

置換クリーン空調システムに関する検討

長谷部 弥 近藤 恒佑 小松原 正幸 染谷 孟行
(技術研究所) (技術研究所) (設計本部) (設計本部)

Study on displacement air cleaning system

Hisashi Hasebe, Kosuke Kondo, Masayuki Komatsubara and Takayuki Someya

本システムは、換気性能に優れる置換換気の技術をクリーンルームに応用したものである。生産装置などから発生する熱上昇流とともに浮遊微小粒子を空間上部へ搬送するため少ない風量で確実に清浄化でき、省エネである。これまでクリーン空調の分野では、床に堆積した粒子が気流の影響で舞い上がると考えられていたため、空間下部からの清浄空気の供給は行われていなかった。これに対し、当社で行った堆積粒子の舞い上がりに関する研究の結果、クリーンルーム内の微風速（1.0m/s以下）では堆積粒子が舞い上がらないことが明らかになったため実現可能となった独創性の高いシステムである。

The displacement air-cleaning system was developed. This system is a new air-cleaning system that applies the characteristics of displacement ventilation. By supplying clean and cold air from inlets arranged near a floor or on a ceiling, the air can be uniformly distributed without a duct to a cleanroom. It is a system which can secure a cleanliness by a small air change rate under the influence of the ascending airflow resulting from heat generation from persons and equipment. In this paper, the characteristics of this system and the experimental results of the recovery performance test and the influence of particle generation and the temperature distribution are reported, and these characteristics are compared with those of conventional system.

1. はじめに

電子デバイス製造クリーンルームは、エネルギー多消費型の施設である。これまで、生産ラインの工夫による省エネの取り組み¹⁾が行われているが、1960年代初頭から始まったクリーンルーム以来²⁾、基本構造（空気循環のための床・壁・天井の2重区画）にほとんど変化がなく、省エネの取り組み効果は頭打ちになっていた³⁾。

筆者らは、クリーンルームの省エネ・省資源化を目指し、基本構造そのものを変える取り組みを行い、タスク&アンビエントクリーン空調システム⁴⁾、温度成層型局所クリーン空調システム⁵⁾などの開発を行い、実案件に導入してきた。

今回、より省エネ・省コストなクリーン空調システムを提供することを目的とし、置換換気の特徴を応用した置換クリーン空調システム（図-1）に関する検討を行った。置換換気では、室下部の床付近から冷気を給気し温度成層を形成して、発熱体や人体の影響で発生する上昇気流を利用して汚染物質を空間上部へ搬送し排出する。押し出し流れに近い気流性状になるため、混合換気方式と比

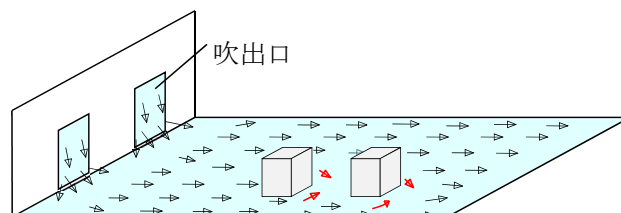


図-1 置換クリーン空調システムの吹出口位置と供給空気の流れのイメージ図

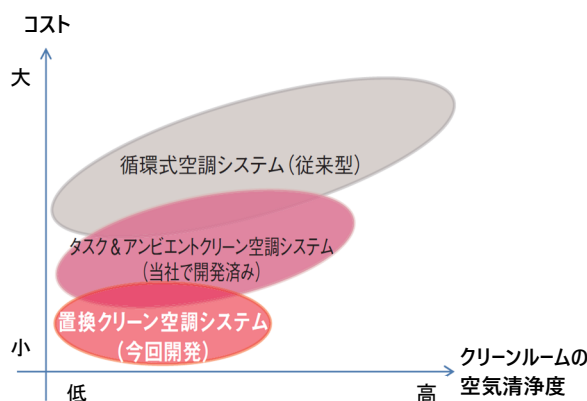


図-2 置換クリーン空調システムの性能とコスト

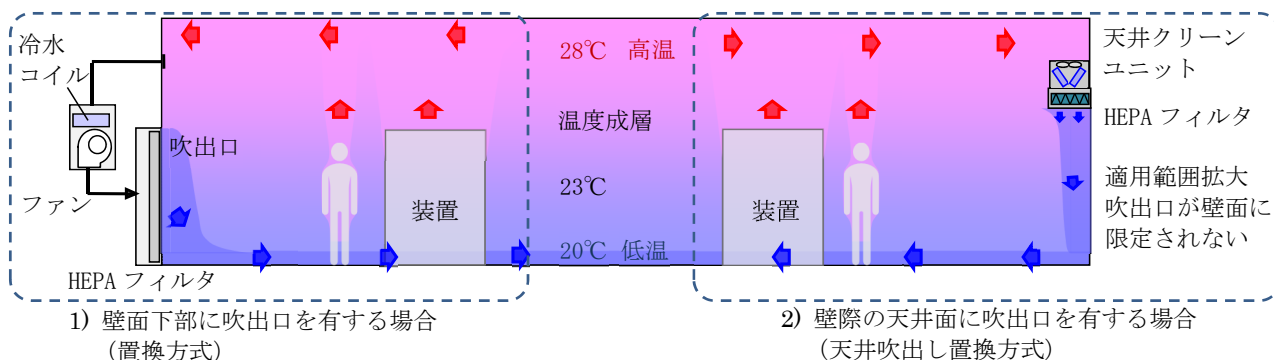


図-3 置換方式(左)と天井吹出し置換方式(右)のシステム図

べ換気効率が高く、換気風量を削減できる省エネな換気方式である。

クリーンルームでは、堆積粒子の再飛散防止の観点から空間下部からの吹出しは行われなかったが、気流による堆積粒子の再飛散の検討⁹⁾の結果、クリーンルーム内の微気流では、再飛散はほぼ起こらないことが明らかになったため、置換クリーン空調システムが実現可能と判断し取り組んだ。

図-2 に置換クリーン空調システムの性能とコストに関して、従来システムとタスク&アンビエントクリーン空調システムとの比較を示す。本システムは、清浄度が低いクリーンルームに対して、より安いコストで提供することが目的である。

本報では、壁面下部に吹出口を有する置換クリーン空調システムにおいて、局所回復特性・発塵時の影響・温度分布に関して実験的に検討を行った。また、実際には、壁面に動力盤・制御盤・備品ロッカー・バルブボックスなどが並ぶこともあり、壁面に吹出口を設置できない場合もあるため、設計の自由度向上を目的として、吹出口を壁際の天井面に設置した天井吹出し置換クリーン空調システムに関して同様の検討を行った。さらに、これらと従来システムとの比較も行った。

2. 置換クリーン空調システムの概要

壁面下部に吹出口を有する場合（置換方式）と壁際の天井面に吹出口を有する場合（天井吹出し置換方式）の概要を述べる（図-3 参照）。

1) 置換方式

清浄冷気を床面付近からクリーンルームに緩やかに吹出し清浄化と熱処理を行う。吹出された清浄冷気は床面に沿って室内に広がり、生産装置・人の発熱の影響で一部が上昇気流となる。その上昇気流により、微小粒子が効率よく排出されることを期待した。少ない換気回数で清浄度を確保で

き、また、空間の上部に設備機器がないため、階高の低いクリーンルームに有効なシステムである。

2) 天井吹出し置換方式

壁際の天井面に設置された吹出口から周囲空気より温度が低く比重の大きい清浄冷気を、鉛直下向きに緩やかに吹出し清浄化と熱処理を行う。吹出された清浄冷気は、比重差により周囲空気と大きく混合せずに床面に到達したのち床面に沿って室内に広がる。置換方式と同様に生産装置・人の発熱の影響による上昇気流で、微小粒子が効率よく排出されることを期待した。

上記 2 つのシステムに共通する点は、(a) 要求清浄度が高くない (5,000~100,000 個/cf)、(b) 発熱が多くない (100W/m²以下程度)、クリーンルーム向けであるという点である。

その理由は、(a) 清浄冷気が床面に向かって流れるときや床面に沿って流れるときに周囲の空気を誘引し清浄冷気の粒子濃度が上昇するため、要求清浄度が高い空間に適さないことと、(b) 上昇気流を利用して微粒子を排出するシステムであることを考慮すると、高発熱の方がより多くの上昇気流が発生し微粒子排出の点においては有利であるが、一方で、熱処理のために供給風量が多くなり、混合型の乱流式クリーンルームの気流性状に近い状態になり、置換換気の特徴が生かせなくなるからである。

3. 検証実験

平面 4m×9m、天井高さ 2.5m の実験クリーンルームに、置換方式・天井吹出し置換方式・従来の天井吹出しシステム（従来方式）を導入した。

3.1 実験室概要

置換方式（図-4）は、吹出口（1m×1m）を短手方向の壁面の中心で床面に接する位置に設置し、

吸込口 (0.75m×0.5m) を同じ壁面の上部で天井面に接する位置に設置した。吹出し風速は 0.35m/s、名目換気回数は 14 回/h (1,260m³/h) とした。熱負荷はクリーンルーム内に設置した 2 台の模擬装置の加熱により与え、発熱量は 2.12kW (59W/m²) とした。

天井吹出し置換方式 (図-5) は、吹出口 (1m×1m) を短手方向中心、天井一端の壁面に接するように配置し、吸込口 (0.5m×0.5m×2) を対向壁面の上部で天井面に接する位置とした。吹出し風速、換気回数、熱負荷は置換方式と同じとした。

従来方式 (図-6) は、天井面に吹出口 (0.35m×0.35m) を 2 つ、短手方向の壁面の床面に接する位置に吸込口 (0.5m×0.5m) を 2 つ設置した。吹出し風速は 1.4m/s、換気回数、熱負荷は置換方式と同じとした。

いずれの方式においても FCU と FFU により製造した清浄冷気をダクトで供給した (図示されていない)。

3.2 局所回復特性

3.2.1 実験方法と実験条件

各方式の回復特性を検証した。図-4 に置換方式、図-5 に天井吹出し置換方式、図-6 に従来方式の粒子濃度の測定点 (a~c) を示す。点 a、b はクリーンルームの中央部で居住域と天井付近とした。点 c は置換方式における吸込口部とした。室内温度が定常状態であることを確認し、空調停止後に線香を焚き扇風機で攪拌する。各点の濃度が所定の濃度 (10,000 個/0.01cf) になった時点で空調を再運転し、同時に粒子濃度測定・記録を開いた。測定には光散乱式粒子計数器 (KC-01E、リオン、粒径 0.3μm 以上) を使用した。

3.2.2 実験結果と考察

換気効率を式(1)のように定義し、実験で得られたデータから換気効率を算出した。

$$N = kN_0 \quad (1)$$

N_0 : 名目換気回数

N : 測定により得られた局所換気回数

k : 換気効率

である。完全混合の場合は $k=1$ となる。

表-1 に実験により得られた局所換気回数と式(1)により算出した換気効率を示す。置換方式では、

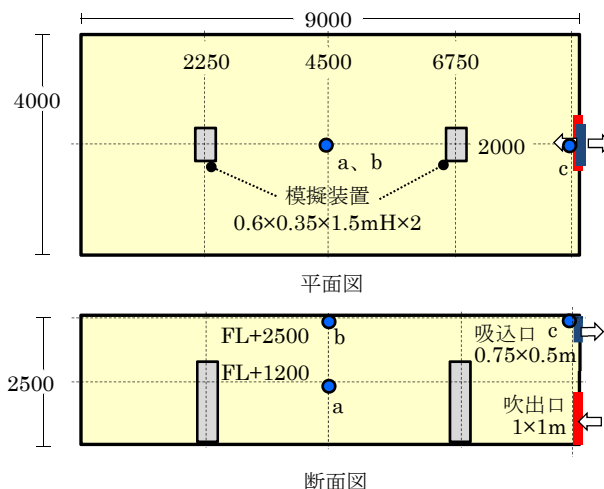


図-4 置換方式の実験設備概念図と局所回復特性実験の測定点

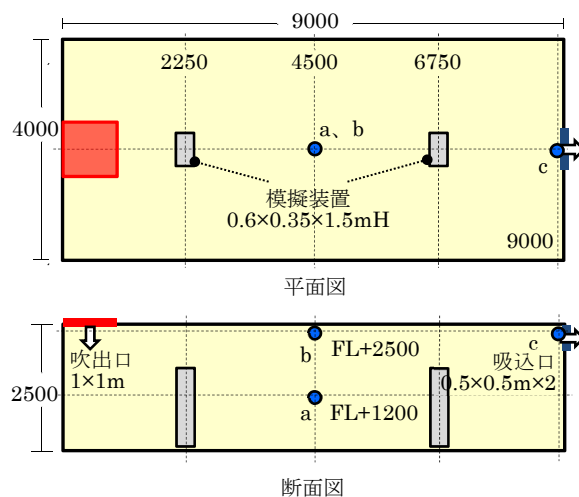


図-5 天井吹出し置換方式の実験設備概念図と局所回復特性実験の測定点

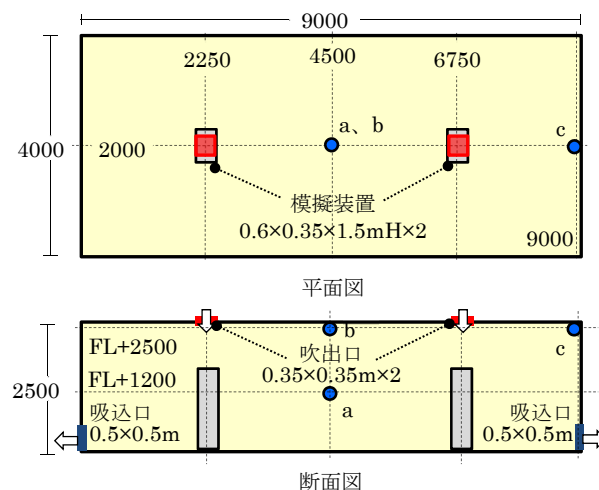


図-6 従来方式の実験設備概念図と局所回復特性実験の測定点

22.6~27.8 回/h で、理論値の 1.6~1.9 倍の高い換気効率であった。押し出し流れに近い気流が形成され、回復特性が良いことが示された。

天井吹出し置換方式では、17.8～21.2 回/h で、理論値の 1.3～1.5 倍の高い換気効率であった。置換方式より換気効率が低くなるが、回復特性が良いことが示された。

従来方式の局所換気回数はすべての測定点で理論値と同等であり、換気効率は理論値の 1.1 倍で、ほぼ完全混合の気流が形成されている。従来方式より置換方式の方が 1.5～1.7 倍、天井吹出し置換方式の方が 1.1～1.3 倍、換気効率が高いことが明らかになった。

3.3 歩行者発塵の影響

3.3.1. 実験方法と実験条件

各方式の歩行者発塵の影響を検証した。図-7 に置換方式と従来方式の測定点と歩行位置、図-8 に天井吹出し置換方式の測定点と歩行位置を示す。測定点は①～④の 4 点とし、測定高さは FL+1200 とした。歩行位置は置換方式の吹出口から L1000 (天井吹出し置換方式は L1500)、L4700 の 2 か所とした。

歩行者はクリーンスーツを着用して歩行した。最初の 5 分間で室内が清浄な状態であることを確認してから歩行を開始した。歩行速度は 80 歩/min とし、3 分間の歩行と 7 分間の休止を 2 回繰り返した。3 分間でおおよそ 14～15 往復した。1cf の空気を 1 分間で吸引する測定を、測定間隔をあげずに連続で 25 分間行った。測定前に床面を十分に清掃した。測定には光散乱式粒子計数器 (LASAIR III 310C、PMS、粒径 0.3 μ m 以上) を使用した。

3.3.2. 実験結果と考察

図-9 に歩行場所 L1000 (天井吹出し置換方式は L1500)、図-10 に歩行場所 L4700 の測定結果を示す。歩行前は粒子濃度が 0 で、歩行を開始すると濃度が上昇し、休止中に濃度が減衰する傾向はいずれの条件でも同じであった。

L1000 (L1500) の歩行は、置換方式・天井吹出し置換方式では上流側における発塵であり、時間遅れはあるがどの測定点にも濃度上昇がみられ、影響が同じように表れている (置換方式では 100～150 個/cf、天井吹出し置換方式では 200～400 個/cf)。従来方式は左右対称の気流性状であり、発塵がある左側の①と②への影響が比較的大きく 100～250 個/cf の濃度上昇が見られた。従来方式と置換方式の濃度上昇は同程度であった。右側の

表-1 実験により得られた各測定点の局所換気回数と式(1)により算出した換気効率

測定点		従来方式	置換方式	天井吹出し置換方式
a	局所換気回数 [回/h]	15.6	27.8	21.2
	換気効率 [-]	1.11	1.98	1.51
b	局所換気回数 [回/h]	15.4	22.6	20.7
	換気効率 [-]	1.10	1.62	1.48
c	局所換気回数 [回/h]	15.4	23.8	17.8
	換気効率 [-]	1.10	1.70	1.27

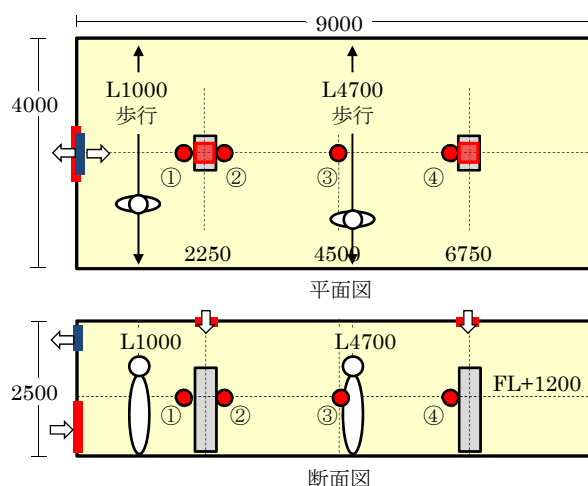


図-7 歩行者発塵の影響検証実験の歩行位置と測定点 (置換方式と従来方式)

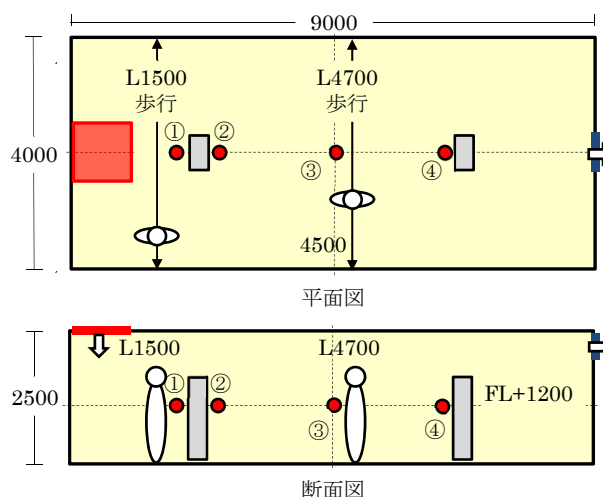


図-8 歩行者発塵の影響検証実験の歩行位置と測定点 (天井吹出し置換方式)

③と④への影響はほとんど見られず、発塵影響は発塵源近傍に限定されていると考えられる。

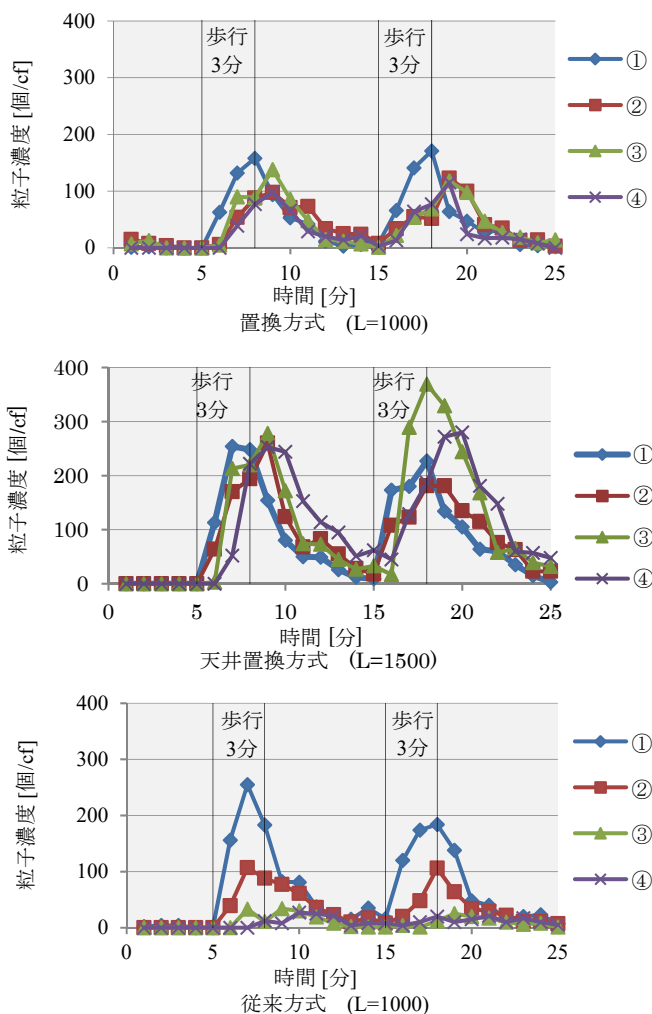


図-9 L1000 (L1500) 歩行の場合の粒子濃度測定結果

L4700の歩行は、置換方式・天井吹出し置換方式では歩行の直近③と下流側④への影響が顕著で200~400個/cfの濃度上昇が見られた。上流側にも時間遅れで影響が表れること(最大濃度は50~100個/cf程度)が確認できる。狙い通りに置換換気がなされている一方で、歩行者発塵の影響には留意する必要がある。従来方式では測定点による濃度の違いが見られず、濃度上昇も最大80個/cf程度で低い結果であった。中央での発塵のため、気流に乗って全体に拡散したと考えられる。

いずれの方式においても、目標とする清浄度に影響を与えるほどではない。

3.4 温度分布

3.4.1 実験方法と実験条件

各方式の温度分布を検証した。図-11に測定点を示す。測定点は置換方式の吹出口から500mm、2500mm、4500mmの3点とし、高さ方向は床から600mmまでと天井から500mmまでは100mm

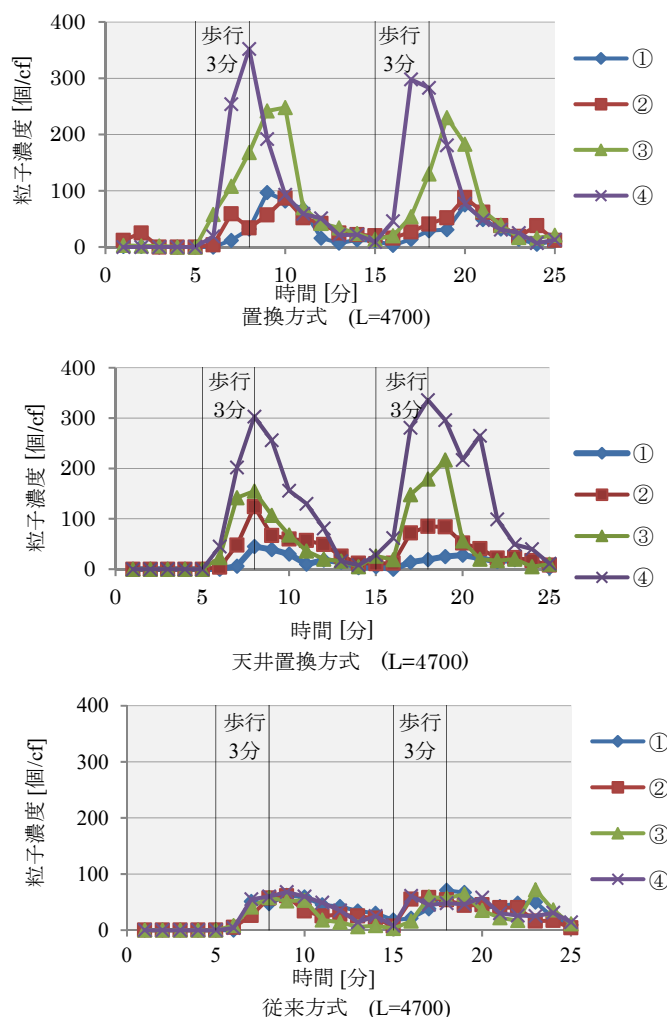


図-10 L4700 歩行の場合の粒子濃度測定結果

ピッチ、その間は200mmピッチの17点とした。室内の温度が定常状態であることを確認し、10秒間隔で1分サンプリングした(計7回)。測定はT型熱電対を用いて行い、データロガー(メモリーハイロガー8422-50、HIOKI)で記録を行った。室内温度設定は23℃とした。

3.4.2 実験結果と考察

図-12に置換方式、図-13に天井吹出し置換方式、図-14に従来方式の測定結果を示す。いずれの方式も居住域は23℃に制御されているが、置換方式・天井吹出し置換方式は温度成層が形成されており、従来方式は上下温度差がほとんどなく、完全混合状態であることが分かる。温度制御の観点では同等である。

4. まとめ

本報では、置換方式・天井吹出し置換方式における局所回復特性・発塵影響・温度分布に関して

実験的に検討を行い、従来方式と比較検討を行った。得られた主な知見を以下に示す。

- ・局所回復特性は、完全混合理論値と比較して、置換方式が1.6~1.9倍、天井吹出し置換方式が1.3~1.5倍、従来方式が1.1倍で、置換方式・天井吹出し置換方式は、従来方式と比較して換気効率が低い。
- ・置換方式における清浄冷気の吹出口近くでの発塵の場合、置換方式・天井吹出し置換方式では、直近だけでなく下流側にも影響があった。従来方式では、発塵影響は発塵源近傍に限定される。
- ・空間の中央部での発塵の場合、置換方式・天井吹出し置換方式では下流側に比較的大きい影響があり上流側にも時間遅れで影響する。従来方式では気流によって全体に拡散するが、置換方式・天井吹出し置換方式よりも低濃度である。
- ・温度制御性は、同等である。

置換方式は階高が低いクリーンルームに有効で、回復特性に優れるが、気流特性を把握し、要求清浄度や発塵場所・発塵量などを十分に把握し、計画する必要がある。

現時点での適用案件は、置換方式、天井吹出し置換方式、各1件である。今後とも、本システムの展開に努めていく予定である。

<参考文献>

- 1) 東芝セミコンダクター社大分工場：SMIF 導入に伴う空調エネルギー削減、省エネルギー、Vol.55、No.2、2003、pp.56-60
- 2) PHILIP R. AUSTIN, STEWART W. TIMMERMAN： “DESIGN & OPERATION OF CLEAN ROOMS”、Business News Pub. Co.、1965
- 3) 並木則和：局所清浄化技術の大きな転換期、クリーンテクノロジー誌、1999年12月号
- 4) 長谷部弥、白谷毅、水原一樹、小松原正幸、梶間智明：省エネ・省資源を実現するクリーン空調システムの開発(その1)-タスク&アンビエントクリーン空調システム概要とクリーン性能-、清水建設研究報告書、No.91、2014.1、pp.73-82
- 5) 長谷部弥、鈴木良延、伊澤康一：「タスク&アンビエント」クリーン空調に関する研究(その8.温度成層局所クリーン空調システム)、第28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、pp.134-136、2011
- 6) 長谷部弥、山田容子、鈴木良延：クリーンルーム内のダクトなどに堆積した微粒子の気流による再飛散に関する検討、エアロゾル研究、Vol.29、No.3、P190~195、2014
- 7) 加藤信介、村上周三、永野紳一郎：天井給排気型クリーンルーム内の気流性状に関する研究(その3) 給排気を局所的に

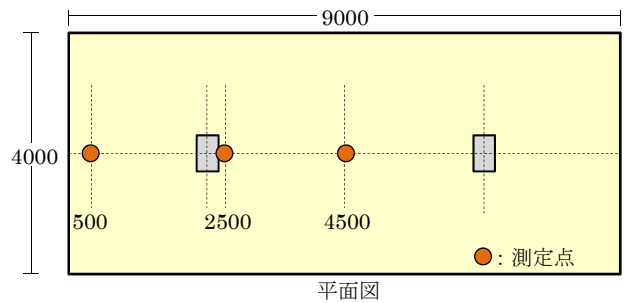


図-11 温度検証実験の測定点

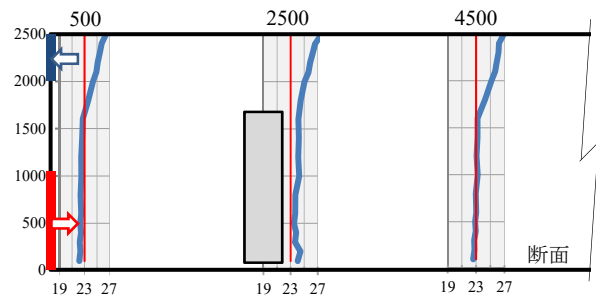


図-12 温度分布測定結果 (置換方式)

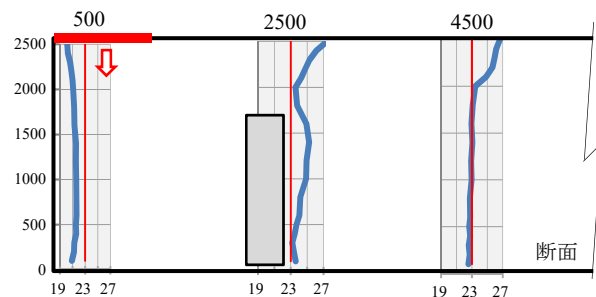


図-13 温度分布測定結果 (天井吹出し置換方式)

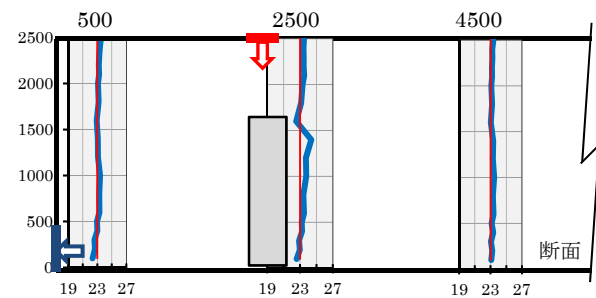


図-14 温度分布測定結果 (従来方式)

対応させた場合の汚染質拡散性状、空気調和・衛生工学会学術論文集、pp.629-632、1986.10

- 8) 長谷部弥、小松原正幸：置換クリーン空調システムに関する検討、第33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、pp.14-17、2015
- 9) 近藤恒佑、長谷部弥、小松原正幸、染谷孟行：置換クリーン空調システムに関する検討(その2) 空間上部に吹出口を有する置換クリーン空調システム、第34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、pp.218-220、2016