

# 環境センサ情報によるクリーン空調制御システムの開発と適用事例

近藤 恒佑 長谷部 弥 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)

## Development of a Control System for FFU Utilizing Particle and Motion Sensors and Its Application Example

Kosuke Kondo, Hisashi Hasebe, Masayuki Komatsubara and Takeyuki Someya

産業用クリーンルーム(CR)におけるファンフィルターユニット(FFU)の循環風量は、一般に最大発塵状態を想定して計画・運用される。したがって、発塵が少ない通常運用時は循環風量が過剰となり、清浄度も過大(必要以上にきれい)になる傾向にある。このような背景の下、当社では、作業員および作業行動による発塵が主な発塵源である CR 内の環境を、画像型人感センサとパーティクルセンサで捉え、その情報を基に FFU を制御するシステム「クリーン EYE」を開発し、さらなる省エネを実現した。本稿では、その開発内容と適用事例を報告する。

The circulation air volume of a fan filter unit (FFU) in an industrial cleanroom (CR) is generally planned and operated under the assumption of maximum dust emission. Therefore, during normal operation when dust generation is low, the circulation air volume tends to be excessive and the cleanliness tends to be cleaner than necessary for the operation. Under these circumstances, we have developed “Clean EYE”, a system that uses an image-type motion sensor and a particle sensor to monitor the environment in the CR, where dust is mainly generated by workers and their work, and controls the FFU based on the information, to achieve further energy savings. This paper reports on the development and application of the system.

### 1. はじめに

産業用クリーンルーム(以降、CR)では、高潔度の要求と大規模化によりエネルギー消費量・建設コストが増大している。一方で CR 内の生産装置やその運用パターンも多様化し、建築設備への負荷となる発塵や発熱も複雑で変化が大きくなり、従来の一様な空間制御を行うシステムでは対応しきれなくなってきた。そこで当社は、必要最小限の要素で CR を構成することと熱処理と清浄化を分離するという発想で CR の基本構造を新たに構築し、CR 全体の熱処理と清浄化を行う「アンビエントクリーン空調システム」を実用化した<sup>1)</sup>。このシステムは従来システムよりも汚染時の回復性能にも優れ、発塵の影響が非常に少ない性能の高いクリーン空調システムである。

また、CR の運用面の課題として、ファンフィルターユニット(以降、FFU)運転に伴うエネルギーロスがある。FFU の循環風量は、一般に最大発塵状態を想定して計画・運用され、これはアンビエント

クリーン空調システムにおいても同様である。したがって、発塵が少ない通常運用時は循環風量が過剰となり、清浄度も過大(必要以上にきれい)になる傾向にある。当社では、主な発塵源が作業員とその作業行動である CR を対象に、CR 内の環境を画像型人感センサとパーティクルセンサで捉え、その情報を基にアンビエントクリーン空調システムの FFU を制御するシステム「クリーン EYE」を開発し、さらなる省エネを実現している<sup>2)</sup>。

本稿ではまず、クリーン EYE の制御対象となるアンビエントクリーン空調システムについてその概要を示す。次に、クリーン EYE の概要とコンセプト、開発過程における諸検討について述べ、最後にその適用事例と実空間での動作検証結果について報告するものである。

### 2. アンビエントクリーン空調システム

従来のクリーン空調システムでは床・壁・天井の二重構造が必要とされ、それぞれ図-1に示す役割

を担っていた。これはクリーンルームの循環気流が床グレーチングから二重区画を利用したレターンシャフトを経由して、全風量がシステム天井に設置されたFFUに供給され、粒子を除去するシステムである。また一般的に冷房用の冷却コイルとFFUの流路は連結されている。

アンビエントクリーン空調システムは図-2に示すように、CR特有の床・壁・天井の2重構造がなく、かつ、熱処理と清浄化の連結を行わない、省エネ・省資源を実現できる新たな空調システムである。この、熱処理と清浄化の分離構成により、センサを用いたきめ細やかなFFUの制御が可能となる。実際の適用例を写真-1に示す。

CR構造は目標清浄度に影響を与えない範囲であれば、微粒子が再飛散しても良いと考え、床・壁・天井の二重構造をなくし、梁・柱・配管・ダクトをCR内露出としている。なお、床やダクト等の堆積粒子が気流(1m/s以下)の変動により再飛散しないことは、実験などにより確認している<sup>3)</sup>。

従来システムでは空間上部から吹出し、空間下部で吸込む気流を構築しているが、FFUが分散配置された場合、FFU間には必ず誘因による上昇流が発生する。アンビエントクリーン空調システムではファンコイルユニット(以降、FCU)とFFUを分離し、上昇流の上部に下面から空気を吸込みFFUに向かって緩やかに吹出すFCUを配置し、FFU気流により形成される循環気流をFCUで補強するように考えた気流構成である。CR内の上昇流がレターンとなり、2重の床・壁・天井なしで循環気流が形成できクリーン環境が構築できる。

この循環気流による疑似的なピストンフローが高い換気効率をもたらし、完全混合が想定される従来システムに比べ、運転とともに素早く清浄化できることが実験・実測両面から確認されている。この特長は清浄度に応じたFFU制御時にも有効であり、粒子濃度の上昇を検知した際の迅速な清浄化を可能としている。

### 3. FFU制御システム「クリーンEYE」

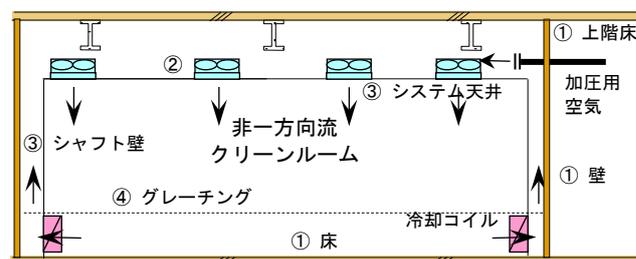
#### 3.1 システムの概要

クリーンEYEは前述のアンビエントクリーン空調システムの熱処理と清浄化を分離したメリットを最大限生かし、CR内の状況・環境を常に把握し、収集した情報に合わせてFFUの風量、運転台数を自動的に制御するシステムである。特に、作業員とその行動が主な発塵源であることが前提の

CRにおいて有効なシステムである。一般に作業員の活動は不規則で時間変動が大きく、予測が困難であることから、時々刻々と変化する室内環境を捉え、制御に反映するものとしている。

#### 3.2 FFU制御システムの構成

システムのハード構成を図-3に示す。システムの実用性を考え、比較的安価で一般に用いられるセンサによる制御技術の確立を目指した。構成は、各センサとFFU間をPLC(Programmable logic controller)を介して通信線で接続するものとした。



- ① 外部空間との区画(床・壁・上階床)、加圧する
- ② 供給空気は全てHEPAを通す(FFU)
- ③ 配管類の隠蔽のために設置される天井、シャフト壁
- ④ グレーチング床、微粒子を床に堆積させない

図-1 従来のCR構造と構成要素の主な役割

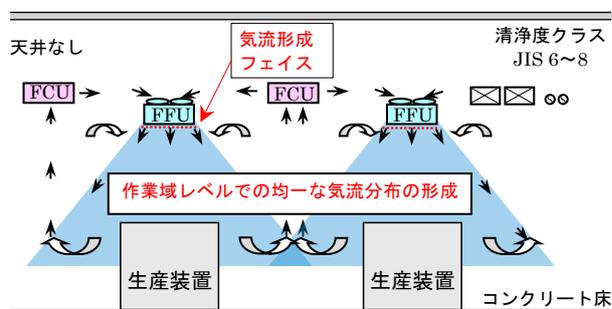


図-2 アンビエントクリーン空調システム概念図



写真-1 アンビエントクリーン空調適用例

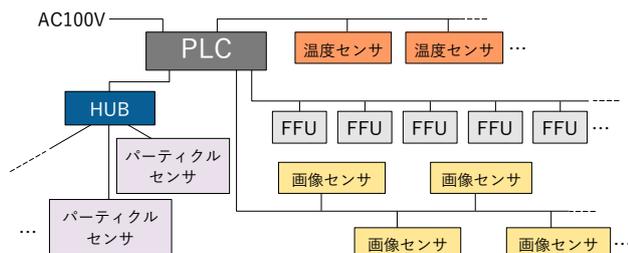


図-3 アンビエントクリーン空調に対する  
FFU制御システムの構成



写真-2 FFU制御に用いたセンサ

### (1) パーティクルセンサ

本システムに適用したパーティクルセンサは光散乱式粒子計数法により粒子を測定するもので、光源に出力の大きい半導体レーザーを使用しており、最小  $0.5\mu\text{m}$  の微粒子の計数が可能である(写真-2 (a)、AES-1000-05N; 神栄テクノロジー、以降、パーティクルセンサ)。サンプリング流量が  $0.1\sim 2\text{ L/min}$  程度と少ないことから、粒子濃度の安定化を図るため5分間の移動平均値を出力する。したがって応答には数分の遅れがあるものの、発塵源である作業員の動きを画像型人感センサで捉え、フィードフォワード的にFFUを運転制御することにより、その遅延を補っている。

### (2) 画像型人感センサ

作業者を捉えるための人感センサには、写真-2 (b)に示す画像型人感センサ(多機能画像センサ; 東芝インフラシステムズ、以降、画像センサ)を用いた。本センサでは、カメラで連続して取得した画像の差分から人間の動きや在/不在情報、エリア内の推定人数を捉える。クリーンEYEにおいてはエリア内の在/不在情報を制御に使用している。

## 3.3 各センサの性能評価

### 3.3.1 パーティクルセンサの精度検証

パーティクルセンサとCR用大型パーティクルカウンター(LASAIR 310-C; PMS、以降LASAIR)をCRに設置し、同じ環境の空気をサンプリングして粒子濃度を比較した。実験時の様子を写真-3



写真-3 実験状況

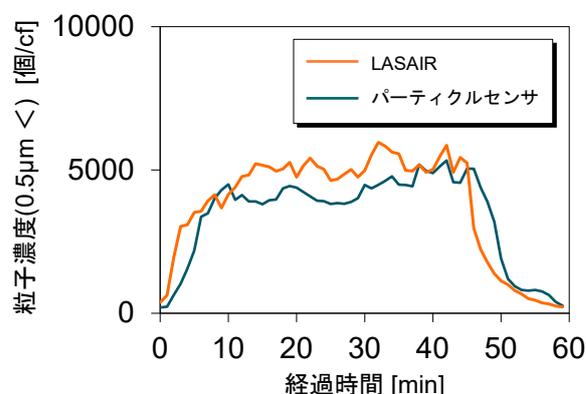


図-4 粒子濃度測定結果の比較

に、結果の一例を図-4に示す。パーティクルセンサの出力値はLASAIRによる測定結果に概ね一致し、適用を想定したCRでの使用に際し問題のないレベルであることが確認できた。LASAIRの粒子濃度の増減に対して、パーティクルセンサでは数分の遅れが生じているが、これはパーティクルセンサが5分間の移動平均値を粒子濃度として出力することによるものである。しかし、通常のCRでは突発的で急激な粒子濃度の増減の発生はまれであることから、FFU制御において問題のないレベルであると判断した。

### 3.3.2 画像型人感センサの検証

#### (1) 検証方法

画像センサをオフィスの天井に比べて高いFL+4.5mに設置し、無塵衣を着用した行動者の動きに対する検知性能の評価実験を実施した。実験に使用した空間のイメージを図-5 (a)に、無塵衣を着用した行動者と画像センサを図-5 (b)に示す。検知対象領域は  $14.4\times 14.4\text{m}$  の正方形のエリアとし、うち  $1/4$  に当たる  $7.2\times 7.2\text{m}$  のエリア内で検証を行った。動作位置はセンサから水平距離で1m

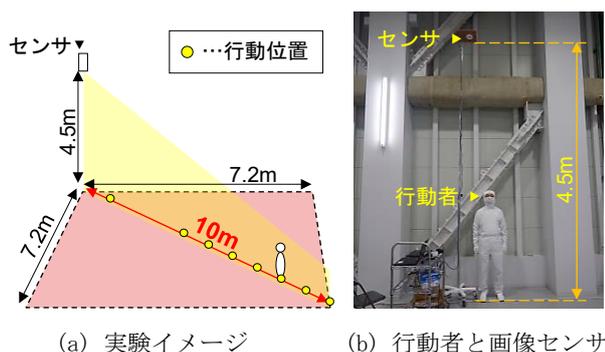


図-5 画像センサ実験の状況

表-1 検知対象とした基準動作

歩行：左右方向 2 m を往復	その場で足踏み
ふり返り	両手を左右に開閉
両手を上下させる	静止立位で首を前後に動かす

の位置と、1 m 間隔で 4~10 m の位置とした。  
 検知対象とした基準動作 6 種を表-1 に示す。これらの動作は、動きの大小が異なるものとして選定した。センサに対し正面または背面を向いて一定時間これらの動作を実施し、それぞれに対する検知の有無を記録した。行動者は位置について立位で静止し、画像センサが行動者を不在と判定したことを確認した後に基準動作を開始した。

無塵衣は一般的な白色に加え、青、緑、ピンク、グレーのもので試験を行った。行動者の背景となる床材は、白に近いグレー色の塗床である。

### (2) 検証結果

本画像センサは感度に関わるパラメータを複数有し、その調整が可能である。まず各パラメータを、オフィスへの適用を想定したデフォルト値として検証した。結果の一例として、白色の無塵衣を着てセンサに対して正面を向き、所定の動作を行ったケースの結果を表-2 に示す。センサから 1m の位置ではすべての動作を検知できたが、センサから離れるにつれ検知できない動作の種類が増え、センサから 8m 離れた位置ではすべての動作を検知できない結果となった。これは、感度パラメータのデフォルト値が、天井高 3m 設置、検知対象領域 9 × 9m、スーツ着用といった一般的なオフィス環境を想定して設定されているのに対し、実験では CR を想定したため、設置高さが高く対象領域も広いことに加え、無塵衣と床の色とのコントラストが小さいことで検知しにくくなったためである。

これを改善するため、パラメータのうちいくつかを調整して検出感度を高め、改めて同様の検証を行った結果が表-3 である。最大 10m 先におい

表-2 画像センサ検証実験結果(デフォルト設定)

センサからの水平距離 [m]	1	...	4	5	6	7	8	9	10
歩行：左右2mを往復	○	...	○	○	○	○	×	×	×
その場で足踏み	○	...	○	×	×	×	×	×	×
ふり返り	○	...	○	△	×	×	×	×	×
両手を左右に開閉	○	...	○	×	×	×	×	×	×
両手を上下させる	○	...	×	×	×	×	×	×	×
首を前後に動かす	○	...	×	×	×	×	×	×	×

表-3 画像センサ検証実験結果(感度調整後)

センサからの水平距離 [m]	1	...	4	5	6	7	8	9	10
歩行：左右2mを往復	-	...	○	○	○	○	○	○	○
その場で足踏み	-	...	○	○	○	○	○	○	○
ふり返り	-	...	○	○	○	○	○	○	○
両手を左右に開閉	-	...	○	○	○	○	○	○	○
両手を上下させる	-	...	○	○	○	○	○	○	○
首を前後に動かす	-	...	○	○	○	○	○	○	○

いずれも白色無塵衣を着用してセンサに対し正面を向いて行動  
 ○…検知可能、△…検知できるときとできないときがある  
 ×…未検知、-…立位・静止状態ですでに検知

ても、いずれの動作も検知できている。  
 センサに対して背面を向いた場合には、後頭部を含めた全身が無塵衣に覆われることで床と行動者が同化しやすくなり、検知できないケースがわずかに増える傾向にあった(不図示)。

このほか、行動者や実験環境のパラメータとして照度、無塵衣の色を変更して実験した。照度に関しては低いほど検知できないケースが増えるが、100~1000lx で大きな影響は認められなかった。無塵衣の色については青、白、緑、グレーの順に検知できるケースが多かった。ただし各色間で大きな違いはなく、感度パラメータの調整によりいずれの色に対してもおおよその動きを 10m 離れた位置で検知できることを確認した(不図示)。

### 3.4 FFU のファン回転数と気流到達距離の関係

本制御システムでは、FFU の回転数を絞って省エネを図るが、回転数を絞りすぎると吹出風速が低下し、FFU からの清浄空気が室下部の作業域へ供給されなくなることが懸念される。そこで、FFU によって形成される気流の特性を把握するため、FFU の吹出口直下にスモークを導入し、レーザーを照射して気流を可視化するとともに、高速度カメラで撮影を行い、PIV (Particle image velocimetry) 解析を行った。

対象とした FFU を図-6 に、実験のセットアップを図-7 に示す。実験の際には対象 FFU を除いてすべての空調機器を停止させた。対象 FFU は上面から吸い込んだ室内空気を清浄化して底面のパンチング状のフェイスより吹き降ろすものである。フェイスには側面にスリット上の開口があり、斜

め下方向にも清浄気流を吹出す。

気流の可視化については、煙発生器(PS-2006;ダイニチ)から発生させたスモークをφ50のアルミフレキダクトでFFU吹出フェイス直下まで導いた。ダクトの先端にはφ25の円管で製作したスモーク散布用ノズルを接続し、これをフェイス直下50mmに設置した。ノズルには50mmほどの間

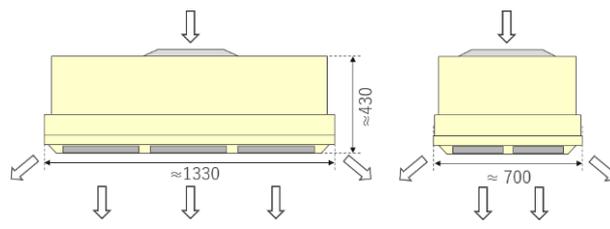


図-6 可視化実験に使用したFFUの立面図

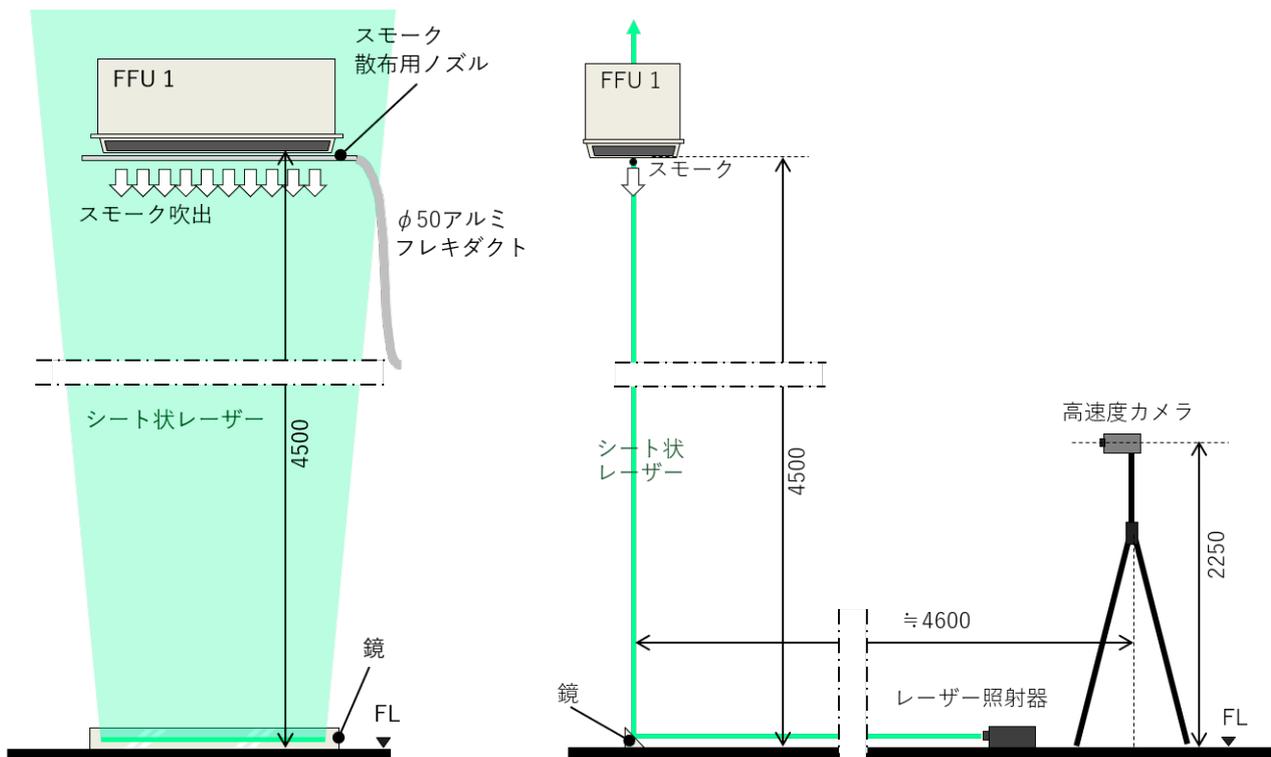


図-7 PIVセットアップ(断面図)

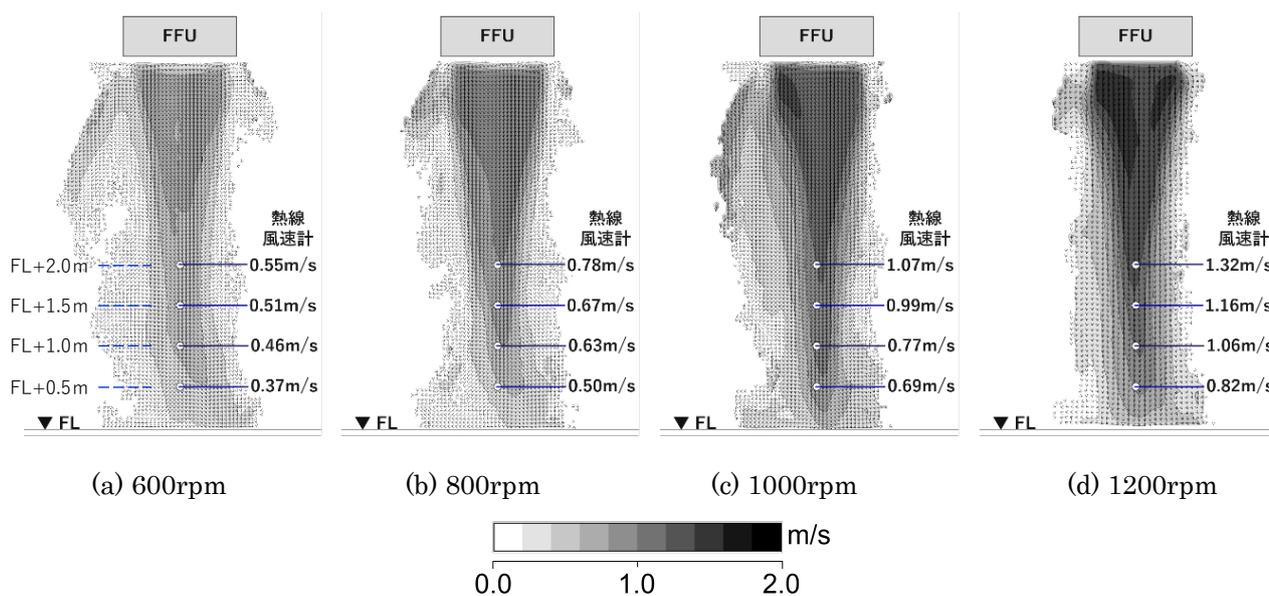


図-8 FFUによる気流性状(PIV解析)

隔でφ7の孔が複数空けられており、孔からスモークが線状に流出するようになっている。FFUの回転数を500~1300rpmまで100rpm刻みで変更し実験を行った。加えて、PIV解析結果の妥当性を確認する目的で、熱線風速計(Testo 440 + マルチプローブ; Testo)を用いて風速の定点測定を行った。測定点は、可視化断面におけるFFUのフェイス中心線上、高さをFL+0.5~2.0mまで0.5m間隔とした。

PIV解析による結果の一例として、ファン回転数600、800、1000、1200rpmにおける気流分布を図-8(a)~(d)に示す。熱線風速計による60秒間の平均風速の測定結果も各図にあわせて示した。いずれの回転数でもスモークが床面近傍(作業域)まで届き、速度ベクトルが検出されており、600rpm程度でも気流が届いている様子が認められる。今回の設置高さ(FL+4.5m)では、作業エリアへ十分な到達速度(0.5m/s <)で清浄空気を供給するためには、800rpm以上の回転数が望ましいと考えられる。またPIV解析から得られた気流場を熱線風速計の結果と比べると、おおむね同程度の値が得られたことから妥当な結果と考えられる。なお、いずれの結果も気流が床面付近で紙面右側に曲がっているが、これはFFUの左側に壁があるため、その存在が影響していると思われる。

### 3.5 クリーンEYEによる制御ロジックの概要

クリーンEYEでは収集した情報を基に、CR内の状況に合わせて図-9に示す4つのモードでFFUを制御する。各モードは以下の通りである。

- ①基本モード：パーティクルセンサの値を基にFFUの回転数をPID制御
- ②人感モード：作業者のエリア進入を画像センサにより検知し、その後の作業発塵に備え風量を増加
- ③間引きモード：発塵負荷の少ない状況下においてさらなる省エネのため運転台数を削減
- ④最大モード：最大回転数でFFUを運転させ、高発塵負荷に対処

送風量は、最大≧人感≧基本>間引きの関係となる。基本モードをベースとし、画像センサで作業者を検知した際には発塵に備えて人感モードへと移行する。また作業者を検知していても濃度が低い場合は、基本モードへ再度移行し、なおも濃度が低い場合にはより省エネとなる間引きモードへと移行していく。

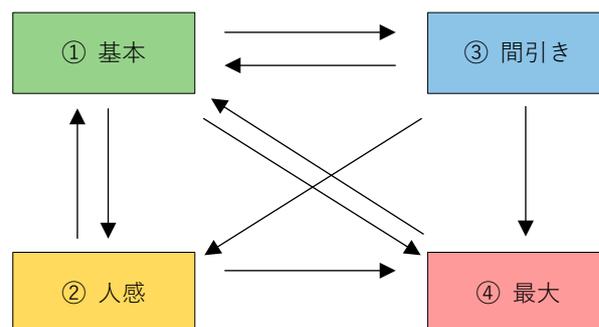


図-9 4つの制御モードと各モード間の移行動作

表-4 動作検証における制御パラメータ

粒子濃度条件 [個/cf]		タイマー条件 [sec]						回転数条件 [rpm]			
目標	監視	基本モードへの移行			人感 モード への移行	間引 モード への移行	最大 モード への移行	基本モード		最大 モード	人感 モード
濃度	濃度	人感 →基本	間引 →基本	最大 →基本				最高	最低		
1000	5000	300	15	300	15	300	10	1050	800	1050	1050

表-4に各モード制御に使用する主なパラメータと後述の検証における設定値を示した。目標濃度は基本モードにおいて制御の目標とする粒子濃度であり、平常時はこの値を超えないようFFUの回転数制御を行う。また各モード間の移行の際に、閾値の役割も果たす。監視濃度は目標濃度より大きく、設計清浄度未満に設定される値で、これを超えた場合には高負荷発塵が生じたものとして、基本・人感・間引き、いずれのモードからも最大モードへ移行する。各制御モードについてFFU回転数が設定され、特にPID制御を行う基本モードには制御の範囲として最高、最低値を設けている。

また移行条件を満たしても瞬時に移行しないよう、タイマーを設けている。タイマーの設定は、送風量を増加させるモード移行の場合は瞬時に対応できるように短めに、送風量を低下させるモード以降の場合は慎重に判断するため長めに、値を設定することを基本的な考え方としている。

## 4. FFU制御システムの適用事例の紹介

アンビエントクリーン空調システムおよびクリーンEYEを、半導体装置の製造組立ラインを有するISO Class7のCRに適用した。製造組立ラインは、作業員の手作業により装置を順次組み上げていくため、主な発塵源は作業員による作業行動である。すなわち、作業員の在/不在や作業行動により発塵量に変化する。したがって、クリーンEYEの導入により、清浄度を適切に保ちながら、FFUによる消費エネルギーの大幅な削減が期待できる。採用した各センサは図-10のように配置した。

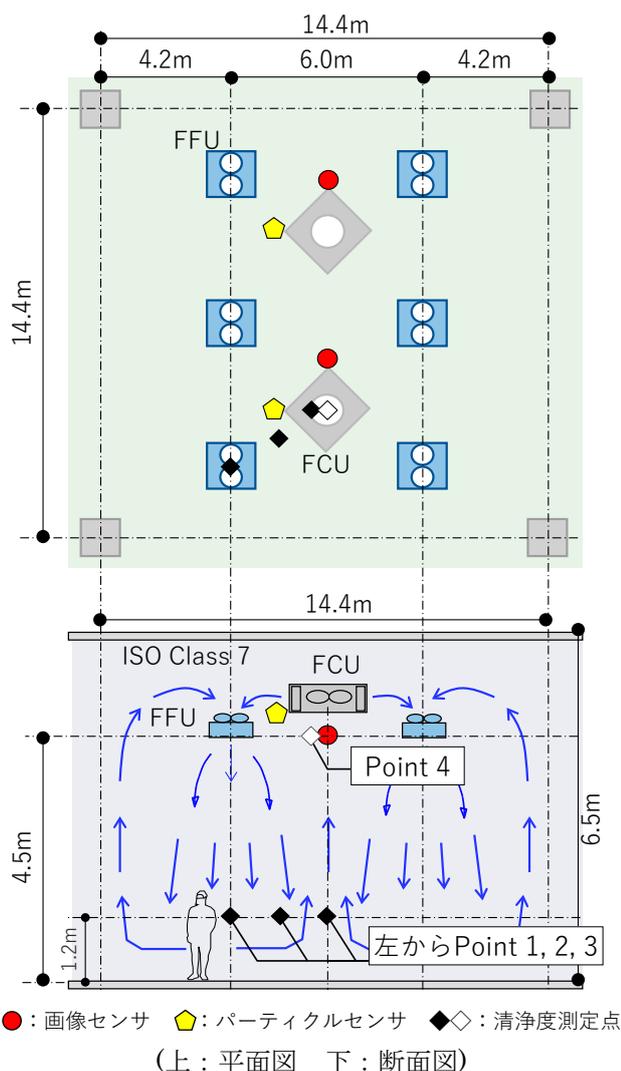


図-10 適用事例のセンサ配置

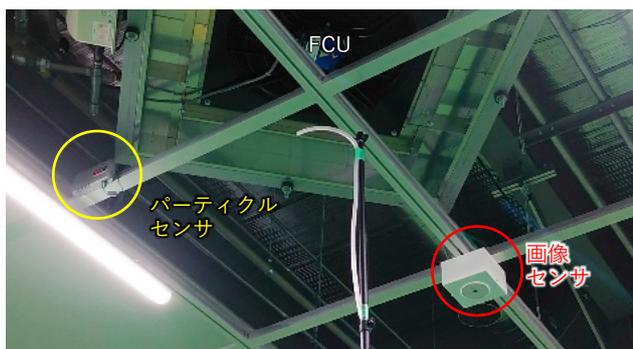


写真-4 センサ設置状況

実際の設置状況を写真-4に示す。適用したCRは1スパン14.4×14.4mで、FFU運転の制御単位をこの1スパンとした。センサ情報をPLCに通信し1スパン内に設置された6台のFFUを制御する構成である。画像センサは1スパンに2台設置し、1台当たりの最長検知距離を約9mとした。またパーティクルセンサも1スパンに2台とし、CRの

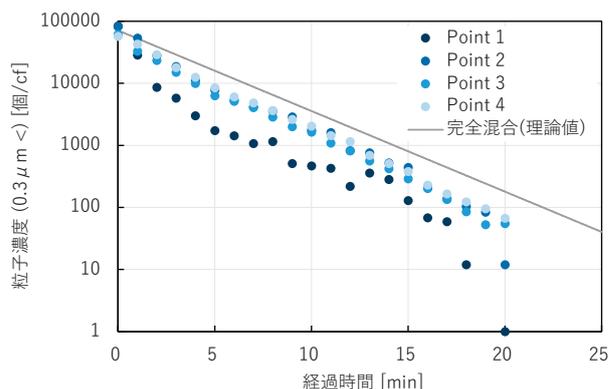


図-11 アンビエントクリーン空調システムの運転にともなう粒子濃度の推移

清浄度の変化を代表的に検知できる位置としてFFUとFFU間のアップフロー域であるFCUの吸込み部分近傍に設置した。

#### 4.1 対象CRにおけるアンビエントクリーン空調システムの性能検証

CRのクリーン出し時にアンビエントクリーン空調システムの回復特性を検証した。粒子濃度が約50,000~70,000個/cf(0.3 $\mu$ m<)の状態からCR内のFFUを全台稼働させ、粒子濃度の推移を計測した。測定点は図-10中◆(Point 1~3; FL+1.2m)、◇(Point 4; FCU吸込)の位置とした。測定にはパーティクルカウンター(ZN-PD03-S;オムロンおよび既出のLASAIR、各2台、計4台)を用いた。

結果を図-11に示す。測定点における局所換気回数は、20.0~24.7回/h(平均21.9回/h)であり、完全混合を仮定した場合の名目換気回数18.0回/hに対して112~138%の換気効率が確認された。また、FFU直下のPoint 1からFCU吸込のPoint 4にかけて徐々に換気回数が低下する結果となり、作業域において意図したピストンフローに近い循環流が形成されていることを確認できた。

#### 4.2 対象CRにおけるFFU制御システムの動作検証 4.2.1 検証方法

対象CRのうち、図-10に示す1スパンで、FFU制御システムの動作検証を行った。それぞれのモード間の移行動作を検証するため、間引きモードでの運転中に疑似的に発塵を与える検証④と、間引きモードでの運転中に作業者をエリア内に入入・滞在させる検証⑤を実施した。

各モード制御に使用する主なパラメータは表-4の通りである。設計清浄度10,000個/cf(0.5 $\mu$ m<)のCRに対し、目標濃度を1,000個/cf、監視濃度

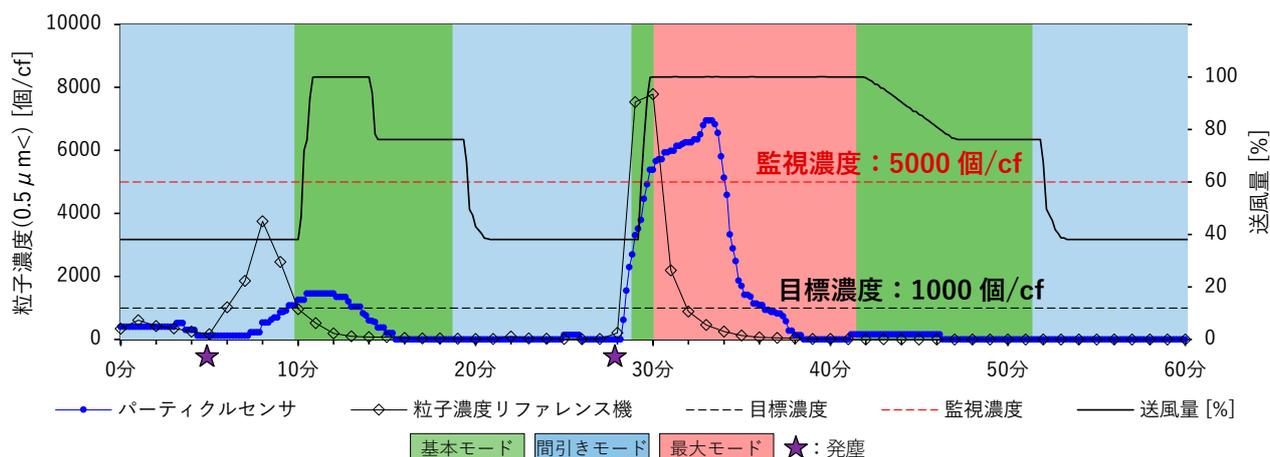


図-12 検証①：モード間の移行と粒子濃度・送風量の変化

を 5,000 個/cf<sup>注1)</sup>とした。回転数の設定については、最大、人感モードの回転数を定格の 1050rpm、基本モードの最高回転数を 1050rpm、最低回転数を 800rpm とした。特に基本モードの最低回転数 800rpm は、事前の PIV 解析の結果に基づいて決定した。

#### (1) 検証①：パーティクルセンサによる制御動作検証

対象スパンおよびその周囲のスパンの FFU が間引きモードで運転している状況において、スパン平面上の中心(FL+0.3m)でエアロゾルジェネレーター(PPA-2101; Prox)により疑似的な発塵負荷を与えた。発塵は検証中に 2 度行い、1 度目の発塵に比べ 2 度目の発塵ではより大きな負荷となるよう発塵時間を長く取った。なお、使用したジェネレーターでは、実際の CR で想定される作業者からの発塵<sup>4)</sup>に比べて瞬間的に多量の粒子を排出するため、発塵の時間は数秒～10 秒程度とした。また検証①では測定機器や発塵操作を行う実験者に反応して人感モードに移行することがないように、対象スパンの画像センサを無効とした。また、実際のセンサ位置での濃度変化を捉えるべく、既出の LASAIR (ここでは以降、リファレンス機)による同時測定も図-10 における◇(Point 4)の位置で実施した。

#### (2) 検証②：画像センサによる制御動作の検証

対象スパンの FFU が間引きモードで動いている状況で、画像センサの検知エリアに作業者を進入させた。作業者は検証②開始 5 分後に検知エリアに侵入し、その後 20 分間の滞在ののち、開始から 25 分後に退去するものとした。検証②では画像センサによる検知情報を基にした制御動作の確認を目的としているため、エアロゾルジェネレーターによる発塵負荷は与えないこととした。

#### 4.2.2 検証結果

##### (1) 検証①：パーティクルセンサによる制御動作検証

検証①の結果を図-12 に示す。横軸を経過時間、第 1 縦軸を粒子濃度、第 2 縦軸を FFU の送風量(6 台が定格で動いた際の送風量を 100%とした場合の相対値)とした。また発塵負荷を与えたタイミングを図中に★で示した。

1 度目(開始 5 分)の発塵でリファレンス機の値は即座に上昇した。パーティクルセンサの値はそれから 2 分程度の遅れののち上昇し、発塵から約 4 分で目標濃度(1,000 個/cf)を超えて間引きモードから基本モードに移行し、送風量が増加した。リファレンス機の値は発塵を止めたことですぐに低下したが、パーティクルセンサでは 5 分間の移動平均値で粒子濃度を出力するため、発塵から 8 分程度で濃度が落ち始め、目標濃度 1,000 個/cf を下回った。これに伴って FFU の送風量も低下し、基本モードにおける最低送風量となった(送風量 76%)。さらに 5 分間、この運転状態が続いたことで移行条件を満たし、送風量 38%の間引きモードとなった。

次に、2 度目の発塵を検証開始から約 28 分後に行った。こちらは先述の通り、1 度目よりも大きな発塵負荷を意図して発塵の時間を長くとった。この発塵により粒子濃度は 1 度目よりも大幅に上昇し、リファレンス機の値は瞬間的に 8,000 個/cf 程度となった。パーティクルセンサは 1 度目と同じく基準パーティクルカウンターよりも少し遅れて濃度が上昇し、監視濃度(5,000 個/cf)を超えて 7,500 個/cf 程度となった。これを受けて制御モードは間引き→基本→最大モードと順に移行し、送風量は 100%となった。その後は粒子濃度が低下し、監視濃度、目標濃度を共に下回り、一定時間経過後

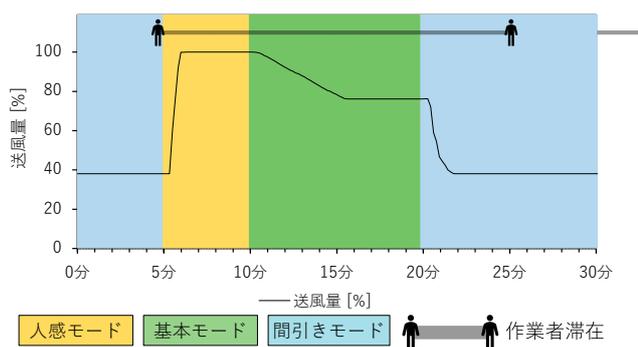


図-13 検証⑧：モード間の移行動作と送風量の変化

に最大→基本モード<sup>注2)</sup>へと移行し、最終的には間引きモードとなって送風量は38%まで低下した。

以上、2度の発塵において、パーティクルセンサはリファレンス機と比べて大きな遅延なく反応し、適切にモードの移行がなされた。

## (2) 検証⑧：画像センサによる制御動作の検証

検証⑧の結果を図-13に示す。第1縦軸に送風量を取り、作業員が滞在していた時間を人型のプロットで示した。

検証開始時には間引きモードによる運転であったが、開始5分後に作業員がエリアに進入、これを画像センサが検知し、人感モードへと移行して送風量は100%まで増加した。作業員はそのままエリアに滞在したが、粒子濃度が目標濃度よりも十分に低いために人感モード移行から5分後に基本モードとなり、徐々に送風量が低下し始めた(開始10分後)<sup>注2)</sup>。5分間の送風量漸減ののち基本モードの最低送風量(送風量76%)となり、なおも粒子濃度が低いことから、さらに省エネとなる間引きモードへと移行した。このように、作業員が検知エリア内に存在していても、同じスパンの粒子濃度が十分に低い場合には、より省エネとなるよう、人感モードから基本モードや間引きモードへ移行するロジックが導入されている。今回の動作検証から各センサによる情報を基に適切に制御モードの移行がなされることを確認した。

## 5. おわりに

今回紹介した省エネ・省資源型クリーン空調「タスク&アンビエントクリーン空調」は、一様な層流を形成してきた従来のCRとは異なり、空間的、時間的なCRの多様性に対応したシステムであることが大きな特徴で、安全なクリーン環境の実現と、省エネルギーの両立を達成しており、液晶工場や

半導体装置組立CR等に多くの採用実績がある。

またCRの内部環境実態に合わせてFFUの風量・運転台数を制御する「クリーンEYE」を組み合わせることで、更なる省エネルギーを図ることが可能となる。具体的には、クリーンEYEを適用することで、すでに大幅な省エネを達成していた従来のアンビエントクリーン空調システムから、さらに最大70%の省エネを達成できることを、実運用より確認している。今後は、実運用を通じてデータの収集とシステムのさらなる性能向上を試みる予定である。

### <注>

注1) 実運用における目標・監視濃度はより安全な制御のため、本論文における設定値よりも低い値を設定している。また、その他いくつかのパラメータも実運用における設定値とは異なる。

注2) 本システムでは、4つのモード間のうち、人感または最大モードから基本モードに送風量を落とす際に、瞬時に落とすのではなく時間をかけて徐々に低下させる制御を搭載している。

### <参考文献>

- 1) 白谷毅ほか：省エネ・省資源型クリーン空調システムの開発，空衛学会誌，Vol. 85, No.7, pp.497-502, 2011
- 2) 近藤恒佑ほか：クリーン空調制御システム「クリーンEYE (アイ)」，建築設備と配管工事，Vol.58, No.5, pp.24-32, 2020
- 3) 長谷部弥ほか：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, pp.190-195, 2014
- 4) 鈴木良延ほか：クリーンルーム用衣服着衣者からの発塵量および発塵機構，日本建築学会計画系論文報告集，Vol.386, pp.43-53, 1985