

非一方向流式クリーンルームにおける環境制御に関する研究

従来方式と天井レス方式の数値流体解析と実測による比較

STUDY ON ENVIRONMENTAL CONTROL IN NON-UNIDIRECTIONAL AIRFLOW CLEANROOM

Comparison of CFD and experiment between conventional and ceilingless cleanroom

栗木 茂*, 鈴木 孝彦**, 永井 裕之***, 伊藤 茂久****, 村江 行忠*****

Shigeru KURIKI, Takahiko SUZUKI, Hiroyuki NAGAI, Shigehisa ITO and Yukitada MURAE

In recent years, in industrial cleanroom, reduction of an initial and the running cost becomes required from the price competition of the product. The report about cleanroom keeping the environment of the production area locally is performed while simplifying building finish and facilities system as techniques not to be seized with a conventional concept.

This paper is the outline that comparison of CFD and experiment between conventional and ceilingless methods in the non-unidirectional airflow cleanroom.

Keywords : Non-unidirectional Airflow Cleanroom, Ceilingless, Index of Age of Air, Index of Residual Lifetime of Air, Fan Filter Unit, Experiment

非一方向流式クリーンルーム, 天井レス, 空気齢指標, 空気余命指標, F F U, 実験

1. はじめに

近年, 工業用のクリーンルームにおいて, 製品の価格競争などからイニシャル及びランニングコストの削減が必須となっている. クリーンルームのようにある一定の空気清浄度が必要な空間においても, 従来の概念にとらわれない技術として, 建築仕上げや設備システムを簡素化し, 局所的に生産エリアの環境を保つ非一方向流式クリーンルームに関する報告が行われている(例えば1)~5).

本報告では, 非一方向流式クリーンルームで従来から行われているシステム⁶⁾(以下, 従来方式)と, 天井を設置しないシステム(以下, 天井レス方式)の2方式について, 温度分布と空気清浄度に関して数値流体解析と実測による基礎的な比較を行ったので報告する.

2. 空調システムの概要

図-1 に空調システムのイメージを示す. 従来方式は, エアハンドリングユニット(以下 AHU)にて負荷を処理し, ダクトやチャンバーから天井部フィルタユニット(以下 FU)を介して生産室に吹き出す方式で, 主に希釈により部屋全体の清浄度を確保する方式である. 今回検討した天井レス空調システムは, クリーンルームの天井を無くし, 生産エリア⁷⁾の上にクリーンルーム用パッケージエアコン(HEPA 付直吸い込みタイプ, 以下 CRPAC)とファンフィルタユニット(以下 FFU)を H=3.0m に設置し, 生産エリアの清浄度のみ達成する方式とした. 天井を無くすことによりイニシャルコストを下げ, 冷媒方式である CRPAC を採用することで搬送動力を減らし, ランニングコストを下げることを目標と

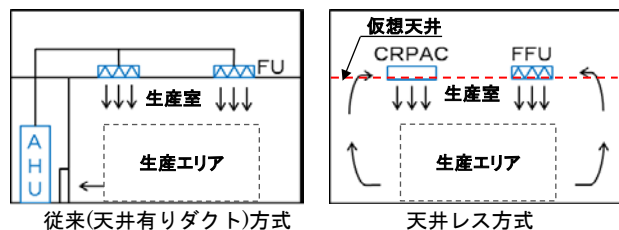


図-1 空調系統図

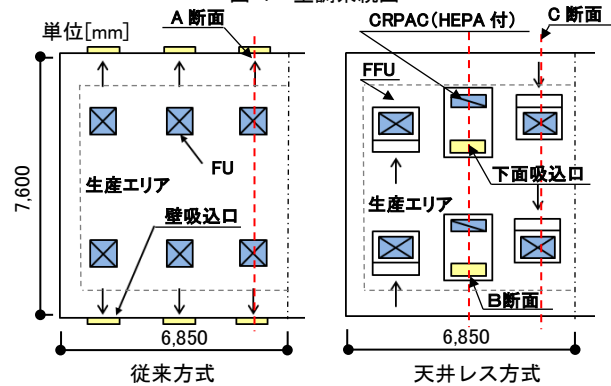


図-2 解析平面図

している. 清浄化は CRPAC 及び FFU で行う.

3. 数値流体解析による比較

3.1 数値流体解析概要

解析平面図を図-2 に, 解析概要を表-1 に示す. 数値流体解析ソフトは, Stream Ver.9 ((株)ソフトウェアクレイドル)を用い, 温度, 空気齢指標⁸⁾, 空気余命指標⁹⁾について定常解析にて求めた. 図-2 に解析対象空間の半分を示し, 断面 A~C にて比較を行った. 設定清浄度は ISO クラス 7 とし, 循環回数を 30 回/h 相当の風量とした. 従来方式の吸込口は, 壁面下部とした. 天井レス方式の循環風量は, 仮想

* 戸田建設(株)技術研究所

** 戸田建設(株)技術研究所 修士(工学)

*** 戸田建設(株)名古屋支店建築設計室

**** 戸田建設(株)設備設計部 工学修士

***** 戸田建設(株)技術研究所 工学修士

天井以下の空間のみ清浄化することを目的に、仮想天井以下の容積を基に算定した。CRPACの吹出口及び吸込口は下面とした。FFUの吹出口は下面とし、吸込口は仮想天井より上部を攪拌しないように側面とした。熱負荷は150W/m²の部屋を想定し、天井・壁・床面負荷として各面に8W/m²、機器・人・照明等の負荷として仮想天井高 H=3.0m 以下の空間に12.3kWとした。

3.2 数値流体解析結果

図-3に従来方式と天井レス方式の断面温度分布を示す。従来方式では、天井近傍のFU以外の部分の温度が高くなった。吸込み口が壁下部にあり、吹き出した冷気が十分に攪拌されずに吸い込まれ、天井部の熱気が除去できていないといえる。天井レス方式では、仮想天井より上部の温度が高くなり、生産エリアの温度は従来方式よりもやや低い。吹出温度はCRPAC下部が低くなり、FFU下部は仮想天井付近の熱を循環し設定温度となり、CRPAC下部との温度差は大きい。つまり、平面的なばらつきが大きく、温熱条件の厳しい空間には検討が必要となる。

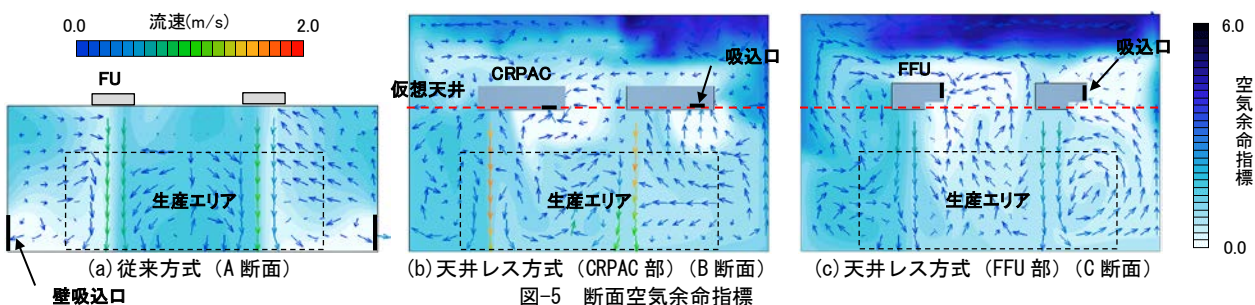
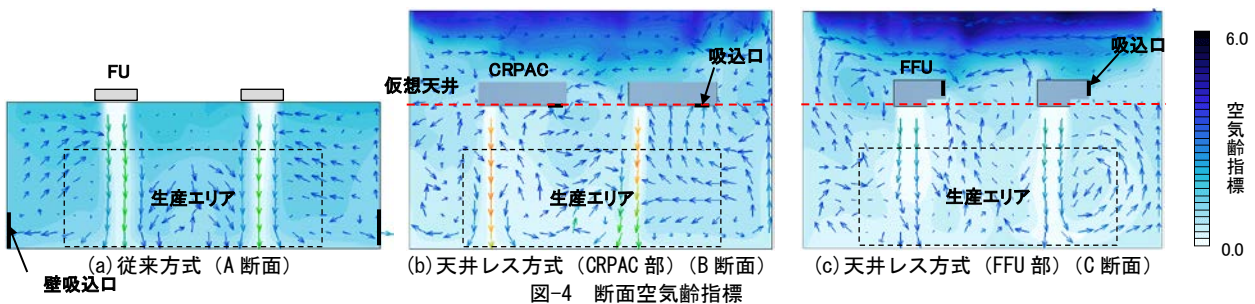
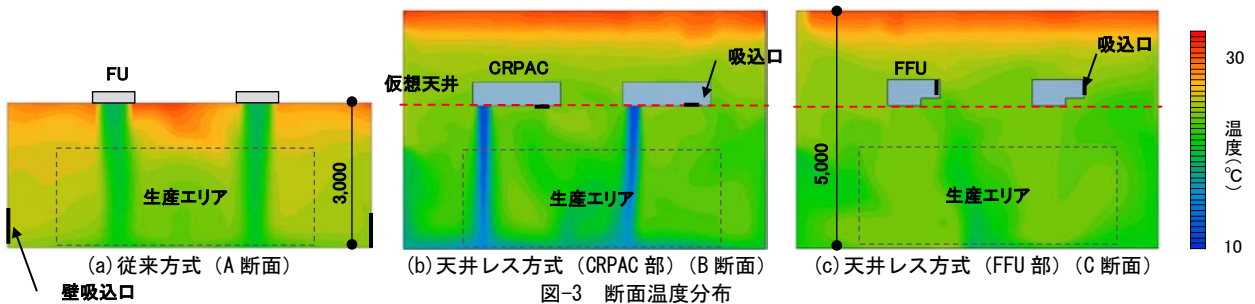
図-4に従来方式と天井レス方式の断面空気齢指標を示す。従来方式では、FU下部に関しては空気齢指標が小さいが、天井近傍の高温域と同じ範囲の空気齢指標がやや大きい。また、吹出口以外の部分でのばらつきは少ない。天井レス方式では、仮想天井上部において空気齢指標が大きく、空気が滞留すると思われるが、生産エリアにおいては、従来方式よりも空気齢指標が小さい。CRPACとFFUの下部

表-1 数値流体解析概要

		従来方式	天井レス方式	
解析対象空間	13.7m × 7.6m			
解析空間高さ	3 m	5 m		
吹出風量	9,360 CMH (30回/h換気相当)			
設定清浄度	ISO クラス7			
設定温度	22 °C			
発熱量	機器・人・照明発熱等 12.3kW 天井・壁・床面負荷 8W/m ²			
吹出口	数風量	12ヶ所 780 CMH	CRPAC 4ヶ所 960 CMH	FFU 8ヶ所 690 CMH
	位置	天井	CRPAC 下面	FFU 下面
	大きさ	0.6m × 0.6m	CRPAC 0.28m × 1.12m	FFU 0.6m × 1.2m
	温度	18°C	CRPAC 11.4 °C	FFU 室温
吸込口	数風量	12ヶ所 780CMH	CRPAC 4ヶ所 960CMH	FFU 8ヶ所 690CMH
	位置	壁 下部	CRPAC 下面	FFU 側面
	大きさ	0.75m × 0.52m	CRPAC 0.28m × 1.12m	FFU 0.3m × 0.46m

の比較では、吹出面積の違いにより、FFUの吹出初速が遅く、空気齢指標の小さい範囲が広い。

図-5に従来方式と天井レス方式の断面空気余命指標を示す。従来方式では、FU間の生産エリア部分の空気余命指標が大きく、汚染空気の排出に時間が



必要となる。部屋全体の清浄度を確保することを想定してシステムが組まれているが、吹出口と吸入口の位置により生産エリアの中で清浄度が偏る可能性があることがわかった。

天井レス方式では、空気齢指標と同様に天井部付近の値が大きいが、仮想天井以下の部分では、吹出口の吸込口反対壁側の空気余命指標が大きい。仮想天井より上部の空気齢指標と空気余命指標は大きい。生産エリアについては仮想天井以下の空間を対象とした循環回数で従来方式と同等以上となることを確認した。また、ここには示さないが、平面的な分布においても、天井レス方式でも同等の空気齢指標および空気余命指標となることを確認した。

4. 実測による比較

4.1 実験条件概要

従来方式と天井レス方式のクリーンルームに生産機器、作業者を模した発熱体および発塵を設定した実験条件においてそれぞれの生産エリアにおける温度・清浄度を比較することを目的に実験を行った。

実験は、戸田建設(株)技術研究所クリーンルーム実験棟内実験室で行った。実験室概要を表-2、実験条件を表-3、実験室の平面図と系統図を図-6、7に示す。実験対象は、数値流体解析の一部分を想定した。

発熱装置負荷として 1200W を吹出下部に模擬し、他の生産機器・照明発熱と天井・壁・床負荷として、206 W/m² を暖房器具で模擬した。天井レス方式の CRPAC 用制御センサを図-6●印の FL+1.5m に設置し、冷房設定温度を 22℃とした。循環風量は ISO クラス 7 を想定した 30 回/h 相当とし、天井レス方式は仮想天井以下の容積に対して風量を設定し、吹出風量を決めた。

温度測定は T 型熱電対を用い、サンプリング間隔 1 分、10 分間の移動測定を行った。測定点を図-6、7 に示す。従来方式は、各点高さ方向に FL+0.1m から 2.9m の鉛直方向 6 点を測定した。天井レス方式は、CRPAC や FFU 周りを中心に、仮想天井上部の FL+3.9m と 4.9m を追加した鉛直方向合計 8 点を測定した。

発塵は、図-6 に示す◎印の 2 箇所から、濃度 1% の塩化ナトリウム水溶液を液噴霧型エアロゾル発生器⁷⁾で噴霧した。エアロゾル発生器の発塵量は、テストチャンバーを用いて測定し、2ヶ所の発塵計が約 2.48×10⁸[個/min]であった。粒子数測定は、側方散乱方式粒子測定器(KC-52:リオン製)を用いた。サンプリング間隔 1 分(流量 0.1cf/min)の 3 回平均値とし、移動測定を行った。

図-8 に天井レス方式実験時の噴霧粒径分布を示す。粒子数は各測定高さの平均値とした。高さ方向の粒径分布の差はほとんどなかった。粒子の大きさは 0.3 μm 以上を評価対象とし、室内濃度が安定してから測定を開始した。

4.2 温度測定結果

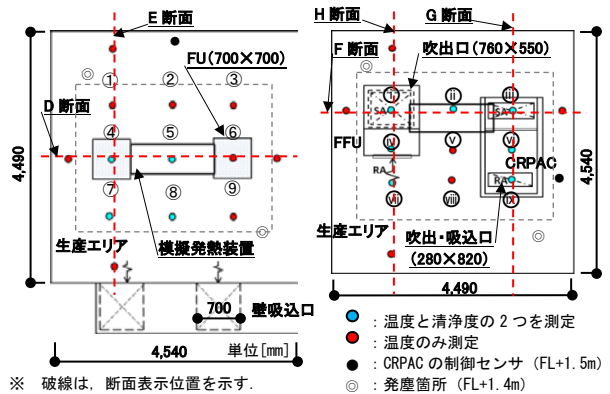
図-9、10 に従来方式と天井レス方式の断面温度分布を示す。従来方式に比べ天井レス方式は温度差が

表-2 クリーンルーム実験室概要

	従来方式	天井レス方式
面積	20.38 m ²	
クリーンルーム高さ	3 m	5 m
室容積	62 m ³	102 m ³
天井	あり	なし
壁仕上げ (高さ 3m より下)	CR 用スチールパーテーション +目地シール	
壁仕上げ (高さ 3m より上)	ケイカル板+塗装	
床仕上げ	帯電防止シート	

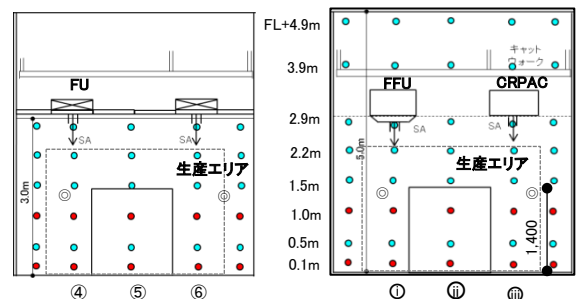
表-3 実験条件

	従来方式	天井レス方式
FU 吹出風量 (2 箇所合計)	1,860 CMH	—
CRPAC 吹出風量	—	870 CMH
FFU 吹出風量	—	910 CMH
加圧風量	—	57 CMH
合計風量	1,860CMH	1,837 CMH
吹出平均温度	18.3 °C	—
CRPAC 吹出平均温度	—	13.1 °C
FFU 吹出平均温度	—	24.4 °C
HEPA フィルタ捕集効率 at0.3μm	99.97 %	99.99 %



(a) 従来方式 (b) 天井レス方式

図-6 クリーンルーム実験室の平面図



●: 温度と清浄度の 2 つを測定 ●: 温度のみ測定 ◎: 発塵位置 (FL+1.4m)

(a) 従来方式 (D 断面) (b) 天井レス方式 (F 断面)

図-7 クリーンルーム実験室系統図

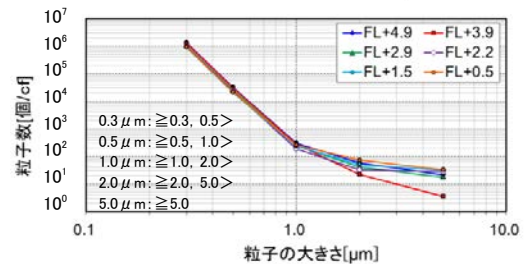


図-8 噴霧粒径分布

大きくなった。天井レス方式は1台のCRPACで負荷処理を行っており、吹出温度が13.1℃と低いためである。採用する際、使用条件や吹出位置検討をする必要がある。

図-11に各測定点の温度分布を示す。生産エリアは、両方式とも吹出口や発熱体付近を除けば、高さ0.5mから2.2mまでは22~24℃程度になった。しかし、天井レス方式で④、⑥の高さ0.1mが22℃未満になるのはCRPACの吹出気流が到達し、温度が下がったためである。

4.3 粒子数測定結果

図-12に測定した粒子数分布を示す。従来方式は左右対象のため、半分のみ測定した。従来方式では模擬発熱装置上部と壁側上部の粒子数が多かった。天井レス方式は、従来方式同様に模擬発熱装置上部と、仮想天井上部と吸込口辺りの粒子数が多かった。CRPACとFFUの下部の粒子数では、FFU下部の方が粒子数の少ない範囲が広がった。

実験においては実際の空間より多い粒子を噴霧しているため、実空間に即して噴霧した粒子数を人2名から発塵したと想定して換算^{※4}を行った。その上下粒子数分布を図-13に示す。従来方式の生産エリアでは、高さに関係なく1万[個/cf]以下となった。FFU吹出口④下部の高さ2.2m以下の測定点では、粒子数が3,400[個/cf]以下になった。天井レス方式においても、測定点の高さに関係なく、1万[個/cf]以下となり、従来方式と同等の清浄度となり、両方式とも想定したISOクラス7の清浄度を達成していることを確認した。

天井レス方式の吹出口下部の粒子数の違いとしてFFUの吹出口下部①では、1,130[個/cf]以下、CRPACの吹出口下部⑥では、4,500[個/cf]以下になり、FFUとCRPACの吹出口が同程度の風量でも粒子数に差が見られた。その理由は、CRPACの吹出口形状が細長く、吹出風速が約1.1m/sとなり、FFUに比べて約2倍速いため、周囲の粒子を誘引し、粒子数が多くなった可能性が考えられる。

5. 数値流体解析と実測結果の比較

図-3の数値流体解析と図-9の実験結果の温度分布を比較すると、天井レス方式の仮想天井の上部に温度差5℃程度の熱だまりが確認されたが、実験では、設定温度+3℃程度となり、数値流体解析の結果ほど差は大きくならなかった。その理由は、数値流体解析と実験(冬期に実施)で発熱条件が異なっていることが一因と考えられる。

図-4の数値流体解析の空気齢指標と図-12の粒子数分布を比較すると、仮想天井上部の空気齢指標が大きく空気が滞留することが想定されたが、測定では仮想天井上部の粒子数がそれほど多くない結果となった。空気齢指標では、室内に一樣発生を想定したときの定常濃度と瞬時一樣拡散濃度との比であるため、発塵位置の関係で仮想天井以上の粒子が滞留しないと考えられる。

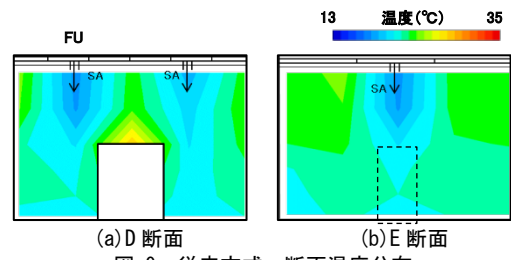


図-9 従来方式

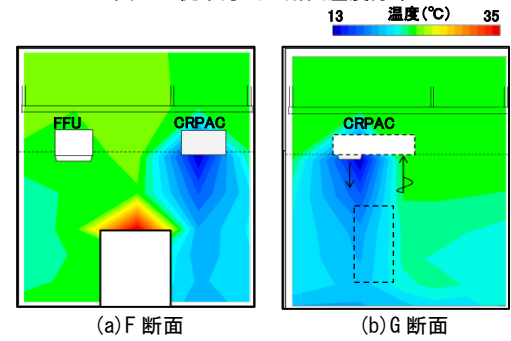


図-10 天井レス方式

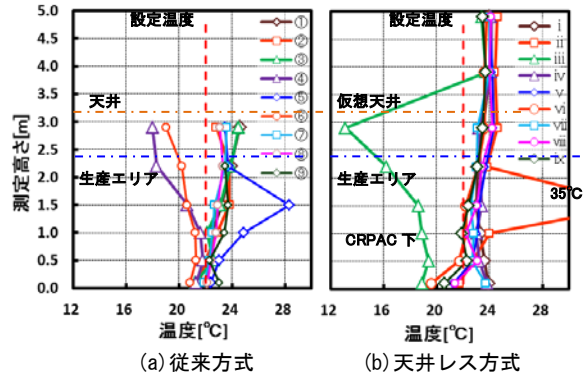


図-11 上下温度分布 (各測定点の平均温度)

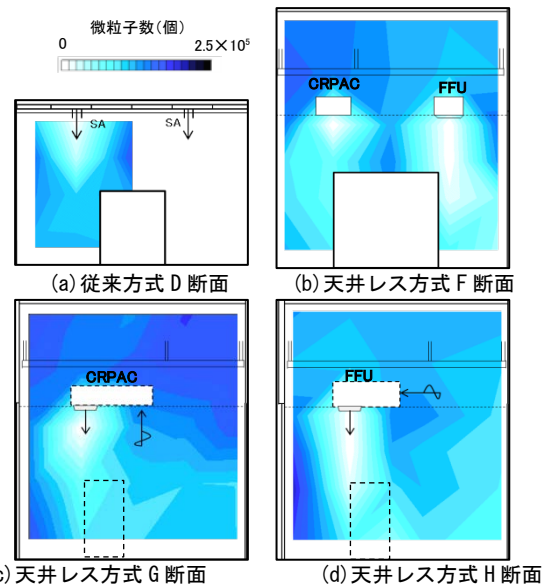


図-12 粒子数分布

6. まとめ

従来方式と天井レス方式の2方式について、温度分布と空気清浄度に関して、数値流体解析と実測による基礎的な比較を行った。CRPACを使用した天井レス方式では、温度の偏りはあるが、清浄度においては従来方式と大きな差は見られず、同等の性能となることを確認した。今後は、CRPACの吹出温度が

低くなっている状態の改善や FFU の吹出口による影響の検討を行う。

謝辞

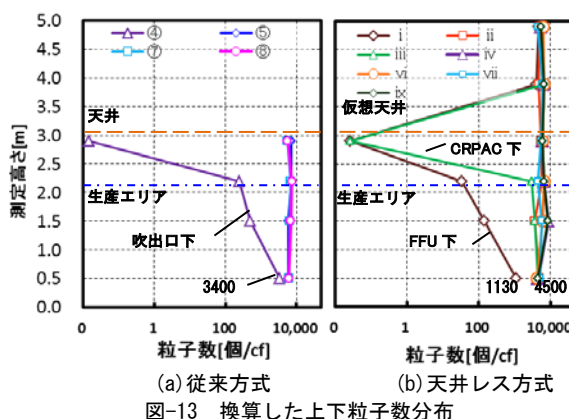
本測定に関しては、戸田建設(株)設備設計部 太田 裕司氏、同エンジニアリング部 久保 夏希氏に多大なご協力を頂いた。記して感謝の意を表す。

注釈

- ※1 生産エリア：生産機器周囲で本論文では温度と清浄度を評価する空間
- ※2 空気齢指標：室内全域に様に汚染物質が発生し続けるとき、給気口から新鮮空気を入れたときの、拡散物質濃度と汚染物質の瞬時一様拡散濃度（完全混合濃度）との比⁸⁾⁹⁾
- ※3 空気余命指標：室内全域に様に汚染物質が発生し続けるとき、流れ場を逆転させ、排気口から新鮮空気を入れたときの、拡散物質濃度と汚染物質の瞬時一様拡散濃度との比⁸⁾⁹⁾
- ※4 換算方法；文献値¹⁰⁾からクリーンルーム用衣服を着て立っている人の発塵（約 5.5×10^5 [個/min 人]）と、発塵器から発生させた量との比から濃度を求めた。

参考文献

- 1) 鈴木良延 他；「タスク&アンビント」クリーン空調に関する研究その 1～3 ，日本建築学会日本建築学会学術梗概集（中国），pp783~788, 2008.9
- 2) 鈴木良延 他；「タスク&アンビント」クリーン空調に関する研究その 4,5 ，日本建築学会日本建築学会学術梗概集（東北），pp1057~1060, 2009.8
- 3) 鈴木良延 他；「タスク&アンビント」クリーン空調に関する研究その 6,7 ，日本建築学会日本建築学会学術梗概集（北陸），pp709~712, 2010.9



- 4) 長谷部弥 他；「タスク&アンビント」クリーン空調に関する研究その 8,9 ，日本建築学会日本建築学会学術梗概集（関東），pp807~810, 2011.8
- 5) 伊藤宏 他；フレキシブル FFU を用いたクリーン空調システムの開発 その 1 日本建築学会大会学術講演梗概集（東海），pp750~751, 2012.9
- 6) （社）日本空気清浄協会 編；クリーンルーム環境の計画と設計（改訂 2 版第 4 刷発行）
- 7) Model 3075/3076 Constant Output Atomizer Instruction Manual, ©TSI Incorporated, October 2002
- 8) 三次元熱流体解析システム Stream Ver.9 ユーザーズガイド 基礎編（株）ソフトウェアクレイドル，pp2-115~117, 2011.7
- 9) 三次元熱流体解析システム Stream Ver.9 ユーザーズガイド リファレンス（ソルバー）編（株）ソフトウェアクレイドル，pp2-331~333, 2011.7
- 10) 平塚 豊；半導体工場における微粒子管理，空気清浄協会 空気清浄雑誌，第 24 巻第 3 号，pp.2~19, 1986.12