとなったk-ε型2方程式乱流モデルを用いて定常な流れ場を算出する^{19), 20)}。

汚染質拡散解析に関して、模型実験では、数値シミュレーションと比較検討されるための汚染質濃度の分布性状が把握される。一方、数値シミュレーションでは空間の各位置にて汚染質が発生した場合の詳細な汚染質濃度の分布性状のほか、加藤・村上による換気効率指標¹⁴⁾を算出し、拡散場の定量的な評価を行う。

1. 3. 3 研究対象の特徴

本研究では典型的な形状の乱流型クリーンルームモデル全14タイプを気流解析の対象として制定する。また、更に、これらのモデルのうち最大の室形状となる室内モデル関し、吹出し・吸込み風量や室内の設置障害物設置状況を変化させた13ケースも気流解析の対象として制定する。また、各室内の特徴的な気流性状となる部位を汚染質発生位置として選定し、総計87ケースに及ぶ汚染質拡散解析が行われる。

解析対象とする乱流型クリーンルームモデルの基本的な形状を図-1.1に示す。また、制定された全14タイプのクリーンルームモデルの形状を図-1.2に示す。これらの各室内モデルでは気流性状の特徴を明確に把握しやすいように、①対称な室形状、②単純な寸法関係、③室形状や吹出し口・吸込み口等の系統的な変更の3点が考慮されており、吹出し口間隔および吹出し口と壁面の距離の1.2mを同一として、順次吹出し口の個数と室平面の大きさを増大させている。また、各タイプとも、実際のクリーンルームとしては標準的な仕様を考え、室内の天井高は2.7mとし、吹出し口は0.6m×0.6mの大きさで、吹出し風速1.0m/s、天井面に設置し、吸込み口は0.6m×0.6mの大きさで、それぞれ壁面四隅に設置している。

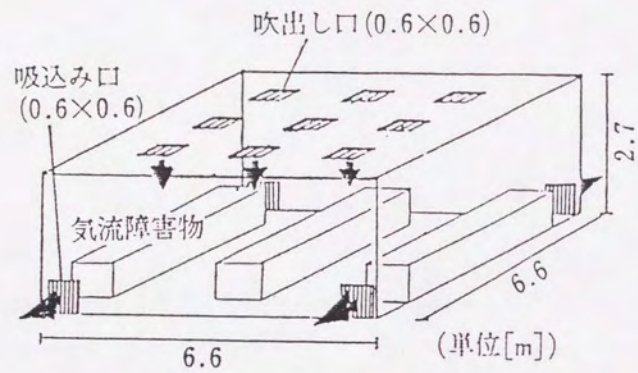


図-1.1 クリーンルームモデルの形状

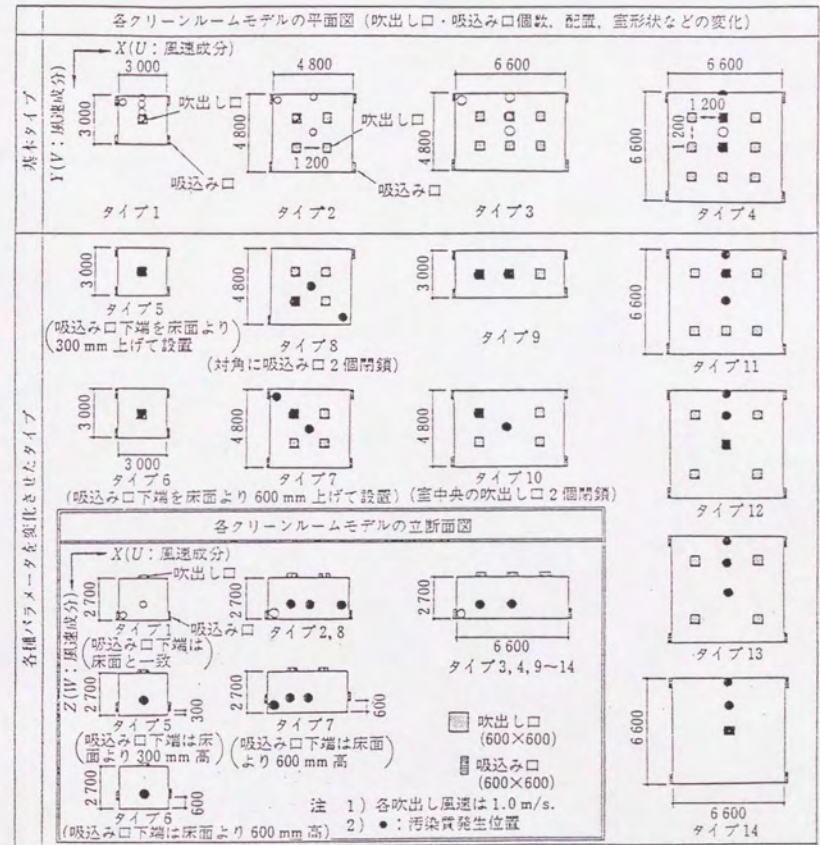


図-1.2 クリーンルームモデルおよび汚染質発生位置

1. 4 本論文の構成

本論文は以下の10章から構成されている。

第1章では、まず序論として本研究の目的と内容が述べられる。

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について概説すると共に、本研究で採用する流れ場・拡散場の解析手法が述べられる。

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る。

第4章では本研究で解析する乱流型クリーンルームモデルの全容並びに本解析における着目点が示される。

第5章から第8章に於いて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る。

第5章では、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る。

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て、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導出された気流単位概念を用いて明らかにされる。

第6章では、吹出し口・吸込み口位置が室内流れ場・拡散場に与える影響が詳細に提示される。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る。

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・拡散場に与える影響が詳細に提示される。

第8章では、室内に設置される気流障害物が、室内流れ場・拡散場に与える影響が詳細に提示される。

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が整理され、一括提示されている。

第10章は全体のまとめであり、本研究により得られた結論と今後の課題が総括されている。

* 第1章の参考文献

- 1) 井上宇一著：空気調和ハンドブック，改訂3版，丸善，(1982-1)，p.352.
- 2) 例えば，藤井正一・南野脩：室内の空気汚染制御に関する研究，日本建築学会大会学術講演梗概集，(1978-9)，p.207
- 3) 例えば，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研究，日本建築学会大会学術講演梗概集，(1984-10)，p.199
- 4) 例えば，西岡利晃・竹内和男・一橋和美：クリーンルームに関する研究，日本建築学会大会学術講演梗概集，(1984-10)，p.209
- 5) 吉沢晋・池田耕一・細川輝男：均一方向流室内の気流性状が汚染物拡散に及ぼす影響に関する模型実験，日本建築学会大会学術講演梗概集，(1978-9)，p.217
- 6) 早川一也・藤井修二・久保猛志・山本晃・原田博司：浮遊微粒子濃度の評価に関する基礎的研究，日本建築学会大会学術講演梗概集，(1979-9)，p.229
- 7) 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，日本建築学会大会学術講演梗概集，(1984-10)，p.213
- 8) Katsuhito YAMAGUCHI, Akikazu KAGA and Akira YOSHIKAWA: Application of ϕ - ω Numerical Method to Two-dimensional, Laminar Air Flow in a Clean Tunnel, Trans. S.H.A.S.E. Japan, No.33 (1987), p.75
- 9) 八島莊市・諏訪延行・寿上宏司・本山浩：有限要素法による三次元気流シミュレーション，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，(1987-5)，p.139
- 10) 田中晃・前田真之・浅見欽一郎・斉木篤：クリーンルーム内の気流設計に関する研究(第2報)，日本建築学会大会学術講演梗概集，(1986-8)，p.421
- 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(その1)，空気調和・衛生工学会論文集，No.37 (1988)，p.38
- 12) 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2)，空気調和・衛生工学会論文集，No.37 (1988)

- 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3），空気調和・衛生工学会論文集，No.40（1989）
- 14) 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
- 15) 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5），空気調和・衛生工学会論文集，No.37（1988）
- 16) 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4），空気調和・衛生工学会論文集，No.44（1990）
- 17) 例えば，村上周三・加藤信介・近藤靖史：代数応力方程式モデルによる室内気流解析，生産研究，（1989-1）
- 18) 例えば，日比一喜・村上周三・持田灯：Large Eddy Simulationによる室内気流の予測（その1），（1985-10），p.389
- 19) 野村豪・松尾陽・貝塚正光・坂本健三・遠藤清尊：室内空気分布の数値解法に関する研究（1～3），日本建築学会論文報告集，231号，232号，238号（1975）
- 20) 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（1980-12）

第2章 室内気流・汚染質拡散の模型実験・ 数値シミュレーション

2.1 模型実験及び数値シミュレーションの目的

各種の乱流型クリーンルーム内の気流性状や汚染質拡散性状を検討するために縮小室内模型を用いた気流・拡散実験並びに気流性状・汚染質拡散性状の数値シミュレーションが行われる。

このうち模型実験は、本論文の第5章以降で示される流れ場・拡散場の性状を得るための数値シミュレーションの実施条件の導出並びに一部の主要な数値シミュレーション結果の検証のために供せられる。一方、数値シミュレーションでは、パラメトリックな多数例の解析結果を容易に、詳細かつ定量的に算出・表示が可能であるため、全編を通じて解析対象となる各種の流れ場・拡散場の解析・表示・検討に供せられる。

2.2 既往の研究

2.2.1 室内気流模型実験

気流の高精度3次元計測に関しては、田中・村上・小峯によるタンデム型熱線流速計を用いた室内気流測定の研究¹⁾、室内模型を対象とした気流・拡散実験方法に関しては、田中・村上による室内濃度分布の数値計算と模型実験の比較に関する研究²⁾、気流の可視化手法に関しては、村上・加藤・赤林によるレーザー光を用いた気流可視化システムに関する開発研究³⁾等が報告されている。また、縮小模型を用いた気流実験における相似則に関しては各種の参考書⁴⁾が出版されている。本研究では、これらの研究成果の適宜参照することにより縮小模型を用いた室内気流・拡散実験を行う。

2.2.2 室内数値シミュレーション

室内乱流流れ場の気流数値解析手法に関し、 $k-\epsilon$ 型2方程式乱流モデルを用いた研究例としては、野村・松尾・貝塚・遠藤による室内空気分布の数値解析に関する研究⁵⁾、野村・村上・加藤・佐藤による3次元乱流数値解析と模型実験に関する研究⁶⁾等が報告されている。また、非定常流れ場が解析可能なLESによる研究例としては、日比・村上・持田によるLarge Eddy Simulationによる室内気流の予測に関する研究⁷⁾、より高精度な解析モデルとして代数応力方程式モデルを用いた研究例としては、村上・加藤・近藤による代数応力方程式モデルによる室内気流解析の研究⁸⁾等がある。

以上のように室内乱流流れ場の数値解析に関する研究には各種の解析モデルが適用され、より精度の良い解法の導出へと鋭意研究が進められている。しかし、本研究における‘多数の室内流れ場・拡散場を算出し、室内環境設計用の資料として設計者に提供する’という立場では、解析に必要とされる計算資源、解析手法に対するユーザーの認知度合いの点で、 $k-\epsilon$ 型2方程式乱流モデルによる解析が妥当であると考えられる。

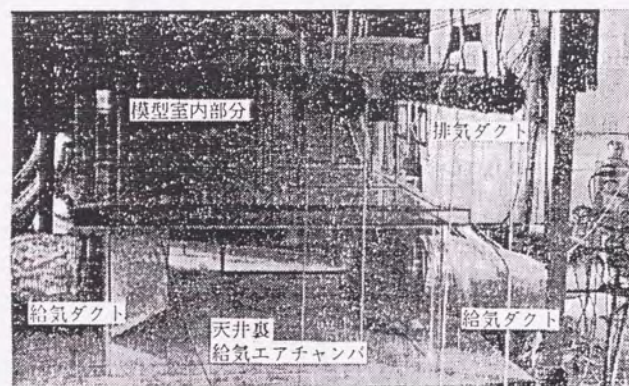
一方、 $k-\epsilon$ 型2方程式乱流モデルによる気流解析手法は広く認知されつつあり、実用的な解析例の報告も行われつつあるが、正しい結果を導く計算条件の設定方法に関しては未確立の部分も多い。これに関しては村上・加藤らにより気流数値解析の診断システムの研究が系統的に行われている⁹⁾。そこで、本研究でも室内の流れ場・拡散場に関する解析を開始する前提として、模型実験結果との参照により、適切な計算条件を導出並びに数値解析結果の整合性の検証を行う。

汚染質拡散の数値解析方法に関しては、田中・村上による室内濃度分布の数値計算と模型実験の比較に関する研究¹⁰⁾があり、点汚染源より発生する汚染質の濃度分布が示されている。また、加藤・村上により3次元乱流数値解析に基づく各種の換気効率指標が提案されている¹¹⁾。本研究では、これらの汚染質拡散数値解析手法を利用し、乱流型クリーンルーム内の汚染質拡散の状況を詳細かつ定量的に解明する。

2. 3 模型実験の概要

縮尺1/6の室内模型(図-2. 1)を用い、想定したクリーンルームモデルの吹出し口Re数(約 4×10^4)の一致を相似条件として実験を行う(模型吹出し風速は約6.0m/s)。模型では各吹出し・吸込み風量は目標値に対して±5%となるように調整を行う。本研究では、等温の流れ場での気流性状・汚染質拡散性状解析を主たる目的とするため、風速計のトラバースなどの便宜を考慮して模型を天地逆に設置する。

風速測定は、タンデム型熱線風速計を用いて平均風速を三次元的に測定する。また、汚染質濃度分布の測定は、空気とほぼ等比重のエチレンガス(C_2H_4)をトレーサとして模型室内に吹出し速度0.05m/sの低速度で放出して、各点の平均濃度を測定する。なお、実験ではLLS(Laser Light Sheet, Ar Laser 4Wを使用)を用いた可視化も行う。



模型は天地逆に設置されている。

図-2. 1 実験模型(1/6 縮尺)

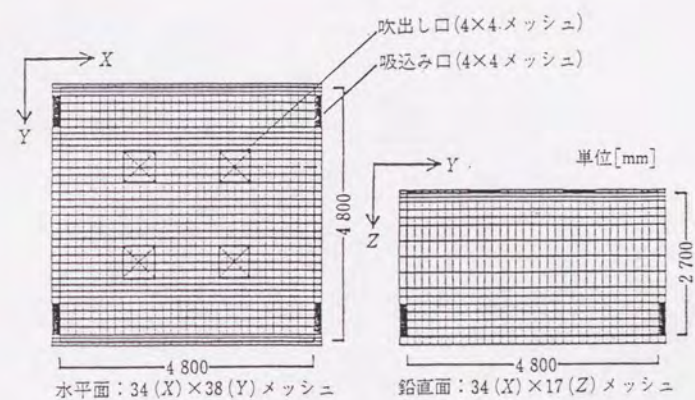


図-2. 2 タイプ2のメッシュ分割

2. 4 数値シミュレーションの概要

室内の気流分布はk-ε型2方程式乱流モデルを基礎とする三次元数値シミュレーションを行う。基礎方程式を表-2.1に、主要な境界条件と差分スキームを表-2.2に示す。本解析では吹出し口の流入乱流量には模型実験より得られた乱流エネルギー $k=0.005\text{m}^2/\text{s}^2$ 、乱れの長さスケール $l=0.3\text{m}$ を採用している。また、解析は初期値0より開始し、最大クーラン数を0.05程度として陽的に定常解を算出する。定常の判定は、空間平均運動エネルギーの時間微分の絶対値に着目して行う(本解析では、各モデルとも定常に至るまで実時間で換気回数10回程度を要する)。なお、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はいない。

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-2.1の式(6)]により解析を行う。なお、汚染質濃度の輸送方程式の移流項に気流解析における乱流エネルギーや乱流散逸の輸送方程式移流項と同様QUICKスキーム¹²⁾を用いた場合には、濃度こう配の大きな領域でオシレーションが発生する。このため本解析では一次精度の風上差分スキームを使用しており、濃度分布の解析結果は数値拡散の影響が多少強い結果となっている。本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、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。なお、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いるため、これに対応して濃度分布の対称性も多少崩れている。

室内は一辺が15cmの均等差分メッシュまたは同程度の細かさの不均等差分メッシュに分割され、解析される。差分分割の一例としてタイプ2の分割状況を図-2.2に示す。各タイプの室内は[タイプ1:22(X)×26(Y)×17(Z)]~[タイプ4:46(X)×50(Y)×17(Z)]に分割されており、各吹出し口面、吸込み口面は4×4メッシュに分割されている。

表-2.1 k-ε型2方程式乱流モデルの基礎方程式

(1) 連続式

$$\frac{\partial U_i}{\partial X_i} = 0$$

(2) 平均流の運動方程式

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

(3) 乱流エネルギーkの輸送方程式

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \frac{\partial k U_j}{\partial X_j} = \frac{\partial}{\partial X_j} \left(\frac{\nu_t}{\sigma_1} \frac{\partial k}{\partial X_j} \right) + \nu_t S' - \epsilon$$

(4) 乱流散逸εの輸送方程式

$$\frac{\partial \epsilon}{\partial t} + \frac{\partial \epsilon U_j}{\partial X_j} = \frac{\partial}{\partial X_j} \left(\frac{\nu_t}{\sigma_2} \frac{\partial \epsilon}{\partial X_j} \right) + C_1 \frac{\epsilon}{k} \nu_t S' - C_2 \frac{\epsilon^2}{k}$$

(5) 渦動粘性係数の算出式

$$\nu_t = C_D \frac{k^2}{\epsilon} = k^{1/2} l$$

(6) 濃度Cの輸送方程式

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

ただし、 $S' = 2S_{ij}S_{ij} = 2 \left[\frac{1}{2} \left(\frac{\partial U_i}{\partial X_j} + \frac{\partial U_j}{\partial X_i} \right)^2 \right]$

$\sigma_1=1.0, \sigma_2=1.3, \sigma_3=1.0$
 $C_D=0.09, C_1=1.44, C_2=1.92$
 U_i : 平均速度 [m/s] P : 圧力 [N/m²]
 ϵ : 乱流散逸 [m²/s³] ν_t : 渦動粘性係数 [m²/s]
 k : 乱流エネルギー [m²/s²] l : 乱れの長さスケール [m]
 C_0 : 汚染質の発生項 [kg/(m³·s)]
 C : 汚染質の平均濃度 [kg/m³]

表-2.2 数値シミュレーションの境界条件および差分スキーム

| | |
|--------------|---|
| (1) 吹出し口境界条件 | $U_i=0.0, U_n=U_{out}, k=0.005\text{m}^2/\text{s}^2, l=0.2\text{m}, C=C_{out}$ 添え字 i, n : 吹出し面に対しそれぞれ法線方向を示す。 U_{out} : 吹出し風速(=1.0) [m/s], C_{out} : 吹出し空気濃度(=0.0) [kg/m ³] |
| (2) 吸込み口境界条件 | $U_i=0.0, U_n=U_{in}, \partial k/\partial n=0.0, \partial \epsilon/\partial n=0.0, \partial C/\partial n=0.0$ U_{in} : 吸込み風速(=1.0)(タイプ2) [m/s] |
| (3) 壁面境界条件 | $(\partial U_i/\partial n)_{n=0} = m(U_i)_{n=h}/h, U_n=0.0, \partial k/\partial n=0.0, \partial C/\partial n=0.0,$ $(\epsilon)_{n=h} = (C_D k_{n=h}^{3/2}) / (C_D^{1/4} \epsilon h)$ h : 壁面から第一セルの差分定義点までの距離 m : U_i が壁近傍でべき乗分布するとみなしたときのべき指数(=1/7) ϵ : カルマン定数(=0.4) |
| (4) 差分スキーム | 空間差分 ・運動方程式, k, ϵ 輸送方程式移流項: 二次精度 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: 二次精度中心差分スキーム 時間差分 ・各方程式: Adams-Bashforth 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なされている。

* 第2章の参考文献

- 1) 田中俊彦・村上周三・小峯裕己：タンデム型熱線風速計による室内気流の測定，日本建築学会大会学術講演梗概集，（1978-9），p.313
- 2) 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，日本建築学会建築環境工学論文集，4号（1982-11），p.89
- 3) 村上周三・加藤信介・赤林伸一：レーザー光を用いた気流の可視化システムの開発研究，日本建築学会論文報告集，361号（1986-3）p.1
- 4) 例えば，日野幹雄著：流体力学，理工学基礎講座 16，朝倉書店，（1974）
- 5) 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法に関する研究（1～3），日本建築学会論文報告集，231号，232号，238号（1975）
- 6) 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（1980-12）
- 7) 日比一喜・村上周三・持田灯：Large Eddy Simulationによる室内気流の予測（その1），（1985-10），p.389
- 8) 村上周三・加藤信介・近藤靖史：代数応力方程式モデルによる室内気流解析，生産研究，（1989-1）
- 9) 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9，10報），空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集，（1986-10），p.617
- 10) 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，日本建築学会建築環境工学論文集，4号（1982-11），p.89
- 11) 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
- 12) 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，日本建築学会計画系論文報告集，第330号（1988），p.1

第3章 数値シミュレーション結果の検証

3.1 解析の着目点

本章では次章以降の流れ場・拡散場の系統的な解析に先駆けて、各クリーンルームモデルのうち基本的な形状と考えられる4タイプに関して、模型実験結果と数値シミュレーション結果の照合を行う。これらの各タイプは室面積の増大に伴って、吹出し口の個数が増加しているタイプである。特に、クリーンルームモデルのうち複数の吹出し口を有する最小の室形状のタイプ2（4個吹出し、4個吸込み）を対象として数値シミュレーション条件が変化した場合の数値シミュレーション結果と模型実験結果の照合を行う。解析に用いた各クリーンルームモデルの形状を図-3.1に示す。これらにより、模型実験と整合するような数値シミュレーション条件が導かれ、整合性が確認される。また、 $k-\epsilon$ 型2方程式乱流モデルを用いた室内気流・汚染質拡散予測の有効性を考察する^{1), 2)}。

3.2 検討した数値シミュレーション条件

気流数値シミュレーションの各種条件のうち、解析領域の差分分割の粗密と移流項に適用される差分スキームの種類は数値シミュレーション結果に極めて大きな影響を与えることが知られている^{3), 4)}。また、これらは数値シミュレーション実施者が比較的任意に設定できるという条件であるため、その影響度合いを把握提示することは非常に重要と考えられる。以下の3.4、3.5の2節では一連のクリーンルーム内の流れ場・拡散場の解析に先駆けて行った、タイプ2の室内モデルを対象とした、差分分割の粗密⁵⁾及び差分スキーム²⁾に関する検討結果を示す。なお、筆者らはこの他の数値シミュレーションの条件に関しても検討を行っており、これらの結果に関しては別報⁶⁾を参照されたい。

3.3 比較される模型実験結果

タイプ2の吹出し口を含む鉛直断面に関して気流性状、乱流エネルギー k の分布、乱れの長さスケール l の分布の模型実験結果³⁾を図-3.2に示す。

吹出し噴流はほとんど減衰せず床面に達し、吹出し噴流間には床面近くで小さな上昇流が形成される〔図-3.2(a)〕。乱流エネルギー k は吹出し口直下で小さな値、噴流周囲でやや大きな値となる〔図-3.2(b)〕。乱れの長さスケール l は噴流部で大きな値となり吹出し方向に徐々に減衰する〔図-3.2(c)〕。

3.4 差分分割方法に関する検討

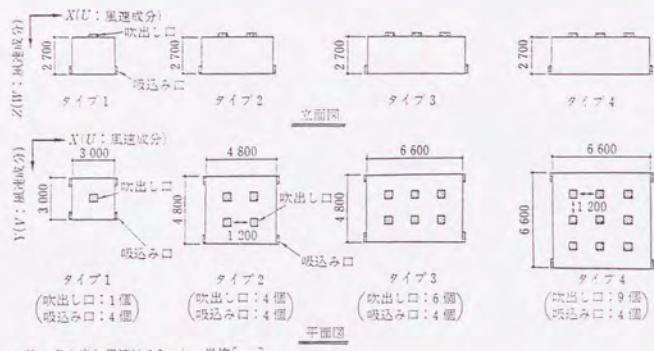
各種の差分分割と、それによる流れ場の性状を、図-3.3、3.4に示す。

(1) 吹出し口間の分割の粗密

吹出し口間を分割とした場合、分割数が不足し吹出し口間床面近くの上昇流が再現されない〔図-3.3(a)〕。8分割の場合〔図-3.3(b)〕、この部分に上昇流が形成され実験結果との対応が向上する。

(2) 吹出し口面の分割の粗密

吹出し噴流とその周縁に形成される大きな速度こう配に基づく乱れの生産と散逸は流れ場全体に支配的影響を及ぼすため、この部分の差分分割は重要となる。この意味で吹出し口面 2×2 分割と 4×4 分割では平均風速ベクトルには大差ないものの〔図-3.4(b)と(c)〕、乱流エネルギー k の分布に関しては 4×4 分割の結果は吹出し噴流周縁のshear flowの再現に関して明らかに改善され、図-3.4(b)は図-3.4(a)に比べ実験結果〔図-3.2(b)〕に対応する。



注 各吹出し風速は 1.0 m/s. 単位 [mm]

図-3.1
三リールームモデル
(基本タイプ)

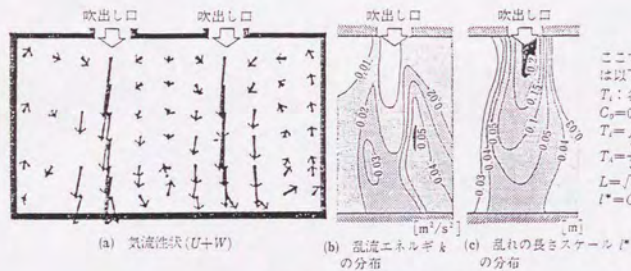
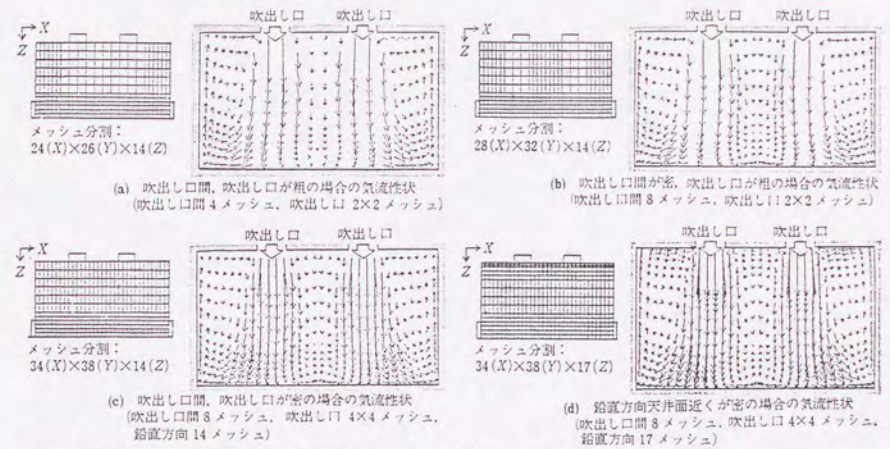
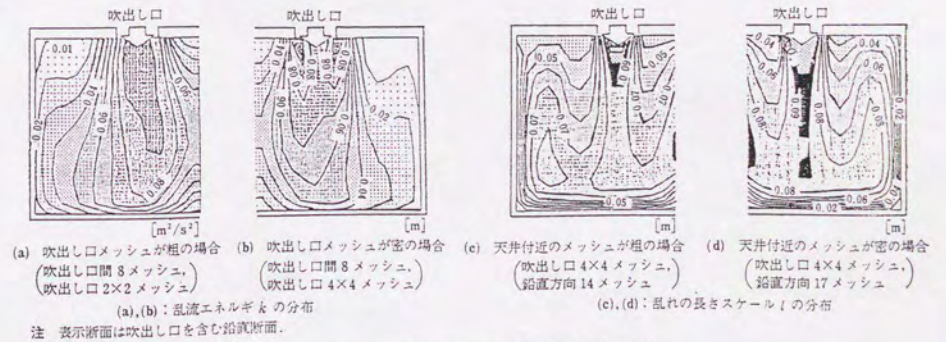


図-3.2 模型実験結果



注 1) 各表示断面は吹出し口を含む鉛直断面 (U+W). 2) メッシュ分割数は仮想セルを含む.

図-3.3 メッシュ分割が変化した場合の気流性状(タイプ2)



注 表示断面は吹出し口を含む鉛直断面.

図-3.4 メッシュ分割が変化した場合の各乱流量の分布

(3) 天井近くの鉛直方向の分割の粗密

吹き出し噴流方向のメッシュ分割は速度こう配が相対的に小さいことから粗とされることが多く、前項までの計算でも水平方向に比べ粗としている。ここでは天井付近の粗密の影響を検討する。鉛直方向のメッシュ分割を天井近傍で密としても平均風速ベクトルには大差ないが〔図-3.3(c)と(d)〕、吹き出し口直下噴流方向(鉛直方向)の分割を細かくした結果は、吹き出し口付近の乱れの長さスケール1の急激な減衰が緩和され実験結果に近づく〔図-3.4(d)〕。

(4) 採用する差分分割

以上の検討より本研究では、吹き出し口間8メッシュ、吹き出し口面 4×4 メッシュ、鉛直方向17メッシュ(一分割幅1.5cm)程度の細かな分割を採用する。

3.5 差分スキームに関する検討

運動方程式移流項および汚染物の濃度輸送方程式移流項に各種の代表的な差分スキームを適用した3次元室内流れ場・拡散場の解析結果を比較検討する²⁾。

(1) 濃度輸送方程式移流項に関する解析結果

運動方程式移流項、 k 、 ϵ 輸送方程式移流項にQUICKスキーム⁷⁾を用いて算出したタイプ2の流れ場を基に、濃度輸送方程式移流項に一次精度風上差分⁸⁾、中心差分⁹⁾、QUICKの各スキームを適用して算出した、吹き出し噴流中(A点)で汚染物が発生する場合の濃度分布の比較を図-3.5に示す。

移流項に1次精度風上差分スキームを採用した場合(図-3.5(b))、汚染物発生位置(A点)上部の噴流中への拡散が顕著である。一方、QUICKスキームの場合(図-3.5(c))、清浄な吹き出し気流が吹き付けるため濃度勾配が著しい汚染物発生位置上部でアンダーシュートするものの、発生位置上部への拡散はなく、実験結果(図-3.5(a))に整合する。なお、中心差分スキームを用いた場合、計算は発散し解は求められなかった。

(2) 運動方程式移流項に関する解析結果

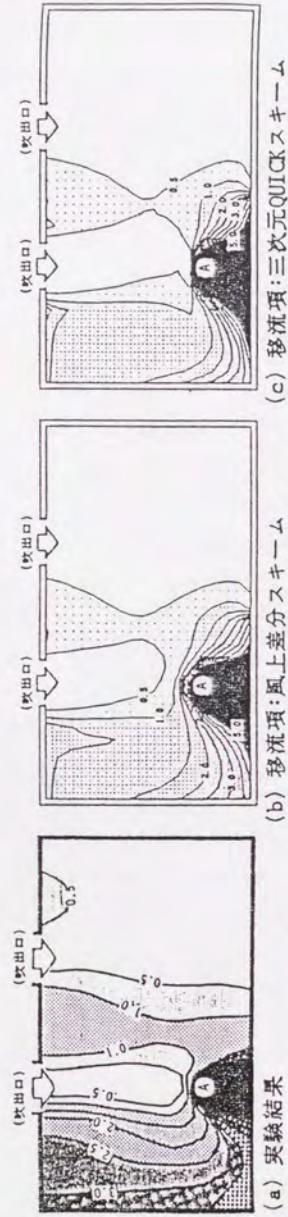
模型実験結果を図-3.6に、 k 、 ϵ 輸送方程式移流項を1次精度風上差分スキームに固定し、運動方程式移流項に以下の各種のスキームを適用して算出したの気流性状を図-3.7~3.10に示す。

a) 1次精度風上差分スキームの場合(図-3.7)

気流性状は非常に拡散的な様相を呈する。吹き出し噴流の著しい減衰や噴流間の二次的な上昇流が再現されない等(図-3.7(a))、本スキームの持つ数値粘性の影響により解析結果は実験結果(図-3.6(a))と非常に異なった様相を呈する。乱流エネルギーの分布に関しても吹き出し口周縁のShear-flow部の高い値が噴流方向にあまり輸送されない等(図-3.7(b))、他のスキームの場合(例えば図-3.8(b))と異なった解となる。

b) 中心差分スキームの場合(図-3.8)

吹き出し噴流の減衰が少ない様相、噴流間の上昇流等(図-3.8(a))、実験結果とよく対応している。しかし、吸い込み口周辺部では著しい数値的な振動が発生する。(図-3.8(c))。また、 k の分布においても、oscillationの領域の値が非常に高くなる不都合を生ずる(図-3.8(d))。平均流に対してだけでなく、乱流統計量の解析においてもoscillationの除去



(a) 実験結果

(b) 移流項：風上差分スキーム

(c) 移流項：三次元QUICKスキーム

* 汚染源は吹出口直下A点。濃度分布は瞬時一様拡散濃度を1.0として表示。

図-3.5 濃度輸送方程式移流項の違いによる濃度分布状況の比較

が重要となる。

c) (中心+部分風上) 差分スキームの場合 (図-3.9)

中心差分によるoscillationの対策として、吸込み口周辺の領域のみに風上差分を適用した場合、oscillationは解消される (図-3.9(a))。一方、図は割愛するがその他断面では中心差分とほぼ同様の様相となり気流性状は実験結果に一層近づく。kの分布に関して、中心差分の使用時の吸込み口周辺の高い値は解消される (図-3.9(b))。

d) QUICKスキームの場合 (図-3.10)

吹出し噴流の減衰の少ない傾向、噴流間の2次的な上昇流の再現など (図-3.10(a))、気流性状は実験結果によく対応する。oscillationも出現しない (図-3.10(a))、気流性状は実験結果によく対応する。oscillationも出現しない (図-3.10(d))。kの分布に関しても、吸込み口前面で (中心+部分風上) 差分の場合に比べやや高い値となり改善される (図-3.9(b)と図-3.10(e)の比較)。その他の領域の分布の様相は、一次精度風上差分とほぼ同様の様相を呈し、中心差分スキームを適用した場合と比べても運動方程式へQUICKスキーム適用した場合の乱流統計量分布への影響はわずかである (図-3.10(c),(e)と図-3.8(b),(d)の比較)。

(3) 採用する移流項差分スキーム

上記の比較検討の結果、運動方程式移流項にはQUICKスキームの適用が妥当であり、ついで (中心+部分風上) 差分スキームの適用がよいことが判明した。また、汚染質の濃度輸送方程式移流項には精度上は、QUICKスキームの適用が妥当であるが、新たなアンダーシュート対策が必要であることが判明した。なお、クリーンルームに関する本研究は、本項で記述した差分スキームに関する研究に先駆けて実施されていた関係上、第4~6章の流れ場は (中心+部分風上) スキームで、拡散場は一次精度風上差分で算出されている。第7章以降の流れ場及び拡散場に関してはすべてQUICKスキームが適用されている。

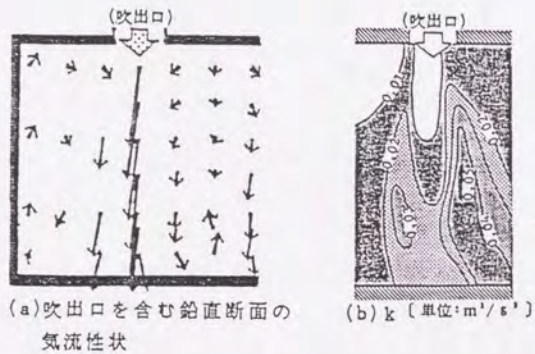
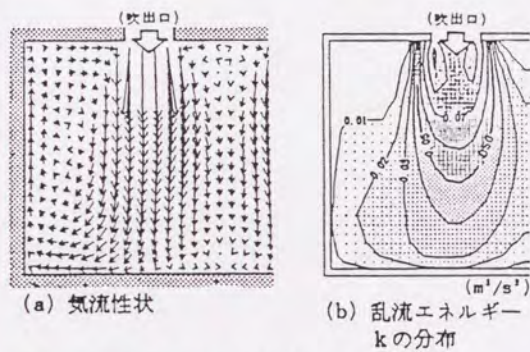
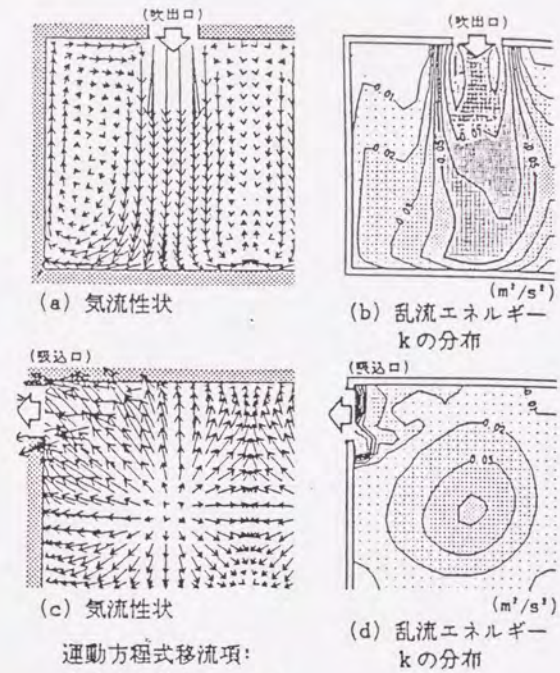


図-3.5 模型実験による気流性状および k の分布



運動方程式移流項: 全体風上差分スキーム

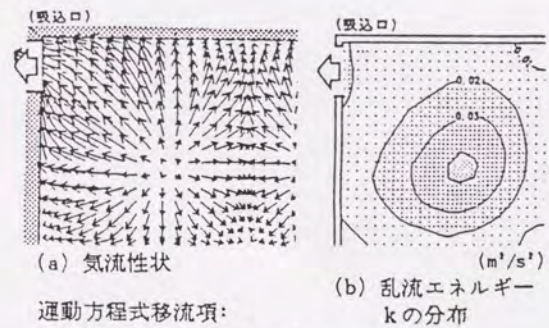
図-3.7 Case 1 の気流性状および k の分布



運動方程式移流項:

全体中心差分スキーム

図-3.8 Case 2 の気流性状および k の分布



運動方程式移流項:

(中心+部分風上)スキーム

図-3.9 Case 3 の気流性状および k の分布

(1) 解析結果

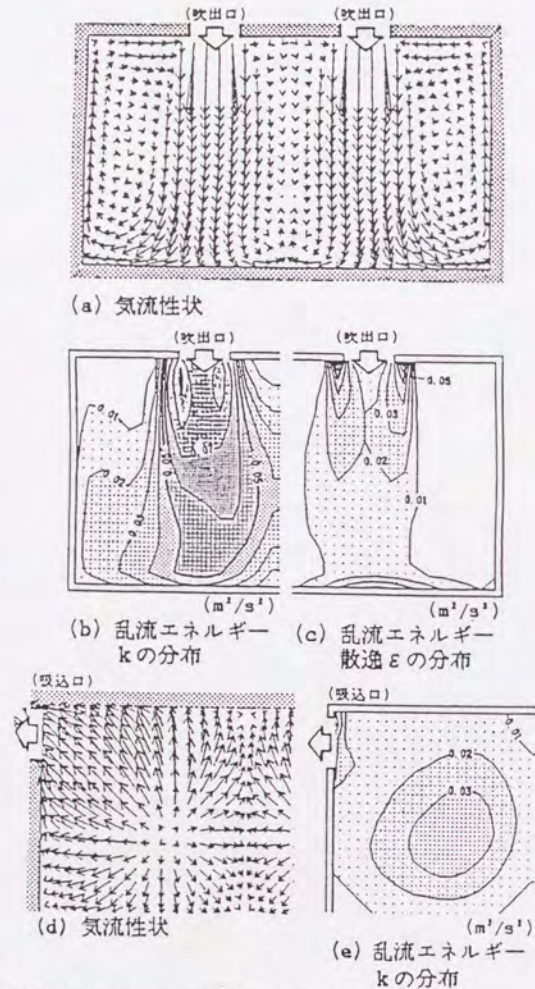
タイプ1~4に関し、吹出し口を含む鉛直断面など特徴的な断面の数値シミュレーション結果と模型実験結果の比較を示す(図-3. 11~3. 14)。タイプ1に関しては、模型実験結果として、レーザーライトシートによる可視化結果、タンデム型熱線流速計により計測した風速ベクトル図(以降では気流性状と称す)、吹出し口下にて汚染質に見立てたトレーサガスが発生した場合の濃度分布図(以降では汚染質拡散性状と称す)を数値シミュレーション結果と対照させて示す。また、タイプ2に関しては気流性状と汚染質拡散性状を、タイプ3, 4に関しては気流性状を、それぞれ模型実験と数値シミュレーション結果で対照させて示す。それぞれの流れ場・拡散場の性状に関する詳細な解説は第5章を参照されたい。また、ここに示したタイプ以外の気流性状に関する模型実験結果に関しては、文献⁹⁾を参照されたい。

(2) 気流性状の整合性

床面に達し発散する吹出し噴流の状況、吹出し噴流間に形成される小さな上昇流の状況、壁側や吹出し口を含まぬ断面にて形成される大きな上昇流の状況など、模型実験結果と数値シミュレーション結果はよく対応している。

(3) 汚染質拡散性状の整合性

汚染質発生位置下部の高濃度、吹出し噴流周囲の濃度分布など、汚染質分布の傾向は両者ではほぼ対応する。ただし実験結果に比べ数値シミュレーション結果は一次精度風上差分スキームの使用に伴う数値拡散の影響と思われる多少の拡散性を示し壁側の領域で実験値よりやや低い濃度、吹出し噴流中の汚染質発生位置上部でやや高い濃度を示す。なお、各濃度分布図では、汚染質が瞬時一様拡散した場合の濃度を1として表示してある。



移流項差分スキーム (運動方程式: 三次元QUICKスキーム
 k, ε 輸送方程式: 風上スキーム)

図-3.10 Case 4の気流性状および k, ε の分布

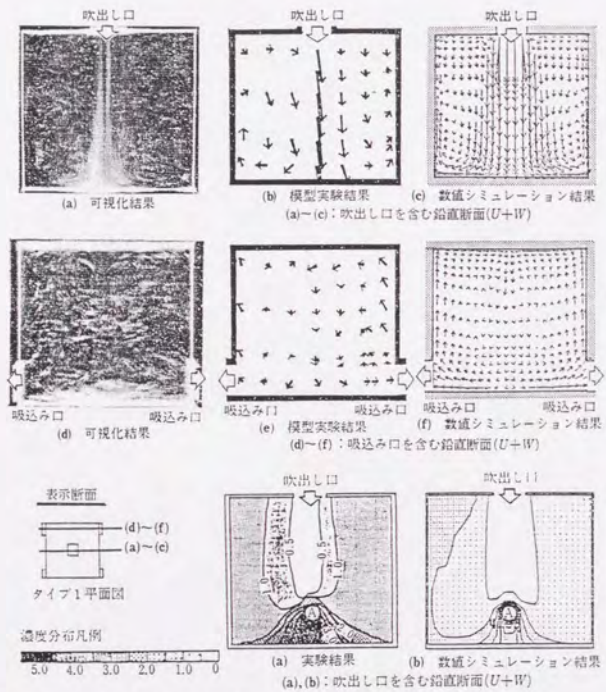


図-3.11 タイプ1の汚染質拡散性状(汚染質発生位置:吹出し噴流中A点)

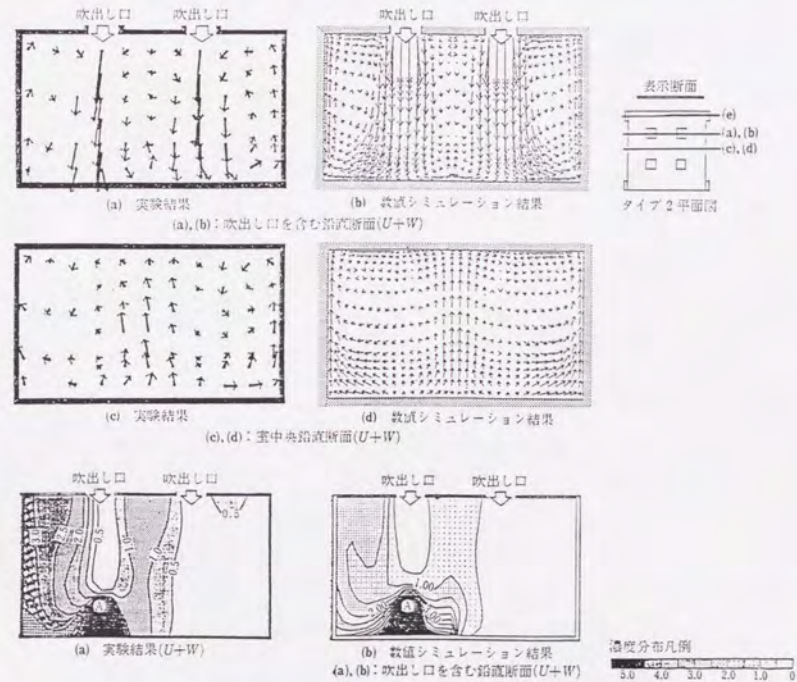


図-3.12 タイプ2の気流性状

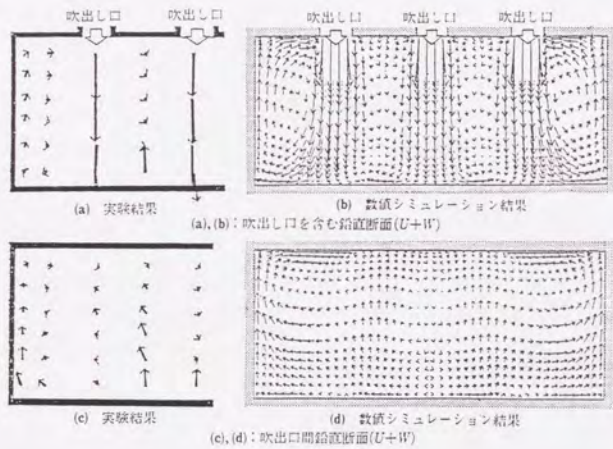


図-3.13 タイプ3の気流性状

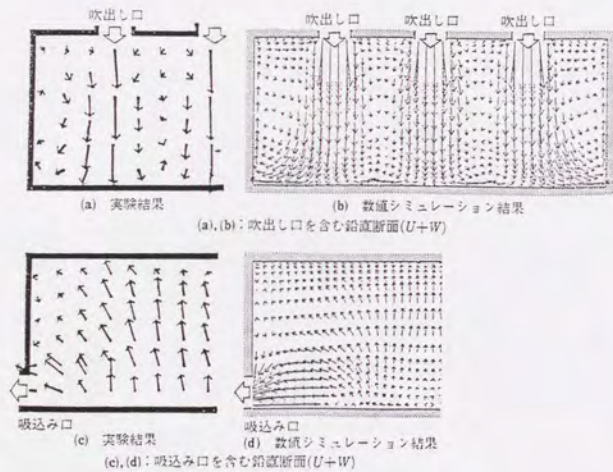
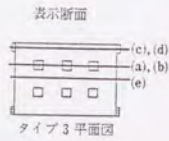
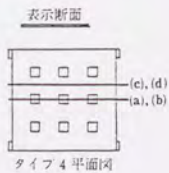


図-3.14 タイプ4の気流性状



3.7 結論

本章では、乱流型クリーンルーム内の気流性状と汚染質拡散性状に関する研究の第1段階として、本研究で用いられる流れ場・拡散場の解析方法の概要を示した。また、次章以降の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先駆けて、一部の単純形状の乱流型クリーンルーム内の流れ場・拡散場について模型実験による解析結果と数値シミュレーションによる解析結果の比較を示した。本章より導出された結論は以下の通りである。

- (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する。
- (2) 数値シミュレーションに適用される差分分割の粗密に関して検討を行い、本研究に必要な差分分割状況を導出した。
- (3) 数値シミュレーションの各方程式移流項に適用される差分スキームに関して検討を行い、QUICKスキーム適用が妥当であることが判明した。
- (4) 乱流型クリーンルーム内の流れ場・拡散場に関する数値シミュレーション結果と模型実験結果を比較した結果、両者の整合性は良好であった。
- (5) 上記の整合性に基づき、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気流性状や汚染質拡散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。

* 第3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
- 2) 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
- 3) 倉淵 隆、鎌田元康：移流・拡散項の差分近似に関する考察，
日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.415-416，昭和58年9月
- 4) 村上周三、加藤信介、永野紳一郎：差分間隔に伴う数値誤差の推定・
評価方法，室内気流数値解析の診断システムに関する研究，
日本建築学会計画系論文報告集、第385号，pp.9-17，昭和63年3月
- 5) 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8月
- 6) 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2~4)，
日本建築学会関東支部研究報告集，(1985年度)
- 7) Leonard, B. P. : A Stable and Accurate Convective
Modelling Procedure Based on Quadratic Upstream
Interpolation, Computer Methods in Applied Mechanics
and Engineering, 19, pp.59-98 1979.4
- 8) Patrick J. Roache 著，高橋亮一ほか6名訳：
コンピューターによる流体力学<上>，構造計画研究所，昭和53年5月
- 9) 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)，
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，(1985-2)

第4章 研究対象のクリーンルームモデル 及び解析方法

4.1 研究対象の乱流型クリーンルーム

本研究で解析を行う乱流型クリーンルームモデル14タイプの形状を図-4.1に示す。これらは、吹出し口間隔および吹出し口と壁面の距離を同一の1.2mとして、吹出し口や吸込み口の個数または室平面の大きさが変化している。各タイプとも、吹出し風速1.0m/s、天井高2.7m、吹出し口・吸込み口は0.6m×0.6mの大きさで、それぞれ天井面および壁面四隅に設置されている。

これらのタイプは、吹出し口1個、吸込み口4個を有するタイプ1を最小の単位としており、これより室平面と吹出し口個数が順次増加するタイプ(タイプ1~4)を基本タイプ¹⁾,²⁾とする。また、各基本タイプに対し吸込み口設置状況を変化させたタイプ(タイプ5~8)³⁾、吹出し口設置状況を変化させたタイプ(タイプ9,10)³⁾、及び最大の室平面のタイプ4に対して吹出し口の配置を変化させたタイプ(タイプ11~14)³⁾である。

更に、タイプ4の室形状はそのまま、吹出し、吸込み風量に関する条件を変化させた室内モデルの状況をケース1~8⁴⁾として表-4.1に示す。また、室形状と吹出し・吸込み条件はタイプ4と同一として室内に生産装置等をモデル化した気流障害物を設置した室内モデルをケース9~13⁵⁾として表-4.2に示す。なお、これらの各ケースのもととなるタイプ4はケース0として適宜表示・参照されている。

検討する汚染質発生位置を図-4.1中に●印で示す。発生位置は吹出し噴流部、壁際上昇流部、吸込み口近傍の収束流部など、特徴的な流れとなる部位や気流単位の形成状況を考慮して設定されている。なお、本研究では、クリーンルーム内の浮遊微粒子の挙動を空気と比重の等しいガスの拡散と同様な挙動とみなせるものとし、発生する汚染質について passive scalar contaminant⁶⁾を仮定している。

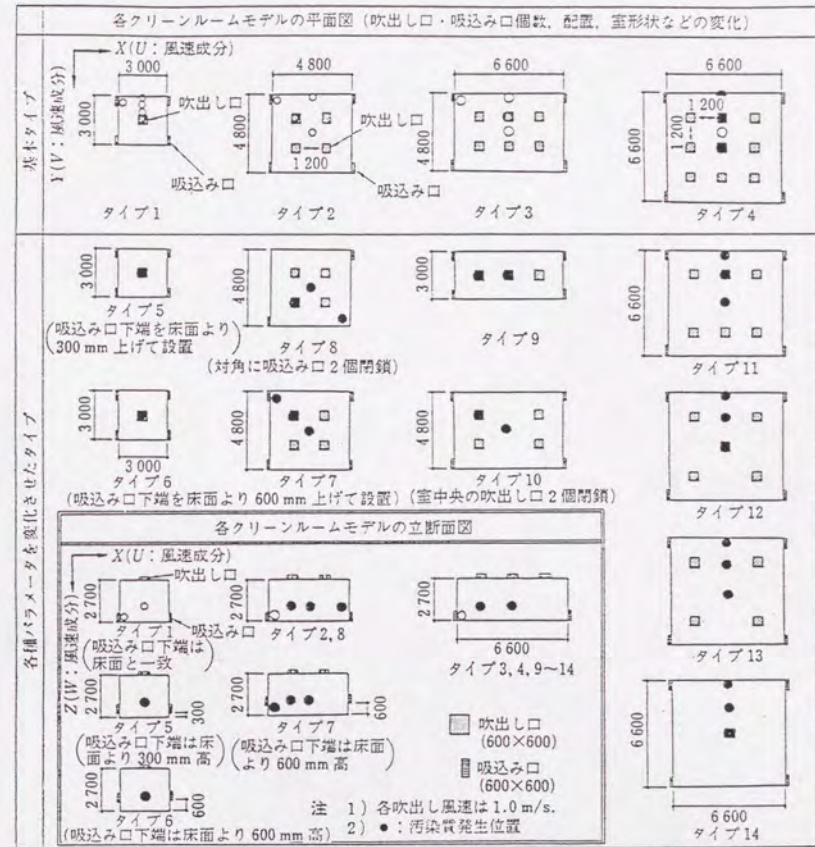


図-4.1 クリーンルームモデルおよび汚染質発生位置

表-4.1 7章解析ケース一覧

| 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 |
|---|---|--|---|---|---|
| 風量の変化した吹出口・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⁾ のタイプの4と同一 | <ケース1> ⊕: 吹出風速10%増(1.1m/s) ・他は均等吹出(0.9875m/s) <ケース2> ⊕: 吹出風速3%増(1.3m/s) ・他は均等吹出(0.9625m/s) <ケース3> ⊕: 吹出風速50%増(1.5m/s) ・他は均等吹出(0.9375m/s) ・ケース1~3とも均等吸込(2.25m/s) | <ケース4> ⊖: 吹出風速10%減(0.9m/s) ・他は均等吹出(1.0125m/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4~6とも均等吸込(2.25m/s) | ⊕: 吹出風速50%増(1.5m/s) ⊖: 吹出風速50%減(0.5m/s) ・他の吹出: 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) | | | | | |

表-4.2 8章解析ケース一覧

| 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 ならびに 汚染質発生位置 (○) | | | | | | |
| 汚染質発生位置 | ④ 壁際(障害物上面中央の位置) ⑤ 吹出し口下 ⑥ 障害物間中央 ⑦ 吹出し気流間 ⑧ 室中央 ⑨ 室内一様発生 | ④ 壁際(障害物上面中央) ⑤ 室中央 ⑥ 室内一様発生 | ④ 吹出し口下(障害物上面中央) ⑤ 室中央 ⑥ 室内一様発生 | ④ 吹出し気流間(障害物上面中央) ⑤ 室中央 ⑥ 室内一様発生 | ④ 壁際(障害物上面中央) ⑤ 室中央 ⑥ 室内一様発生 | ④ 壁際(障害物上面中央) ⑤ 中央(障害物上面中央) ⑥ 中央障害物上面 ⑦ 障害物間床面 ⑧ 室内一様発生 |

4.2 各解析タイプ・ケースの着目点

本研究にて解析される乱流型クリーンルームモデル各タイプ・ケースについて、解析時の着目点、結果の示される章(括弧書き)、その室内モデルの特徴を以下に示す。

- (1) 数値シミュレーション実施条件の導出、
室内気流数値シミュレーション結果の模型実験結果との整合性の検討(第3章)
タイプ1: 最小の室内モデル
タイプ2: 複数の吹出し口、吸込み口を有する最小の室内モデル
- (2) 室内の気流性状の解明、汚染質拡散性状の解明、
気流性状と汚染質拡散性状の関係の把握(第5章)
タイプ1: 最小の室内モデル
タイプ2: 複数の吹出し口、吸込み口を有する最小の室内モデル
タイプ3: 三連二列の吹出し口を有する室内モデル
タイプ4: 三連三列の吹出し口を有する、最大の室内モデル
- (3) 吹出し口・吸込み口設置状況の変化が流れ場・拡散場に与える影響の解明、吹出し口配置と換気効果の関係の解明(第6章)
タイプ5: タイプ1に対し吸込み口の高さを変えた室内モデル
タイプ6: タイプ1に対し吸込み口の高さを変えた室内モデル
タイプ7: タイプ2に対し吸込み口の高さを変えた室内モデル
タイプ8: タイプ2に対し対角の吸込み口を2個を削減した室内モデル
タイプ9: 三連一列の吹出し口を有する室内モデル
タイプ10: タイプ3に対し中央の吹出し口を2個削減した室内モデル
タイプ11: タイプ4に対し中央の吹出し口を一列(3個)削減した室内モデル
タイプ12: タイプ4に対し各壁側中央の吹出し口を計4個削減した室内モデル
タイプ13: タイプ4に対し中央並びに壁側中央の吹出し口を計5個削減した室内モデル
タイプ14: タイプ4に対し壁側の吹出し口を8個削減した室内モデル

(4) 吹出し・吸込み風量の変化が流れ場・拡散場に与える影響の解明
(第7章)

ケース0: タイプ4と同様

ケース1: タイプ4に対し中央の吹出し口の吹出し風速(風量)を10%増加させた室内モデル

ケース2: タイプ4に対し中央の吹出し口の吹出し風速(風量)を30%増加させた室内モデル

ケース3: タイプ4に対し中央の吹出し口の吹出し風速(風量)を50%増加させた室内モデル

ケース4: タイプ4に対し中央の吹出し口の吹出し風速(風量)を10%減少させた室内モデル

ケース5: タイプ4に対し中央の吹出し口の吹出し風速(風量)を30%減少させた室内モデル

ケース6: タイプ4に対し中央の吹出し口の吹出し風速(風量)を50%減少させた室内モデル

ケース7: タイプ4に対し片側三連の吹出し口の吹出し風速(風量)を50%増加させ、反対側三連の吹出し口の吹出し風速(風量)を50%減少させた室内モデル

ケース8: タイプ4に対し片側三連の吸込み口の吸込み風速(風量)を50%増加させ、反対側三連の吸込み口の吸込み風速(風量)を50%減少させた室内モデル

(5) 気流障害物の設置が流れ場・拡散場に与える影響の解明
(第8章)

ケース0: タイプ4と同様

ケース9: タイプ4の室内壁際に1個の箱型気流障害物を設置した室内モデル

ケース10: タイプ4の室内壁側吹出し口下に1個の箱型気流障害物を設置した室内モデル

ケース11: タイプ4の室内吹出し気流間に1個の箱型気流障害物を設置した室内モデル

ケース12: タイプ4の室内壁際に1個の机型気流障害物を設置した室内モデル

ケース13: タイプ4の室内壁際及び室中央に1個の箱型気流障害物を設置した室内モデル

以上の着目点による解析により乱流型クリーンルームモデル内の流れ場・拡散場の様相を詳細に明らかにする。

4.3 解析方法・結果の表示方法

4.3.1 解析方法概要

室内の気流性状の解析は第2章、第3章にて概説した $k-\epsilon$ 型2方程式乱流モデルを用い、同じく第3章にて導出した数値シミュレーション実施上の諸条件に則って行う。本気流数値シミュレーションにより、等温の3次元乱流流れ場(平均風速)を算出する。

汚染質拡散性状の解析は、気流数値シミュレーションにより算出された気流分布及び渦動粘性係数をもとに汚染質濃度の輸送方程式を用いて行う。本汚染質拡散数値シミュレーション⁷⁾により、汚染質濃度の3次元分布を算出する。また、加藤、村上による各種の換気効率指標³⁾も算出する。

4.3.2 解析結果の表示方法の概要

各気流性状は、室中央鉛直断面、吹出し口を含む鉛直断面、床面近傍水平断面等の特徴的な部位の2次元断面の風速ベクトル図にて示す。

各汚染質拡散性状のうち、各点汚染源による空間の濃度分布の状況は瞬時一様拡散濃度(吸込み口平均濃度と同じ)を1.0とした等値線図にて表示する。これらの濃度分布図は風速ベクトル図と適宜対応させて示される。また、図中の汚染質発生位置は英文字に○を付して示す。

各換気効率指標の表示内容及び意味を表-4.3に示す。このうち室内平均濃度(SVE1:換気効率指標1)及び平均拡散半径(SVE2:換気効率指標2)は数値で本文中や表に示し、吹出し空気の平均到達時間(SVE3:換気効率指標3)は、室内一様汚染質発生の場合の濃度分布図として等値線図にて示す。結果の各図では室の対称性などを考慮して、一部分のみを表示する場がある。

4. 3. 3 換気効率指標

各点汚染源で発生した汚染質の濃度分布は、換気の効果に対応して重要な示唆を与えるものの、それらは汚染質の発生位置が異なればそれに応じて変化する。すなわち、汚染質発生量が同一であっても汚染質の発生位置が異なれば、同一地点の汚染質濃度の値は異なってくる。したがって、濃度の値等からその場所の換気効果（換気効率）を評価するためには、①汚染質の発生位置に関し、実際問題への応用に対し普遍性の高い取決めを行って濃度分布を求め、各位置の濃度の値をそのまま換気効率指標とし、その分布を求める方法、②汚染源に対応する濃度の空間分布の特性を一般的な形で数値化し、これをその換気効率指標として定義し、汚染源を室内全体にスキャンすることに対応してその分布を求める方法、などが考えられる。定常の流れ場・汚染質拡散場に関する加藤・村上による換気効率指標は、前者に関し室内一様の汚染質発生を、後者に関し濃度分布特性の数値化の手法として濃度分布のモーメントを採用しており、室内の換気性状が、汚染源ごとに対応する濃度分布によって表されることやその分布形の普遍的でかつ取扱いの簡単な表示方法となっていることなどから、室内における換気の効率分布を定量的に把握するのに非常に有効な指標と考えられる。

(1) 濃度分布の低次のモーメント

加藤・村上の換気効率指標では、濃度分布の低次のモーメントの中で以下のものを換気効率指標として用いている。

①濃度分布の零次のモーメント

$$C_0 = \int_{V(X)} C(X) dX \quad \dots (4.1)$$

②濃度分布の一次のモーメント

$$X_0 = \int_{V(X)} X \cdot C(X) dX / C_0 \quad \dots (4.2)$$

③濃度分布の二次のモーメント

$$X_0^2 = \int_{V(X)} (X - X_0)^2 \cdot C(X) dX / C_0 \quad \dots (4.3)$$

ここに、 $C_x(X)$: $X(X, Y, Z)$ における濃度
 X : 位置ベクトル (X, Y, Z)

図-4.1に、濃度分布のモーメントの意味を風速変動の確率密度関数の例とともに示す。一般に分布関数は、その低次のモーメントによって、その概略の分布性状が推定できる。

(2) 換気効率指標と分布の定義

以下に換気効率指標とその分布を具体的に定義し、その物理的な意味を示す。

①換気効率指標1 (SVE1: 室内平均濃度とその分布)

ある汚染源(点発生)に対応して得られる室内平均濃度を瞬時一様拡散濃度で基準化して定義される。これは、濃度分布の零次のモーメントを瞬時一様拡散濃度で基準化したものである。

$$SVE1(X_s) = C_0(X_s) / C_s \quad \dots (4.4)$$

$$\text{ただし、} C_s = q / Q \quad \dots (4.5)$$

$$C_0(X_s) = \int_{V(X)} C(X) dX \quad \dots (4.6)$$

ここに、

SVE1(X_s) : Scale for Ventilation Efficiency 1,
 X_s における換気効率指標1(無次元室内平均濃度およびその分布)。空間全体に汚染質発生位置 X_s をスキャンさせ、SVE1の分布を算出

$C_x(X_s, X)$: X_s を汚染源位置とし、汚染質発生量を q 、換気量 Q とした場合の X 位置での濃度を表す [kg/m^3]。

q : 汚染源の汚染質発生量 [kg/s]

Q : 換気量 [m^3/s]

C_s : 瞬時一様拡散濃度 [kg/m^3]

SVE1, すなわち室内の汚染質平均濃度は、発生した汚染質が排気口より排出されるまでの室内平均残留時間に対応する。この指標の分布は、どの場所で汚染質が発生した場合に速やかに排出されるか、またどの場所で汚染質が発生した場合に汚染質が室内に滞留する時間が長いかなどを端的に示す。図-4.2に示す室内モデルを考える。排出口の近傍のC点で発生した汚染質は速やかに排出され、室内の平均濃度は低い値となる。一方、室内循環流中、B点で汚染質が発生した場合、汚染質は室内に滞留し、場合によっては室内平均濃度は瞬時一様拡散濃度より大きい値を示す。この場合、汚染質発生量と排出口からの汚染質排出量は定常的に一致するが、汚染質の発生から排出までの時間が長くなるほど、室内の総汚染質量は増加し室内平均濃度は上昇する。吹出し口近傍のA点で発生した汚染質は、吹出し噴流でよく拡散される。したがって、室内はほぼ均一の濃度となり、瞬時一様拡散濃度に近づく。換気効率指標1は、このように汚染質の排出される効率を示す。

②換気効率指標2 (SVE2: 汚染質の平均拡散半径とその分布)

ある汚染源(点発生)に対応する濃度分布の二次モーメントを室内平均濃度(零次モーメント)で基準化し、その平方根で定義される。

$$SVE2(X_s)^2 = \int_{V(X)} \{X - X_G(X_s)\}^2 \cdot C_X(X_s, X) dX / C_0(X_s) \dots (4.7)$$

$$\text{ただし、} X_G(X_s) = \int_{V(X)} X \cdot C(X_s, X) dX / C_0(X_s) \dots (4.8)$$

ここに、

SVE2(X_s) : X_sにおける換気効率指標2(汚染質の平均拡散半径)。空間全体で汚染質発生位置X_sをスキャンさせ、SVE2の分布を算出

X_G(X_s) : 汚染質濃度分布の重心(零次のモーメントで基準化した濃度分布の一次モーメント)

SVE2, すなわち濃度分布の基準化された二次モーメントの平方根は、長さの次元を持ち、汚染質の平均的な拡散距離いわば平均拡散半径に対応する量となる。室内平均濃度が汚染質の室内残留性に関する指標であるのに対し、これは汚染質の室内への広がりに関する指標となる。室内で生じた汚染質は、なるべく室内に広がることなく速やかに排出されることが望ましい。これを図-4.2に示す室内気流モデルで検討する。吹出し口近傍A点で汚染質発生があった場合、室内平均濃度はB点で汚染質発生があった場合よりも低くなる可能性がある。しかし、汚染質は室内に大きく広がるため好ましくない。この指標の分布は、どの場所に汚染質が排出された汚染質が排出された場合、室内に汚染質が広く拡散することなく排出されるかを示す。

③換気効率指標3 (SVE3: 吹出し空気の平均到達時間)

室内一様に汚染質が発生する場合の各点の濃度およびその分布により定義する。この指標は吹出し空気がその点に到達するまでの時間(行程)が長いほど、汚染の確率が上昇するという想定に基づいている。

$$SVE3(X) = C_X(X) / C_s \dots (4.9)$$

$$\text{ただし、} C_s = q / Q \dots (4.10)$$

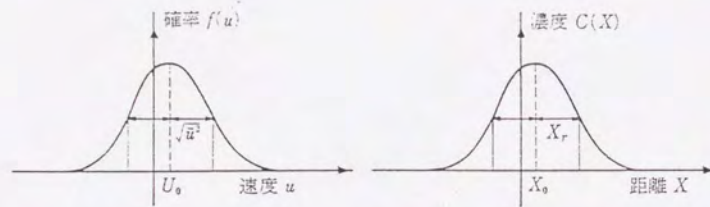
ここに、

SVE3(X) : Xにおける換気効率指標3(室内一様汚染質発生した場合の各点濃度を瞬時一様拡散濃度で基準化した無次元濃度)

C_X(X) : 室内一様に総量qの汚染質発生がある場合のX点の濃度 [kg/m³]

C_s : 瞬時一様拡散濃度 [kg/m³]

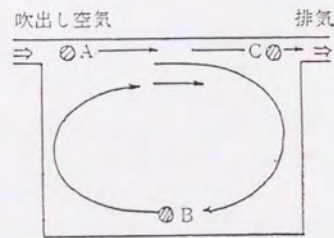
第三の換気効率指標SVE3は、主に汚染質の排出を意識した前述二つの換気効率指標とその分布とは異なり、室内の任意の点に関し吹出し空気がそこに到達するのに要した平均的な時間(行程)を示すものである。吹出し空気が到達するのに要した時間(行程)が短ければ短いほど、その到達した空気は汚染されている可能性が小さく、時間(行程)が長くなるほど途中汚染されている可能性が増すと考えられる。吹出し空気の平均到達時間(行程)は、室内気流を吹出し口から室内を経て排気口に至る無数の流管の集合としてモデル化することにより容易に理解される。吹出し口から排気口に至る流管は、途中の循環などに応じてさまざまな長さを持つ。室内一様に汚染質を発生した場合、流管中を流れる空気の汚染質濃度は、吹出し口からの時間(行程)が長くなるほど高くなる。また、排出口ではさまざまな流管が集合し、その場の濃度が各流管濃度の平均となることを考慮すると、室内各点の濃度もその場所に吹出し口からの空気が平均的に到達する時間(行程)を表す。



零次 $\int f(u) du = 1$ (確率の積分値) 零次 $\int C(X) dx = C_0$ (濃度の積分値)
 一次 $\int u f(u) du = U_0$ (平均風速) 一次 $\int \{XC(X)/C_0\} dX = X_0$ (重心)
 二次 $\int u^2 f(u) du = \overline{u^2}$ (分散) 二次 $\int \{(X-X_0)^2 C(X)/C_0\} dX = X_r^2$ (拡散半径の2乗)

$f(u)$, $C(X)$ が正規分布と仮定できれば、速度変動が $U_0 - \sqrt{u^2} \leq u < U_0 + \sqrt{u^2}$ の範囲の確率は 68%、 $X_0 - X_r < X < X_0 + X_r$ の範囲の汚染質量は全体の 68% となる。

図 - 4. 1 濃度分布と速度の確率密度関数の対応



- 汚染源 A: 拡散半径大
室内平均濃度 ~ 瞬時一様拡散濃度
- 汚染源 B: 拡散半径大
室内平均濃度 > 瞬時一様拡散濃度
- 汚染源 C: 拡散半径小
室内平均濃度 < 瞬時一様拡散濃度

図 - 4. 2 室内気流モデル
(汚染質定常発生)

表 - 4. 3 汚染質拡散性状の表示方法

| 表示方法 | 表示内容・意味 |
|-----------------------------------|---|
| 点汚染源による濃度分布 | 室内の1点で汚染質を発生させた場合の濃度分布。この濃度分布図により室内の汚染質分布の情報が具体的に与えられる。また、この汚染質分布のパターンより汚染質が滞留しそうな場所、速やかに排出されそうな場所などの定性的な汚染質拡散性状を判断することができる。 |
| 室内平均濃度 (換気効率指標 1) [-] | 室内の1点で汚染質発生を行った場合に得られる室内全体の空間平均濃度を瞬時一様拡散濃度で基準化した無次元濃度。本指標は、その点で発生した汚染質が吸込み口より排出されるまでの室内平均滞留時間に対応し、この値が小さいほど室内体としてみた場合に汚染質は速やかに排出されていると解釈される。詳しい算出方法などについては文献(7)を参照されたい(以下の指標 2, 3 も同様)。 |
| 平均拡散半径 (換気効率指標 2) [m] | 室内の1点で汚染質発生を行った場合に得られる濃度分布の二次モーメント(各方向 X, Y, Z の3成分の2乗和)を室内平均濃度(零次モーメントが前述の換気効率指標 1)で基準化し、その平方根として算出される長さの次元を持つ値。本指標の値が大きいほど、発生した汚染質は室内に広く拡散すると解釈される。 |
| 吹出し空気の平均到達時間 (換気効率指標 3) [-] | 室内に汚染質が一様発生した場合にその点の濃度を瞬時一様拡散濃度で基準化した無次元濃度として算出される。本指標の値が大きいほど、吹出し口からの清浄空気が到達する時間(行程)が長いと考えられ、その点に到達する空気が汚染されている可能性が大きいと解釈される。 |

* 第4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1報-数値シュミ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
- 2) 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-数値シュミ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
- 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
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10月
- 4) 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) 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5報-数値シュミレーションによる吹出し・吸込み風景にバラツキ
のある室内流れ場・拡散場の検討(投稿中)
空気調和・衛生工学会論文集
- 6) 永野紳一郎、村上周三、加藤信介:
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)
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,
(1987-5), p.151
- 7) 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,
日本建築学会建築環境工学論文集、4号(1982-11), p.89
- 8) 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5章 単純形状の乱流型クリーンルーム内 の気流性状と汚染質拡散性状

第5章 単純形状の乱流型クリーンルーム内の気流性状と汚染質拡散性状

5.1 研究対象モデル及び着目点

単純な形状のタイプ1～4の気流性状および室内各点で汚染質が発生した場合の汚染質拡散性状を解析する^{1)~6)}。解析に於いて、吹出し口数の少ないタイプ1, 2では主に局所的な室内の気流性状と汚染質拡散性状との関係に着目し、多数の吹出し口を有するタイプ3, 4では主に気流単位の状態と汚染質拡散性状の関係に着目する。なお、各断面ともほぼ対称な気流性状となるため一部の断面では片側のみを示す場合がある。

5.2 室内の気流性状・汚染質拡散性状の解析結果

5.2.1 タイプ1の気流性状と汚染質拡散性状

吹出し口1個、吸込み口4個を有する室形状のタイプ1(最小の室形状)の気流性状及び汚染質拡散性状を図-5.1～5.4に、室内平均濃度および平均拡散半径を表-5.1に示す⁷⁾。

(1) 気流性状

吹出し噴流は、あまり減衰せず吹出し口直下の床面に到達し〔図-5.1(a)〕、床面付近で四方に広がる〔図-5.1(c)〕。床面に沿って流れた気流は壁面に沿って薄い厚さで上昇する〔図-5.1(a)〕。この上昇流の一部は、室上部において天井からの下降流と衝突し渦を形成する。また、室隅角部では、床面に下端の接した吸込み口を有するにもかかわらず上昇流を生じている〔図-5.3(a)〕。これらの流れは天井面に沿って吹出し口周囲に収束し〔図-5.1(a)〕、吹出し噴流に誘引され再び室下部に向かう〕。

(2) 汚染質拡散性状

a) 吹出し噴流部で汚染質が発生した場合

吹出し噴流部(A点)で汚染質が発生した場合を図-5.1に示す。吹出し噴流は、床面に衝突して発散し〔図-5.1(c)〕、壁面近傍で上昇流を形成する〔図-5.1(a)〕。吹出し噴流部で発生した汚染質は流れに対応し発生位置下部および床面近傍で高濃度となる〔図-5.1(b)〕。室全体で一様に0.5以上の濃度となるが、吹出し口下は発生位置まで清浄となる。室内平均濃度(換気効率指標1)は0.89、平均拡散半径(換気効率指標2)は1.47mとなり、室の長さスケール(室の各辺の長さの2乗和の平方根として算出される:タイプ1では各辺の長さは3m, 3m, 2.7mであり、5.03mとなる)の29%となる。

b) 吹出し噴流・壁面間で汚染質が発生した場合

汚染質発生位置を吹出し噴流部より壁際まで順次変更した場合(B～D点)を図-5.2に示す(詳細な寸法は図-5.2表示断面中)。汚染質は床面に沿った流れや壁際の上昇流により移流・拡散される〔B, D点:図-5.2(a), (c)〕。発生位置付近の風速が小さい場合には高濃度領域は発生位置の四方に広がる〔C点:図-5.2(b)〕。室内平均濃度は0.98(B点), 1.28(C点), 1.55(D点)と壁面に近づくにつれて大きくなり、平均拡散半径は1.44m(B点), 1.39m(C点), 1.28m(D点)と壁面に近づくにつれて小さくなる。

c) 吸込み口近傍部で汚染質が発生した場合

吸込み口近傍部(E点)で汚染質が発生した場合を図-5.3に示す。吸込み口に向かう気流と周囲の上昇流により汚染質は両方向に拡散する。室内平均濃度は0.96と前述の吹出し噴流部に汚染源のある場合より大きい。また、平均拡散半径は1.33mとなる。

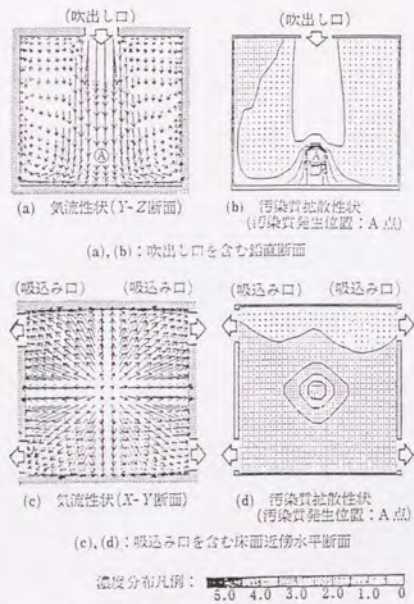
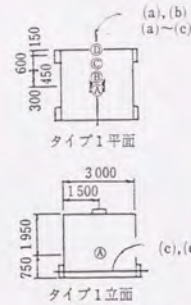


図-5.1 タイプ1の気流性状および汚染質拡散性状
(吹出し口1個, 吸込み口4個, 汚染質発生位置:
吹出し噴流部 A点)

- 注 1) 図中の○印は汚染質発生位置。
2) ○印の大きさは、数値シミュレーションの汚染質発生セルの大きさにほぼ対応する。
3) 汚染質は下図に示す4セルにて発生する。



各表示断面



○: 汚染質発生位置

図-5.2 タイプ1の汚染質拡散性状(汚染質発生位置:
吹出し噴流・壁隙間 B~D点)

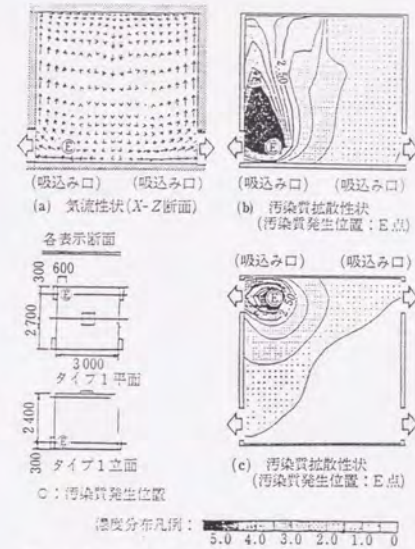
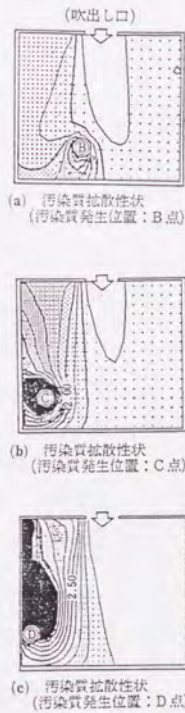


図-5.3 タイプ1の気流性状および汚染質拡散性状
(汚染質発生位置: 吸込み口近傍 E点)

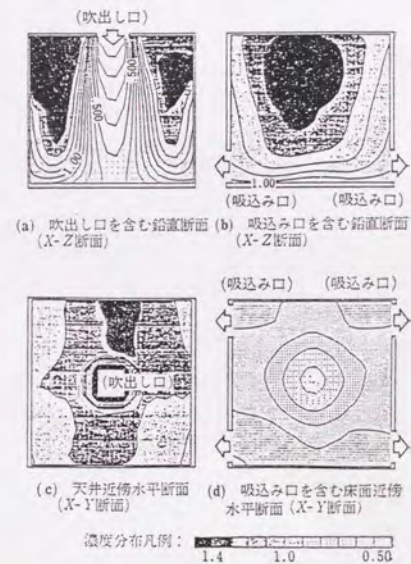


図-5.4 タイプ1の汚染質拡散性状(室内一様汚染質発生, 換気効率指標3)

表-5.1 タイプ1の室内平均濃度と平均拡散半径

| 汚染質発生位置 | 室内平均濃度 [-] | 平均拡散半径 [m] |
|-------------|---------------|---------------|
| 吹出し噴流部 A点 | 0.89 | 1.47 |
| 吹出し噴流横 B点 | 0.98 | 1.44 |
| 吹出し噴流・壁間 C点 | 1.28 | 1.39 |
| 壁面近傍 D点 | 1.55 | 1.28 |
| 吸込み口手前 E点 | 0.96 | 1.33 |

d) 室内一様汚染質発生 (SVE3) の場合

室内空間で一様に汚染質が発生した場合の濃度分布 (換気効率指標3) を図-5.4に示す。この場合の室内各点の濃度は、吹き出された清浄空気の平均到達時間 (行程) に対応し、その値が大きいほど吹き出し口からの清浄空気がその点に到達するまでに要する平均的時間 (行程) が長く、汚染されている可能性が大きい。吹き出し口下、床上、吸込み口手前の順にその値は大きくなる [図-5.4 (a), (b)]。特に、天井吹き出し口の周辺は値は極めて高く [図-5.4 (c)]、この領域には吹き出し口からの空気が時間を経て到達しており、途中で汚染されている可能性が高く注意が必要である。

5.2.2 タイプ2の気流性状と汚染質拡散性状

吹き出し口4個、吸込み口4個を有する室形状 (複数の吹き出し口を有する最小の室形状) のタイプ2の気流性状と汚染質拡散性状を図-5.5~5.9に、室内平均濃度および平均拡散半径を表-5.3に示す。

(1) 気流性状

床面に至る吹き出し噴流 [図-5.5 (a)]、床面での発散流 [図-5.5 (e)]、壁際の上昇流 [図-5.5 (a)、5.7 (a)] などタイプ1の気流性状の特徴と同じであり、タイプ1の気流性状 (1個の吹き出し噴流とその周囲の上昇流を単位とする気流性状) を4個合成した様相を呈す。さらに、本タイプの大きな特徴として隣接する吹き出し口間では上昇流がそれほど生じず [図-5.5 (a)]、室中央から外側の壁面に向かう水平成分を有する流れを生ずる [図-5.6 (a)]。また、吹き出し口からの距離が相対的に大きくなる、4個の吹き出し噴流に囲まれた室中央の空間では、強い上昇流が形成される [図-5.6 (a)]。壁際や室中央で上昇し天井付近に到達した気流は、吹き出し口に向かって収束し [図-5.6 (c)]、吹き出し口間で吹き出し噴流に誘引されて下降した後、床面付近の上昇流と衝突し、前述の壁面に向かう水平成分を有する流れとなる [図-5.5 (a)]。

(2) 汚染質拡散性状

a) 吹出し噴流部で汚染質が発生した場合

吹出し噴流部(A点)で汚染質が発生した場合を図-5.5に示す。吹出し噴流は床面に衝突して発散し〔図-5.5(e)〕、吹出し噴流間の床面近傍および壁面近傍で上昇流を形成する〔図-5.5(a)〕。吹出し噴流部で発生した汚染質はこれらの流れにより、発生位置下部および床面近傍で高濃度となる〔図-5.5(b)〕。室の1/4の領域で0.5以上の濃度となるが、発生位置より上の吹出し噴流部および室の3/4の領域は清浄〔図-5.5(b), (f)〕となる。また、室内の上昇流により天井面に運ばれた汚染質は床面よりもやや広がって分布する〔図-5.5(d)〕。本タイプでは、タイプ1と異なり4個の吹出し口、吸込み口が1対1に対応する傾向が強く、1個の吹出し噴流と周囲の上昇流を単位とする気流単位が互いにある程度閉じた系を形成する。単位の中心で発生した汚染質はその単位内に留まり、室全体へ拡散は比較的小さくなる。室内平均濃度は0.76とタイプ1に比べ低く、平均拡散半径は1.80mと室の長さスケール7.3mの25%程度でタイプ1に比べ相対的に小さい。

b) 壁面近傍部で汚染質が発生した場合

壁面近傍部で汚染質が発生した場合を図-5.6に示す。壁面近傍上昇流に対応し高濃度域は発生位置(B点)から上部に広がる〔図-5.6(a), (b)〕。さらに、汚染質は天井面に沿って吹出し口に収束する気流に運ばれ、吹出し口近くまで高濃度で分布する〔図-5.6(c), (d)〕。この場合、室の片側半分に汚染質が分布する〔図-5.6(d)〕。室内平均濃度は1.50と高いが、平均拡散半径は1.68mと前項の吹出し噴流部における汚染質発生の場合より小さくなる。

c) 室中央上昇流部で汚染質が発生した場合

室中央(C点)で汚染質が発生した場合を図-5.7に示す。室中央の上昇流により高濃度域は発生位置の上部に広がる〔図-5.7(b)〕。汚染質は室全体に拡散し、室内平均濃度は1.50と高く、平均拡散半径は1.89mと大きくなる。

d) 吸込み口近傍部で汚染質が発生した場合

吸込み口近傍(D点)で汚染質が発生した場合を図-5.8に示す。吸込み口手前で発生した汚染質は吸込み口へ収束する気流によりほとんどが拡散されずに排出される〔図-5.8(b), (d)〕。吸込み口周辺の上昇流の減少や吸込み風速の増大により、室内平均濃度は0.06とタイプ1に比べて非常に低くなり、また、平均拡散半径も1.00mとかなり小さくなる。

e) 室内一様汚染質発生(SVE3)の場合

室内で一様に汚染質が発生した場合の濃度分布を図-5.9に示す。吹出し噴流部で濃度の低い状況〔図-5.9(a)〕、床面から天井へと高くなる状況〔図-5.9(b)〕、天井吹出し口脇で高濃度となる状況〔図-5.9(e)〕などはタイプ1と同様であるが、本タイプでは室の四隅の吸込み口上部の領域が高濃度となっており、タイプ1とはやや異なる様相を呈する。

f) タイプ2の汚染質拡散性状のまとめ

タイプ2は各4個の吹出し口、吸込み口が1対1に対応する傾向が強く、1個の吹出し噴流と周囲の上昇流を単位とする4個の気流単位が互いにある程度閉じた系を形成する。単位の中心または吸込み口近くで発生した汚染質はその単位内に留まり室全体へ拡散は比較的小さくなる。一方、単位の間で発生する場合はその両単位に広く拡散する。

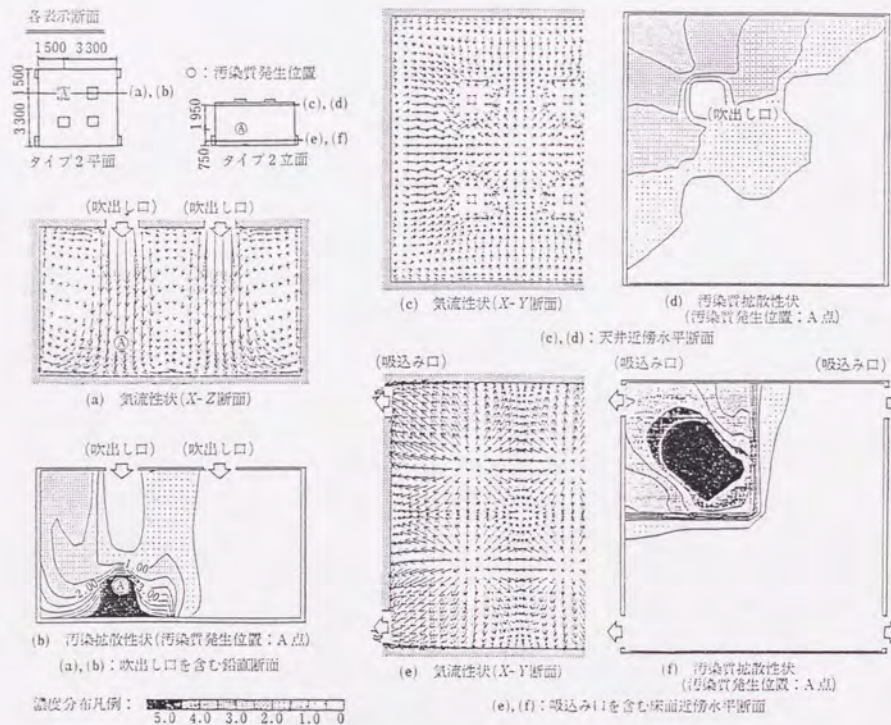


図-5.5 タイプ2の気流性状および汚染質拡散性状(吹出し口4個, 吸込み口4個, 汚染質発生位置: 吹出し噴流部A点)

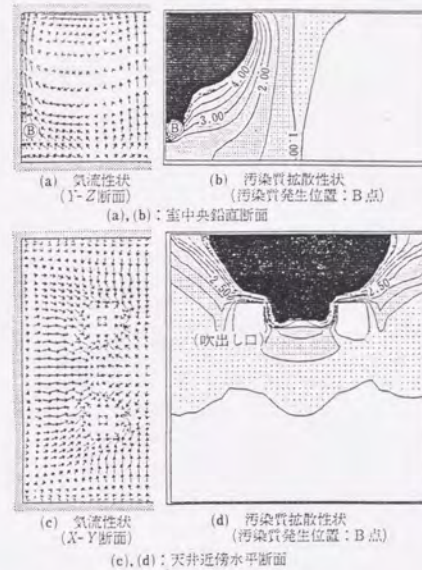


図-5.6 タイプ2の気流性状と汚染質拡散性状 (汚染質発生位置: 壁際B点)

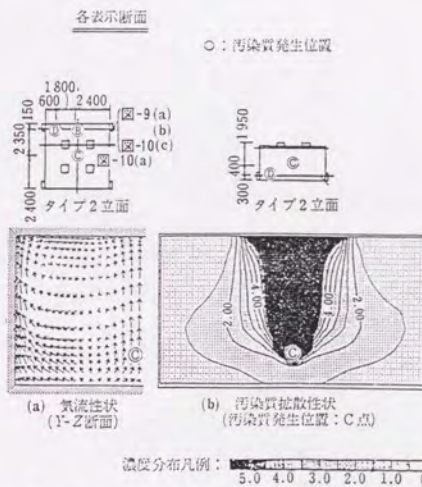


図-5.7 タイプ2の気流性状および汚染質拡散性状 (汚染質発生位置: 室中央C点)

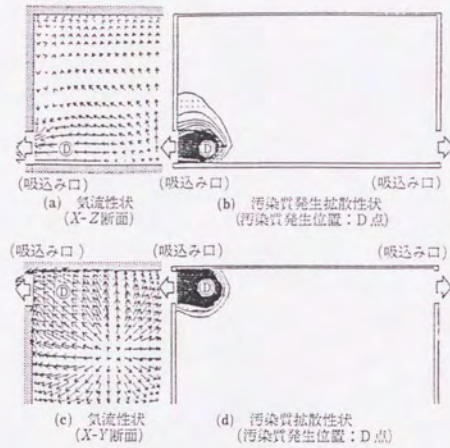


図-5.8 タイプ2の気流性状および汚染質拡散性状
(汚染質発生位置: 吸込み口近傍D点)

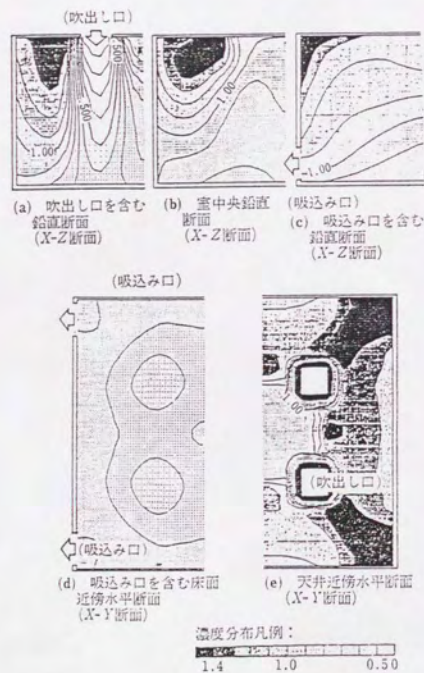


図-5.9 タイプ2の汚染質拡散性状(室内一様汚染
質発生, 換気効率指標3)

表-5.2 タイプ2の室内平均濃度と平均拡散半径

| 汚染質発生位置 | 室内平均濃度 [-] | 平均拡散半径 [m] |
|------------|---------------|---------------|
| 吹出し噴流部 A点 | 0.76 | 1.80 |
| 壁面近傍 B点 | 1.50 | 1.68 |
| 室中央上昇流部 C点 | 1.50 | 1.89 |
| 吸込み口手前 D点 | 0.06 | 1.00 |

5. 2. 3 タイプ3の気流性状と汚染質拡散性状

吹出し口6個、吸込み口4個を有するタイプ3の気流性状と汚染質拡散性状を図-5. 10~5. 14に、室内平均濃度および平均拡散半径を表-5. 3に示す。

(1) 気流性状

本タイプの気流性状は、タイプ2と同様、一つの吹出し噴流とその周囲の上昇流（隣接する吹出し口間では、上昇流と下降流の衝突となる）を1単位とする気流単位を6個合成した様相を呈する。これらは3個連なって1列となり、この列が二つ並行に位置する三連2列の配置となっている〔図-5. 10(a), (b), (f)〕。また、床面での発散流〔図-5. 10(f)〕、吹出し噴流〔図-5. 10(a), (b)〕、壁際の上昇流〔図-5. 10(a)~(e)〕、吹出し口に囲まれた部分の上昇流〔図-5. 10(e)〕、隣接する吹出し口間の上昇流と下降流の衝突〔図-5. 10(a), (b)〕および壁面に向かう水平成分を有する流れ〔図-5. 10(e)〕など部分的な流れの様相はタイプ2の場合とほぼ同様である。

(2) 汚染質拡散性状

a) 吹出し噴流部で汚染質が発生した場合

吹出し噴流部（A点またはB点）で汚染質が発生した場合を図-5. 10に示す。

本タイプの気流性状は一つの吹出し噴流とその周囲の上昇流（隣接する吹出し口間では、上昇流と下降流の衝突となる）を1単位とする気流単位が3個連なって1列となり、この列が二つ並行に位置するという様相を呈する〔図-5. 10(a), (b)〕。

三連の気流単位のうち端の吸込み口に接する単位の吹出し噴流中（A点）で汚染質が発生した場合〔図-5. 10(c), (d)〕、汚染質はその単位内に拡散し、単位内は高濃度となる。その単位は吸込み口に接するため、汚染質は吸込み口から直接室外に排出され、汚染質の分布はその単位（室の1/6の領域）に留まる。室内平均濃度は0.53、平均拡散半径は1.63mと、室の長さスケールの19%となる。

一方、三連の気流単位のうち中央の単位の吹出し噴流中（B点）で汚染質が発生した場合〔図-5. 10(e), (f)〕、汚染質は吸込み口に向かうため、中央の単位に続いてその両側の単位にも流入し拡散する。これら両側の単

位内の汚染質濃度は中央の単位に比べやや低くなる。また、汚染質は発生位置近くの吸込み口〔図-5. 10(f)中、上側の吸込み口〕より排出され、室の半分の領域は清浄となる。室内平均濃度は1.51、平均拡散半径は2.20mといずれも大きな値となる。

b) 壁面近傍部で汚染質が発生した場合

壁面近傍部（C点）で汚染質が発生した場合を図-5. 11に示す。壁面近傍上昇流に対応し高濃度域は発生位置より上部に広がり〔図-5. 11(a)~(d)〕、天井面に沿った収束流により吹出し口周囲に到達する〔図-5. 11(e), (f)〕発生位置側の三連の単位には汚染質が分布するが、反対側の三連の単位は清浄となる〔図-5. 11(d)〕。室内平均濃度は1.82とタイプ3では最も大きく、また、平均拡散半径は1.99mとなる。

c) 室中央で汚染質が発生した場合

室中央部（D点）で汚染質が発生した場合を図-5. 12に示す。室中央では上昇流と下降流が衝突して複雑な様相となる。室の中央で発生した汚染質は室全体に移流・拡散され、吹出し噴流部を除き室内は1.0以上の濃度となる〔図-5. 12(b), (c)〕。室内平均濃度は1.72、平均拡散半径は2.15mとなり、両者とも大きな値となる。

d) 吸込み口近傍部で汚染質が発生した場合

吸込み口近傍部（E点）で汚染質が発生した場合を図-5. 13に示す。吸込み口手前で発生した汚染質は吸込み口に収束する気流により、ほとんど拡散されずに排出される〔図-5. 13(b)〕。タイプ3の吸込み風速はタイプ2より増大しているため、室内平均濃度は0.03、平均拡散半径は0.48mとなり、タイプ2に比べ両者とも小さな値となる。

e) 室内一様汚染質発生（SVE3）の場合

室内で一様に汚染質が発生した場合の濃度分布を図-5. 14に示す。吹出し噴流部の低濃度〔図-5. 14(a)〕。床面から天井へと濃度が高くなる状況〔図-5. 14(a)~(c)〕、天井吹出し口脇の高濃度〔図-5. 14(e)〕などタイプ2と同様である。また、短辺壁面上部の領域も高濃度となっている。

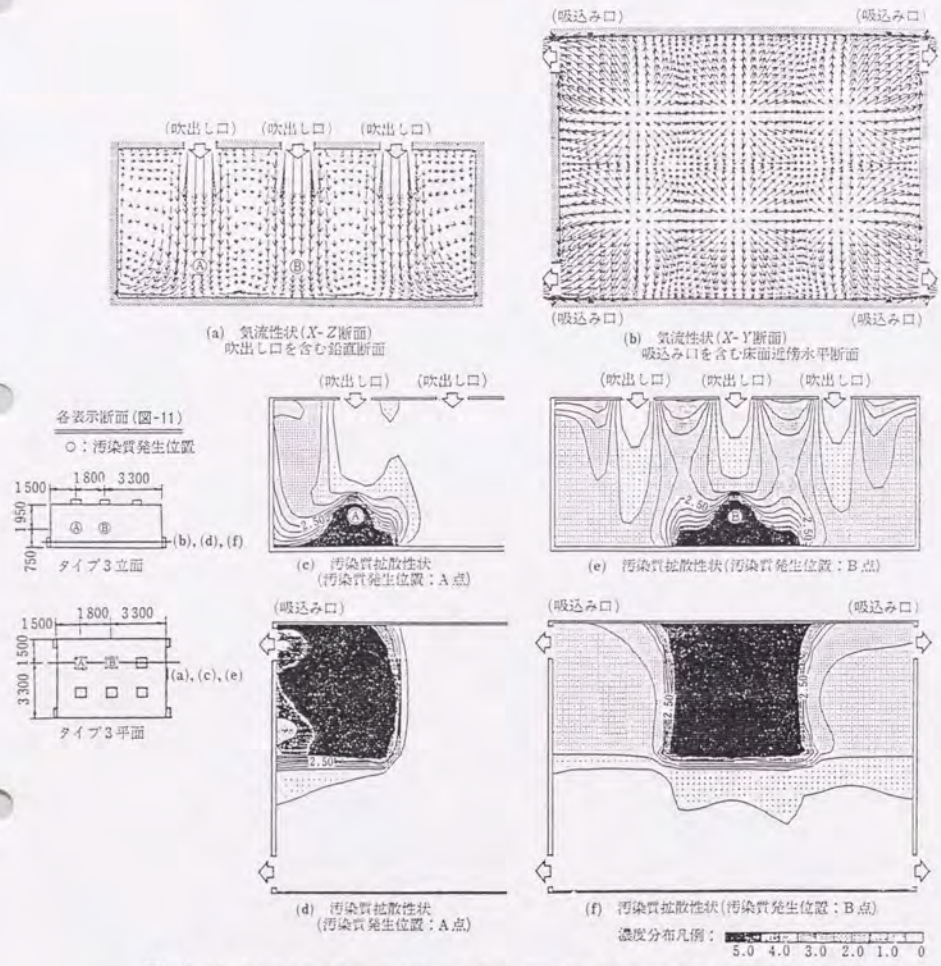


図-5.10 タイプ3の気流性状および汚染質拡散性状(吹出し口6個, 吸込み口4個, 汚染質発生位置: 吹出し噴流部A点またはB点)

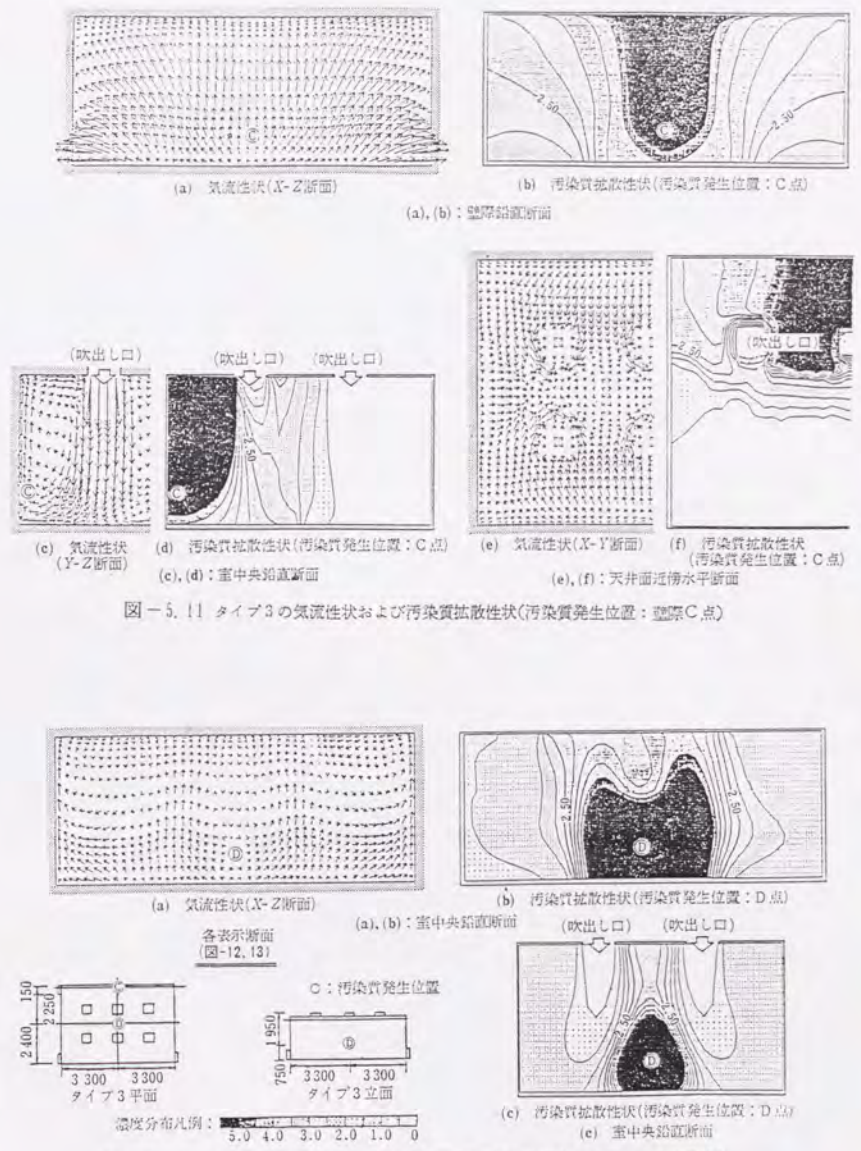


図-5.11 タイプ3の気流性状および汚染質拡散性状(汚染質発生位置: 壁際C点)

図-5.12 タイプ3の気流性状および汚染質拡散性状(汚染質発生位置: 室中央D点)

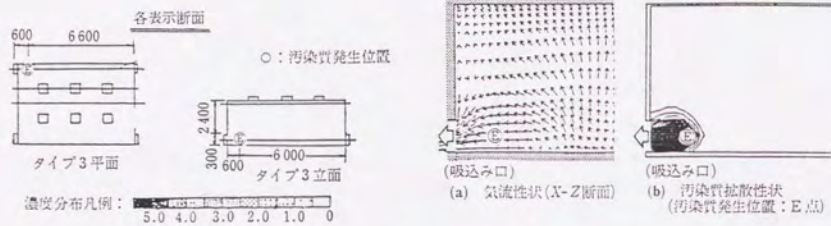


図-5.13 タイプ3の気流性状および汚染質拡散性状(汚染質発生位置: 吸込み口近傍E点)

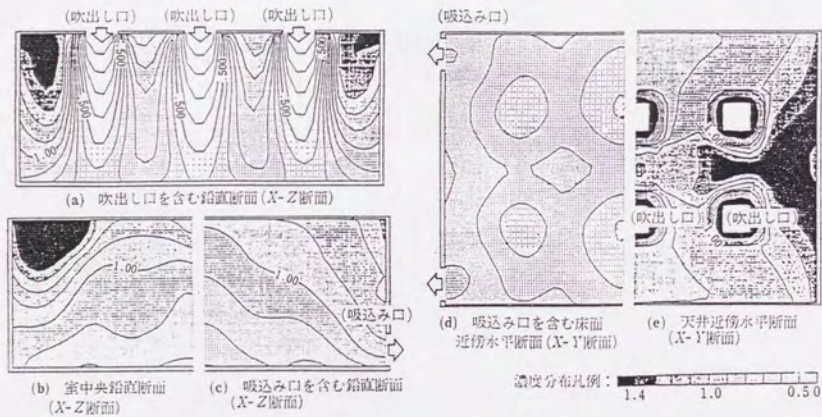


図-5.14 タイプ3の汚染質拡散性状(室内一様汚染質発生, 換気効率指標3)

表-5.3 タイプ3の室内平均濃度と平均拡散半径

| 汚染質発生位置 | 室内平均濃度 [-] | 平均拡散半径 [m] |
|-----------|---------------|---------------|
| 吹出し噴流部 A点 | 0.53 | 1.63 |
| 吹出し噴流部 B点 | 1.51 | 2.20 |
| 壁面近傍 C点 | 1.82 | 1.99 |
| 室中央 D点 | 1.72 | 2.15 |
| 吸込み口手前 E点 | 0.03 | 0.48 |

5. 2. 4 タイプ4の気流性状と汚染質拡散性状

吹出し口9個、吸込み口4個を有するタイプ4の気流性状と汚染質拡散性状を図-5. 15~5. 17に、室内平均濃度と平均拡散半径を表-5. 4に示す。

(1) 気流性状

本タイプの気流性状は、タイプ2, 3と同様、一つの吹出し噴流とその周囲の上昇流(隣接する吹出し口間では、上昇流と下降流の衝突となる)を1単位とする気流単位を9個合成した様相を呈する。これらは、3個連なって1列となり、この列が三つ並行に位置する三連三列の配置となっている〔図-5. 15(a), (b), (e)〕。また、吹出し噴流〔図-5. 15(a), (b)〕、壁際の上昇流〔図-5. 15(a)~(d)〕、隣接する吹出し口間の上昇流・下降流の衝突〔図-5. 15(a), (b)〕などの部分的な流れの様相もタイプ2, 3とほぼ同様である。

(2) 汚染質拡散性状

a) 吹出し噴流部で汚染質が発生した場合

吹出し噴流部(A点)で汚染質が発生した場合の汚染質拡散性状を図-5. 15に示す。

本タイプの気流性状は気流単位が3個連なって1列となり、この列が三つ並行に位置する三連三列の様相を呈する〔図-5. 15(a), (b)〕。吸込み口に接する単位内の吹出し噴流部(A点)で汚染質が発生した場合〔図-5. 15(c), (d)〕、汚染質はその単位中に拡散し近接する吸込み口より排出される。そのため汚染質の分布は室の1/9の領域に限られ、他の8/9の領域は清浄となる。室内平均濃度は0.26、平均拡散半径は1.33m(室の長さスケール9.7mの14%)と比較的小きな値となる。

壁側中央の気流単位内の吹出し噴流部(C点)で汚染質が発生した場合〔図-5. 15(e), (f)〕、その単位内は吹出し噴流部を除き2.0以上の高濃度となる。濃度分布はタイプ3の場合〔5. 2. 3(2), 図-5. 10(e), (f)〕とほぼ同様の様相を呈し、吸込み口側に隣接する単位にも汚染質が拡散する。汚染質は室の1/3の領域に分布するが、他の2/3の領域は清浄となる。室内平均濃度は1.15、平均拡散半径は1.97mと吸込み口に近いA点で汚染質が発生した場合より大きくなる。

室中央の気流単位内の吹出し噴流部(E点)で汚染質が発生した場合〔図-

5. 15(g), (h)〕、その単位は吹出し噴流部を除き1.0以上の濃度となる。さらに、汚染質は四隅の吸込み口に向かうためすべての単位に拡散し、室内は吹出し噴流部を除き0.5以上の濃度となる。室内平均濃度は1.37、平均拡散半径は2.55m(室の長さスケール9.7mの26%)と非常に大きくなる。

b) 壁際・室中央間で汚染質が発生した場合

汚染質発生位置が壁際から室中央まで、順次変化した場合(B~E点)の汚染質拡散性状を図-5. 16に示す。

壁際(B点)で汚染質が発生した場合〔図-5. 16(d)〕、壁から吹出し噴流までの領域に高濃度の汚染質が分布する。この場合、室の1/2が清浄となる。

壁側の吹出し噴流部(C点)で汚染質が発生した場合〔図-5. 16(c)〕、発生位置から床面までの領域および壁際の天井面までの領域が高濃度領域となる。この場合も室の1/3が清浄となる。

吹出し噴流間の中央(D点)で汚染質が発生した場合〔図-5. 16(d)〕、高濃度領域は発生位置の周囲に限られる。この場合、室の1/2以上の領域に汚染質が分布する。

室中央(E点)で汚染質が発生した場合〔図-5. 16(e)〕、吹出し噴流部を除く室全体が汚染される。

室内平均濃度(表-5. 4)は、壁際で汚染質が発生した場合(B点)が最も高く、次いで吹出し噴流間(D点)、室中央吹出し口下(E点)、壁側吹出し口下(C点)の順に低くなる。一方、平均拡散半径は、汚染質発生位置が壁側から室中央になるにつれ、その汚染質の分布領域の大きさに対応してより大きな値となる。

c) 室内一様汚染質発生(SVE3)の場合

室内で一様に汚染質が発生した場合の濃度分布を図-5. 17に示す。吹出し噴流部の低濃度〔図-5. 17(a)〕、床面から天井へと濃度が高くなる状況〔図-5. 17(a)~(c)〕、天井吹出し口脇で高濃度〔図-5. 17(e)〕などタイプ2やタイプ3と同様の様相を呈する。室隅角部の天井付近の濃度が特に高くなっており、こうした領域では吹出し口からの空気がかなり長い時間(行程)をかけて到達することがわかる。

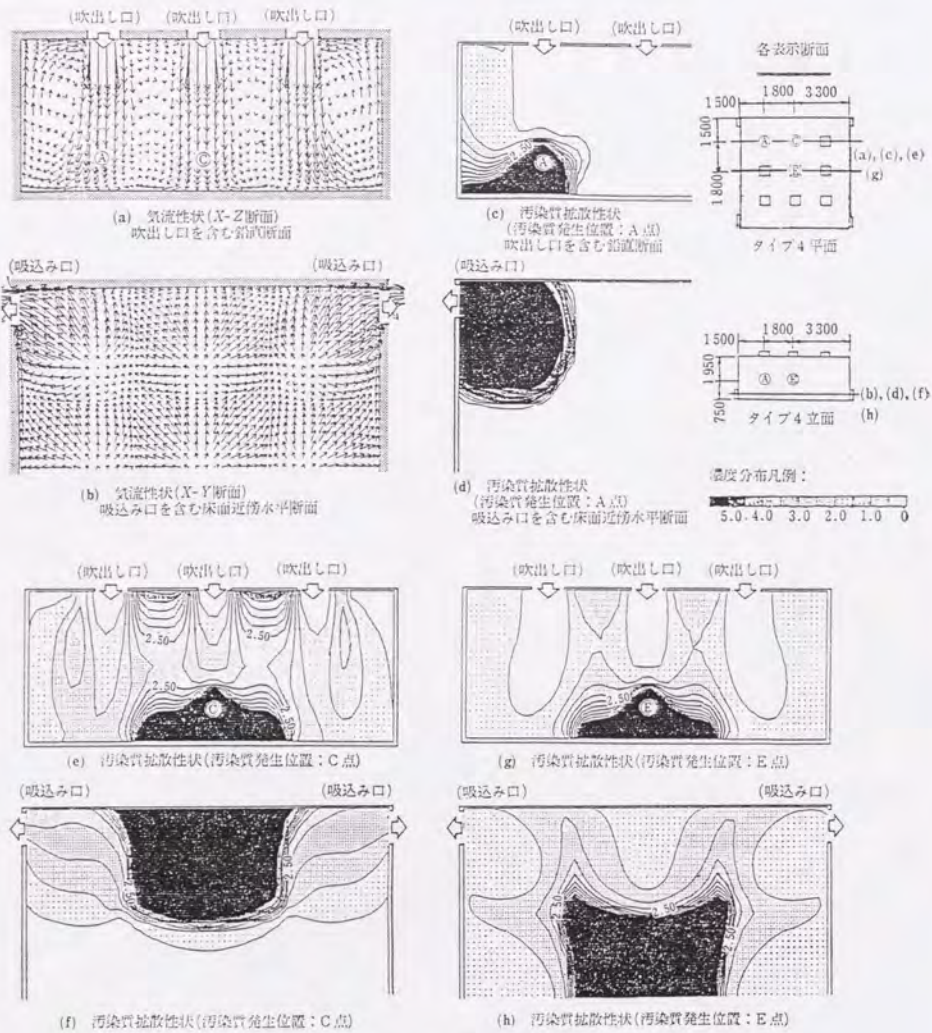


図-5.15 タイプ4の気流性状および汚染質拡散性状(吹出し口9個, 吸込み口4個, 汚染質発生位置: A点またはC点またはE点)

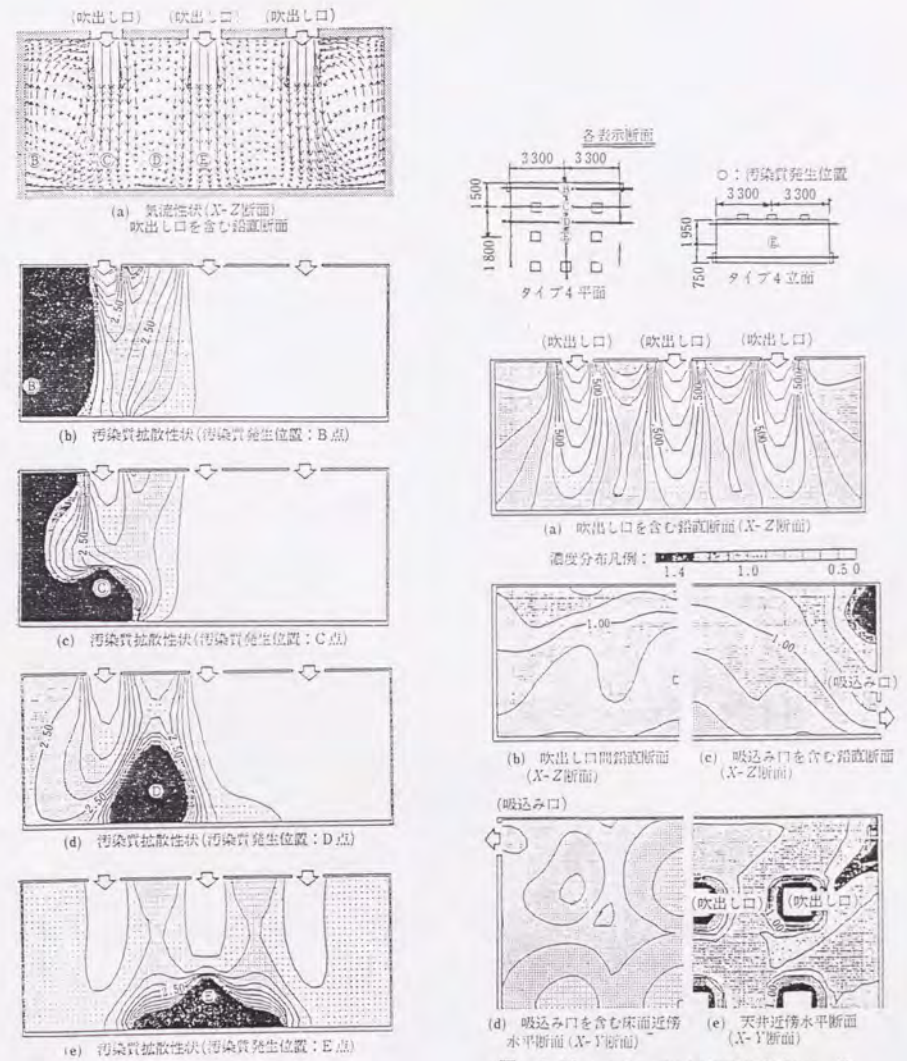


図-5.16 タイプ4の気流性状および汚染質拡散性状(汚染質発生位置: B~E点)

表-5.4 タイプ4の室内平均濃度と平均拡散半径

| 汚染質発生位置 | | 室内平均濃度 [-] | 平均拡散半径 [m] |
|-------------|----|---------------|---------------|
| 吹出し噴流部 | A点 | 0.26 | 1.33 |
| 壁面近傍 | B点 | 1.56 | 1.87 |
| 吹出し噴流部 | C点 | 1.15 | 1.97 |
| 吹出し噴流間 | D点 | 1.43 | 2.17 |
| 吹出し噴流部(室中央) | E点 | 1.37 | 2.55 |

5.3 基本タイプの気流性状・汚染質拡散性状の特徴

基本タイプの解析結果より判明した気流性状・汚染質拡散性状の特徴を以下に整理する。

5.3.1 気流性状の特徴

室内の気流性状は、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。したがって、汚染質分布の様相も気流単位と発生位置の位置関係から整理することができる。

5.3.2 汚染質拡散性状の特徴

汚染質拡散性状の特徴を気流単位と関連させ以下に整理する。

(1) 気流単位内の汚染質発生

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。

(2) 気流単位間の汚染質発生

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。多数の吹出し口を有する場合、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、汚染質の分布範囲はその大きな系の内部に留まる。例えば、吹出し口4個のタイプ2の場合には、2個の単位が大きな系となっており、タイプ3や4の場合には、三連の単位が大きな系となっている。

(3) 他の気流単位への汚染質拡散

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。吸込み口に接する単位内で汚染質が発生する場合、ほとんどの汚染質は吸込み口から排出され他の単位には拡散しない。一方、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。

5. 3. 3 気流単位

(1) 気流単位形成の要件

乱流型クリーンルーム内の気流性状の特徴として導出された“気流単位”が形成される室の要件は以下の通りである。

- ①室内天井に局所的な複数の吹出し口が設置されていること。
- ②吸込み口は壁面等に局所的に設置されており、各々の吸込み気流は室内全体の気流性状の様相に影響を及ぼさないこと。
- ③吹出し口の形状は、誘引・拡散型でなく、吹出し噴流を形成するような形状であること。(多くの乱流型クリーンルームでは吹出し口はHEPAフィルタ+室内側前面バンチングメタルの構成となっており、吹き出し噴流が形成される。)
- ④吹出し口幅に比べ天井高が小さく、吹出し噴流が減衰することなく、十分な運動量を有するまま床面に衝突すること。(ちなみに、本研究では、吹出し口幅1に対し、天井高さ4.5となっており、天井面と床面の間に気流単位が形成されている。)
- ⑤床面に衝突後、形成される床面に沿った強い発散流は、別の発散流と衝突後上昇流を形成するに十分な運動量を有すること。
- ⑥室内中間高さにおいて水平成分の卓越した強い流れのないこと。気流単位の形成されている室内において水平成分を有する流れは、床面に沿った発散流、天井面に沿った収束流(これらの流れは各気流単位の構成要素である)及び、吸込み口周辺の収束流に限られる。
- ⑦室内中間高さの空間においては下降流(吹出し気流等)及び上昇流(吹出し気流間の流れ、壁際の流れ等)のみ存在すること。

(2) 気流単位の定義

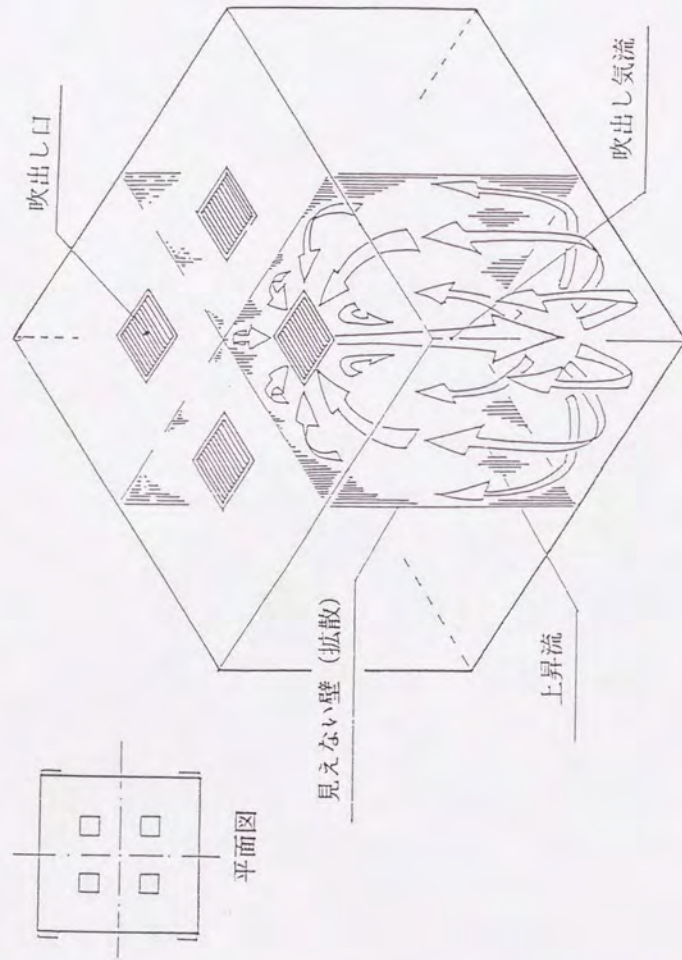
気流単位概念図を図-5.18に示す。気流単位は、“①1個の吹出し噴流及びその②床面での発散流、この発散流と別の吹出し噴流による発散流との衝突により生ずる③吹出し噴流間の上昇流、この上昇流が天井面に至った後、④天井面に沿ってもとの吹出し口に向かう収束流という4つの部分的な気流性状により構成される1個の気流パターン”として定義される。なお、これは室の天井高、隣接する複数の吹出し気流と2次的な上昇流等がある種のバランスの上に複合・形成される1種の気流性状のパターンであるため、これ以上の定量的な定義を示すことは難しいと考えられる。

一方、図-5.19, 5.20に示されるように、気流単位の境界と汚染質の分布範囲がほぼ一致していることから、汚染質の移流・拡散状況も含めて、気流単位を“中央の吹出し気流部を除く内部がほぼ一様な汚染質の濃度分布となり、

外縁の上昇流部で濃度値が大きく変化するような、1個の吹出し噴流と周囲の上昇流により構成されるまとまり”と拡張定義できる。

(3) 気流単位の境界

本研究では、各気流単位の境界位置の判断に関し、床面近傍の水平面の風速ベクトル図を参照し、各発散流の衝突部分(この部分に上昇流が形成される)から上部に境界が存在するものと見なしている。図-5.19では室上部の領域まで、床面における気流性状から判断した境界と汚染質の分布範囲が一致しており、図-5.20では汚染質制御上重要となる高濃度領域が、床面における気流性状から判断した境界と対応しており、気流単位間の上昇流が不明確の場合も床面の気流性状から気流単位の境界を判断して差し支えないと考えられる。



(タイプ2)
図-5. 18 気流単位の概念図

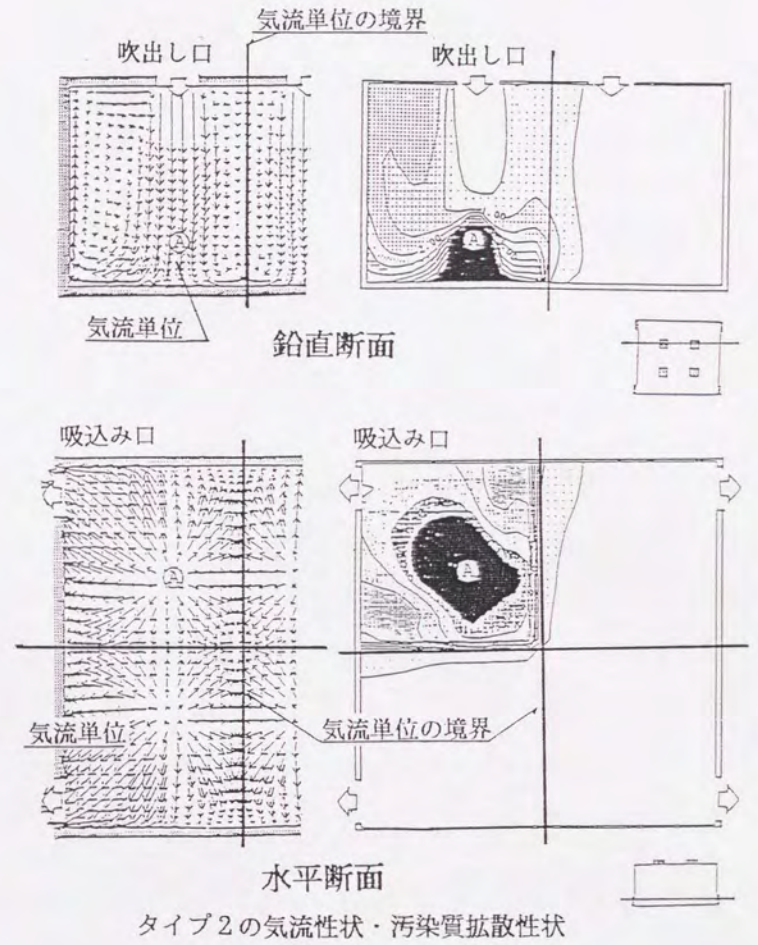
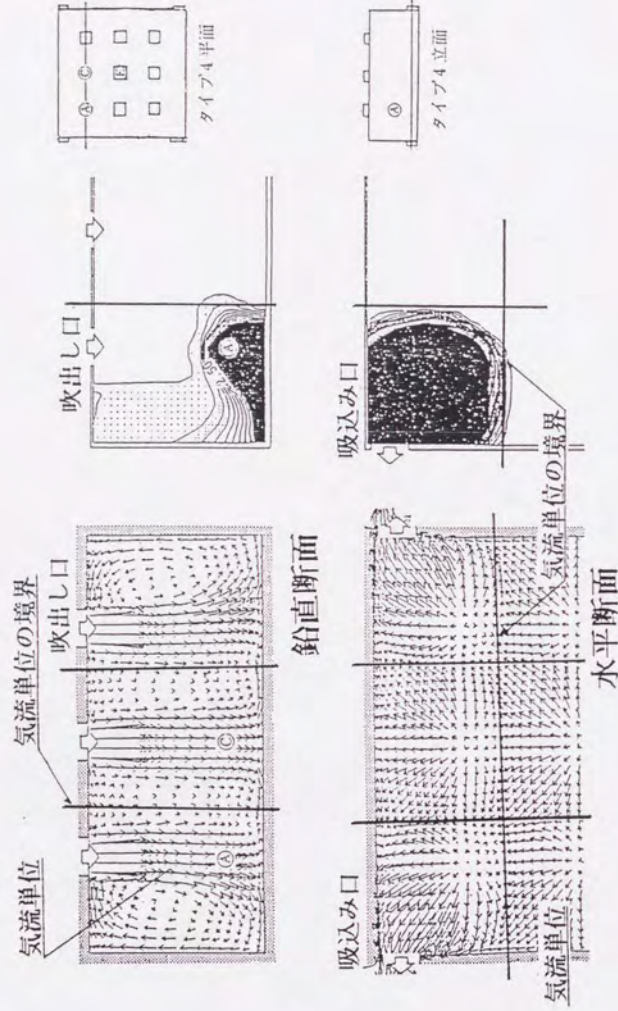


図-5. 19 気流単位の境界と汚染質の分布範囲



タイプ4の気流性状・汚染質拡散性状
 図一5.20 気流単位の境界と汚染質の分布範囲

5.3.4 換気効率についての考察

(1) 室内平均濃度

1個の気流単位となるタイプ1では、室中央の吹出し噴流部から壁際に行くに従い室内平均濃度は大きな値となり、発生した汚染質は排出されにくくなる。一方、複数の気流単位を有するタイプ2～4では室中央側の単位内の汚染質発生ほど室内平均濃度は大きな値となり、発生した汚染質は排出されにくくなる。

(2) 平均拡散半径

タイプ1では、壁際から室中央の吹出し噴流部に行くに従い平均拡散半径は大きな値となる。複数の気流単位を有するタイプ2～4では室中央側の単位内の汚染質発生ほど平均拡散半径は大きな値となり、汚染質の分布範囲は大きくなる。

(3) 吹出し空気の平均到達時間

吹出された清浄空気の到達時間(行程)は吹出し口周囲で特に大きくなるほか、室内上部の空間ほど大きくなる。これらの領域に到達する空気は汚染されている可能性が高い。

第6章 吹出し口・吸込み口の設置状況が変化した場合の気流性状・汚染質拡散性状

5. 4 結論

本章では数値シミュレーションにより基本的な形状のコンベンショナルフロー型クリーンルームモデル内の流れ場・拡散場の解析を行った。解析により明らかとなった気流性状と汚染質拡散性状の関係や拡散場自体の特徴や室内気流制御によるコンタミネーションコントロールに関する知見は以下の通りである。

- (1) コンベンショナルフロー型クリーンルームモデル内の流れ場は一つの吹出し噴流とその周囲の上昇流を1単位とする気流単位が合成されたものと解釈できる。
- (2) 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予測を行うことが可能である。
- (3) 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。

* 第5章の参考文献

- 1) 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5)
モデルクリーンルームにおける実験及び数値シュミレーション
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
- 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
- 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7) 数値シュミ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
- 4) 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9)
数値シュミ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
- 5) 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)
- 特に数値シュミ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
- 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
第1報-数値シュミ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
- 7) 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6章 吹出し口・吸込み口の設置状況が変化 した場合の気流性状・汚染質拡散性状

第6章 吹出し口・吸込み口の設置状況が変化した場合の気流性状・汚染質拡散性状

6.1 研究対象モデル及び着目点

本章では、基本タイプのクリーンルームモデルに対し、吹出し口や吸込み口の配置などを変更したモデルを対象として行った流れ場・拡散場の数値シミュレーション結果を報告する^{1)~3)}。前章にて解析を行ったクリーンルームモデル4タイプ(基本タイプ1~4)および本章にて解析を行う10タイプ(タイプ5~14)の形状を図-6.1に示す。これらのタイプは基本タイプ1~4に対し、

- 1) 吸込み口の設置高さの変更(タイプ5~7)
- 2) 吸込み口削減(タイプ8)
- 3) 室形状の変更(タイプ9)
- 4) 吹出し口の削減(タイプ10およびタイプ11~14)

を行っている。また、汚染質拡散解析における汚染質発生位置を図-6.1中に●印で示す。これらは吹出し噴流部、壁際、室の中央などの特徴的な部位に設定されている。

本解析により、これらの室内条件の変化が室内の流れ場・拡散場の形成に与える影響を明らかにする。また、室内の汚染質発生位置を固定し、吹出し口の配置状況を変更した場合(それに応じて室の換気量も変化する)に関して換気効果の検討を行い、吹出し口の有効な配置方法を考察する。

6.2 吹出し口の設置状況が変化した場合の気流性状・汚染質拡散性状

6.2.1 室形状の変更(タイプ9)

タイプ9はタイプ1の室形状を3個直列に合成したものであり、三連の吹出し口を有する基本タイプ3,4の吹出し口配置を構成単位に分割したものと考えられる。タイプ9の気流性状と汚染質拡散性状を図-6.2に示す。

本タイプの気流性状は、気流単位を3個合成した様相を呈するが〔図-6.2(a), (b)〕, 天井までの上昇流発生領域は長辺壁面に沿った部分に限られ、上昇流の速度や範囲はタイプ3,4よりも大きくなる〔図-6.2(b), (c)〕。また、下降流の領域は吹出し噴流間に限られ、この部分の風速もタイプ3,4よりも大きくなる。

気流単位内で汚染質発生の場合(A点またはB点), 汚染質はその単位内に高濃度で分布し、この単位の境界より外側で著しく濃度が低下する〔図-6.

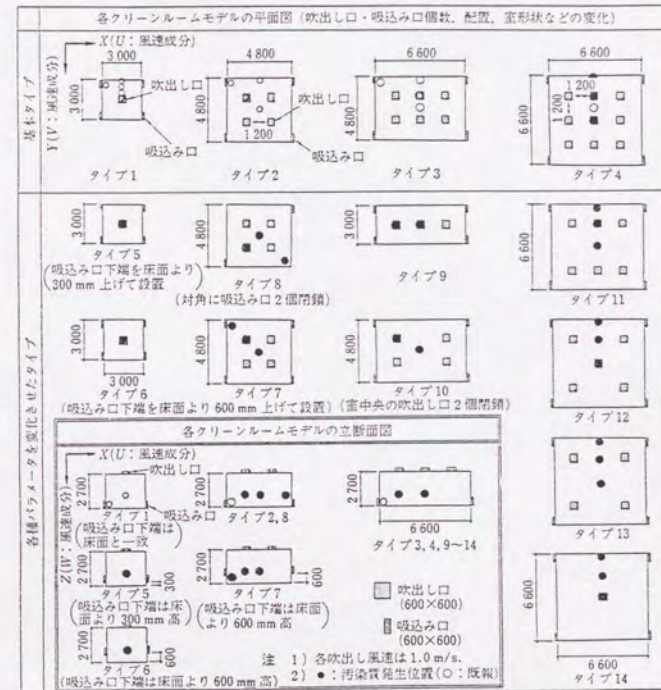


図-6.1 クリーンルームモデルおよび 汚染質発生位置

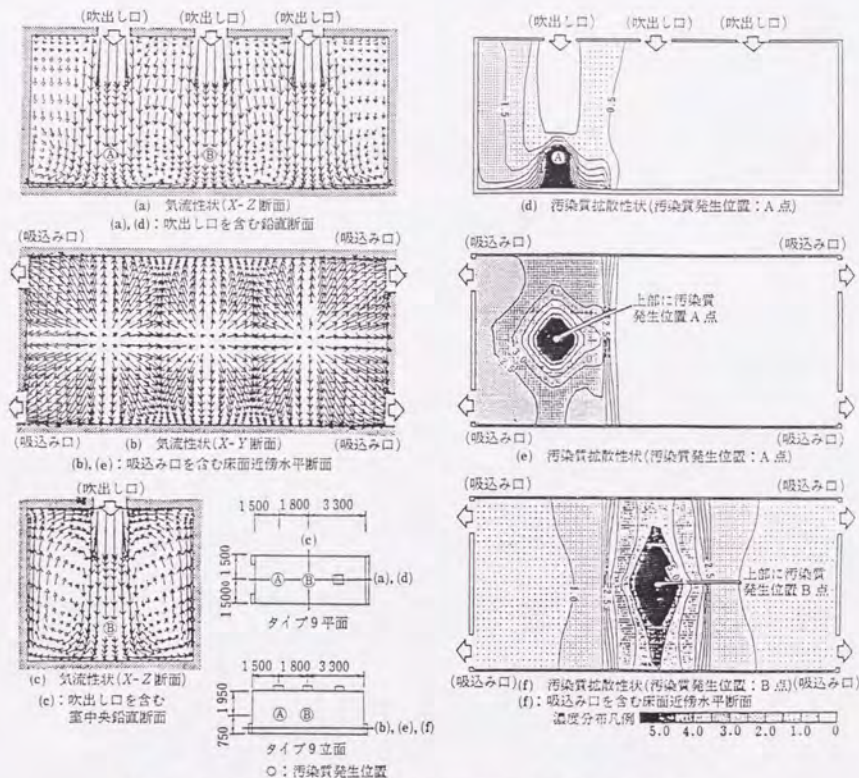


図-6.2 タイプ9の気流性状および汚染質拡散性状(吹出し口3個, 吸込み口4個)

2 (d) ~ (f)] . 特に、吸込み口を有する気流単位で汚染質発生のある場合 (A点) には、汚染質は隣接する単位へはほとんど拡散しない。

6. 2. 2 吹出し口の削減 (タイプ10)

三連2列の吹出し口配置のタイプ3に対し、室中央の吹出し口2個を削減し、吹出し口を4個としたタイプ10の気流性状と汚染質拡散性状を図-6. 3, 6. 4に示す。

4個の吹出し口に対応し、気流単位は4個形成され、各々の単位が占める領域は室の1/4とタイプ3に比べて大きくなる [図-6. 3 (a), (b)] . このため、吹出し噴流部 (A点) で発生した汚染質は、室1/4の領域に分布する [図-6. 3 (c), (d)] . 平均拡散半径²⁾は2.11mとなり、タイプ3の同じ位置で汚染質発生する場合 (1.63m) に比べかなり大きな値となる。また、室内平均濃度²⁾は1.03となり、タイプ3の0.53に比べ大きい。

本報で示す無次元濃度分布や室内平均濃度は、各タイプごとの瞬時一樣拡散濃度を基準としているため同一の瞬時一樣拡散濃度 (同一汚染質発生量の場合、同一換気量となる) の室内においてのみ濃度の大小比較が可能である。タイプ10では吹出し個数の削減に伴い、換気量はタイプ3の2/3となっている。したがって瞬時一樣拡散濃度を1とするため、濃度分布解析では汚染質発生量もタイプ3の2/3倍としている。吹出し口を削減して換気量を減少させた効果に関し、タイプ10の濃度値とタイプ3の濃度値を比較して考察するためには同一の汚染質発生量に換算する必要がある。これには、タイプ10の濃度値を3/2倍すればよい、タイプ10のA点における汚染質発生ではタイプ3と同量の汚染質発生量とした場合の室内平均濃度は1.55と換算され、タイプ3の室内平均濃度0.53に比べ著しく大きな値となり、汚染質が排出されにくいことがわかる。本タイプでは4個の気流単位の境界となる室中央に天井まで至る上昇流が形成される。室中央 (B点) で汚染質が発生した場合、汚染質は上昇流に移流され、発生位置上部に高濃度領域が形成される [図-6. 3 (e), (f)] . この場合、室内の広い領域で1.5以上の高濃度となる。平均拡散半径は2.18mと吹出し噴流部の汚染質発生とはほぼ同様になるが、室内平均濃度は1.64とかなり大きな値となる。また、タイプ3と同一汚染質発生量として換気量削減の影響を検討する場合、この値は2.64と換算され、タイプ3の同位置の汚染質発生の場合、(室内平均濃度: 1.72) に比べると、汚染質が排出されにくいことがわかる。

室内で一樣に汚染質を発生させた場合³⁾、室の上部ほど高濃度となるほか、吹出し周辺の天井面近傍および室中央や吸込み口上部の天井面近傍の領域で特に高濃度となる (図-6. 4)。

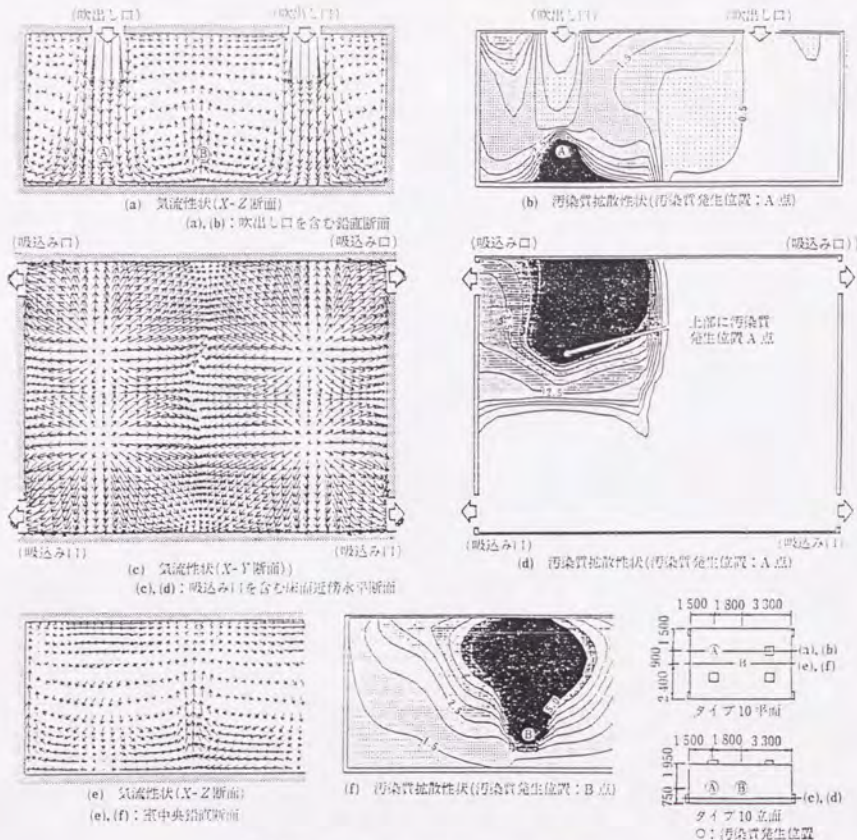


図-6.3 タイプ10の気流性状および汚染質拡散性状

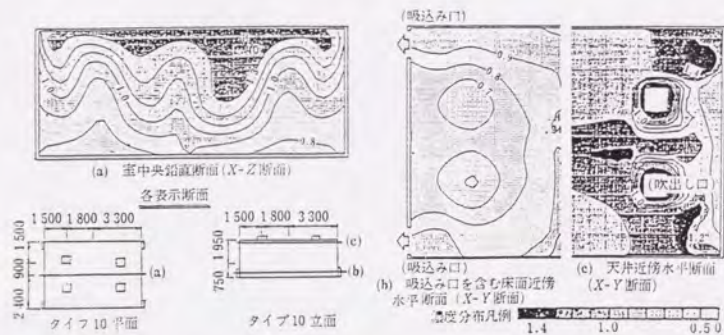


図-6.4 タイプ10の汚染質拡散性状(室内一様汚染質発生, 换气効率指標3)

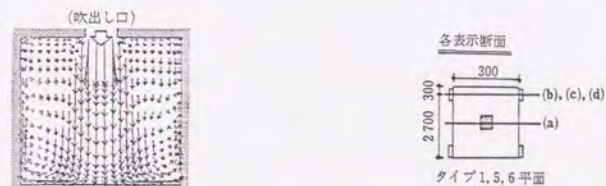
6.3 吸込み口の設置状況が変化した場合の気流性状・汚染質拡散性状

6.3.1 吸込み口高さの変更(タイプ5, 6, 7)

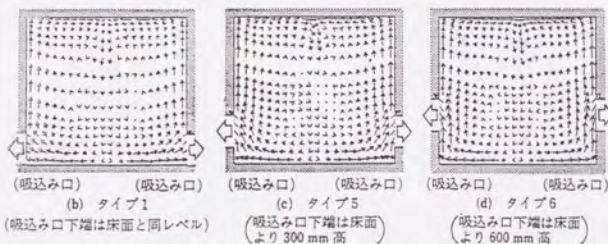
吸込み口の下端が床面に接するタイプ1に対し、下端を床面よりそれぞれ30cm上部(吸込み口幅の半分)、60cm上部に設置したタイプ5, 6の気流性状を図-6.5に示す。また、タイプ2に対し吸込み口下端を床面より60cm(吸込み口幅)上部に設置したタイプ7の気流性状と汚染質拡散性状を図-6.6に示す。

タイプ1, 5, 6とも、吸込み口近傍では上昇流が生じる〔図-6.5(a), タイプ5, 6は割愛〕。また、吹出し噴流、壁際の上昇流などの気流性状の様相〔図-6.5(b), (c), (d)〕, 各汚染質発生位置による濃度分布の様相(図は割愛)などほぼ同様となる。このタイプの場合、吸込み口の高さの変更による影響はほとんどない。

タイプ2に対し、吸込み口高さを変化させたタイプ7では吸込み口に向かう床面からの上昇流が形成される〔図-6.6(c)〕。吸込み口上部の空間では、タイプ2とは異なり吸込み口に向かう下降流は形成されず、その領域は弱い上昇流となる。このため、吸込み口近傍(C点)で発生した汚染質の一部は天井まで到達する〔図-6.6(d)〕。室内平均濃度は0.16, 平均拡散半径は1.47mとなり、タイプ2(それぞれ0.03, 1.00m)よりも大きくなる。一方、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一つのまとまり)の形成状況や吸込み口より離れた室内各点で汚染質が発生した場合の濃度分布の状況〔図-6.6(a), (b)〕, 室内平均濃度や平均拡散半径の値など両タイプの差異は極めて小さい。総じて、吸込み口高さの変化による影響は少ない。



(a) タイプ1
(a): 吹き出し口を含む鉛直断面 (Y-Z断面)



(b)-(d): 吸込み口を含む鉛直断面 (Y-Z断面)

図-6.5
タイプ1,5,6の気流性状の比較
(吹き出し口1個, 吸込み口4個)

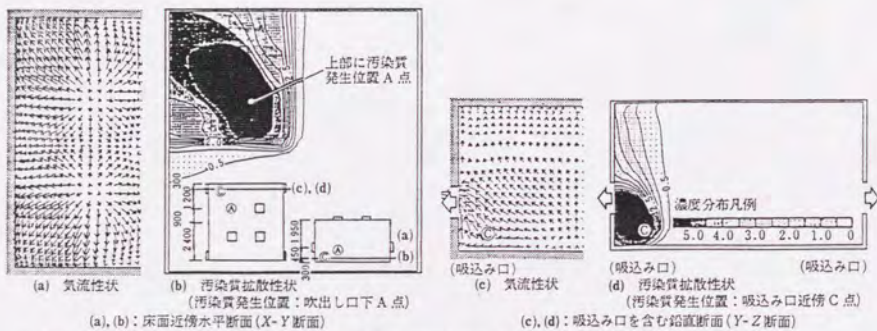


図-6.6 タイプ7の気流性状および汚染質拡散性状(吹き出し口4個, 吸込み口4個の下端は床面より600mm高)

6.3.2 吸込み口の削減 (タイプ8)

吸込み口4個のタイプ2に対し、対角する位置の吸込み口2個を削減したタイプ8の気流性状と汚染質拡散性状を図-6.7, 6.8に示す。

タイプ8もタイプ2と同様に室内に4個の気流単位が形成される。このうち吸込み口を有する単位では、吸込み口1個あたりの吸込み風量が多く、吸込み口手前の風速が増大する〔図-6.7(a)〕。このため、その単位の噴流部(A点)で汚染質が発生した場合、汚染質の分布の様相〔図-6.7(b)〕や平均拡散半径は1.84mとタイプ2(1.80m)とほぼ同様となるものの、室内平均濃度は0.60(タイプ2:0.76)とやや小さな値となる。

一方、吸込み口の削減された部分では強い上昇流が形成される〔図-6.7(c)〕。この部分(C点)で汚染質が発生した場合、汚染質は上昇流により室上部に移流され天井面で広範囲に高濃度領域が形成される〔図-6.7(d)〕。この場合室内の3/4に汚染質が拡散し、対称の位置にある同様に吸込み口を削減された気流単位のみが比較的汚染されない。室内平均濃度は、1.58、平均拡散半径は1.97mと大きな値となる。

室内で一様に汚染質を発生させた場合の濃度分布は削減した吸込み口の上部の空間で特に高濃度となり〔図-6.8(a)〕、この領域に到達する吹き出し空気の到達時間が大きく、汚染された空気の到達する可能性の高いことがわかる。

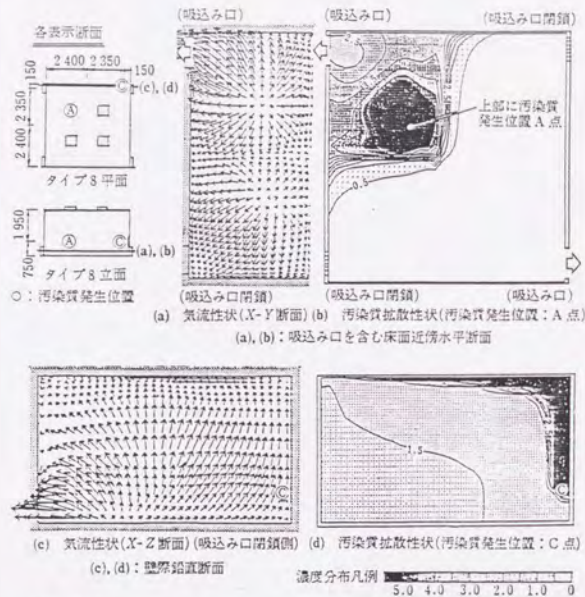


図-6.7 タイプ8の気流性状および拡散性状(吹出し口4個, 吸込み口2個)

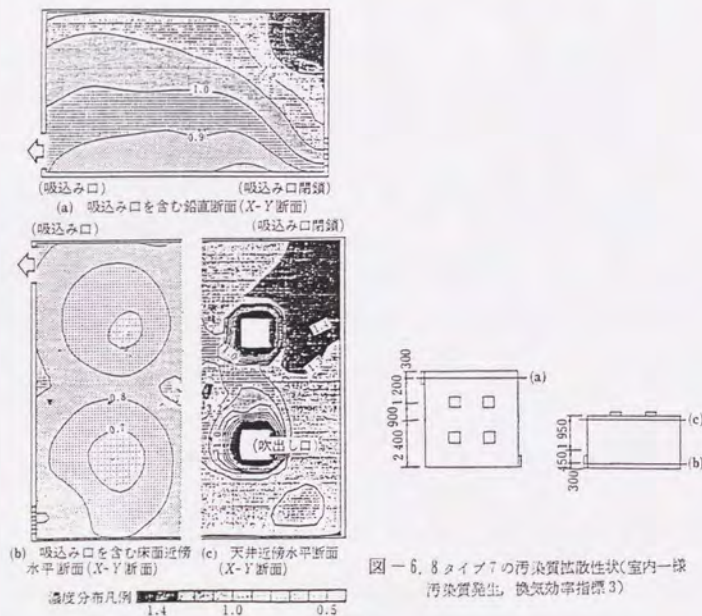


図-6.8 タイプ7の汚染質拡散性状(室内一様汚染質発生, 換気効率指標3)

6.4 吹出し口・吸込み口の設置状況変化のまとめ

吹出し口や吸込み口の位置の変化や削減が室内流れ場・拡散場に与える影響は以下のとおりである。

- (1) 吹出し口を削減する場合、それまでその吹出し口が分担していた気流単位が消滅する。これに伴い隣接していた各単位の領域は増大する。
- (2) 気流単位内で汚染質発生のある場合、単位の領域の増大に伴い汚染質の分布領域も増大し、平均拡散半径の値も大きくなる。
- (3) 室内隅角部の吸込み口を削減した場合、この領域には壁面に沿った強い上昇流が形成される。この領域は、残された吸込み口より遠くなるため、室内の汚染質は排出されにくい。また、この領域は吹出し口からの清浄空気の到達時間が大きく、到達する空気が汚染されている可能性が高い。
- (4) 床面近くの吸込み口設置高さの変更の影響は吸込み口の近傍の領域に限られ、室内全体の気流性状や汚染質拡散性状にはほとんど影響しない。

6. 5 吹出し口の配置と汚染質拡散性状

クリーンルームの計画において換気量の増減は、消費エネルギーにかかわるため重要な検討事項である。吹出し口9個・吸込み口4個を有するタイプ4と同じ大きさの室内モデルで順次吹出し口を削減し、吹出し口配置を変化させたタイプ11～14の換気効果を検討する。これらは、基本タイプ4に対し吹出し風速を一定として、吹出し口の削減により換気量を低減したものと考えられる。以下では、室内各点で汚染質が発生した場合を比較する。

6. 5. 1 室中央で汚染質が発生した場合

各タイプの気流性状および室中央（E点）で汚染質が発生した場合の汚染質拡散性状を図-6. 9に示す。気流単位の形成状況の概略は、表示断面図中に点線の丸印にて示す。これらの濃度分布図は今までと同様に各タイプごとの瞬時一様拡散濃度で基準化した無次元濃度で示してある。

(1) 気流性状および汚染質拡散性状

a) タイプ4 [図-6. 9 (a)～(c)]

三連3列9個の気流単位が形成される。吹出し口間隔が最短となる各単位の境界では上昇流は室下部にとどまる。吹出し噴流部で発生した汚染質は下方に移流され、発生位置の下部が著しく高濃度となる。また、汚染質発生のある中央の気流単位内は高濃度となる。

b) タイプ11 [図-6. 9 (d)～(f)]

三連2列6個の気流単位が形成され、室中央（2列の間）に生ずる上昇流は天井面に達する。汚染質は室中央に生ずる上昇流により移流され、発生位置から天井までの領域は著しく高濃度となる。

c) タイプ12 [図-6. 9 (g)～(i)]

千鳥状に5個の気流単位が形成され、中央の単位の上昇流は各壁面に達する。吹出し噴流部で発生した汚染質は下方に移流され、発生位置の下部が著しく高濃度となる。さらに、吹出し噴流の両側に生ずる強い上昇流により壁面上部に向けて移流され、室内のほとんどの領域で1.0以上の濃度となる。

d) タイプ13 [図-6. 9 (j)～(l)]

二連2列4個の気流単位が形成され、室中央（2列の間）に生ずる上昇流は天井面に達する。汚染質は室中央に生ずる上昇流により室上部に移流され、発生位置から天井までの領域は著しく高濃度となる。また、室内には1以上の濃度が広く分布する。なお、本断面の風速ベクトルの計算結果は空間的振動により非対称となっており、このため濃度分布も非対称となっている。

e) タイプ14 [図-6. 9 (m)～(o)]

室内全体が1個の大きな気流単位となる。吹出し噴流部で発生した汚染質は下方に移流され、発生位置の下部で著しく高濃度となる。また、吹出し噴流部を除き一様に1.5以上の濃度になる。

(2) 換気量の低減効果

各タイプの室内平均濃度（各タイプごとの瞬時一様拡散濃度を基準とした値と、タイプ4の瞬時一様拡散濃度を基準とし換気量の変化にかかわらず汚染質発生量が一定となるように換算した値の2種類）、および平均拡散半径を表-6. 1 (a)に示す。また、後者の各タイプの室内平均濃度（室内平均濃度2）と換気回数との関係を図-6. 10 (a)に示す。図中の双曲線は“換気量×室内平均濃度＝一定”を示す。これは、タイプ4において同一量の汚染質発生量のまま吹出し風速を減少させて換気量を低減した場合の室内平均濃度の増加を示す。

各タイプの室内平均濃度2の値がこの曲線より下にくるか、上にくるかでタイプ4の吹出し口配置を基準とした各タイプの吹出し口の配置による換気効果の良否の判定を行うことができる。

タイプ11およびタイプ12の室内平均濃度は図-6. 10 (a)の双曲線上にあり、タイプ4における吹出し風速減少により換気量の低減を図った場合の室内平均濃度とはほぼ同じ値となる。室中央の汚染質発生に対するこれらのタイプの吹出し口配置は、汚染質の平均室内滞在時間（汚染質の排出されやすさ）に対応する室内平均濃度の観点から、タイプ4の吹出し風速を低減した場合と同程度の換気効果となる。タイプ13は双曲線の上側となり換気効果は劣り、室中央の汚染質発生に対しては適切な吹出し口の配置ではない。タイプ14の室内平均濃度は双曲線の下側となる。この吹出し口の配置は室内平均濃度の値としては高くなるものの、小風量であり、換気効果は高い。本発生位置に関しては、タイプ14 > タイプ4 > タイプ12 > タイプ11 > タイプ13の順に換

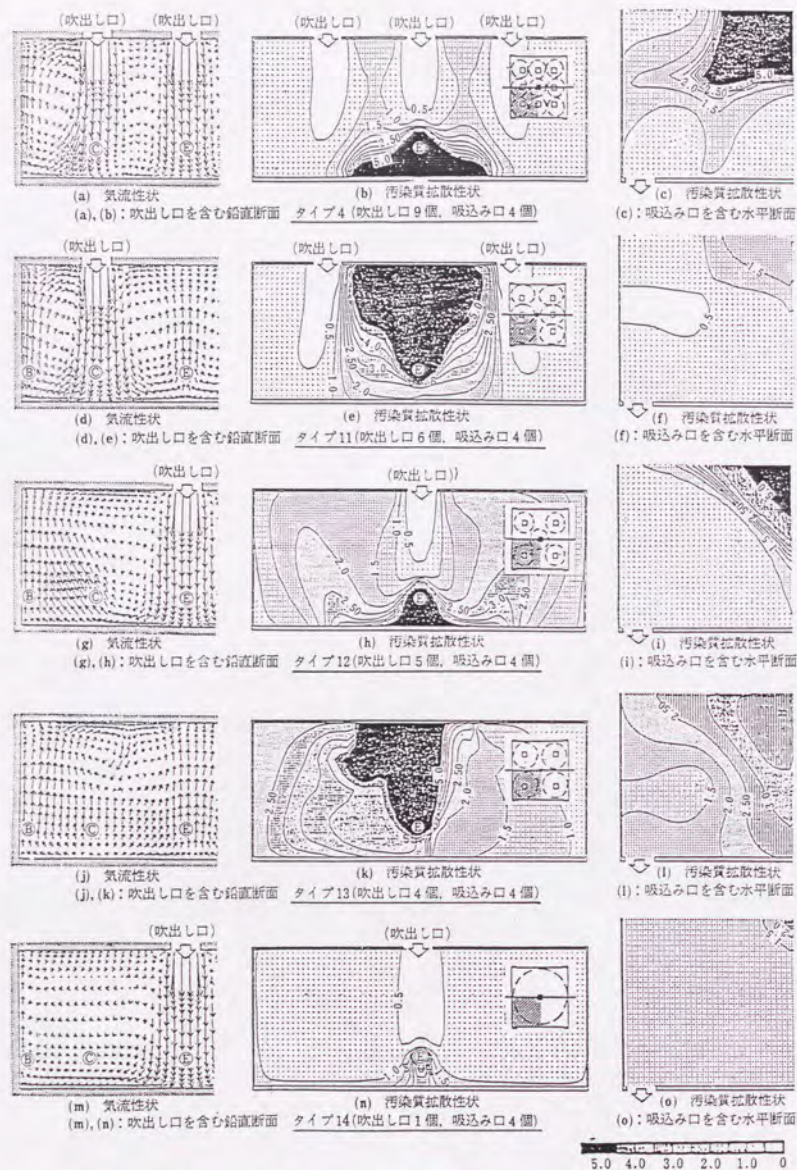


図-6.9 吹出し口配置が変化した場合の気流性状と汚染質拡散性状の比較(汚染質発生位置: 室中央E点)

気効果が優れているとおおむね判断される。

平均拡散半径は室中央の汚染質発生位置が吹出し噴流中となるタイプ4, 12, 14で大きくなり、汚染質が広く拡散する〔表-6.1(a)〕。

6.5.2 壁面と室中央の中間で汚染質が発生した場合

壁面と室中央の中間(C点)で汚染質が発生した場合の各タイプの濃度分布を検討する。なお、濃度の空間分布図は割愛する〔文献¹⁾を参照〕。

(1) 気流性状および汚染質拡散性状

吹出し噴流部で汚染質発生するタイプ4, 11では汚染質は発生位置の下方に移流され、発生位置下部で著しく高濃度となる。さらに、高濃度の汚染質は壁際の上昇流により移流され、天井まで高濃度領域となる。その他のタイプでは、壁際上部に向かう斜めの強い上昇流(タイプ12)、床面からの広範囲の上昇流(タイプ13)、床面に沿った水平な流れ(タイプ14)などにより、汚染質発生位置より流れ方向に高濃度領域が広がる。また、汚染質の分布範囲は、発生位置のある気流単位およびこの単位と最短距離の吸込み口との間にある各単位にわたり、タイプ4で室の約1/3、タイプ11~14で室の約1/2となる。

(2) 換気量の低減効果

各タイプの室内平均濃度、平均拡散半径を表-6.1(b)に示す。また、前項6.5.1と同様タイプ4を基準とし、タイプ4の汚染質発生量を一定として換気量の低減を図った場合と、各タイプともタイプ4と同一汚染質発生量とした場合の関係を図-6.10(b)に示す。

タイプ11~14とも、タイプ4の吹出し風速を減少させ換気量の低減を図った場合より室内平均濃度は高くなり、換気効果が悪いことがうかがえる。本発生位置に関しては、タイプ4>タイプ14>タイプ12>タイプ11>タイプ13の順に換気効果が優れているとおおむね判断される。

平均拡散半径は、室中央における汚染質発生の場合ほど顕著な差は認められない。

6. 5. 3 壁際で汚染質が発生した場合

壁際（B点）で汚染質が発生した場合の各タイプの濃度分布を検討する。なお、濃度の空間分布図は割愛する〔文献¹⁾を参照〕。

(1) 気流性状および汚染質拡散性状

各タイプとも汚染質は壁際の上昇流により天井面まで高濃度領域となる。また、汚染質分布領域は、発生位置のある気流単位およびこれと最短距離の吸込み口間にある単位にわたり、タイプ4では室の約1/3、タイプ11～14では室の約1/2の領域となる。

(2) 換気量の低減効果

各タイプの室内平均濃度、平均拡散半径を表-6.1(c)に示す。また、前項4.1, 4.2と同様にタイプ4を基準とし、タイプ4の汚染質発生量を一定として換気量の低減を図った場合と、各タイプともタイプ4と同一汚染質発生量とした場合の関係を図-6.10(c)に示す。

タイプ12, 13とも、室内平均濃度はタイプ4の吹出し風速の低減を図った場合より低くなり、壁際の汚染質発生に対してこれらの吹出し口配置のほうが望ましい。特にタイプ12の場合は室内平均濃度は低く、タイプ4の5/9の換気量でほぼ同様の換気効果となる。本発生位置に関しては、タイプ12 > タイプ14 > タイプ13 > タイプ4 > タイプ11の順に換気効果が優れているとおおむね判断される。

平均拡散半径は、タイプ11～14とも2.4m程度となるが、タイプ4では壁際の気流単位の領域が小さいため、1.87mと小さな値となる。

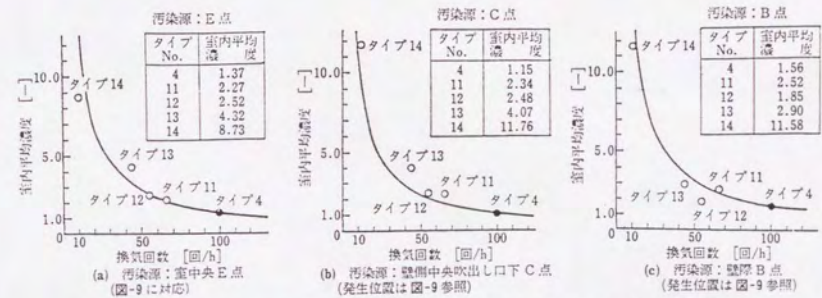


図-6.10 換気回数が低減された場合の室内平均濃度の変化(タイプ4と同一汚染質発生量、タイプ4の瞬時一様拡散濃度基準)

表 6. 1 各タイプの室内平均濃度と平均拡散半径

| 汚染質発生位置 換気効率 指標 | (a) 室中央吹出し口下(E点) | | | (b) 壁側中央吹出し口下(C点) | | | (c) 壁際(B点) | | |
|-----------------------|----------------------|-----------------------|-------------------|----------------------|-----------------------|-------------------|----------------------|-----------------------|-------------------|
| | 室内平均 濃度 1* [-] | 室内平均 濃度 2** [-] | 平均 拡散半径 [m] | 室内平均 濃度 1* [-] | 室内平均 濃度 2** [-] | 平均 拡散半径 [m] | 室内平均 濃度 1* [-] | 室内平均 濃度 2** [-] | 平均 拡散半径 [m] |
| タイプ No. | | | | | | | | | |
| タイプ 4 | 1.37 | 1.37 | 2.54 | 1.15 | 1.15 | 1.97 | 1.56 | 1.56 | 1.87 |
| タイプ 11 | 1.51 | 2.27 | 2.37 | 1.56 | 1.56 | 2.46 | 1.68 | 2.52 | 2.39 |
| タイプ 12 | 1.40 | 2.52 | 2.59 | 1.38 | 1.38 | 2.30 | 1.03 | 1.85 | 2.39 |
| タイプ 13 | 1.92 | 4.32 | 2.30 | 1.81 | 1.81 | 2.23 | 1.30 | 2.90 | 2.41 |
| タイプ 14 | 0.97 | 8.73 | 2.81 | 1.31 | 1.31 | 2.55 | 1.29 | 11.58 | 2.55 |

注 *1 室内平均濃度 1 は、それぞれのタイプの室中央吹出し口下の瞬間一様拡散濃度の値で基準化した無次元濃度。

*2 室内平均濃度 2 は、上記の各タイプの室内平均濃度 1 をタイプ 4 と同一汚染質発生量となるよう換算した無次元濃度。

6. 5. 4 吹出し口配置の変化のまとめ

吹出し口の配置（吹出し口個数）を変化させたタイプ 4, 11~14 を同一の吹出し風速として、汚染質の排出されやすさを比較した結果、総じて換気量の多いタイプ 4 が有利であり、換気回数の最も少ないタイプ 14 が不利となる。しかし、同一の換気量および同一の汚染質発生量として比較した場合には、各々の汚染質発生位置に応じて、汚染質の排出されやすい吹出し口の配置は変化する。本報にて検討した 3 箇所の汚染質発生位置では、タイプ 12 の吹出し口配置が比較的良好な換気効果を有すると判断される。これは、タイプ 12 では吹出し口が千鳥に配置されていることで、①室内が平均してよくかくはん（攪拌）され、発生した汚染質が一つの気流単位内に滞留しないこと、②室中央の単位では、上昇流が吸込み口のある壁側に向かって広がる様相を呈し、汚染質を室の外側に向かって移流する傾向があること、の 2 点によるものと考えられる。

6. 6 結論

本章では吹出し口や吸込み口の設置状況の変化した各種の形状の乱流型クリーンルーム内の流れ場・拡散場の性状を解析し、吹出し口や吸込み口の設置状況が室内流れ場・拡散場に与える影響や各種の吹出し口の配置方法による換気効果を検討した。これにより、得られた知見は以下の通りである。

- (1) 数値シミュレーションは、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、これを用いれば、室の換気特性なども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。
- (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削減する場合、隣接する単位の領域が拡大する。拡大した単位内で汚染質発生のある場合、その単位の大きさに応じて汚染質分布領域も拡大する。
- (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) 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。

* 第6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
(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
- 2) 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
- 吹き出し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
- 3) 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8)
吹出口の配置、吸込口設置高さ上昇流について
日本建築学会関東支部研究報告集、1985年
- 4) 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12)
吹出口の配置、吸込口設置高さ上昇流について
空気調和・衛生工学会論文集、1985年9月30日～10月2日、宇都宮
- 5) 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)
空気調和・衛生工学会論文集、1985年9月30日～10月2日、宇都宮
- 6) 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
- 7) 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-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
- 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
第3報-吹き出し口・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
空気調和・衛生工学会論文集、NO.40、1989年6月
- 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