クリーンルーム環境を定量化する環境センサと環境監視システム

中村　貴之（なかむら　たかゆき）　平本　伸一（ひらもと　しんいち）　小泉　和裕（こいずみ　かずひろ）

1　まえがき

半導体製造分野における微細化・高集積化，液晶分野における高精細化・大型化，医薬品製造分野のGMP（Good Manufacturing Practices），食品製造分野のHACCP（Hazard Analysis Critical Control Point）などに従った品質管理の浸透に伴い，クリーンルームの製造環境管理ニーズが拡大している。なかでも清浄度管理は製品の品質向上，歩留り向上においてきわめて重要な管理項目である。しかし，従来は清浄度をオンラインで常時監視していないために微粒子（パーティクル）が発生した場合，どこで発生したかを特定するのが困難であった。また，測定器においても**表1**に示すような課題があった。

このたび，清浄度，温度，湿度，差圧（オプション）をリアルタイムに監視でき，従来測定器の課題を解決する「クリーンルーム環境センサ」「クリーンルーム環境監視システム」を新規に開発・製品化したので紹介する。

表1　クリーンルーム環境管理の課題と対策

	従来測定器の課題	「クリーンルーム環境監視システム」による対策
測定対象	パーティクルのみ	多機能（パーティクル，温度，湿度，差圧）
価格	高価	安価
測定方法	人が測定器を移動し測定	センサを設置し無人で計測
機器形状	測定器	センサ
測定頻度	バッチ処理測定	連続計測（最小1分単位のリアルタイム計測）
使用方法	スタンドアロンが中心	ネットワーク化しパソコンで一元管理
データの記録	手書き，レシートプリンタ	パソコンに自動記録
データの表示	テキスト，数字	トレンドグラフ
データの保存	紙	電子データ（CSVファイル形式）
データの評価	瞬時値による評価	傾向による評価
データの加工	不可	パソコン，表計算ソフトウェアによって加工可能

2　クリーンルーム環境センサ

2.1　特　長

富士電機は，水処理分野向けに液中パーティクルカウンタ（高感度濁度計，ハイブリッド微粒子カウンタ）を製品化し，水質監視で多くの納入実績を持っている。今回は液中用で得たパーティクル検出技術およびノウハウを気中パーティクルセンサに応用し，クリーンルーム環境計測に必要な，温度，湿度，差圧のセンサと複合化しクリーンルーム環境センサ（以下，環境センサという）として完成させた。

以下に環境センサの特長と主要な開発要素であったパーティクルセンサ部について，測定原理と性能評価結果を紹介する。

環境センサは他の類似センサに対して次の特長を持っている。

(1)　多機能性

①パーティクル，②温度，③湿度，④差圧（オプション），⑤外部アナログ信号の五つを同時に計測できるため，クリーンルーム環境を効率よく測定・定量化できる。

(2)　高精度

パーティクルの計測に必要な光源に半導体レーザを採用した。このレーザビームの最適化によるパーティクルの全数計測と，流量センサによる吸引エア流量の制御によって，JIS B 9921（光散乱式自動粒子計数器）に準拠した精度で最小可測粒子0.3 μmの検出を実現している。

(3)　常時モニタリング

従来，パーティクルカウンタでは，エアの吸引機構としてポンプを使用していたが，寿命が短く（2,000～3,000時間）メンテナンス性に問題があり，常時モニタリングには適していなかった。そこで，寿命の長い（約10万時間）ファンモータを採用し，常時モニタリングを実現した。

(4)　自己診断機能

自己診断機能を搭載しており，ファン異常，レーザ出力低下，回路異常などの異常をリアルタイムで発見し早期にメンテナンスが可能である。

中村　貴之

クリーンルーム用機器の開発およびエンジニアリング業務に従事。現在，富士電機システムズ株式会社産業・交通システム本部クリーンシステム統括部技術第一部課長補佐。

平本　伸一

情報通信機器およびシステムの開発，設計業務に従事。現在，富士電機システムズ株式会社機器本部東京工場ファインテック機器部主任。

小泉　和裕

光応用センサの研究開発に従事。現在，富士電機アドバンストテクノロジー株式会社機器技術研究所。電気学会会員。

環境センサの外観を**図 1** に，仕様を**表 2** に示す。

2. 2　測定原理

図 2 にパーティクルセンサの原理構成を示す。半導体レーザから射出されるレーザビームは，レンズによってノズル位置に集光される。レーザビームの光パワー密度およびビームの形状は，パーティクルセンサの粒子検出性能を決定する重要な要素である。そこで，光学系の設計には光学シミュレータを使用して，①ノズルから吐出される吸引エア全量にビームを照射できること，②最小可測粒子 0.3 μm を検出できる光パワー密度を得ること，を実現できるレーザビームを設計した。その結果，**図 2** に示すようにレーザビームを偏平形状にすることで目標仕様を達成した。

吸引エアにパーティクルが含まれている場合には，パーティクルにより散乱光が発生する。この散乱は Mie 散乱〈注 1〉と呼ばれ，レーザ波長と粒径が同程度のときに発生する。

この散乱光を凹面ミラーによってホトダイオードに集光させ，ホトダイオードで散乱光を電気信号に変換する。1 個の粒子がレーザビームを通過するたびに 1 個のパルス状の電気信号が観測される。散乱光パルスの波高値は粒径と一定の関係があることから，計数と同時に粒径判定を行うことができる。

〈注 1〉Mie 散乱：光の波長と同程度以上の大きさの粒子による光の散乱現象

2. 3　評価結果

(1)　パーティクル検出信号

パーティクルセンサの評価・校正には，粒径のそろっている PSL（ポリスチレンラテックス）粒子が一般的に使用されている。**図 3** に，PSL 0.3 μm 粒子を検出したときの散乱光パルス波形を示す。**図 4** に，パルス波高の度数分布グラフを示す。**図 4** から，0.3 μm 粒子の波高分布がノイズの分布から完全に分離できていることが分かる。

パルスの波高値はパーティクルの粒径に対応しているので各粒径に応じたしきい値を設けることで，粒径区分ごとにパーティクルの個数を計数することが可能となる。**図 4** から，粒径 0.3 μm の検出しきい値はパルス波高分布の 50％計数位置（**図 4** の P 点）に設定する（JIS B 9921 準拠）。

図 1　環境センサの外観

表 2　環境センサの仕様

項　目		仕　様
パーティクルカウンタ	方　式	光散乱検出方式（JIS B 9921準拠）
	粒径区分	0.3/1.0 μmまたは0.5/1.0 μm
	最大可測濃度	70,000個/L
	サンプリング流量	0.283L/min（0.01CF/min）
温度センサ	測定範囲	0～40℃
湿度センサ	測定範囲	35～80％RH
差圧センサ（オプション）	測定範囲	0～50 Pa
アナログ入力	入力範囲	DC4～20 mA
通　信	電気仕様	RS-485準拠
	通信速度	9,600ビット/秒
電　源		AC100 V 50/60 Hz
外形寸法		W236×H169×D60（mm）
取付け寸法		DINレール取付け，引掛式取付け

図 2　パーティクルセンサの原理構成

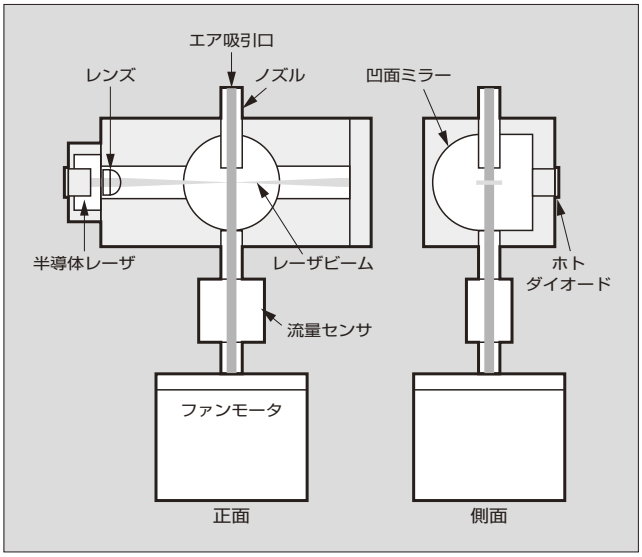
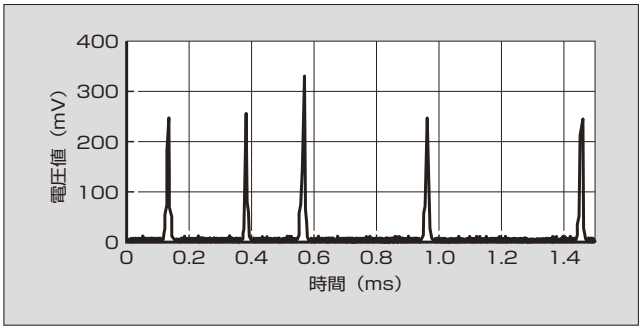


図 3　散乱光パルス波形（粒径 0.3 μm）



(2)　粒子計数効率

パーティクルセンサの粒子計数精度（計数効率）は，**図5**に示す構成で実施し，基準パーティクルセンサとの計数比較によって評価する。基準センサには，財団法人日本品質保証機構（JQA）で校正したパーティクルセンサを原器として，測定のトレーサビリティを確保している。

表3に，計数効率の評価結果を示す。最小可測粒子（0.3 μm）の計数効率は56～62％，最小可測粒子径の1.5～2倍粒子（0.5 μm）の計数効率は95～102％であり，JISの仕様値を満たしている。

(3)　偽計数

パーティクルセンサの重要な評価項目として偽計数がある。偽計数とは粒子以外の電気ノイズ，光ノイズなどによって発生する誤計数のことである。評価時はパーティクルセンサの吸引口にエアフィルタを設置して評価する。

表3に示す評価結果のとおり，評価時間60分で偽計数は1～3個であり，JISの仕様値を満たしている。

図4　パルス波高分布（粒径0.3 μm）

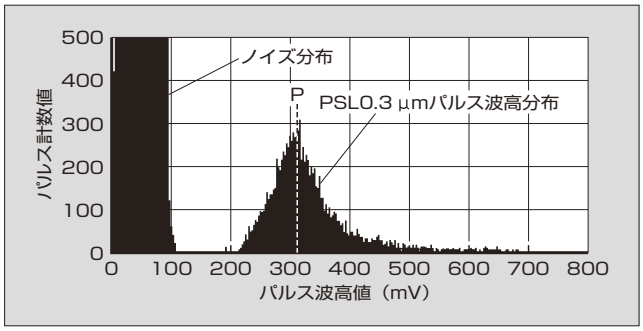


図5　計数効率の評価構成

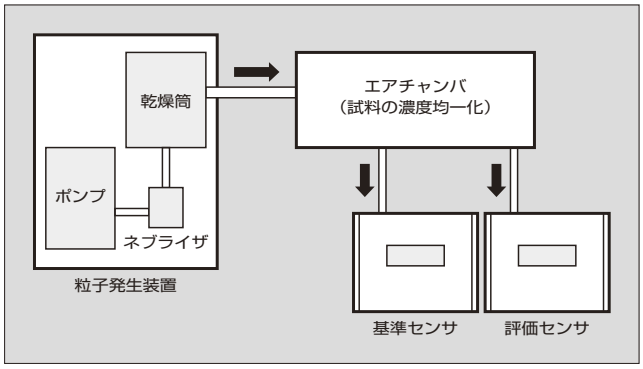


表3　計数効率と偽計数の評価結果

項　目	仕様（JIS B 9921）	評価結果
計数効率	最小可測粒子（0.3 μm）で30～70％	56～62％
	最小可測粒子の1.5～2倍の粒子（0.5 μm）で90～110％	95～102％
偽 計 数	5分間に1個以下	60分間で1～3個（5分間で約0.2個）

3　クリーンルーム環境監視システム

3.1　概　要

クリーンルーム環境監視システム（以下，環境監視システムという）は，上位側では「Webサーバ」「自動メール発信」「Ethernet〈注2〉」など汎用IT（Information Technology），下位側では富士電機の得意とする「センサ」「フィールドネットワーク」など専用技術を採用している。監視用パソコン，小型Webサーバ〔以下，F-Site（エフサイト）という〕，環境センサで構成され，クリーンルーム環境データの「監視」「保存」「管理」が容易に実現できるシステムである。そのシステム構成を**図6**に示す。

3.2　特　長

(1)　F-Siteの採用

F-Siteは富士電機のIMM（Intelligent Micro Module）技術でコンパクト化されたハードウェアに，以下の多彩なIT機能を搭載した小型Webサーバである。

①　Webサーバ機能
②　ダウンロード機能
③　データ自動保存機能
④　データ連携機能
⑤　計測データのメール発信機能
⑥　アラームのメール発信機能

環境監視システムは，これらF-Siteの機能を活用したアプリケーションソフトウェアを搭載している。F-Siteは環境センサの計測データをネットワークで収集し，Webデータに変換できるので監視パソコンはブラウザのみで監視できる。F-Siteの外観を**図7**に，仕様を**表4**に示す。

(2)　ユーザーによるシステム構築と運用

環境監視システムはセンサ1台から導入でき，必要に応じてセンサを増設し，システムを拡張できる。センサの

〈注2〉Ethernet：米国Xerox Corp.の登録商標

図6　システム構成

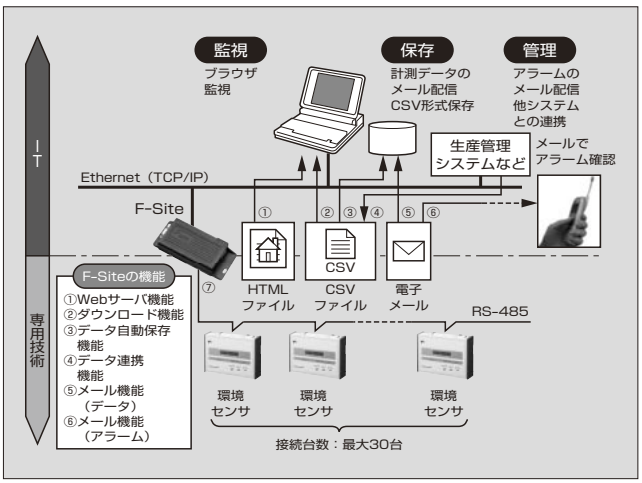


図7　F-Site の外観と IMM 基板

表4　F-Siteの仕様

項　目		仕　様
CPU		RISC型CPU（富士電機IMM-Cモジュール）
インタフェース	上位側（パソコンなど）	Ethernet 10BASE-T（RJ-45）
		TCP/IP，UDP/IP，FTP（クライアント），HTTP，SMTP，ICMP，ARP/RARP，DHCP（クライアント）
	下位側（環境センサ）	RS-485（RJ-45：汎用LANケーブル使用）
		環境センサ専用プロトコル
電　源		AC100V，50/60Hz，5W（ACアダプタ）
外形寸法		W68×D150×H24（mm）

図8　データ監視画面

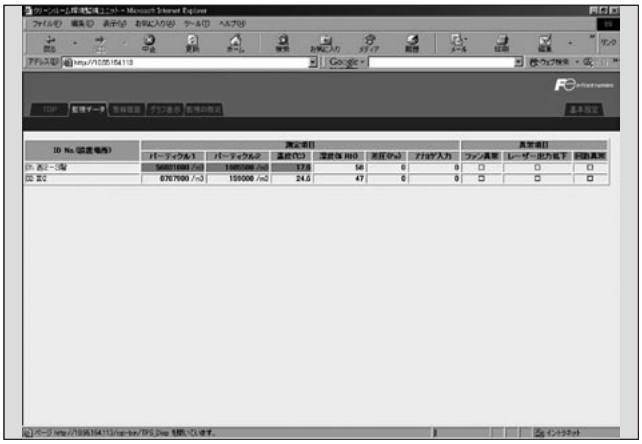
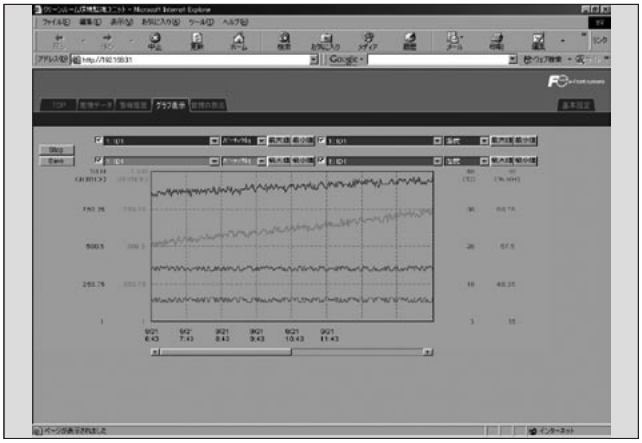


図9　トレンド監視画面



増設も ID 設定だけなのでユーザー自身で実施でき，メーカーエンジニアによるソフトウェアの改造が不要である。したがって，少ないコストで導入でき，運用コストも低く抑えることができる。

(3)　拡張性と多様性

環境監視システムは，汎用的な IT を応用し，運用上の利便性を高めている。LAN（Local Area Network）が Ethernet（TCP/IP）環境であるため，イントラネットに接続し情報共有が促進できる。また，インターネットに接続し外部からのデータ管理が容易で遠隔管理が可能である。

遠距離，ノイズ環境には「光 LAN」が有効で，ノイズがなく見通しのきく環境では「無線 LAN」も期待できる。また，ソフトウェアについては，計測データに CSV（Comma Separated Value）形式ファイルを採用しているため，ユーザー自身が加工できることはもちろん，他システムとデータ連携する場合にも汎用的なインタフェースとして有効である。

3.3　機　能

(1)　データ監視機能

標準仕様として，次の監視画面を搭載している。

①　データ監視画面

データ監視画面は，各センサの計測データ（パーティクル，温度，湿度，差圧，外部アナログ入力信号）現在値とセンサの自己診断データ（ファン異常，レーザ出力低下，回路異常）を Web ブラウザでリアルタイムに監視できる。また，計測データが設定値に対して異常になった場合や自己診断データが異常になった場合は，表示データ背景を色替えして通知する。データ監視画面を**図 8** に示す。

②　トレンド監視画面

トレンド監視画面は，計測データのすべてをトレンドで表示し，データの変化・傾向を一目で把握できる。また，トレンドデータは同時に 4 点のグラフを画面に表示でき，設置場所単位，計測データ単位にグラフを選択表示できるので関連データの比較が容易である。トレンド監視画面を**図 9** に示す。

③　アラーム履歴画面

アラーム履歴画面は，計測データの設定値に対する異常や故障発生を一覧表形式で表示する。アラームの各データは発生時間，異常データ箇所，異常データ，警報内容，発生・復旧区分を表示できるので異常事象の特定が容易になる。トレンドと一緒に使用すれば時間軸による異常傾向の把握が容易である。アラーム履歴画面を**図 10**に示す。

(2)　データ保存機能

図 10　アラーム履歴画面

計測データは次の二つの方法で保存できる。

①　所定フォルダへの自動保存

パソコンの所定フォルダに保存することができる。CSV 形式のファイルで保存されているので Excel〈注3〉など表計算ソフトウェアでユーザーが自由に加工できる。トレンドグラフ，帳票などとして参照することが容易にできる。

また，F-Site に標準付属するトレンドビュア（専用ソフトウェア）を利用すれば加工の手間がなくトレンドとして参照することもできる。

②　指定メールアドレスへの自動保存

計測した環境データの CSV 形式ファイルを添付した電子メールを指定したメールアドレスに配信できる。イントラネットなど電子メールが利用できる環境であれば通常業務用のパソコンでも管理でき，監視システムのために専用のパソコンを設置しない運用も可能である。

(3)　データ管理機能

①　異常アラームのメール配信

異常アラームは，F-Site のメール機能を利用して配信できる。携帯電話へのメールを活用し，モバイル環境で異常アラームを知ることができるので迅速に対処できる（**図 6** の⑥参照）。

②　他システムとのデータ連携

環境センサの計測したデータを既設の生産管理システムなど上位システムで一括して管理したい場合は，F-Site の「データ連携機能」を利用する。上位システムは F-Site で計測したデータを CSV 形式ファイルでインタフェースできる。（**図 6** の④参照）。

4　あとがき

クリーンルーム内の環境は非常に微細で目に見えない部分が多いため，その環境を把握するうえでセンサは欠かせない。今後とも，0.1 μm 粒径計測をはじめとした環境センサの性能アップ，風速，静電気，ケミカルガスなど微細な現象をリアルタイムで計測できるセンサのラインアップを拡充していく計画である。クリーンルーム環境の定量化を促進し，「オペレーショナル（通常運転時）状態でのクリーンルーム性能の確保」を実現していく所存である。

〈注 3〉Excel：米国 Microsoft Corp. の登録商標

e-Front runners

＊本誌に記載されている会社名および製品名は，それぞれの会社が所有する
商標または登録商標である場合があります。