

クリーンルームに関する研究 (その1)

—垂直層流方式における清浄度立上り特性—

西岡 利晃 竹内 和男
一橋 克美

Research on Clean Rooms (Part 1)

—Dynamic Change of Particle Concentration in Starting
Operation of a Vertical Laminar Flow Clean Room—

Toshiaki Nishioka Kazuo Takeuchi
Katsumi Ichihashi

Abstract

The dynamic change of particle concentration in starting operation of a Vertical Laminar Flow (VLF) clean room is examined. Tests are to measuring the lengths of time required for particle concentration of the air of the clean room to be reduced to that of the clean air supplied under various air-supply velocities, pressure differences of the rooms, and exhaust air rates.

The particle sizes measured were equal to or larger than $0.5 \mu\text{m}$ and $0.12 \mu\text{m}$, and the behaviors of these were compared. Although the type of the clean room is VLF, the property of controlling contamination is in three degrees, namely, piston flow, perfect diffusion and imperfect discharge according to the air change rate. The equations for clean-up time and concentration rate are experimentally obtained for each case. When supply air velocities are constant, pressure difference and exhaust air rate have no influence on clean-up time. All particle sizes are controlled equally, and particles equal to $0.1 \mu\text{m}$ can be purged by increasing the ventilation rate by 20 to 30 percent.

概 要

垂直層流方式の研究用クリーンルームを用いて、清浄度の立上り特性の実験を行なった。実験は、吹出し気流速度、室間の圧力差、排気量をそれぞれ変化させた場合について行ない、塵埃濃度が吹き出し気流のそれと同じになるまで清浄化するのに必要な時間を測定した。対象塵埃の粒径は $0.12 \mu\text{m}$ 以上と $0.5 \mu\text{m}$ 以上の場合を行ない、両者の比較を行なった。吹出し方式が、全面垂直層流方式であっても吹出し気流の大きさに応じ、浄化機構がピストン流型、完全拡散型、塵埃残留型に分かれる。それぞれの場合に清浄化に必要時間、塵埃濃度を求める式を導いた。吹出し気流速度が一定の場合、室間の圧力差、排気量により清浄度の立上り時間に差がないことを確認した。塵埃の粒径により浄化機構に大きな差はみとめられず、粒径が $0.1 \mu\text{m}$ 程度に微細化しても、換気量を2～3割増やすことによって対処できる見通しを得た。

1. はじめに

垂直層流方式のクリーンルームの性能評価は、AACC (American Association For Contamination Control) の暫定基準¹⁾で13項目にわたる試験を行なうことを推奨している。これらのうち、清浄度に関係の深いものは以下の項目である。

(1) システム天井および HEPA フィルターのリーク

(2) 気流の均一性

(3) 風量 (給気量, 外気量)

(4) 気流の平行性, 塵埃の拡散域, 清浄度の回復

(5) 圧力制御

これらはいずれもクリーンルームの環境制御設備の完成時のもので、生産設備や作業者が存在する実稼動時に、どのように過酷な使用状態でも性能を保証するために考えられたものである。清浄度を直接測定する項目はなく

特殊な発塵装置を用いて、気流の平行性、塵埃の拡散範囲、清浄度の回復時間等を測定し、清浄化能力を判定することとしている。このテストは、他の項目と異なり、垂直層流方式そのものの性能を判定するもので、試験方法は、非常に煩雑で、工事担当者にとってかなり負担になり、工期にも影響が少なくない。普通は日常の作業の種類、管理能力に応じて緩和したものが適用されている。例えば、糸等により気流を可視化して、気流の平行性テストに代えてすませている場合が多い。糸による場合も目視テストであるため、定量化が困難で、客観性に欠けるところがある。これに比べ、清浄度の立上り試験は、糸のテスト程度に軽便で定量化が可能であり、平行性ばかりでなく、拡散性、回復性も同時に判定できる。更に吹出し気流速度と清浄化能力、清浄度を関係づけ、定量化できるので、負荷に応じた装置能力の最適化や、負荷変動に応じた風景変化の運転等の設計に必要なデータも提供できる。

この報告は、研究用クリーンルームを用いて行なった一連の性能テスト²⁾のうち、清浄度の立上りに関する測定に関するもので、吹出し気流速度と清浄化時間の定量化、清浄度の実験式等を導いた。

2. 実験概要

実験に用いたクリーンルームの空調系統図を図-1に示す。クリーンルームは床面積約 19.8 m² (6, 110 × 3, 240 m) 天井高さ 3, 000 m である。システム天井は当社で独自に開発したもので (特許出願中)、HEPA (High Efficiency Particulate Air) フィルターの面積比は85%に達し、従来のものより7~8%大きくなっている³⁾。

空調を停止し、クリーンルームを大気塵で一定濃度に高める。十分濃度が定常に達したことを確認し、空調機の運転を開始する。パーティクルカウンターと空調機のスタートをほぼ同時にし、引き続き外調機、排気機をスタートして差圧を設定する。給気量、差圧を一定に保ち塵埃濃度を測定する。塵埃濃度が吹出し気流と同じ (35 個/m³ = 1 個/ft³ 以下) になったことを確認して実験を打ち切る。実験開始後30分経過しても上記濃度以下にならない場合は、濃度が変動しないことを確認して実験を打ち切る。これを給気量 (換気量)、圧力差、排気量を変化させて行なう。サンプリング位置は、床中央、床上 1 m の高さ 1 点とした。サンプリングチューブは、応答と計器による気流の乱れを考慮して、適切な長さを選定した。パーティクルカウンターは、粒径が 0.5 μm 以上の場合にはフォトカウンター、0.12 μm 以上の場合にはレーザーカウンターとした。計器の測定条件を表-1に示す。測定はいずれも塵埃に関し、無負荷状態で行なった。

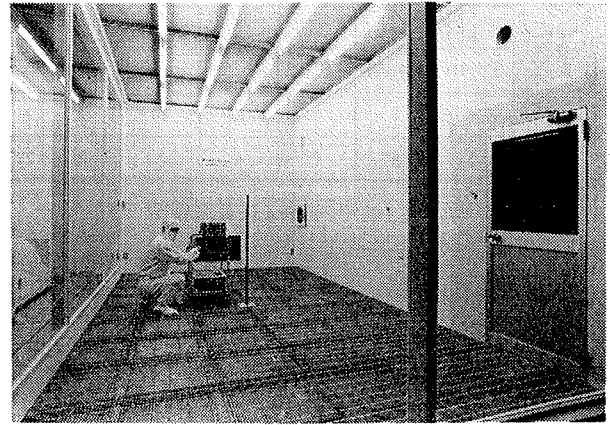


写真-1 研究用クリーンルーム

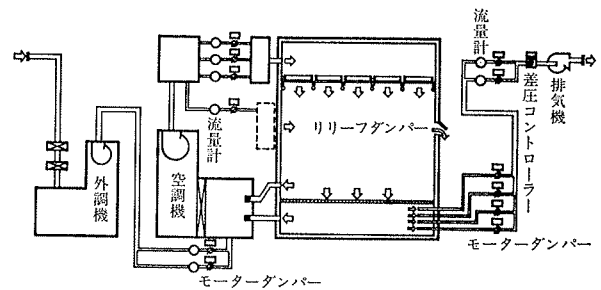


図-1 クリーンルーム空調系統図

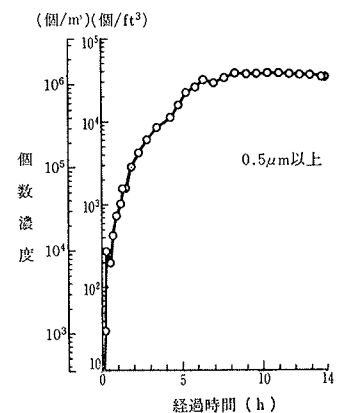
機種	粒 径	吸引量 (cc/sec)	リセットタイム (sec)	サンプリングチューブ
フォトカウンター (DIC, PM-734DXPT)	0.5 μm 以上	47.2	21.2	φ5mm, 125cm
レーザーカウンター (PMS, LAS-X)	0.12 μm 以上	9.5	10.0	φ5mm, 200cm

表-1 使用計器と測定条件

3. 実験結果

3.1. 予備実験-初期濃度の設定

初期濃度設定のため、大気塵で自然に塵埃濃度が増大する様子を実験した。無負荷、換気回数約 450回/h で30分間空調機を運転し、0.5 μm 以上の粒子に対して 35個/m³



(= 1 個/ft³) 以下に無塵 図-2 塵埃濃度の自然増加化した後、空調機を停止し、全ての開口を閉じて、自然な塵埃濃度の増大を測定した。結果を図-2に示す。約8時間で定常に達し、その濃度は 0.5 μm 以上の粒子に対し、 $1.06 \times 10^6 \sim 1.41 \times 10^6$ 個/m³ ($= 3 \times 10^4 \sim 4 \times 10^4$ 個/ft³) である。濃度の粒径による分布がクラスを規定するグラフと同じであるとすれば、0.12 μm 以上では、それぞれ $3.58 \times 10^7 \sim 4.76 \times 10^7$ 個/m³ ($= 1.01 \times 10^6 \sim 1.35 \times 10^6$ 個/ft³) に相当する。これより初期濃度の設定を行なった。

換気回数 平均風速 粒径	~ 50 回/h	~ 90 回/h	~ 150 回/h	~ 240 回/h	~ 300 回/h	~ 450 回/h	計
	~0.042	~0.075	~0.125	~0.200	~0.249	~0.375	
0.5 μm 以上	4	5	3	2	10	2	26
0.12 μm 以上	5	4	6	4	1	2	22

表一 設定換気回数と実験数

3.2. 換気回数による立上り特性

設定した換気回数と、それぞれの場合の実験数を表一に示す。0.5 μm 以上で26回，0.12 μm で22回の計48回行なった。結果の一部を図一3～図一5に示す。図中に示す点線のグラフは、対応する換気回数の場合の完全拡散による濃度変化を計算したものである。計算は以下の式によった。

$$C(t) = C_0 \cdot e^{-nt} \quad \dots\dots\dots(1)$$

C(t): 時刻 t の塵埃濃度 (個/m³, 個/ft³)

C₀: 塵埃の初期濃度 (個/m³, 個/ft³)

n: 換気回数 (回/h)

t: 時刻 (h)

図より明らかなように、吹出し方式が層流型であっても換気量(吹出し気流速度)に応じて、濃度変化(減衰)に三つのタイプが見られる。換気量の多い場合から、層流型、完全拡散型、塵埃残留型に大別される。クリーンルームの方式は、層流、非層流(乱流)と一般に呼び慣らされているが、「層流」での気流は、流体力学で定義される層流ではなく、ほとんどの場合乱流であり、クリーンルーム内の気流の性状を表わすものとしては適切ではない。流れの状態、清浄化のメカニズムに応じた適切な名称が求められる。ここでは、層流の代わりにピストン流、非層流の代わりに完全拡散の名称を用い、実験結果を以下のごとく分類する。()内は従来の名称を示す。

○ピストン流型 (層流)

- ┌ ピストン流型
- └ 準ピストン流型

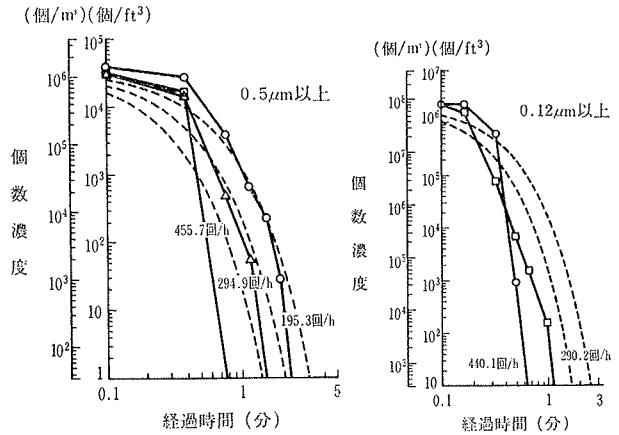
○拡散型 (非層流, 乱流)

- ┌ 完全拡散型
- └ 塵埃残留型

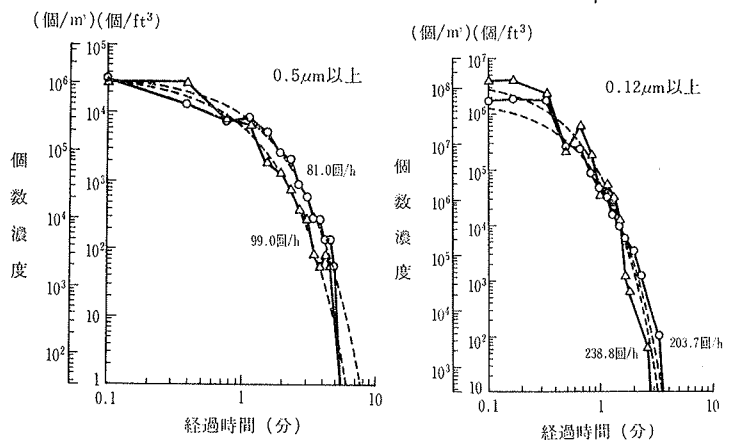
これらと換気回数(吹出し気流速度)との関係を図一6に示す。

3.3. 圧力差による立上り特性

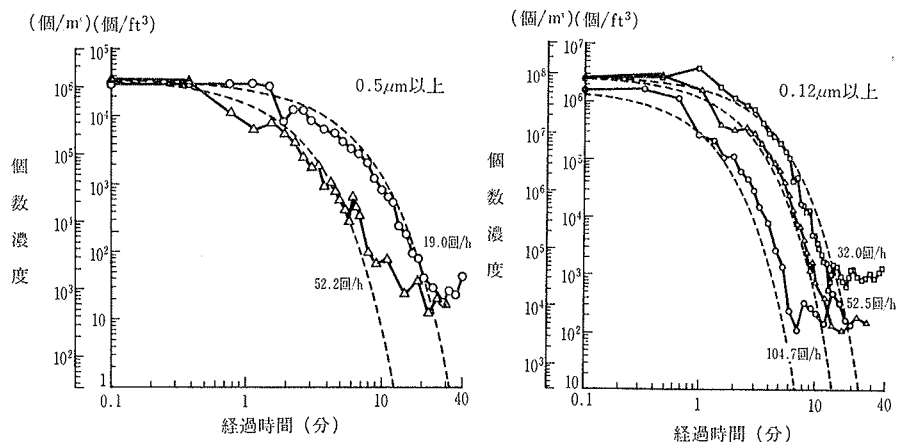
結果を図一7に示す。クリーンルーム内外差圧は0.98 ~ 2.33 mmAq の間にあり、この程度の圧力差の変化で



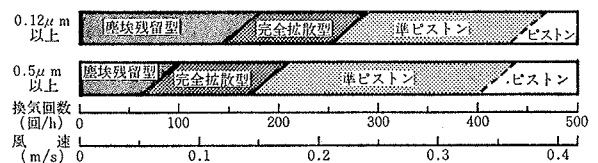
図一3 清浄度の立上り1 ピストン流型



図一4 清浄度の立上り2 完全拡散型



図一5 清浄度の立上り3 塵埃残留型



図一6 換気量と清浄化機構のタイプ

は、立上り特性に差は生じないと言える。

3.4. 排気量による立上り特性

結果を図-8に示す。排気量は325 m³/h~1508 m³/hの間で変化させた。差圧は排気量325 m³/h(グラフ▲)の時0.96 mmAqでその他は1.17~1.30 mmAqでほぼ一定である。排気量911 m³/h(グラフ■)で立上り時間が他より若干長いが特に差はないと言える。

4. 立上り時間と濃度変化

4.1. ピストン流型

図-3に示すように、立上り直後は濃度が一定でほぼ初期濃度に等しい。その後急激に、吹出し気流の濃度に等しくなるまで下がる。これはクリーンルームの気流が層を成した流れになっており、吹出し気流が塵埃のサンプル点を通じた時点で、吹出し気流の濃度に等しくなる、ほぼ完全なピストン流になっていることを示している。この場合、濃度の変化より、吹出し気流濃度にまで低下するのに要する時間の方が重要である。これを立上り時間と称し、吹出し気流の平均速度から求める方法と、パーティクルカウンターの測定結果より求める方法を示す。

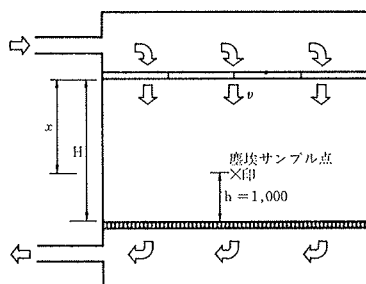


図-9 ピストン流の模式図

(1) 立上り時間 その1 (t_v)

吹出し気流の平均速度から求める方法で、平均速度v(t)、吹出し面(HEPA フィルター下面)からサンプリング位置までの距離をxとすれば、吹出し気流がサンプリング位置に達する時間t₁は以下の式になる。(図-9参照)

$$x = \int_0^{t_1} v(t) \cdot dt \quad \dots\dots\dots(2)$$

空調機の立上り特性より、v(t)は以下のごとくなる。(図-10参照)

$$v(t) = \begin{cases} at; & 0 < t < t_n \\ b; & t \geq t_n \end{cases} \quad \dots\dots\dots(3)$$

ただし、t_n: 規定風量に達するに要する時間(S)
 a: 加速度(m/s²)
 b: 平均速度(m/s)

(2), (3)式より

$$t_1 = \begin{cases} \sqrt{2x/a} & ; 0 < t_1 < t_n \\ t_n - (a/2b) \cdot t_n + x/b & ; t_1 \geq t_n \end{cases} \quad \dots\dots\dots(4)$$

今回の実験系では、別に行なった吹出し気流の測定から空調機スタート後2秒間は全く給気されないの、立上り時間t_vは以下となる。

$$t_v = t_1 + 2 \quad \dots\dots\dots(5)$$

(2) 立上り時間 その2 (t₀)

パーティクルカウンターは1回のリセット時間の積算

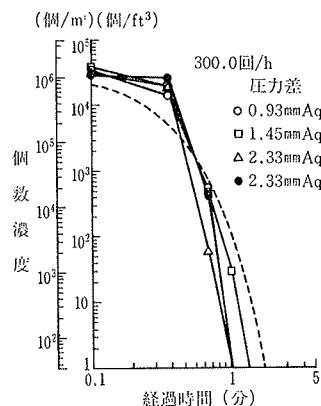


図-7 圧力差と清浄度立上り

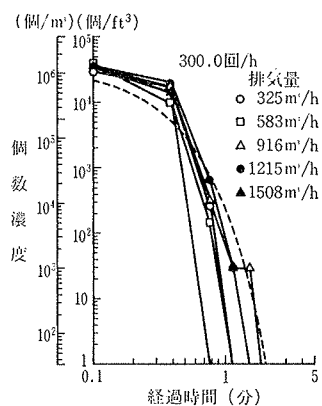


図-8 排気量と清浄度立上り

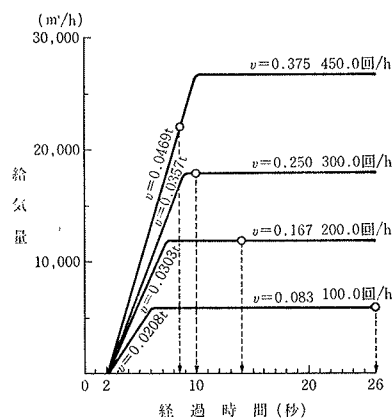


図-10 空調機の立上り特性

値で、瞬間値を表わさない。したがって測定結果そのものから吹出し気

流がサンプリング位置に達した時間はいえられない、吹出し気流がサンプリング位置に達するまでは初期濃度としそれ以降は吹出し気流の濃度とする。n回目のリセット中に、時間t₀で吹出し気流がサンプリング位置に達したとする。この時(n回目のリセット)カウンターがとらえた塵埃の総数Mは、

$$M = N_0 \cdot Q \cdot t_0 + \bar{N} \cdot Q \cdot (t_r - t_0) \quad \dots\dots\dots(6)$$

ただし、N: 吹出し気流の濃度(個/m³, 個/ft³)

N₀: 初期濃度(個/m³, 個/ft³)

t_r: カウンターのリセット時間(s)

Q: カウンターの吸引量(m³/s, ft³/s)

$\bar{N} \approx 0$ だから(6)式は

$$M = N_0 \cdot Q \cdot t_0 \quad \dots\dots\dots(7)$$

この時(n回目のリセット)カウンターに表示される濃度N(個/m³, 個/ft³)は

$$N = M / (Q \cdot t_r) \quad \dots\dots\dots(8)$$

(7), (8)式より

$$t_0 = (N/N_0) \cdot t_r \quad \dots\dots\dots(9)$$

立上り時間t₀は、サンプリングチューブ(容積V)による遅れをさし引いて以下のごとくなる。

$$t_c = (n-1) \cdot t_r + (N/N_0) \cdot t_r - v/Q \quad \dots\dots(10)$$

今回の実測値を用い、(5), (12)式によって t_v, t_c を計算し、結果を表-3 に示す。表より明らかのように、換気回数によって、 $t_v \geq t_c$ と $t_v < t_c$ に別れる。前者は完全なピストン流、後者は準ピストン流と区別できる。

No.	粒 径	換気回数 (回/h)	a:加速度 (m/s ²)	b:平均風速 (m/s)	t_r' (sec)	t_v (sec)	N:表示濃度 (個/m ³) ()内は(個/ft ³)	N ₀ :初期濃度 (個/m ³) ()内は(個/ft ³)	n:リセット回数(回)	t _c (sec)
1	0.5 μm 以上	459.1	0.048	0.383	8.0	11.2	511,710 (14,490)	1,119,334 (31,696)	1	9.2
2	"	455.7	0.048	0.380	8.0	11.2	589,649 (16,697)	1,105,349 (31,300)	1	10.8
3	"	298.4	0.036	0.249	7.0	13.5	22,990 (651)	1,254,236 (35,516)	2	22.9
4	"	288.0	0.034	0.240	7.0	13.9	9,005 (255)	1,048,387 (29,687)	2	22.7
5	"	280.0	0.033	0.233	7.0	14.1	19,988 (566)	1,239,262 (35,092)	2	22.5
6	0.12 μm 以上	440.1	0.046	0.367	8.0	11.2	2,090,275 (59,190)	77,074,262 (2,182,500)	2	6.2
7	"	398.6	0.043	0.332	7.0	11.9	413,182 (11,700)	156,267,403 (4,425,000)	3	15.9
8	"	290.2	0.035	0.242	7.0	13.7	233,077 (6,600)	76,269,087 (2,159,700)	3	15.9

注) x=2.0m; サンプリグチューブの遅れ0.5秒(0.5μm以上), 4秒(0.12μm以上)

表-3 ピストン流型の立上り時間の計算

4.2. 完全拡散型

図-4 は完全拡散型とみなせる場合で、換気回数がこの範囲以下では、全面吹出し方式であってもピストン流の性能を発揮しない。設定した換気回数と濃度変化のグラフの最小二乗近似により求めた換気回数を表-4 に示す。

0.5 μm 以上	設定換気量 (回/h)	102.5	100.5	99.0	81.0
	実験結果 (回/h)	100.5	79.6	90.6	73.1
0.12 μm 以上	設定換気量 (回/h)	238.8	203.8	194.9	191.6
	実験結果 (回/h)	270.0	193.0	206.0	197.5

表-4 完全拡散型の換気回数の比較

4.3. 塵埃残留型

図-5 では、ある時間経過すると完全拡散の理論式からはずれ濃度は定常に達する。これは、供給空気が室空気と十分混合しないうちに室内から排除されることによると思われる。定常に達する時間 (t) と換気回数 (n) の関係を図-11 に示す。定性的に $n \rightarrow 0$ で $t \rightarrow \infty$, $n \rightarrow \infty$ で $t \rightarrow 0$ 。従って、 $t = a/b^n$ で近似できる。最小二乗法により実験結果を近似した結果を以下に示す。

0.5 μm 以上の場合; $t = 4.574 \times n^{-0.875} \dots(11)$

0.12 μm 以上の場合; $t = 3.575 \times n^{-0.777} \dots(12)$

(1), (11), (12)式を用いて換気回数と定常濃度の関係を求める式を導き以下に示す。

0.5 μm 以上の場合; $C_r = C_0 e^{-4.574n^{0.125}} \dots\dots(13)$

0.12 μm 以上の場合; $C_r = C_0 e^{-3.575n^{0.223}} \dots\dots(14)$

実験結果と比較し図-12に示す。結果と良く一致しており、(13), (14)式は実用式として十分利用できる。

5. まとめ

垂直層流方式であっても換気量 (吹出し気流速度), 対象粒径により浄化機構に差が出る。換気量によりタイプを分類し、それぞれの場合の立上り時間, 清浄度を求める実験式を導いた。これらを用いて、発塵量に応じた最適換気量の決定や、発塵量の変化に応じて換気量を変化させる運転の設計等を行なうことができる。

粒径による差は、タイプの境界が 0.12 μm 以上の方が換気量の多い所に来る程度であり、粒径が小さくなくても換気量を増やすことによって対処できる。

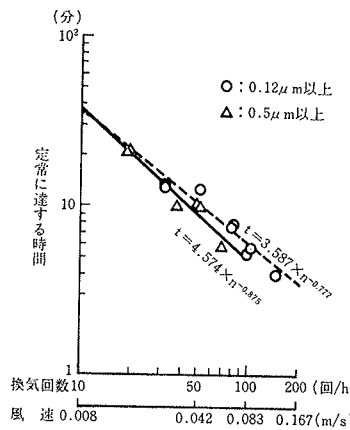


図-11 塵埃濃度定常化時間

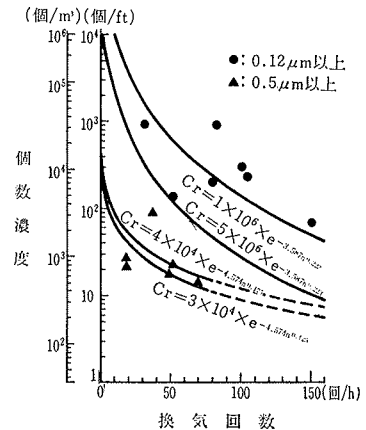


図-12 残留塵埃の濃度

クリーンルーム内外差圧, 排気量は, 清浄度立上に大きな影響がない。

謝辞

実験に際し、東海大学建築学科、松本敏男助教授の御協力を得ました。記して謝意を表します。

参考文献

- 1) American Association For Contamination control, Tentative Standard For Testing and Certification of "Particulate Clean" Rooms (AACC Designation; CS-bT, Mass. 02108, (April 23. 1970)
- 2) 竹内, 一橋, 西岡, 田中: クリーンルームに関する研究(その1), (その2), 空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集, (昭和58. 10), p. 241
- 3) 西岡, 他: 大林組実験用クリーンルームについて, 第2回 空気清浄技術研究大会予稿集, (昭和58. 3), p. 85