

換気性能評価指標を用いた クリーンルーム気流設計に関する研究(その1)

諏訪 好英 名倉 剛
(本社エンジニアリング本部)

Method for Evaluating Cleanroom Airflow Performance on the Basis of a Ventilation Efficiency Scale

Yoshihide Suwa Takeshi Nagura

Abstract

A method is proposed for evaluating cleanroom airflow performance. This method is based on a "Scale for Ventilation Efficiency(SVE)", which is used to measure building ventilation. The proposed method enables quantitative evaluation of airflow performance independently of other factors. It can therefore, be used to design the optimum cleanroom and to construct a design database. This report outlines the method and describes some applications.

概要

クリーンルーム設計への適用を目的として、換気性能評価指標(SVE)を用いた気流性能の評価手法を提案し、その適用性について検討した。SVEによる評価では、クリーンルーム気流が汚染物質を除去する能力を他の要因とは独立に定量化できるため、設計条件の最適化や設計ノウハウのデータベース化への応用が可能と考えられる。本報では提案した手法の概要と、これを用いて実施したクリーンルーム気流性能評価の試行解析結果について報告する。

1.はじめに

現在、さまざまな産業分野においてクリーンルームが用いられている。中でも半導体、液晶をはじめとする電子デバイスの生産ラインとして用いられる産業用クリーンルームでは、製品の高集積度化に伴い、要求される清浄度等のスペックが年々厳しいものとなってきている。膨大な循環送風量を必要とする高清浄度クリーンルームでは、要求清浄度に対して設備コスト、運転コストが指数的に増加することも指摘されており、その省コスト化対策も大きな課題となってきた。最近では精密産業、食品産業等においても、製品スペックの高度化や環境衛生管理の観点から、従来は一般室で行われてきた工程をクリーンルーム内に移行する事例が増えており、リニューアルやさまざまな清浄度レベルに対応したクリーンルーム設計技術の確立も重要となってきている。

クリーンルームにおいて最も重要な機能は、制御対象空間において汚染物質の発生や外部からの侵入を防止し、内部で発生した汚染物質を速やかに除去することにある。クリーンルームにおける汚染物質除去性能は、気流状態の良否に支配される場合が多く、省コスト化や各

種用途への対応を実現するには、設計条件、気流性能、および汚染物質発生条件それぞれの関係を明確化し、目標とする要求性能に見合った適正な気流設計を行っていく必要がある。

本研究では、クリーンルーム気流設計の適正化を可能とする新たな手法として、空気齢(Age of Air)¹⁾および換気性能評価指標(SVE:Scale for Ventilation Efficiency)^{2),3)}を用いた気流性能定量化手法を提案し、その適用性を検討している。本報では、その基本的な考え方とSVE適用の試行解析事例を報告する。

2.現状のクリーンルーム設計における課題

従来からクリーンルームの要求スペックはFed. Std. 209E⁴⁾やJIS B9920⁵⁾が定める「清浄度クラス」で提示され、これを満足すべく設計が行われてきた。しかし、空気中浮遊微粒子濃度を基準とする「清浄度クラス」は、清浄空気の流れによる汚染物質の除去特性と、汚染物質の発生条件との兼ね合いから結果的に得られるものであり、気流性能そのものを表す指標ではない。クリーンルームの計画段階では、汚染物質の発生条件について詳

細な情報が得られない場合も多く、設計者は、設計対象の目的や用途を考察し、経験的に具体的設計条件を決定していくほかないのが現状であった。

一方、クリーンルーム内の気流状態と汚染物質拡散状況との関係については、これまで実験や数値シミュレーションを用いてさまざまな研究が行われている。しかしこれらの検討の多くは、ある程度限定した汚染物質発生源や汚染制御対象を想定したものであり、各論的なものであった。また三次元的な気流や濃度分布からは定性的な状況把握を行うことは可能であるが、設計条件に対する気流性能の違いなどについて定量的な比較・評価を行うことが難しく、方法論として一般化、体系化することが困難であった。

筆者らは、従来のクリーンルーム設計に関わる問題点の多くが、気流性能そのものを他の要因と分離して定量的に評価する手法がないことに起因するものと考え、その提案を試みた。気流性能を汚染物質発生条件と独立して定量的に評価することができれば、設計条件と気流性能との関係を一般化して関連付けることが可能となり、より論理的に設計条件を選定できるようになる。またさまざまな設計条件についての気流性能評価結果を蓄積していくことで、設計データベースの構築や、省コスト設計などにつながる最適設計条件の検討が可能になると考えられる。

3. 空気齢と換気性能評価指標

本研究では、クリーンルーム内気流性能の定量化手法として、空気齢および換気性能評価指標の考え方を応用した。以下にそれぞれの概要と、クリーンルーム評価への適用に至った考察について示す。

3.1 空気齢、空気余命および空気寿命

換気空間に導入された空気は、特定の時間その空間に存在し、やがて排気口から室外に除去される。空間内に導入された一塊の空気の経路を想定すると、換気空間はさまざまな経路を持つ空気塊の流束の集合とみなすことができる。空間内の気流が定常的であると仮定した場合、任意の点における空気塊が空間内に導入されてからの平均存在時間、その後空間内から排出されるまでの平均存在時間を定義することが可能で、前者は空気齢、後者は空気余命(Residual Life Time of Air)、両者の合計は空気寿命(Residence Time of Air)と呼ばれている¹⁾。いずれも一般屋内環境における換気性状の評価指標として広く用いられている概念である。室内に一樣な汚染物質が存在する場合、任意の点における空気塊の汚染物質濃度は空気齢に比例する。同様の考え方を拡張すると、汚染源が特定できない空間では、任意点における空気塊が汚染される潜在的な確率が空気齢に比例すると考えることができる。

Table 1 SVE-1~6の評価内容
Evaluated Efficiency by SVE-1 to SVE-6

SVE-1	任意点で汚染が発生した場合の室内平均濃度
SVE-2	任意点で発生した汚染物質の拡散半径
SVE-3	室内一樣発生(またはその可能性)時の無次元濃度 無次元化した空気齢
SVE-4	各吹き出し口の勢力範囲
SVE-5	各吸い込み口の勢力範囲
SVE-6	無次元化した空気余命

3.2 換気性能指標(SVE)

空気齢や空気余命を一般化した換気性能の評価手法として換気性能評価指標(SVE-1~6)が提案されている²⁾・³⁾。それぞれの指標が対象とする評価内容をTable 1に示す。SVEは、任意の汚染源を想定した場合の濃度の空間的な分布を分布関数として一般化し、フーリエ級数展開したときの低次のモーメントとして定義されている。このうち、SVE-3およびSVE-6は任意の汚染源を想定したときの濃度分布の重ねあわせとして求めることができ、それぞれ一樣な汚染源(または一樣な汚染の可能性のある空間)を仮定したときの定常濃度(または潜在的な確率濃度)を瞬時一樣拡散濃度で正規化した値である。これらの値は、定常状態を仮定したCFD解析結果から比較的容易に求めることができる。また、SVE-3およびSVE-6はそれぞれ空気齢、空気余命を名目換気時間(換気回数⁻¹)で正規化した値と等価であり、SVE-3、SVE-6を求めることにより空気齢、空気余命、空気寿命を求めることが可能となる。

3.3 クリーンルーム設計への適用性の考察

クリーンルームは、最終段フィルタから供給された清浄空気により室内で発生した汚染物質を室外へ排出する。室内によどみや旋回領域を生じた場合、その点での空気齢および空気余命は高い値を示し、他の領域よりも汚染物質濃度が高い領域を形成する。またこのような領域では、汚染の可能性も高くなることが予測され、空気齢、空気余命の分布から汚染の危険性の高い領域を特定することが可能となる。すなわち、空気齢や空気余命は、クリーンルームの気流が汚染物質を換気、除去する潜在的な能力とほぼ一対一に対応する概念と解釈できる。Fig.1は一方向流型クリーンルームに設置された装置周辺について空気齢、空気余命および空気寿命の分布状態を示したものである。装置周辺の剥離領域や壁面近傍の領域では、空気齢、空気余命の値がいずれも大きくなっており、これらの領域に巻き込まれた汚染物質は室外に除去されにくいという経験的事実とよく一致している。

空気齢を一般化したSVE-3は、気流設計に適用可能な特徴的な性質を持つことが考察の結果わかった。Fig.2に示すようなミキシング領域およびピストンフロー領域

を想定した場合,対象空間内におけるSVE-3の平均値(以下,アンサンブル平均を想定し,<SVE-3>と示す)は前者の場合1.0,後者の場合には0.5となり,また室内に渦領域やよどみを発生した場合にはこれに応じて<SVE-3>が増加する性質を持つ。これらは,SVE-3の定義および流体の連続性から理論的に証明が可能である。

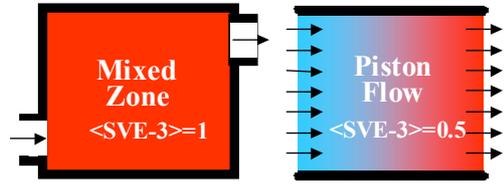


Fig.2 代表的換気状態における<SVE-3> Typical Airflow States and <SVE-3>

3.4 SVEによる気流性能評価手法の提案

一方向流型と呼ばれるタイプのクリーンルームでは,天井全面にフィルタ吹き出し口を設けて室内に垂直下降流を形成し,汚染物質を床下のレターンチャンバに排出する構造を採用しており,先述のピストンフロー領域に近い気流状態を形成する(Fig.3)。したがって理想的な気流状態の一方向流型クリーンルームでは,<SVE-3>は0.5に近い値を示し,渦領域やよどみ領域が大きくなるほど大きな値を示すことが予測される。一方,非一方向流型クリーンルームでは<SVE-3>が1.0に近い値を示すが,この場合も,汚染物質の除去能力の良否や渦領域,よどみ領域の発生に応じてその値が増減する。本研究では,<SVE-3>のこのような性質を利用して,Table2のようなクリーンルーム内気流性能の評価指標を提案した。この方法では,クリーンルームの気流性能を一条件につきひとつの値で定量化できるため,室のアスペクト比や給排気口位置などの設計条件をパラメータとした場合に,最適設計条件の考察などが容易に行える。また,SVE-3は気流による汚染物質除去性能についてのみ着目した値であり,異なる設計パラメータに関する考察結果も,同等の指標として相互に比較することができる。例えば,対象空間のアスペクト比を変化させた場合とパーティション設置による対策とを<SVE-3>により評価した結果,いずれの方法でも同程度の値が得られるならば,よ

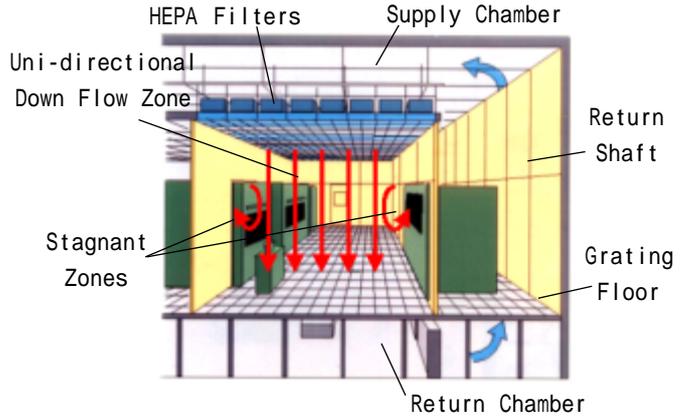
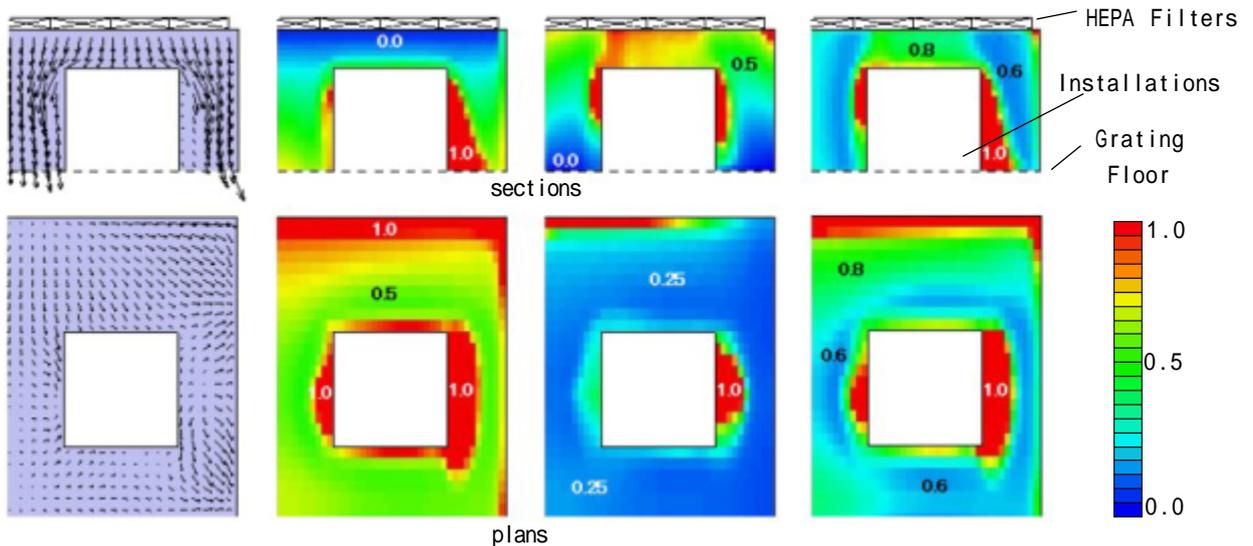


Fig.3 一方向流型クリーンルームとピストンフロ - 換気空間との類似性 Similarity of the airflow in Piston-flow Zones and Uni-directional Cleanrooms

Table 2 SVEによる気流性能評価指標 Guidekines of Cleanroom Airflow Evaluation using the <SVE-3>

	一方向流型	非一方向流型
理想的な気流状態	< 0.7	1.0
対策の余地あり	0.7 ~ 1.0	1.0 ~ 1.5
不適当な気流状態	> 1.0	> 1.5



(a)Airflow Distribution (b)Age of Air (c)Residual Life Time of Air (d)Residence Time of Air

Fig.1 一方向流型クリーンルームにおける空気齢, 空気余命および空気寿命の分布 Distributions of Age of Air, Residual Life Time of Air, and Residence Time of Air in Uni-directional Cleanrooms (Each Value is Standardized by the Nominal Time Constant)

り対策が容易なパーティション追加による対策を採用するなどの選択が可能である。

4. SVEによる気流性能の試行解析

提案した<SVE-3>による気流性能評価手法を用いて、クリーンルーム内気流状態の解析・評価を試行した。ここでは、乱流モデルとして標準k-εモデル⁶⁾を適用し、SIMPLE法⁷⁾により気流と汚染物質濃度拡散状態の定常解析を実施した結果から、クリーンルーム内のSVE-3分布および<SVE-3>を算出した。以下その結果について示す。

4.1 装置配置状況による気流性能の違い

一方向流型クリーンルームでは偏流と呼ばれる気流の傾斜を生じ、クロスコンタミネーションの原因となることがある。偏流の発生には、グレーチング床の開口率や装置配置状況の偏りが原因となる場合が多い。Fig.4, Fig.5は、偏流を生じた一方向流型クリーンルームについて装置の設置位置、よどみ領域の発生状況および<SVE-3>それぞれの関係を考察した結果である^{8),9)}。想定したクリーンルームは8m×10m、天井高さ3mのもので、装置寸法は2m×2m×2mである。装置の壁からの距離をパラメータとして変化させたところ、<SVE-3>の値は壁からの距離に追従して単調に変化することがわかった。これは、パラメータの変化に伴い剥離領域の大きさが変化し、気流性能に影響するためと考えられる。<SVE-3>による評価では、このようにパラメータを連続的に変化させた場合の影響の度合いをグラフ化できるため、許容できるパラメータはどの範囲までか、パラメータの最適値があるのかなどを考察できる。

4.2 給排気口条件による気流性能の違い

非一方向流型クリーンルームでは、吹き出し口、レターン排気口の開口面積や配置に大きな自由度があり、クリーンルームの特性を決定付ける重要な要素となる。こ

こでは、Fig.6のような各種吹き出し口、排気口の組合せを想定し、各モデルについて<SVE-3>による気流性能の比較を行った¹⁰⁾。想定したクリーンルームは5.4m×5.4m、天井高さ2.4mで、タイプ別に以下のような給排気口の組合せを想定した。

- ・タイプ0：天井全面を吹き出し口とした場合
- ・タイプA1～A4：吹き出し口条件を一定として、排気口条件を変化させた場合
- ・タイプB1～B10：排気口条件を一定として、吹き出し口条件を変化させた場合
- ・タイプC1～C5：天井吹き出し、天井吸込み型として給排気条件を変化させた場合

ここでは、気流性能の評価指標として<SVE-3>に加え、<SVE-6>(室内におけるSVE-6[正規化した空気余命]のアンサンブル平均)を定義し、それぞれの条件について比較した。

代表的なケースについて解析した平面内、断面内のSVE-3分布状況と<SVE-3>、<SVE-6>をFig.7に示す。各平面図は床上1mについて示したものであるが、いずれの場合も天井の吹き出し口の影響を受け、これらの直下で

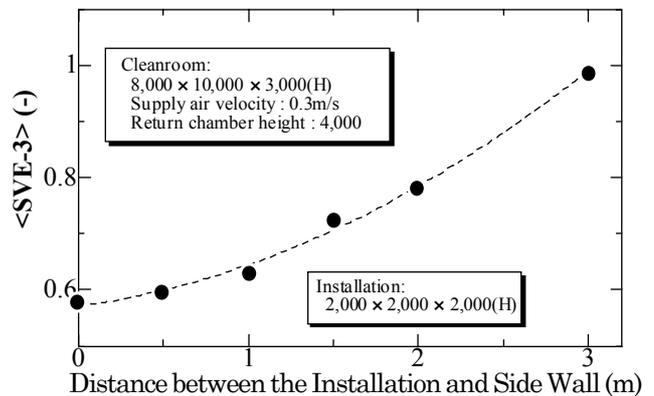


Fig.4 装置の設置位置と<SVE-3>との関係
Relationship between the Layout of installations and <SVE-3> in an Uni-directional Cleanroom

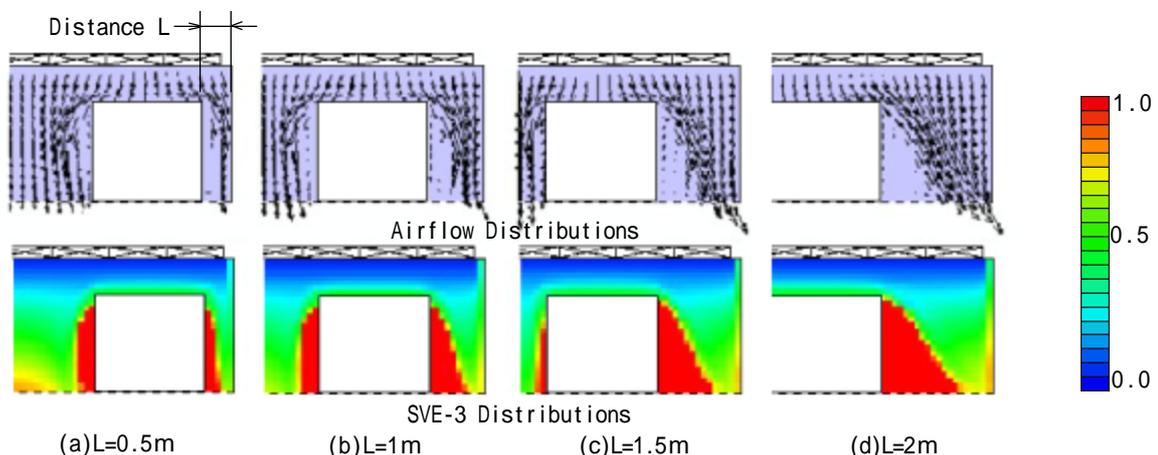


Fig.5 一方向流型クリーンルームに設置した装置周辺の気流分布およびSVE-3の分布
Airflow and SVE-3 distribution in an Uni-directional Cleanroom with different Installation's Layouts (sections)

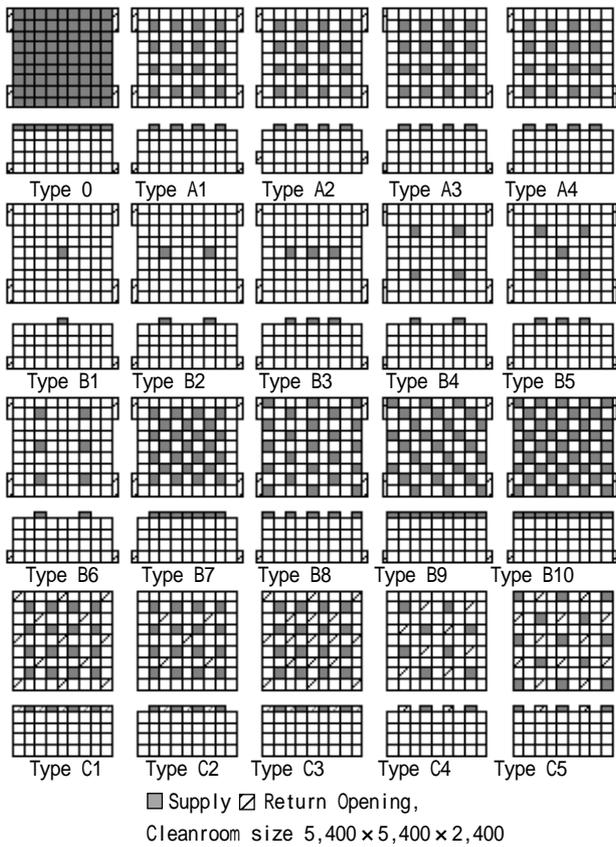


Fig.6 想定した非一方向流型クリーンルームモデル
Assumed Non-unidirectional Cleanroom Models with several types of Supply and Return Openings

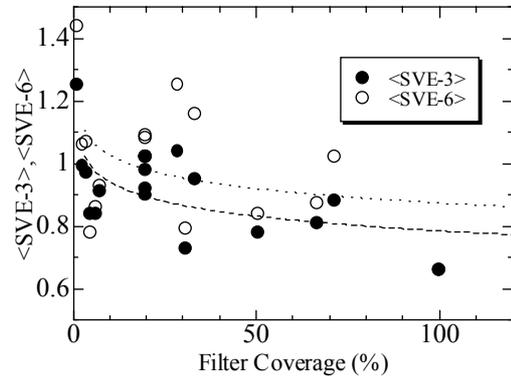


Fig.8 吹き出し口開口面積比(フィルタ占有率)で整理した
<SVE-3>, <SVE-6>
Filter Coverage vs. <SVE-3>, <SVE-6>

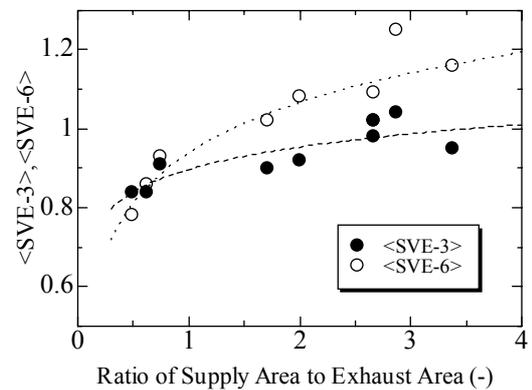


Fig.9 給排気口面積比で整理した<SVE-3>, <SVE-6>
Rate of Supply and Return Opening Area vs. <SVE-3>, <SVE-6>

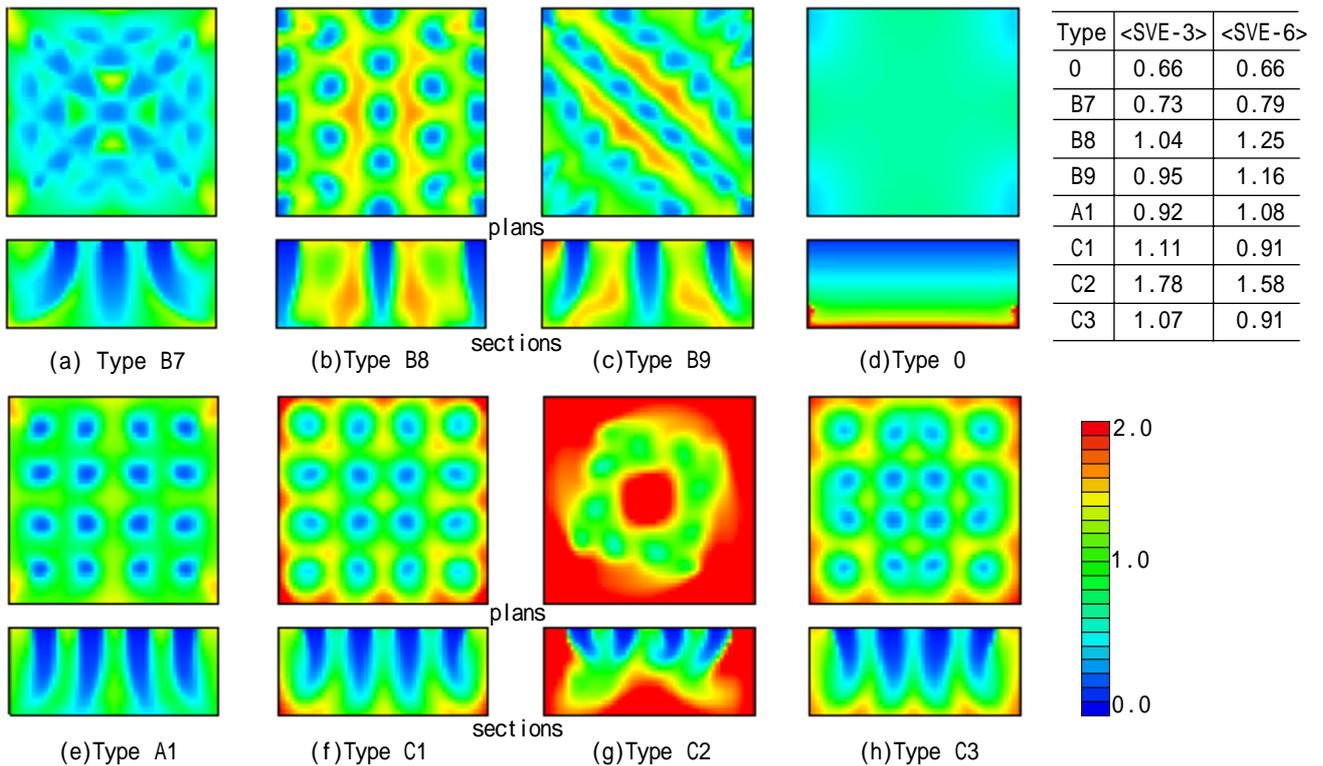


Fig.7 各種給排気口の非一方向流型クリーンルームにおけるSVE-3分布
SVE-3 Distributions in Assumed Non-unidirectional Cleanroom Models

はSVE-3も低い値を示している。また、天井吹き出し、天井吸込み型としたタイプC1～C5の状況は、天井吹き出し、壁吸込みを基本とした他のタイプのものとは特性が異なり、特に排気口面積の小さいタイプC2では壁面近傍に大きなよどみを生じ、十分な換気性能を得られないことがわかった。

タイプC1～C5を除く全ケースについてフィルタ占有率(天井面積に対する吹き出し開口面積比)を用いて<SVE-3>、<SVE-6>を整理した。結果をFig.8に示す。値には若干のばらつきが認められるが、<SVE-3>、<SVE-6>のいずれもフィルタ占有率に対し緩やかに減少する傾向が認められた。定義よりSVE-3、SVE-6はいずれも名目換気時間で正規化した値であり、同一モデルについて循環送風量のみを変化させても本来は変化しない値である。Fig.8の結果は、同一換気回数の場合でもフィルタ占有率を大きくすることで気流性能が改善できることを示している。

Fig.9は、さらに吹き出し口、排気口の開口面積比([吹き出し開口面積]/[排気口面積])を基準に<SVE-3>、<SVE-6>を整理した結果である。Fig.8の場合とは逆に、開口面積比が小さいほど<SVE-3>、<SVE-6>が減少し、気流性能を向上できることがわかった。Fig.7のタイプC2の結果にも認められるように、排気口面積が十分でないときと気流が出口を見失い、よどみを生じやすくなるものと考えられる。Fig.9の結果から、フィルタ占有率が同一の場合にも、より良好な気流性能を得るためには排気口面積を吹き出し開口面積と同等あるいはそれよりも大きくとる必要のあることがわかった。

なお、汚染物質の除去能力としての気流性能を考えた場合、空気余命に基づくSVE-6の定義は、より直接的な汚染物質除去能力を示すものと考えられる。しかし、これまで検討した範囲では、いずれの場合も<SVE-3>、<SVE-6>は同様の傾向を示し、<SVE-3>の方が若干ばらつき小さい特性を示すことがわかった。気流性能の評価にはいずれの指標も適用可能であるが、設計条件に対する気流性能の違いを考察する場合には、<SVE-3>による評価の方がより明確に特性を把握できると思われる。

5.まとめ

クリーンルーム設計への適用を目的として、換気性能指標(SVE)を用いた気流性能評価手法を提案し、これを用いた試行解析の結果を報告した。従来から、クリーンルームの設計条件と気流性能との関係は定性的、各論的にしか扱えないという色彩が強く、これらの問題は各設計者の経験的ノウハウとしてしか蓄積することができなかった。SVEを用いた気流性能評価では、気流による汚

染物質除去性能を定量化することが可能であり、本手法を用いることで最適設計条件の検討や設計ノウハウのデータベース化も可能になると考えている。今後、さらに本手法の適用性検討を行い、クリーンルーム設計への応用を進めていく予定である。

謝辞

本研究を進めるにあたり、芝浦工業大学工学部電気設備学科助教授 西村直也先生にさまざまな助言やご協力をいただきました。ここに記して感謝致します。

参考文献

- 1) D.Etheridge and M.Sandberg: Building Ventilation -Theory and Measurement, John Wiley and Sons (1986) .
- 2) 村上, 加藤: 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, 32(1986 10), pp91～101.
- 3) 加藤: 数値流体力学CFDの室内環境への応用(1) CFDによる室内環境解析の概観, 空気調和・衛生工学, 71 6(1997), pp59～68.
- 4) Fed.Std.209E: Airborne Particulate Cleanliness in Cleanrooms and Clean Zones(1992).
- 5) JIS B9920: クリーンルーム中における浮遊微粒子の濃度測定法及びクリーンルームの空気清浄度の評価方法(1989) .
- 6) B.E.Lauder and D.B.Spalding: Lectures in Mathematical Models of Turbulence, (1972), Academic Press .
- 7) S.V.Patankar: Numerical Heat Transfer and Fluid Flow(1980), Hemishpere Publishing Corp.
- 8) 諏訪, 与謝, 名倉: クリーンルーム気流性能の評価手法に関する研究(その1), 第18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, 空気清浄協会(2000), pp.240～242 .
- 9) 名倉, 諏訪, 与謝: クリーンルーム気流性能の評価手法に関する研究(その2), 第18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, 空気清浄協会(2000), pp.243～246 .
- 10) 西村, 高木, 諏訪: 空気齢による非一方向流型クリーンルームの評価に関する基礎的検討, 第18回エアロゾル科学・技術研究討論会, 日本エアロゾル学会(2001), pp.59～60.