　U.D.C. 621.3.049.774′14.002.56:〔628.511.1:535.361.2.08:621.375.826.038.823〕

レーザ ダスト モニタ

Laser Dust Monitor

微細プロセス技術の進歩発展は目覚ましく，ULSIは実用段階に入っている。これにはスーパークリーンルームを実現するクリーン化技術の向上が寄与している。このようなスーパークリーンルームおよび生産設備の清浄管理では，0.1 μm以下の超微粒子まで測定することが要求され，高性能の浮遊粒子計測器が必要となっている。

この要求にこたえるため，高性能ダストモニタモデル(1) TS-1450，(2) TS-3600，(3) TS-3700，(4) TS-5100および(5) TS-6500（新製品）などを開発した。検出性能を向上させるため，光源であるHe-Neレーザを新たに開発し，出力パワーの向上とともに高強度化を図った。また，散乱光の受光効率を上げ，さらにノイズを抑制する処理を行うなどによって目的とする性能を達成した。

須田　匡* *Kyô Suda*
蓬来泉雄** *Izuo Hourai*
山本穂積** *Hozumi Yamamoto*
中島　洋*** *Hiroshi Nakajima*

1 はじめに

ハーフミクロンサイズの素子製造技術および目標サイズの素子が的確に製造されているか否かを確認するプロセス分析評価技術は，超清浄空間の存在が前提となっている。超清浄空間が望みどおりに実現されているか否かの確認評価には，浮遊粒子計測器が必要となる。

レーザ ダスト モニタはその計測器として，「微細プロセス技術」の中で必要不可欠な装置として位置づけられる。

製造技術および分析評価技術と超清浄空間を実現させるクリーン化技術とは，素子の性能向上上や製品歩留り向上の点で不可分の関係で進歩発展してきた。浮遊粒子計測器もそれと密接に関連しながら技術の向上がなされてきた。

日立電子エンジニアリング株式会社では，レーザ ダスト モニタを他社に先駆けて製品化し，多くの顧客の要望にこたえてきた。

本稿では，クリーンルームと計数器に関するJISを略記し，次に製品ラインアップの現状とその性能について総括的に述べる。

2 超清浄空間評価技術の動向

サブミクロンからハーフミクロンへと半導体製造技術の進展の中で，生産歩留りの維持・向上のため，異物・微粒子に対する厳しい管理が必要とされている。クリーンルームなどの清浄環境，各種製造装置，材料，人など多方面でのきめ細かい清浄化管理が重要である。このため，高精度の清浄度測定評価が不可欠なことは言うまでもない。最近のクリーンルームは，直径0.1 μmの微粒子もほとんど存在しない（28 l当たり数個以下）高清浄の空間となっている。このような高清浄の環境清浄度を精度よく測定するためには，超微粒子を大量にサンプリングする必要がある。現在は，最小粒径0.1 μm，吸入量28 l/min（毎分1立方フィート）を測定する計測器が主流となっている。今後は大吸入量に加えて0.1 μm以下の超微粒子（0.07 μm，0.05 μm…）の測定が求められる。また，計測器に対する具体的要求は偽計数のないこと，計数値器差の小さいこと，粒径区分の正確性，高速応答性などの実用面での性能が求められている。

3 クリーンルームと計数器に関する規定

上記のような技術に対応するため，「クリーンルーム中の浮遊粒子の濃度測定方法および空気清浄度の評価方法」，および「空気中の粒子濃度を求める光散乱式自動粒子計測器」の2件のJISが平成元年11月に改正・公布された[1),2)]。その中からレーザ ダスト モニタの紹介に必要な部分を以下に略記する。

3.1 クリーンルームに関するJIS[1)]（JIS B 9920）

今回の改正は国内のクリーンルームの設計・運用に資するだけでなく，国際規格としても提案できる，とされている。

本JISでは，クリーンルーム清浄度のクラス分け，空気中浮

---

* 日立電子エンジニアリング株式会社 研究部 理学博士　** 日立電子エンジニアリング株式会社 特機部
*** 日立電子エンジニアリング株式会社 営業本部技術部

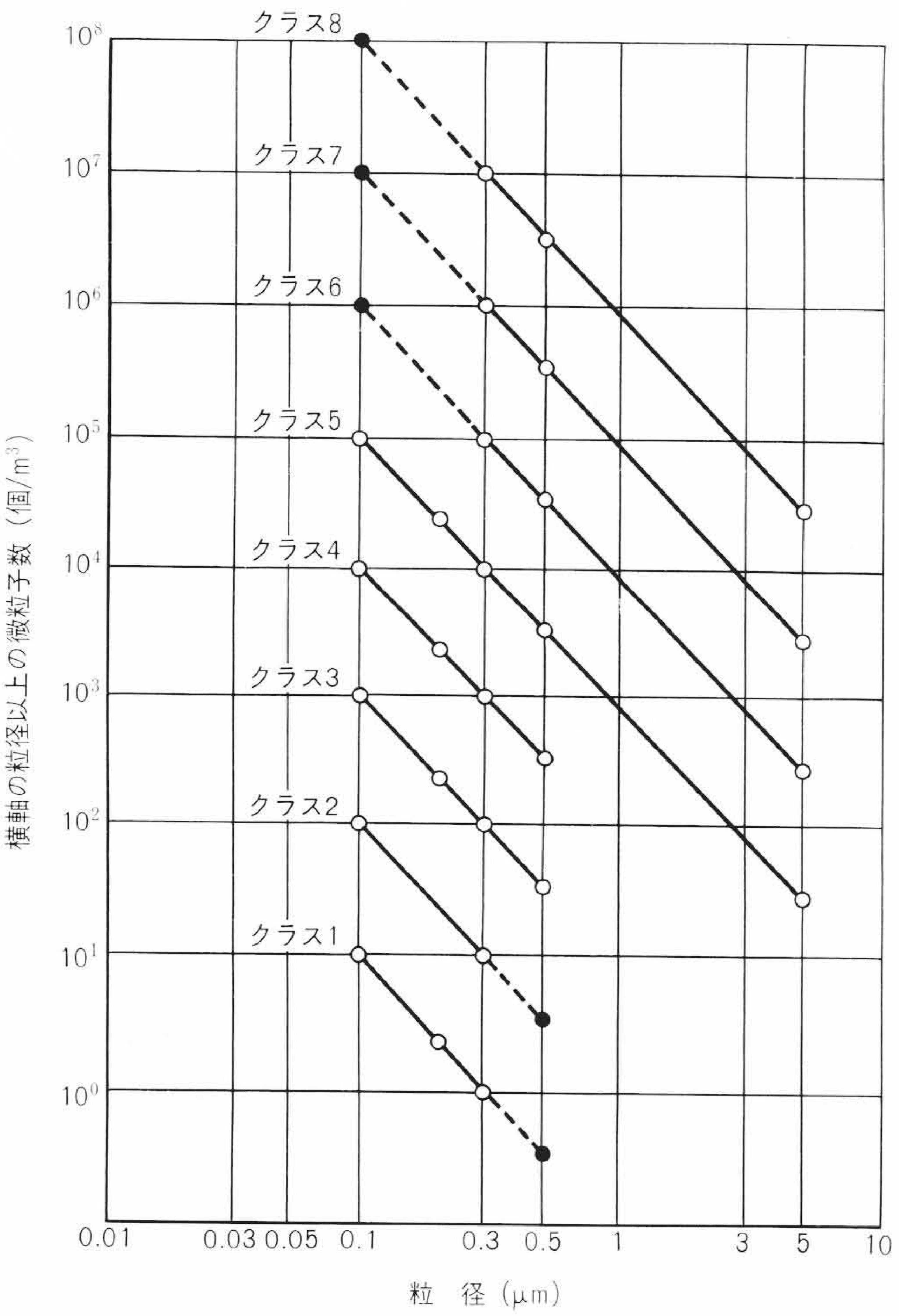
表1 清浄度クラスの上限濃度(個/m^3)[1] 平成元年11月に改正・公布されたJIS B 9920で規格化された清浄度クラスと代表的粒子サイズの上限濃度および関連事項について詳細に説明している。

粒径 (μm)	清浄度クラス							
	クラス1	クラス2	クラス3	クラス4	クラス5	クラス6	クラス7	クラス8
0.1	10^1	10^2	10^3	10^4	10^5	(10^6)	(10^7)	(10^8)
0.2	2	24	236	2,360	23,600	—	—	—
0.3	1	10	101	1,010	10,100	101,000	1,010,000	10,100,000
0.5	(0.35)	(3.5)	35	350	3,500	35,000	350,000	3,500,000
5.0	—	—	—	—	29	290	2,900	29,000
清浄度クラス粒径範囲	0.1～0.3		0.1～0.5		0.1～0.5	0.3～5.0		

注：(1) クラス3，クラス4，クラス5，クラス6，クラス7およびクラス8は，それぞれFederal Standard 209 D(Clean Room and Work Station Requirements Controlled Environments)のクラス1，クラス10，クラス100，クラス1,000，クラス10,000およびクラス100,000に相当するものである。
(2) 上限濃度は，対象粒径以上の粒子濃度を表している。
(3) 上限濃度は，粒径0.1および0.5 μmの値を基準としている。
(4) この表に示されていない清浄度クラス粒径範囲内の上限濃度は，次式で求める。

$$N_c = 10^N \times \left(\frac{0.1}{D}\right)^{2.08}$$

ここに，N_c：粒径以上の上限濃度(個/m^3)
N：清浄度クラス(—)
D：粒 径(μm)
(5) かっこ内の数字は，清浄度クラスを評価するための対象粒径以外の粒径に対する値で，参考値である。



注：●印は，清浄度クラスを評価するための対象粒径を示す。

図1 清浄度クラスの上限濃度(個/m^3)[1] 平成元年11月に改正・公布されたJIS B 9920に記載された，清浄度クラスごとの粒径と粒子数の関係を表すグラフである。

遊粒子の濃度測定方法，その結果による清浄度評価方法，などについて規定している。**表1**に示すように8クラスが定められた。0.1 μm以上の粒子が1 m^{3}当たり10^N(N＝1，2，…，8)とするとき，Nの値が清浄度クラス分けを表し，クラス1，クラス2，…，などと呼ぶ。各クラスの対象とする粒径範囲および上限濃度を**図1**に示す。従来の「旧JIS」でのクラス1，クラス10，クラス100……，は新JISでのクラス3，クラス4，クラス5……，に対応する。

濃度測定方法には光散乱式粒子計測器を含め，4方法が定められている。評価方式には，クリーンルーム空間全体を対象とする正規評価方法，クリーンルーム中の各測定点ごとの付近空間を対象とする逐次サンプリング評価方法，の2方法が規定されている。

3.2 計測器に関するJIS[2](JIS B 9921)

このJISでは，まず性能項目とその性能値を規定し，次いで各性能項目の試験方法を規定している。以下に項目と規定された性能値を列記する。

(1) 流量……流量の経時変化±3%/h，平均流量±5%
(2) 偽計数……5分間で1個以内
(3) 応答性……測定中の粒子濃度変化による計数値の応答性，最大定格濃度1分間計測値と，清浄空気に切換10秒後の1分間計測値との比が0.5%以下
(4) 粒径区分の正確さ…別に定めた試験方法で求めた値が5%以下
(5) 計数効率…PSL(ポリスチレンラテックス)粒子に対して

$30\% < (D_p)_{min} < 70\%$，および

$90\% < (1.5 \sim 2.0)(D_p)_{min} < 110\%$

表2 現用製品の主な仕様　超清浄空間対応の性能を持つ製品を含む現在の製品ラインアップである。

モデル	主　な　仕　様
TS-1450	0.1 μm　6 l/min
TS-3600	0.14 μm　28 l/min
TS-3700	0.1 μm　28 l/min
TS-5100	0.05 μm　2.8 l/min
TS-6500	0.07 μm　28 l/min

ただし，$(D_p)_{min}$は被試験計数器の最小可測粒径である。

(6) 計数損失……最大定格濃度で5％以下

(7) 測定時間の安定性……設定された測定時間間隔の誤差は±1％

(8) 余熱時間……1時間以内

(9) 電源変動に対する安定性……定格電圧の±10%の変動に対し，上記(1)～(8)の性能を満足すること。

4 半導体プロセス向け高性能レーザ ダスト モニタ

4.1 光散乱式自動粒子計測器の測定原理[3)]

微粒子に光があたると微粒子によって全空間にわたって光が散乱される。この散乱光の空間分布は，粒子の屈折率と粒径，光の波長と偏光方向などによって決まる。ある特定方向を中心とし，適当な立体角で散乱光を集めると，屈折率一定の粒子ならば，その強度は粒径に依存する。このことにより，集光光を光検出器で電気信号に変換し，その信号の大きさから粒径を求めることができる。この考え方を計測装置として実現したものが粒子計数器であり，光源にレーザを用いたものがレーザ ダスト モニタである。

散乱光強度(または信号の大きさ)の粒径依存性を散乱応答特性と言う。

4.2 レーザ ダスト モニタ製品ラインアップ

現在の製品ラインアップは，モデル(1) TS-1450，(2) TS-3600，(3) TS-3700，(4) TS-5100および(5) TS-6500(新製品)などである。これらの主な仕様は**表2**に示すとおり最小粒径0.05 μm～，吸入量最大28 l/minであり，0.1 μm以下の超微粒子を28 l/minの高速で測定できる。最近の超清浄空間の測定に十分対応できる性能を持っている。TS-3700の外観を**図2**に，TS-6500の外観を**図3**に示す。レーザ ダスト モニタの基本特性であると同時に，製品の性能確認に重要な散乱応答特性を，TS-3700の場合を例として**図4**に示す。

4.3 性能評価結果の概略[4)]

製品は前節で示したJISの規定に準じた性能試験方法で性能評価を行っている。以下，代表的な製品性能の概略についてデータを示しながら述べる。

(1) 流量……各製品について規定値を満足していることを確認している。

図2 TS-3700外観　最小可測粒径0.1 μm，吸入量28 l/min，フラット キー スイッチを使用し，豊富な処理機能を実現した。
注：幅390×奥行き740×高さ230(mm)

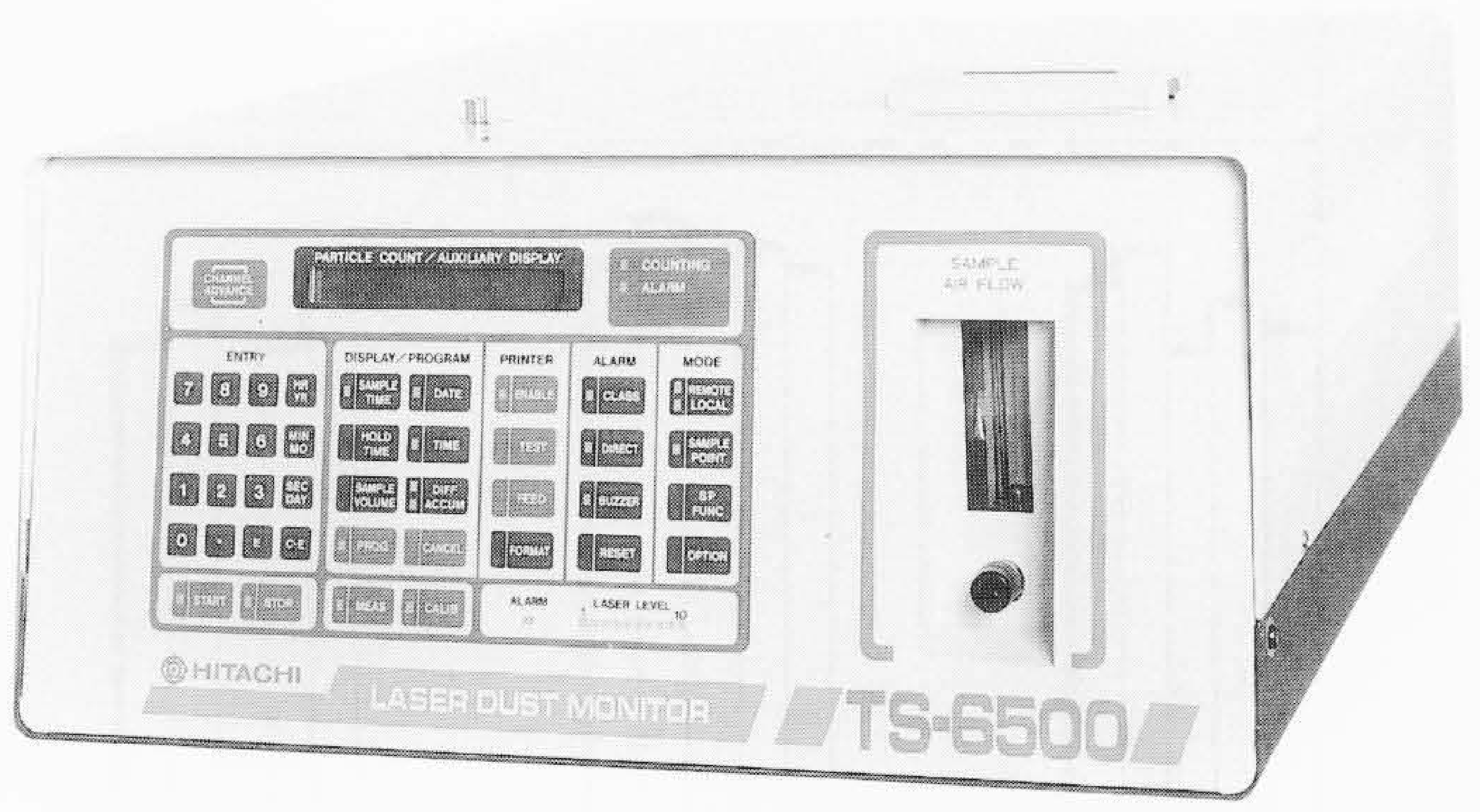


図3 TS-6500外観(新製品)　最小可測粒径0.07 μm，吸入量28 l/minである。
注：幅460×奥行き760×高さ240(mm)

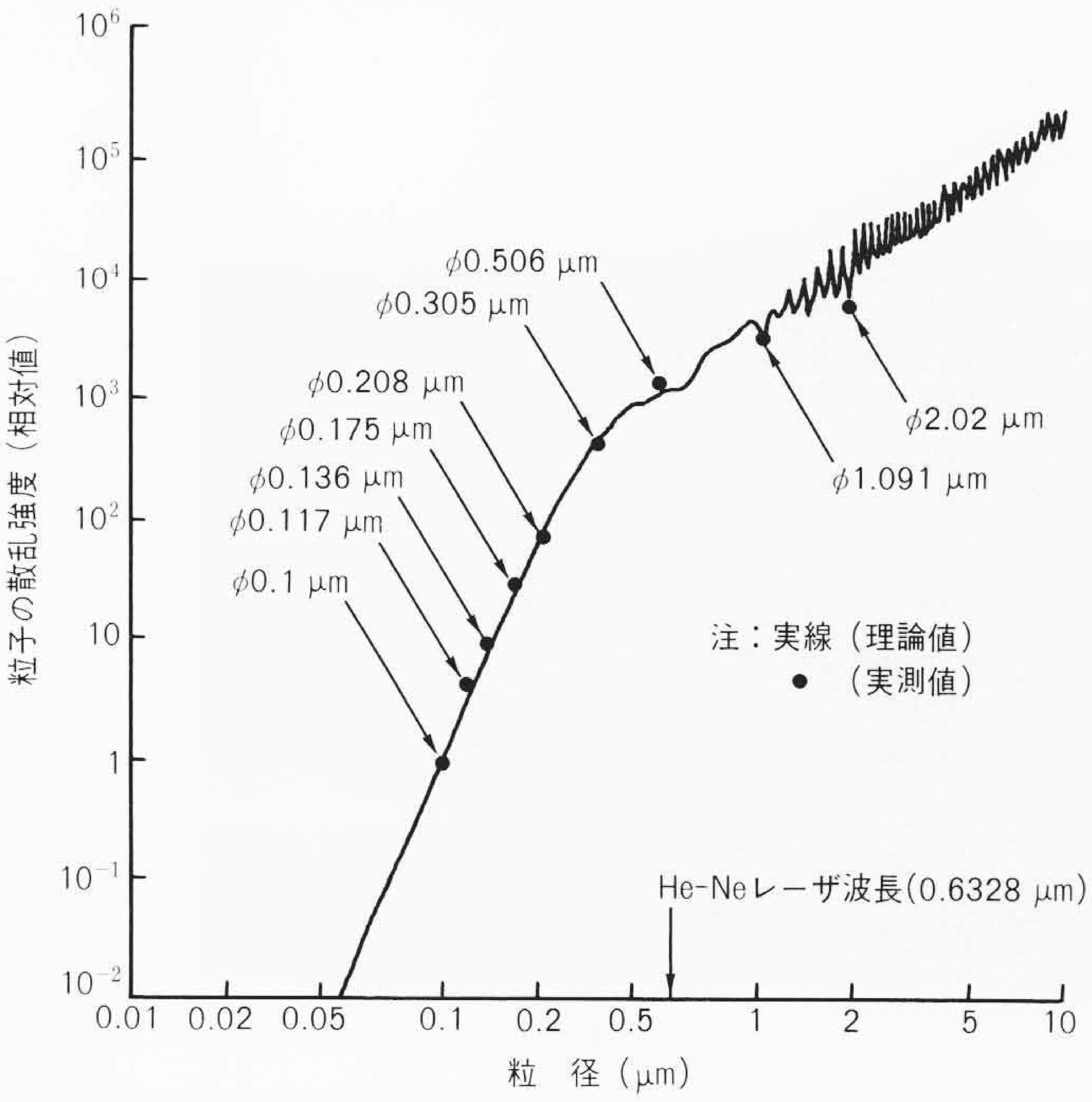


図4 TS-3700散乱応答特性[4)]　Mie理論による計算値と，粒子の散乱光強度の実測値がよく対応し，粒径を高い精度で決定できる。

(2) 偽計数……TS-3700の場合，平均値0.01個/28 lであることが確かめられている。この値はクラス3(「旧JIS」のクラス1に相当)のスーパークリーンルームを十分精度よく測定できることを示唆している。

(3) 応答性……TS-3700の場合の計測応答性の試験結果を**図5**に示す。この結果によれば，最大濃度の汚染空気から清浄空気への急変，またはその逆に対して，おのおの1秒以内で応答していることがわかる。

(4) 粒径区分の正確さ……各製品は数チャネルの粒径弁別を行っている。このチャネル分けが十分なためには粒径分解能が良いことが必要である。**図6**に示した標準粒子による評価によれば，TS-3700の場合，粒径分解能($\Delta D/D_i$)は0.06となっており，粒径区分の正確さが保証されている[4)]。ただし，D_iは中心粒径，ΔDは半値幅である。

(5) その他の規定値……以下規定項目，(a)計数効率，(b)計数損失，(c)測定時間の安定性，(d)余熱時間，(e)電源変動に対する安定性なども十分な試験を行い，レーザ ダスト モニタの性能実現に万全を期している。

(6) 機種間の計数比較……クリーンルームの清浄度管理では，複数かつ異機種のダストモニタを同時に使用することが多い。そのとき器差が問題となる。日立電子エンジニアリング株式会社製3機種のクロスチェックの結果を**図7**に示す。主な仕様が異なっているにもかかわらず，粒径ごとの計数値がよく一致している[4)]。

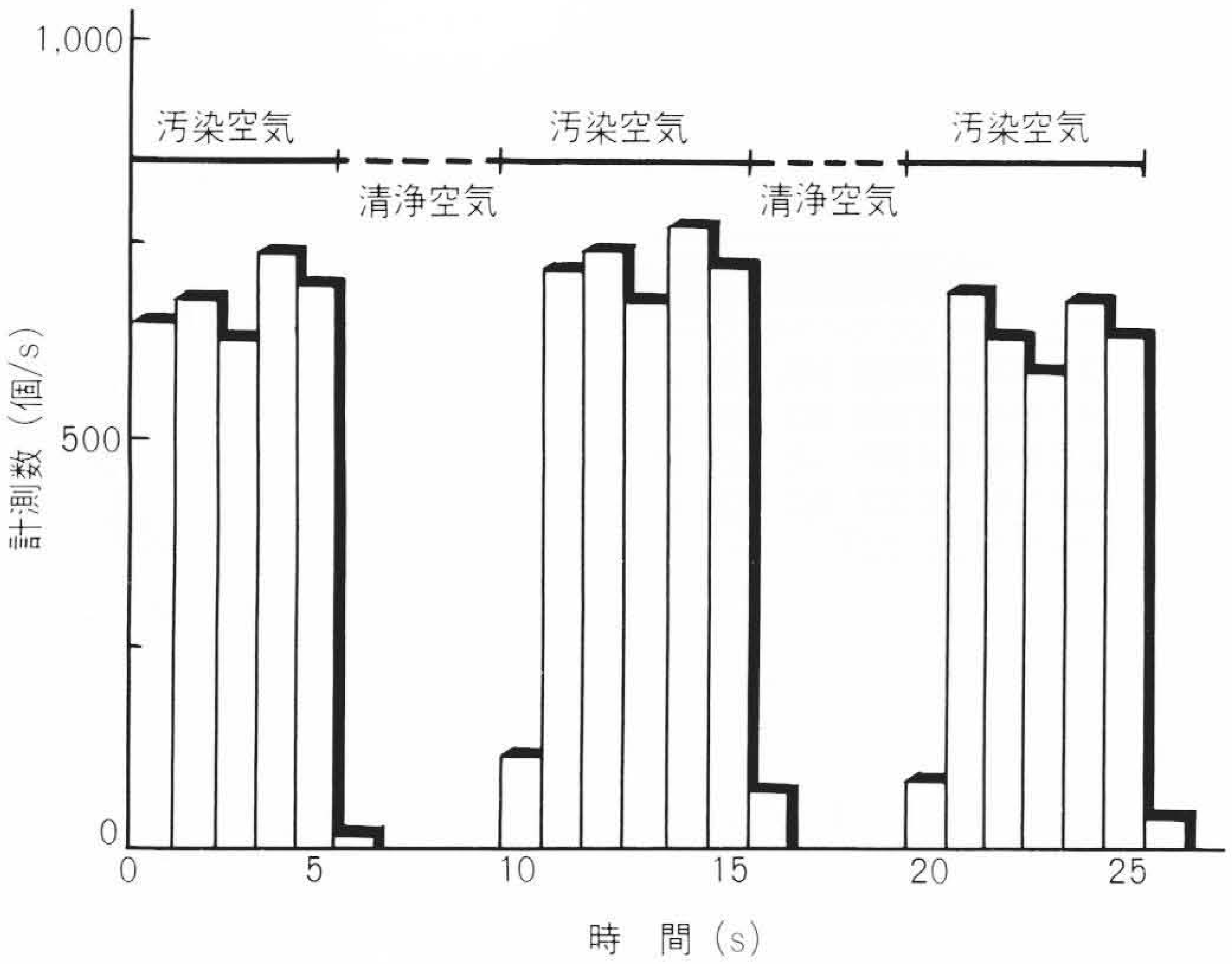


図5 TS-3700の粒子濃度変化に対する計測応答性[4)] 汚染空気から清浄空気への変化に対し，1秒以内に高速応答している。

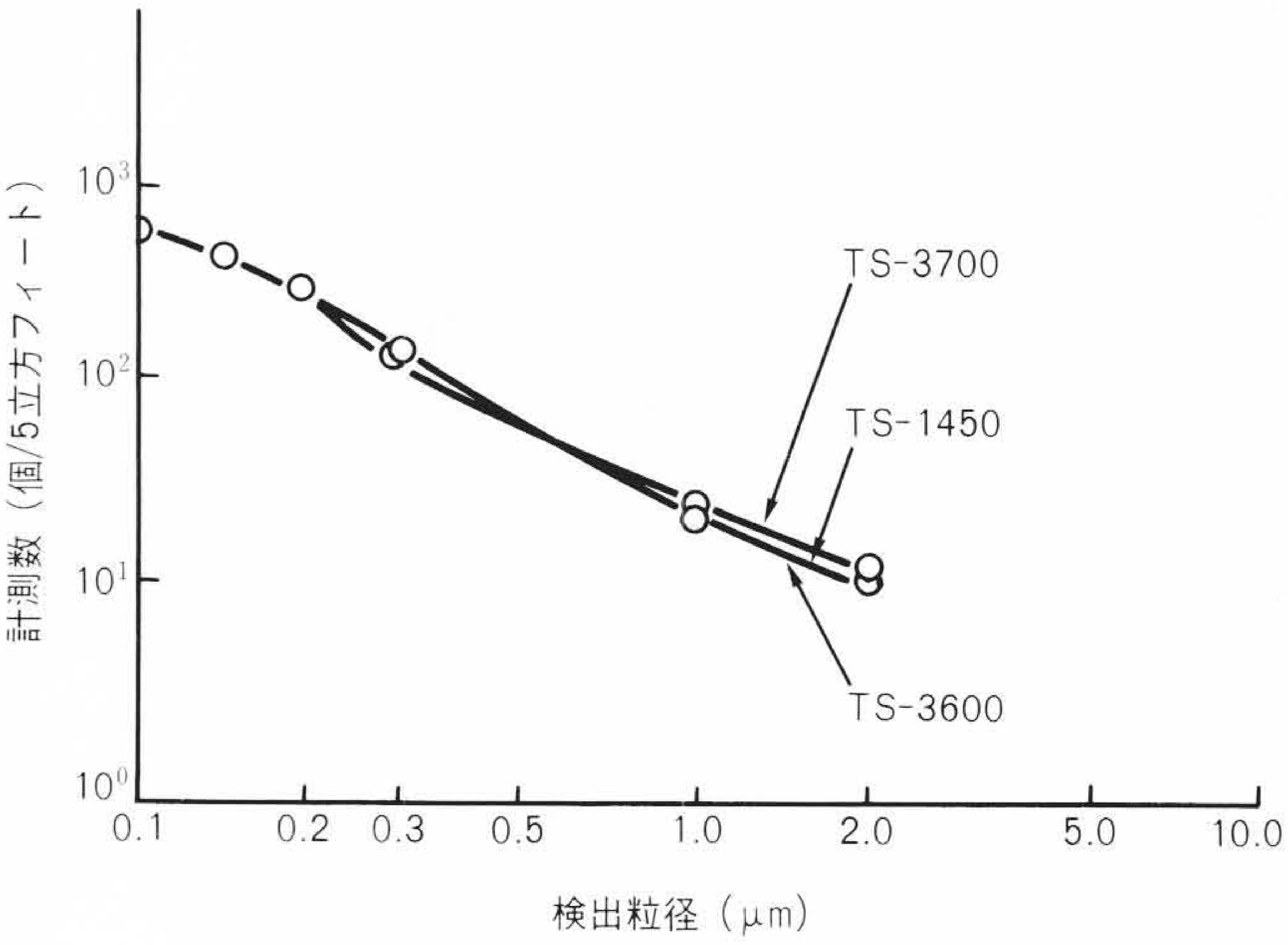
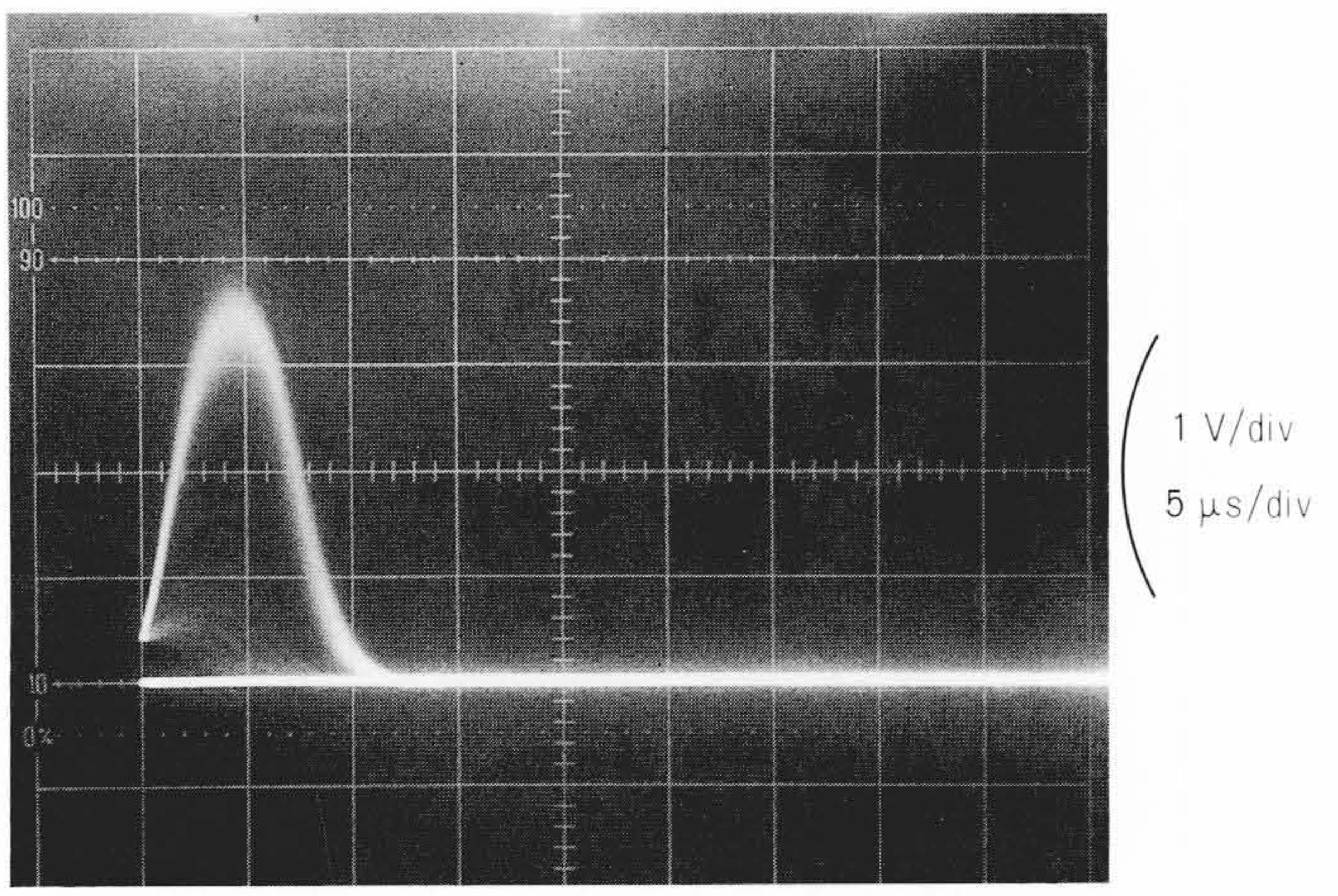
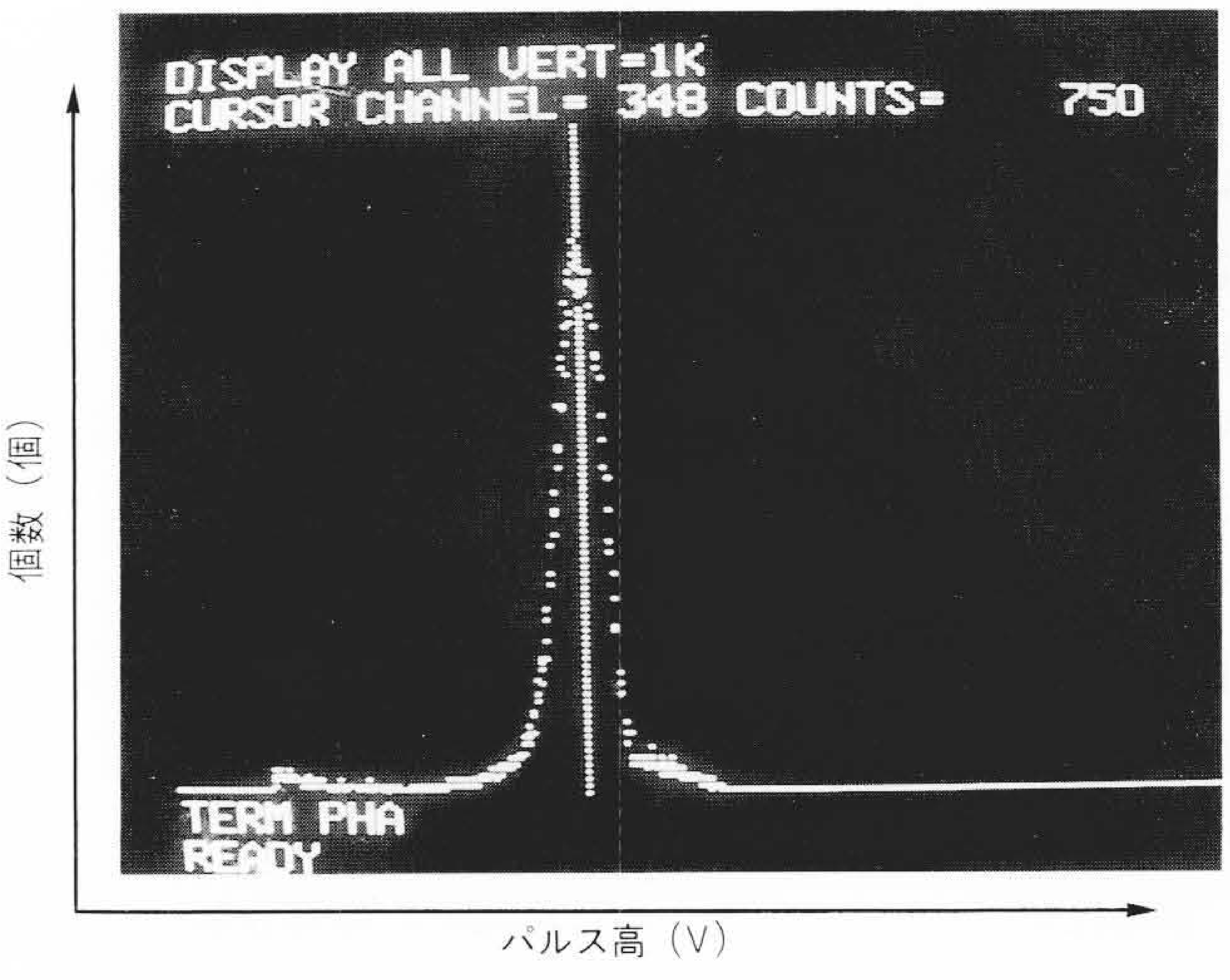


図7 クロス チェック データ[4)] TS-3700, TS-3600, TS-1450との同一サンプリングの測定結果を示す。他機種との相関がよくとれている。TS-1450とTS-3600とはほぼ一致している。



(a) ϕ1.091 μm標準粒子



(b) ϕ1.091 μm標準粒子 パルス ハイト データ

図6 標準粒子によるレーザ ダスト モニタの評価[4)] 粒径1.091 μmの標準粒子を測定したときの信号波形と，信号の波高分析結果を示す。(b)図で，ピーク値を示す波高値に対応する粒径D_i=1.091 μm，半値での波高値の幅に対応する粒径幅ΔD=0.07 μmとなっている。

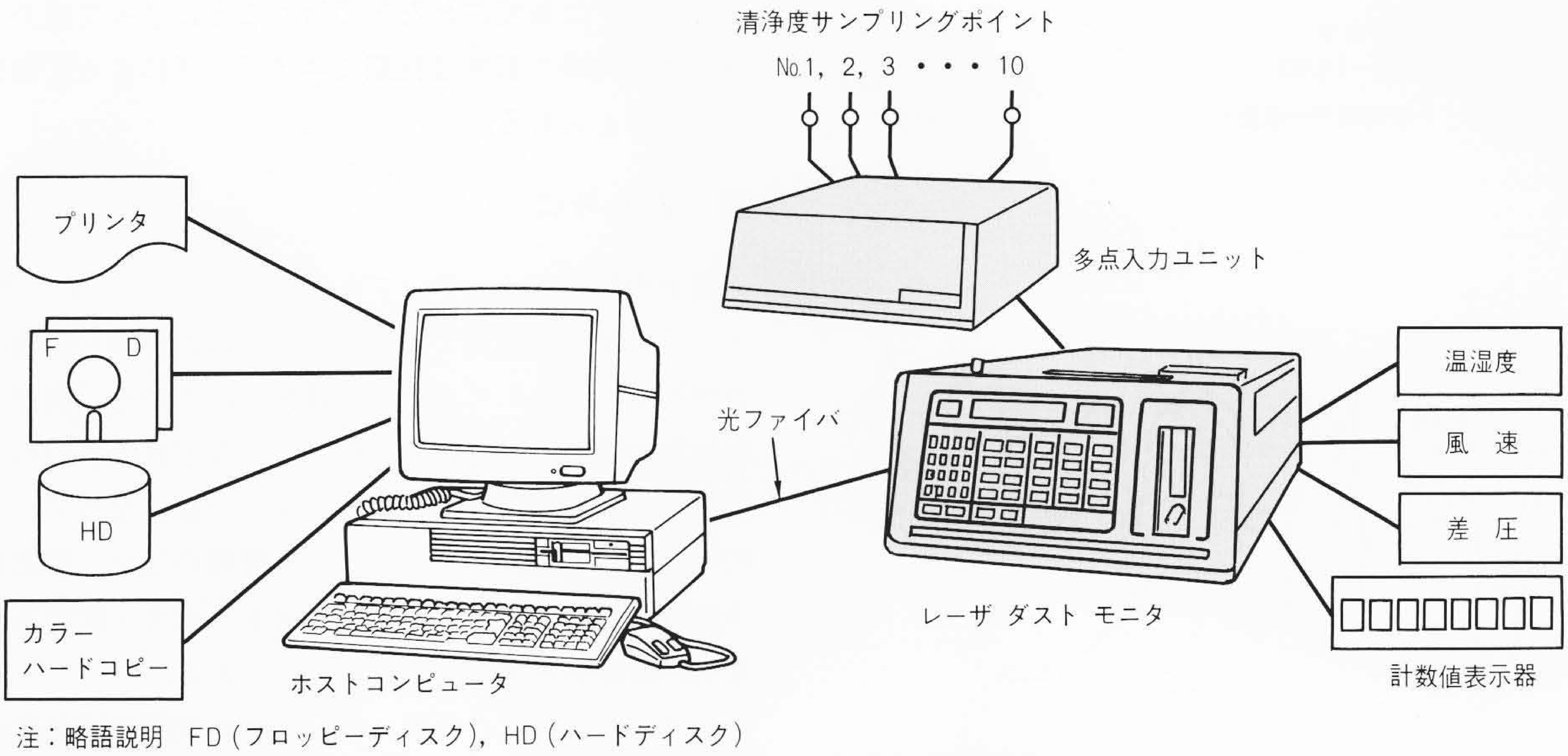


図8 モニタリングシステム構成例[4] レーザ ダスト モニタ1台ないし複数台と，各モニタへの多点入力ユニットの結合により，クリーンルーム内要所の清浄度を測定できる。これにコンピュータを併用することによって集中管理が行える。

表3 多点入力ユニットMX-10の発塵(じん)量[4] 清浄空気吸入時のMX-10切換後の内部発塵データを示す。2秒経過すると発塵はなくなる。

MX-10 ポイントNo.	発塵量(CHI 0.14 μm) (個)										
	切換時	1 s後	2 s後	3 s後	4 s後	5 s後	6 s後	7 s後	8 s後	9 s後	10s後
1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9	0	7	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
平均	0	1.7	0	0	0	0	0	0	0	0	0

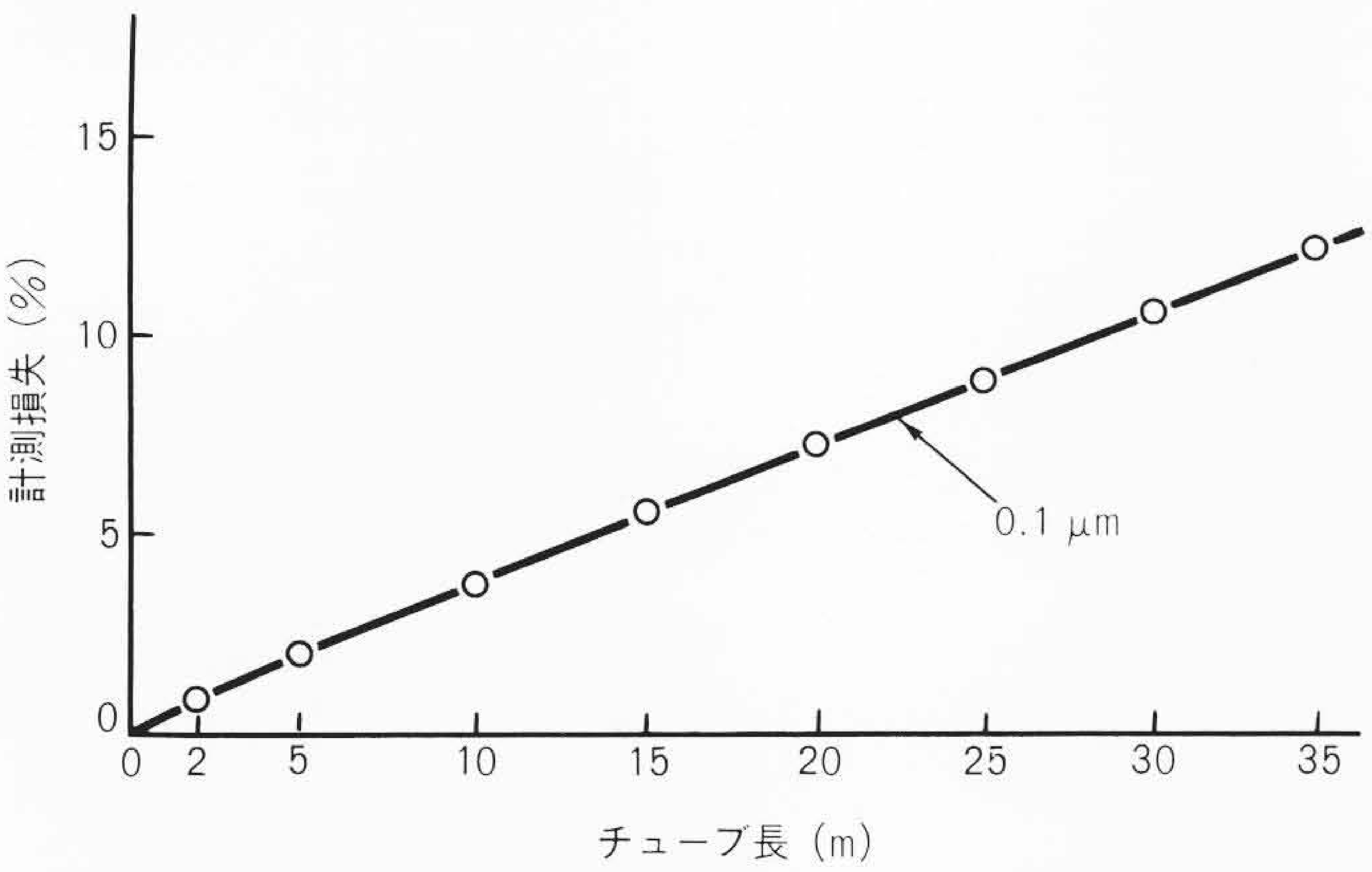


図9 セミコンダクティブチューブによる計測損失[4] チューブの長さ，材質を考慮することで実用上の問題はなくなる。

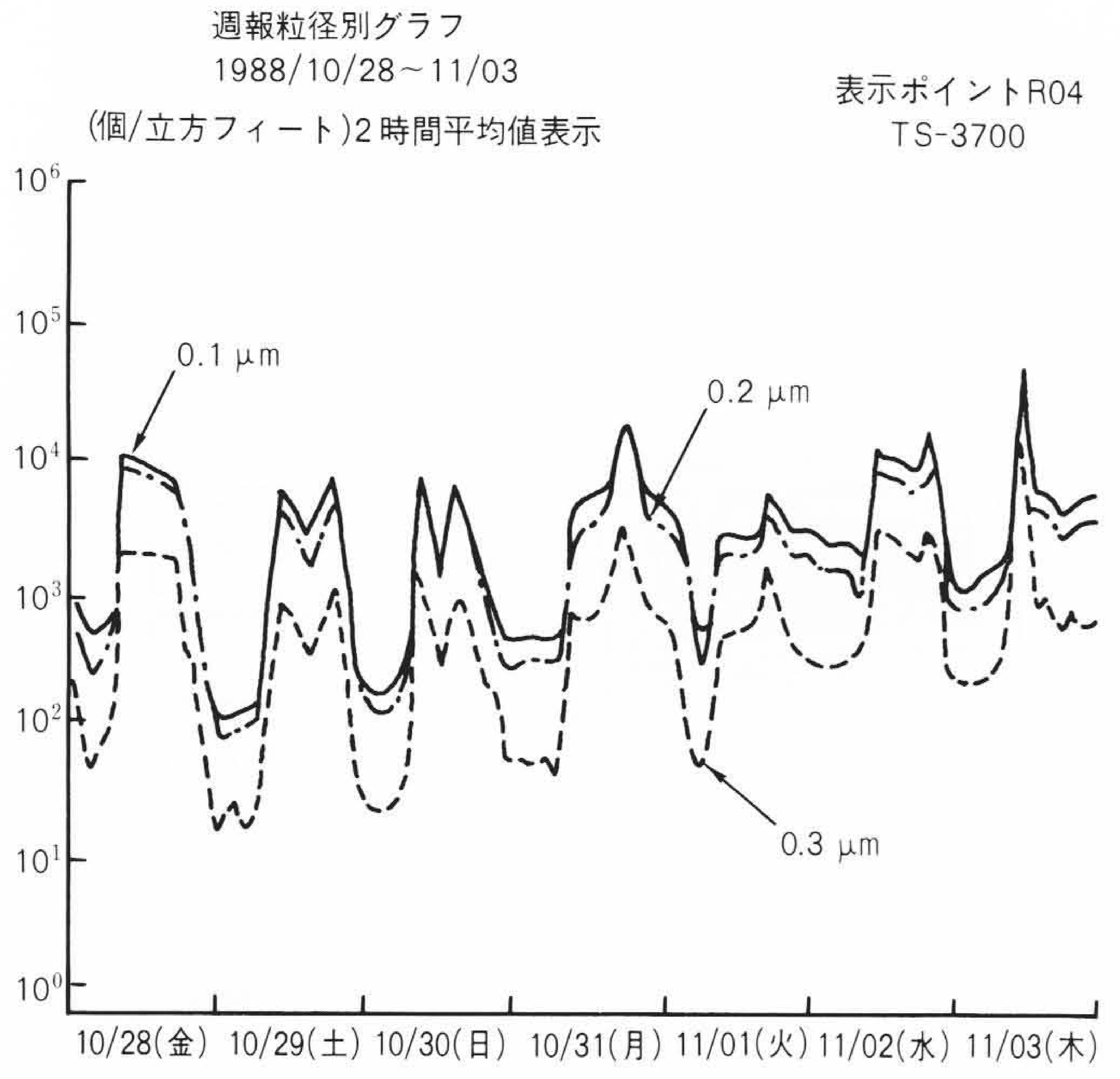
4.4 清浄度モニタリングシステム

清浄度モニタリングシステムの構成例を**図8**に示す[4]。モニタリングの目的によってダストモニタの機種を変えることができる。また，システムの規模はクリーンルームの広さ，測定点の数などによって，変更可能である。

この清浄度モニタリングシステムで，計数値に誤差を与えると考えられる要素についての試験結果を幾つか示す。

多点入力ユニットMX-10の内部発塵(じん)量を試験した結果を**表3**に示す[4]。同表に見るように，多点入力ユニットMX-10は切換直後に若干の発塵が認められる。しかし，切換時に，このユニット内を数秒以上パージした後測定する方式を採っており，この発塵による誤計数はない。

多点入力ユニットMX-10とダストモニタを接続するチューブによる計測損失を，チューブの長さに対して求めた結果を**図9**に示す[4]。5％までの計測損失を許せば，チューブの長さ



注：出力例 クリーンルーム内浮遊粒子濃度の変動(粒径別表示)

図10 モニタリングシステム出力例[4] 清浄度データを時系列グラフ化することにより，その測定点の清浄度変化の特徴をとらえられる。

は15 mまで伸ばせる。このチューブでの計測損失を皆無にすることはできないが，材質，長さ，引き回し方法などを配慮すれば，計測損失を少なくできる。なお，同図のようなデータをあらかじめとっておけば，その状況での計測値を補正できる。

清浄度モニタリングシステムの一実施例を**図10**に示す[4]。モニタリングは長期にわたって行うことによって威力を発揮する。異常発塵の有無は長期モニタリングによって発見できるものと考えられる。

5 おわりに

以上の製品ラインアップとその性能により，レーザ ダスト モニタは半導体製造での清浄化のための試験・評価，および管理用モニタとして多方面で使用されている。前述した清浄化対象の環境，製造装置，材料，人などおのおのの分野に利用され，生産歩留りの維持・向上の一助となっている。具体的用途としては，クリーンルーム管理のほか，製造装置・搬送装置の発塵試験，フィルタテスト，ガス・配管系試験，無塵衣，ほか各種備品試験など多様である。

今後，高集積化の進展に伴い超清浄空間の清浄度向上がますます要求されるようになる。このような状況に対して，レーザ ダスト モニタは重要な役割を果たすと考える。さらに性能向上を図っていく次第である。

参考文献

1) JIS B 9920：平成元年11月改正・公布
2) JIS B 9921：平成元年11月改正・公布
3) 須田：レーザダストモニターによる塵芥等の測定，O+E，No.37，74(1982年12月)
4) 木村，外：スーパークリーンルーム対応レーザダストモニタ，日立電子エンジニアリング技報，創刊号，8(1991-1)