

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

(その 2) 天井レスクリーンルームにおけるパッケージエアコンの適用に関する研究

STUDY ON ENVIRONMENTAL CONTROL IN NON-UNIDIRECTIONAL AIRFLOW CLEANROOM

Part.2 Study on application of Package Air-Conditioner in ceilingless cleanroom

栗木 茂^{*1}, 鈴木 孝彦^{*2}, 永井 裕之^{*3}, 伊藤 茂久^{*4}, 村江 行忠^{*5}, 太田 裕司^{*4}
Shigeru KURIKI, Takahiko SUZUKI, Hiroyuki NAGAI, Shigehisa ITO, Yukitada MURAE and Yuuji OOTA

The previous paper had described comparison between conventional and ceilingless system I by CFD and experiment in the non-unidirectional airflow cleanroom.

This paper is the outline that examination of ceilingless system II with “Packaged Air Conditioners” in the non-unidirectional airflow cleanroom, examination of air volume control with “Air Particle Sensor” by the experiment, and energy saving evaluation. Cleanliness of ceilingless system II confirmed that it became the equal performance to conventional system. We confirmed that we could reduce supply air volume of FFU with keeping cleanliness.

Keywords : Non-unidirectional Airflow Cleanroom, Ceilingless, Packaged Air Conditioner, Fan Filter Unit, CFD, Experiment

非一方向流式クリーンルーム, 天井レス, パッケージ型空調機, FFU, CFD, 実験

1. はじめに

既報¹⁾では, 非一方向流クリーンルームで一般的に採用されてきたシステム (以下, 従来方式) と, 天井を設置せず, 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) を用いて, 必要な範囲のみ清浄度を確保するシステム (以下, 天井レス方式 I) の 2 方式について数値解析と実験により基礎的な比較を行った。

本報では, コストを下げるため HEPA の無いパッケージ型空調機 (以下, 一般 PAC) を使用し, 一般 PAC からファンフィルタユニット (以下, FFU) に空調空気を供給する方式 (以下, 天井レス方式 II) を考案し, 数値解析及び実験によりその方式の可能性を検討した。さらに, 粒子濃度に合わせて風量を変更するシステムを追加し, 実験によりそのシステムの制御の検討と省エネルギー評価を行ったので報告する。

2. 空調システムの概要

天井レス方式 II のシステムイメージを図-1 に示す。天井レス方式 I の CRPAC を一般 PAC に変更し, ダクトを介して空調空気を FFU 吸込口近傍に供給する方式である。従来方式の天井設置位置 (高さ 3m) を仮想天井とし, 機器の吊込, FFU 吹出口 と一般

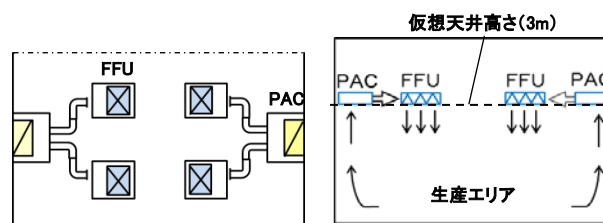


図-1 天井レス方式 II システムイメージ図

表-1 数値解析条件

解析対象空間	13.7 m × 7.6 m		
解析空間高さ	5 m		
吹出し風量	9,370 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	機器発熱等 12.3kW 天井・壁・床面負荷 8W/m ²		
吹出口	数	PAC	8ヶ所 270 CMH
	風量	FFU	12ヶ所 780 CMH
	位置	PAC	側面
	FFU	下面	
吸込口	数	PAC	4ヶ所 540 CMH
	風量	FFU	12ヶ所 780 CMH
	位置	PAC	下面
	FFU	側面	
大きさ	PAC	0.45 m × 0.215 m	
	FFU	0.4 m × 0.2 m	

*1 戸田建設(株)開発センター

*2 戸田建設(株)開発センター 修士 (工学)

*3 戸田建設(株)名古屋支店建築設計室

*4 戸田建設(株)設備設計部 工学修士

*5 戸田建設(株)開発センター 工学修士

Research and Development Center, TODA CORPORATION

Research and Development Center, TODA CORPORATION, M.Eng

Designing Division, Nagoya Branch, TODA CORPORATION

Mechanical and Electrical Engineering Dept., TODA CORPORATION, M.Eng.

Research and Development Center, TODA CORPORATION, M.Eng.

PAC の吸込口高さとした。また、仮想天井より下の範囲の清浄度を効果的に確保するために、仮想天井より上の範囲を循環させないように FFU の吸込口は側面とした。一般 PAC1 台からダクトを介して FFU2 台に供給する。一般 PAC の風量が FFU の風量より少ないため、ダクトを FFU に接続せず、吸込口手前で開放した。それにより、熱負荷や粒子濃度に合わせて、一般 PAC や FFU の風量を個別に調整できる。なお、設定清浄度は ISO クラス 7 とし、循環風量は、仮想天井より下の容積に対して 30 回/h 相当とした。

3. 清浄度・温度分布に関する検討

3.1 数値解析による検討

天井レス方式 II の検討のため数値解析を実施した。解析条件を表-1 に示す。解析ソフトは、Stream Ver.9 を用い、定常解析で温度分布、空気齢指標^{注1)}を求めた。熱負荷など詳細条件は、既報¹⁾と同様とし、従来方式と比較した。

図-2 に従来方式、図-3 に天井レス方式 II の数値解析結果を示す。天井レス方式 II は、仮想天井より上の空間に熱気が上がり、従来方式に比べ仮想天井より下の空間では、上下温度差が小さくなった。空気齢指標は、仮想天井より上の空間で大きく、塵埃が滞留する可能性がある。また、従来方式は吸込口が壁下部にあり、清浄空気が生産エリアを循環する前に排出される可能性があるが、天井レス方式 II では、生産エリアを通過後に一般 PAC に吸い込まれ、空気齢指標が小さくなったと考えられる。

3.2 実験による検討

(1) 実験 1 概要

天井レス方式 II の温度分布と清浄度を確認する目的で実験 1 を行い、既報¹⁾の従来方式と比較した。実験条件は、既報と同様にクリーンルーム内に生産機器、作業者を模した発熱体および発塵を設定した。表-2 に従来方式と天井レス方式 II の風量・温度条件

表-2 従来方式と天井レス方式 II の風量・温度条件

	従来方式	天井レス方式 II
実験室広さ	4.5 m×4.5 m	
天井高さ	5 m	
仮想天井高さ	3 m	
空調機	AC	PAC
吹出口風量	1,860 CMH	-
PAC 吹出風量	-	840 CMH
FFU 風量 (1 台)	-	923 CMH
OA 風量	-	57 CMH
吹出口平均温度測定値	18.0 °C	-
FFU 吹出平均温度測定値	-	19.4 °C
PAC 吹出平均温度測定値	-	10.7 °C
HEPA フィルタ捕集効率 @0.3µm	99.79 %	99.99 %

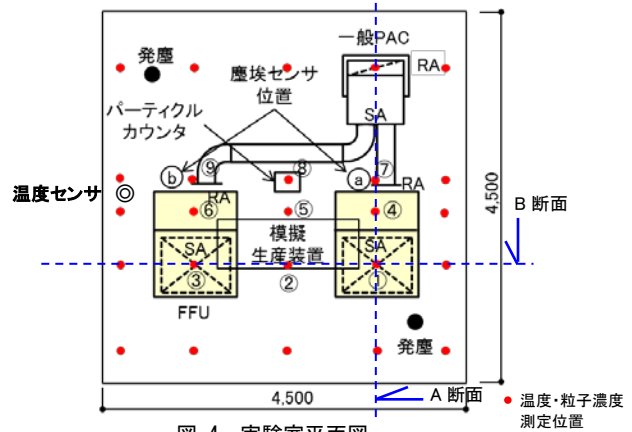


図-4 実験室平面図

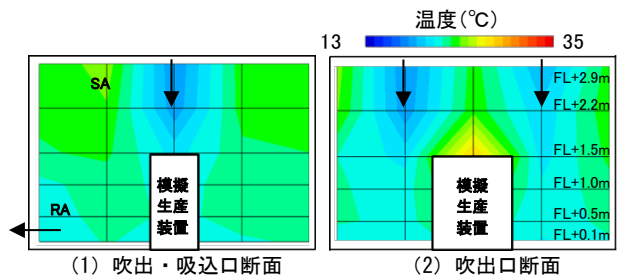


図-5 従来方式の断面温度分布¹⁾

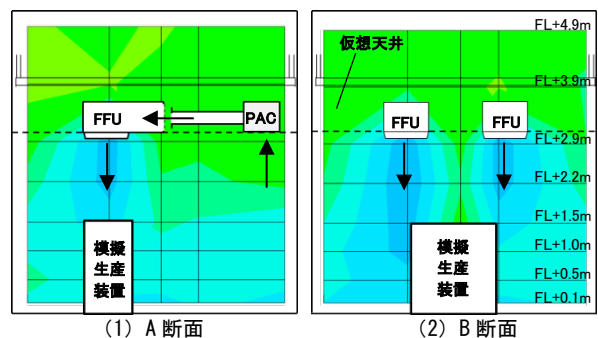


図-6 天井レス方式 II の断面温度分布

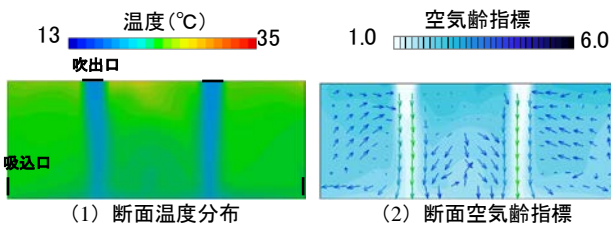


図-2 従来方式 数値解析結果

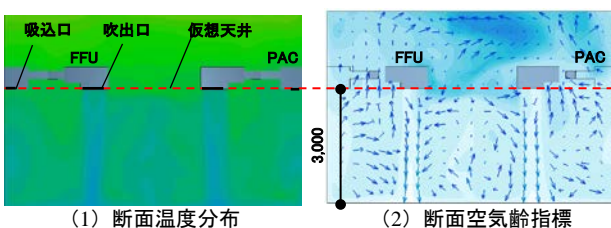


図-3 天井レス方式 II 数値解析結果

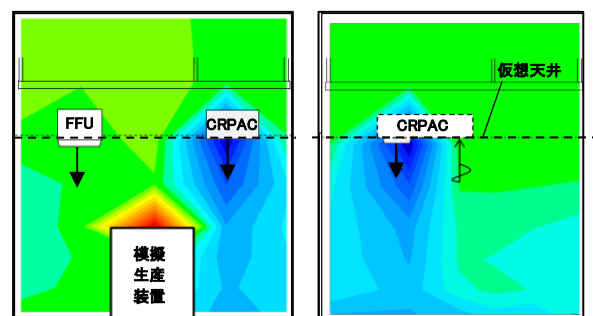


図-7 天井レス方式 I 断面温度分布¹⁾

を示し、図-4 にクリーンルーム実験室の平面図を示す。一般 PAC の温度センサは ◎印 (H=1.5m) に設置し、設定は 22℃の冷房とした。発塵は、図中に示す●印 (H=1.4m) の 2ヶ所から、液噴霧型エアロゾル発生器³⁾を用いて発生させた。また、天井レス方式 II において OA として壁面より加圧し、陽圧を維持している。なお、測定項目は、既報と同様に温度と清浄度とし、粒径は 0.3 μm 以上を評価対象とした。

(2) 温度測定結果

図-5 に従来方式、図-6 に天井レス方式 II の断面温度分布を示す。天井レス方式 II の一般 PAC 吹出し温度は 10.7℃と低いが、一般 PAC より FFU の風量が多く、周囲の空気と混合しているため、FFU からの吹出し温度は、従来方式と同じ 18℃程度となった。既報¹⁾の CRPAC を用いた天井レス方式 I (図-7) と比べ温度の偏りは改善した。

図-4 に示した生産エリア①~⑨の上下温度分布を図-8 に示す。吹出口や発熱体付近を除けば、高さ 0.5m から 2.2m では、概ね従来方式と同様であることを確認した。天井レス方式 II は、仮想天井より上に熱気が上昇していることが確認できる。FFU の吹出口の下 (図-8 (2) ①③) で温度差があるのは、保温タイプのダクトを使用しているが、一般 PAC からの供給距離により、受け渡し温度の違いがあるためと考えられる。

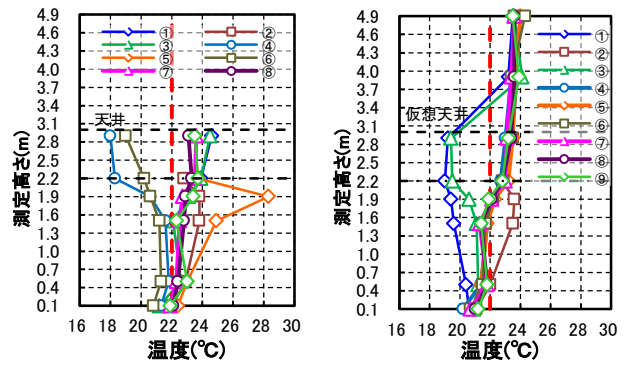
(3) 清浄度測定結果

図-9 に粒子濃度の 3 回の測定値を平均し、この生産エリアでは 2 名が作業すると想定して、人 2 名からの発塵に換算^{注2)}した上下粒子濃度分布を示す。(2) 天井レス方式 II では、生産エリア内の測定点高さに関係なく、6,700 個/cf 以下となり、従来方式と同等の清浄度が確保できた。数値解析結果 (図-3) では、仮想天井より上の空間の空気齢指標が大きく、滞留の可能性があったが、実験では 3,300~5,200 個/cf 程度であった。その理由として、数値解析は室内全域に一樣に汚染物質が発生し続ける解析としたが、実験では、仮想天井より上で発塵していないため、粒子濃度が多くならなかったと考えられる。FFU (図-9 (2) ①③) の吹出口の下では、1,400 個/cf 以下になり、従来方式と同等以上の清浄度が確保でき、ISO クラス 7 を達成していることを確認した。

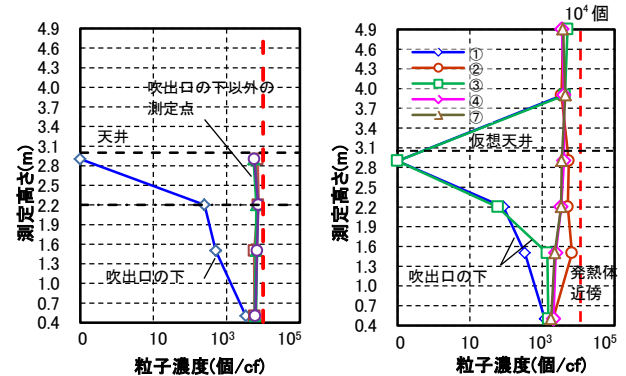
4. 風量制御システムに関する検討

4.1 風量制御システム概要

天井レス方式 II に塵埃センサを組み合わせて風量を制御するシステムについて実験 (実験 2, 3) により検討を行った。図-10 に風量制御システムのイメージを示す。仮想天井高さに設置した FFU に、塵埃センサ、プログラマブル・ロジック・コントローラ (以下、PLC) とインバータを組み合わせて粒子濃度に合わせて風量を変更するシステムである。これにより、発塵の少ない休憩時や夜間等に風量を下げることに



(1) 従来方式 (2) 天井レス方式 II
図-8 上下温度分布 (各測定点の平均温度)



(1) 従来方式 (2) 天井レス方式 II
図-9 上下粒子濃度分布 (換算値)

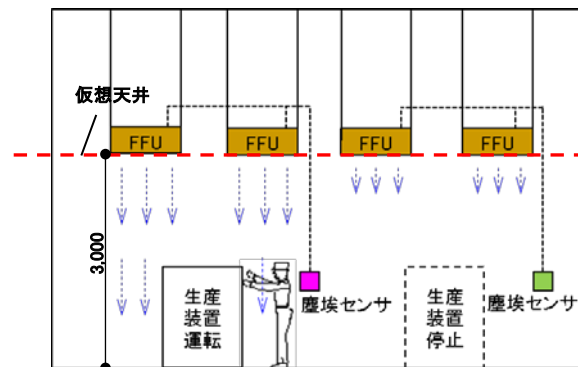


図-10 風量制御システムイメージ

表-3 風量制御システム実験概要

実験室広さ	4.5 m×4.5 m
天井高さ	5 m
FFU 吹出口 (仮想天井) 高さ	3 m
FFU 風量 (1 台)	大 930 CMH 中 620 CMH 小 465 CMH
HEPA フィルタ捕集効率@0.3μm	99.99 %
PAC 風量 (強運転) (1 台)	840 CMH
清浄度設定	ISO クラス 7
パーティクルカウンタ位置	部屋中央 H=1.5m

表-4 実験 2 における塵埃センサ設定

	塵埃センサ位置	しきい値 (個)		タイムラグ (sec)	
		上値	下値	減少時	増加時
CASE I	FFU 吸込口 a	6000	1000	30	5
CASE II				10	5

より省エネルギーを図る。塵埃センサはオムロン製 ZN-PD03-S を使用し、PLC を介し FFU 風量を変更する。風量を変更する方法として PID 制御を用いる事例もあるが、制御を簡素化するために塵埃センサに設定できるしきい値を利用し、しきい値を通過した場合に風量を変更するシステムとした。

4.2 実験 2, 3 概要

表-3 に実験概要を示す。FFU の風量変更は 3 段階で、ISO クラス 7 を想定し仮想天井以下の容積の 30 回/h 相当を最大の循環風量とした。最小風量は一般 PAC の風量以下にならないように 15 回/h 相当とした。発塵は液噴霧型エアロゾル発生器を用いて、30 回/h の風量の際に部屋の粒子濃度が 10,000 個/cf 程度となるように、室内の 2ヶ所 (H=1.4m) から濃度 0.2% の塩化ナトリウム水溶液を 20 分噴霧した。粒子濃度の評価は、ISO21501-4:2007 に対応したパーティクルカウンタ (リオン製 KC-52) を部屋中央 H=1.5m に設置し、評価粒径は 0.3 μ m 以上を対象とした。塵埃センサは 1 秒毎に 60 秒間の移動平均値を出力し、パーティクルカウンタは 0.1cf/60sec の計測値を 1cf 当たり に換算した。

4.3 風量減少タイムラグによる比較 (実験 2)

塵埃センサのしきい値通過直後の風量変更は、ハンチングを生じる可能性があるため、タイムラグを設定した。表-4 に実験 2 の塵埃センサの設定を示す。粒子濃度がしきい値を超えた場合は、直ぐに風量を上げ清浄度を保つ必要があり、タイムラグを 5 秒とした。しきい値より下がった場合のタイムラグは、30 秒、10 秒の 2 条件とした。塵埃センサの測定位置は、FFU 吸入口 (図-4a) とした。

図-11 に塵埃センサによる粒子濃度測定値、図-12 に部屋中央におけるパーティクルカウンタの粒子濃度測定値の経時変化を示す。図-11 にて塵埃センサの値が 6,000 個/cf を超えた時点で FFU の風量が増え、粒子濃度が下がっている。減少時のタイムラグが 10 秒の CASE II は CASE I に比べ粒子濃度が再増加するまでの時間が短く、細かく上下している。また、部屋中央のパーティクルカウンタの値も CASE II が高くなっており、減少時のタイムラグは 10 秒では粒子濃度が多くなる可能性があることが分かった。

4.4 塵埃センサ測定位置による比較 (実験 3)

塵埃センサの測定位置の違いによる比較として実験 3 を行った。表-5 に実験 3 の塵埃センサの設定を示す。センサの位置は、清浄度が必要な生産装置近傍の部屋中央 (パーティクルカウンタ横) と、2 台の FFU の吸入口 a, b (図-4) とした。

図-13 に塵埃センサによる粒子濃度測定値、図-14 に部屋中央におけるパーティクルカウンタの粒子濃度測定値の経時変化を示す。部屋中央 (図-14) では、

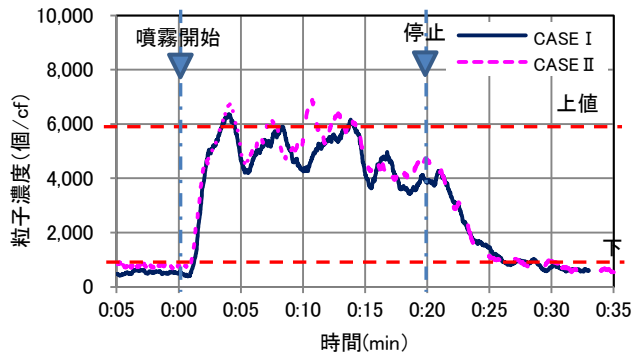


図-11 実験 2 塵埃センサによる粒子濃度の経時変化

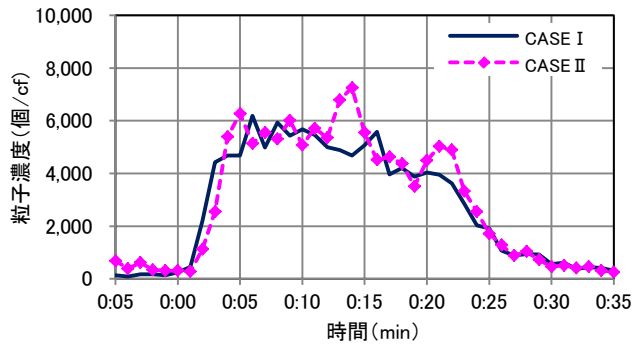


図-12 実験 2 部屋中央における粒子濃度の経時変化

表-5 実験 3 における塵埃センサ設定

	塵埃センサ 位置	しきい値(個)		タイムラグ(sec)	
		上値	下値	減少時	増加時
CASE1	部屋中央	5000	1000	30	5
CASE2	FFU 吸入口 (a)				
CASE3	FFU 吸入口 (b)				

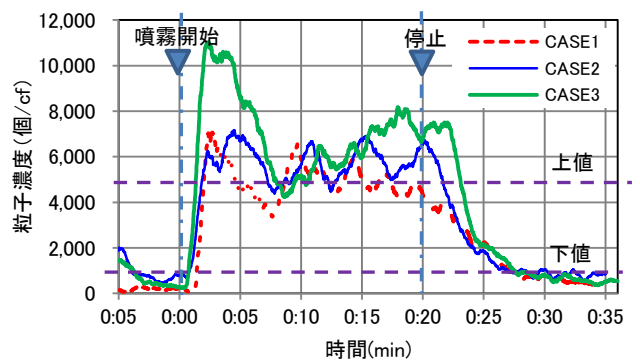


図-13 実験 3 塵埃センサによる粒子濃度の経時変化

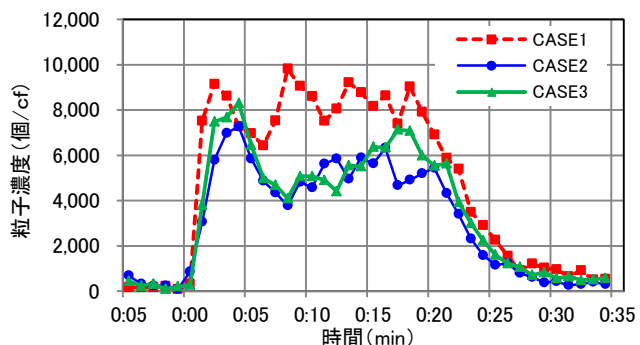


図-14 実験 2 部屋中央における粒子濃度の経時変化

CASE1 は CASE2, 3 より多くなった。これは、FFU 吸込口の粒子濃度が多く、CASE2, 3 が CASE1 よりも風量を多くする制御となり、部屋中央の粒子濃度が少なくなったと考えられる。また、FFU の吸込位置が発塵位置に近い CASE3 において、塵埃センサの粒子濃度は多くなっており、その場合のパーティクルカウンタの値も CASE2 より多くなった。しかし、目標とした 10,000 個/cf 以下になっており、かつ CASE1 よりも少ない粒子濃度となった。

省エネルギー評価として、FFU を 1 日 10 時間 30 回/h での連続運転を基準とし、循環風量を比較した。CASE1 で 23%減、CASE2 で 12%減、CASE3 で 10%減となった。制御としては部屋中央値で行う CASE1 が最も省エネルギーとなった。ただし、清浄度としては粒子濃度が多くなり、塵埃センサの位置を決める際、注意が必要である。

5. まとめ

天井レスクリーンルームにおいて HEPA の無い一般 PAC を使用した天井レス方式Ⅱについて数値解析及び実験によりその方式の可能性を検討した。さらに、粒子濃度に合わせて風量を変更するシステムを追加し、実験によりシステムの制御の検討と省エネ

ルギー評価を行った。その結果、天井レス方式Ⅱの清浄度が従来方式と同等の性能となることを確認した。また、風量制御について、しきい値 2 点のみの設定でタイムラグを調整することにより、清浄度を保ったまま FFU の風量を減らすことができることを確認した。

注釈

- 注 1 空気齢指標: 室内全域に一樣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²⁾。本解析においては、FFU からの吹出空気を新鮮空気とみなした。
- 注 2 換算方法; 文献値⁴⁾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) 栗木他; 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 技術研究報告第 39 号 2013.10
- 2) 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, リファレンス編 (株)ソフトウェアクレイドル
- 3) Model 3075/3076 Constant Output Atomizer Instruction Manual, ©TSI Incorporated
- 4) 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