

クリーンルームのじんあい濃度計算法



日本エアーテック株式会社
Airtech Japan, Ltd.

本 社 〒106 東京都港区六本木3-7-17(六本木産業ビル)
TEL. 03-403-1731
大阪営業所 〒536 大阪市淀川区中津1-11-8(旭ビル)
TEL. 06-373-0473
06-376-0513
九州営業所 〒812 福岡市博多区山王1-8-35(山王岩瀬ビル)
TEL. 092-474-4787
工 場 〒340 埼玉県草加市青柳町1117-3
TEL. 0489-36-3033
0489-36-3350

1. はじめに

半導体工業、精密機械工業及び医薬品などの分野では、無じん無菌環境を確保するために、クリーンルーム、バイオクリーンルームが市広く使用されている。しかしながら、これらの設備では、しばしば過剰投資が見られる。従って、より正確に室内清浄度を計算し、必要最小限の設備投資をすることが重要である。

実際に行なわれているじんあい濃度決定法は、空気の循環回数あるいはフィルタ効率の選択などを、経験により概略的に決めるという非常に不正確な方法で行なわれている。

この原因は、現在までいくつかの計算法が確立されているが、一般的には簡易的にじんあい濃度の定常値による計算法を用いていることによる。定常値を用いると、必要な循環回数は減少するため、計算値と実際のじんあい濃度の差は大きくなり、実用的でなくなる。このため、設備計画をするときには、定常値の定数を無理に変えて数値を合せるといった場合が多々ある。

正確な値を知るためには、じんあい濃度の過渡状態を考慮し計算しなければならない。じんあい濃度の計算については、国立公衆衛生院、吉沢晋先生より解析がなされている。今回、クリーンルームの計画に当り、実際に本式をどのように利用すべきかについて検討したので、以下に説明する。本稿により、クリーンルーム計画者が誤った概念を持っていることがあるのだということを知り、本式を利用して頂ければ幸である。

2. じんあい濃度式

2-1 式の導入

じんあい濃度式に関する詳細解析は、吉沢¹⁾²⁾により行なわれているので、ここでは簡単に説明する。

クリーンルームにおける空気系統図を図1に示す。ここで用いる記号は、以下の如くである。

N : クリーンルーム内のじんあい濃度 ($\mu\text{g}/\text{ft}^3$)

M : 流入外気濃度 ($\mu\text{g}/\text{ft}^3$)

V : クリーンルーム容積 (m^3)

K : 循環 (換気) 回数 (回/時)

G : 室内発じん量 ($\mu\text{g}/\text{分}$)

a : フィルタの集じん効率

s : 全風量に対する外気風量の比

以下の点を条件とし、計算を進める。

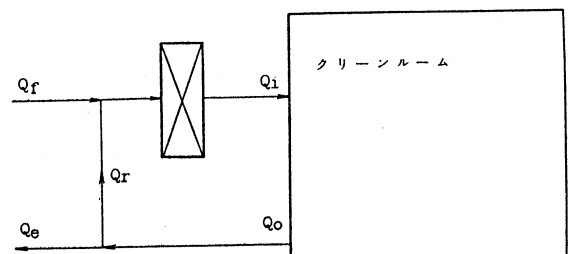
(1) 発生したじんあいは瞬時にクリーンルーム内に拡散する。

(2) じんあいは壁面に付着したり、沈降しない。

(3) 室内発じん量及び流入外気濃度は一定である。

(4) クリーンルームからの漏れ空気はない。

図1に示す各風量は以下の如くなる。



Q_o : クリーンルームからの流出風量
 Q_i : クリーンルームへの流入風量
 Q_s : 外気の取入風量
 Q_r : 循環風量
 Q_e : 排気風量

図1. 空気系統図

$$Q_o = Q_i = KV \text{-----} (2-1)$$

$$Q_f = Q_e = sKV \text{ ----- (2-2)}$$

$$Q_r = (I - s)KV \text{ ----- (2-3)}$$

室内じんあいの増加は、流入外気、循環空気及び室内発じんにより決定される。一方、減少量は、クリーンルームからの排気による。従って、 Δt 時間における室内じんあい数の変化 ΔP は 2-4 式で与えられる。

$$\Delta P = MKVS(1-a)\Delta t + NKV(1-s)(1-a)\Delta t + 60G\Delta t - NKV\Delta t \text{ ----- (2-4)}$$

よって、 Δt 時間における室内じんあい濃度変化 ΔN は 2-5 式となる。

$$\Delta N = \Delta P/V = MKS(1-a)\Delta t + NK(1-s)(1-a)\Delta t + 60G\Delta t/V - NK\Delta t \text{ ----- (2-5)}$$

$$= A\Delta t - B N \Delta t \text{ ----- (2-5')}$$

$$\text{ただし, } A = MKS(1-a) + 60G/V \text{ ----- (2-6)}$$

$$B = K\{1 - (1-s)(1-a)\} \text{ ----- (2-7)}$$

次に、2-5' 式を積分し、室内じんあい濃度 N を求める。

$$N = Me^{-Bt} + A/B(1 - e^{-Bt})$$

$$= Me^{-K\{1 - (1-s)(1-a)\}t} + \frac{NKS(1-a) + 60G/V}{K\{1 - (1-s)(1-a)\}}(1 - e^{-K\{1 - (1-s)(1-a)\}t}) \text{ ----- (2-8)}$$

$$= N_1 + N_2$$

$$\text{ただし, } N_1 = Me^{-K\{1 - (1-s)(1-a)\}t} \text{ ----- (2-9)}$$

$$N_2 = \frac{NKS(1-a) + 60G/V}{K\{1 - (1-s)(1-a)\}}(1 - e^{-K\{1 - (1-s)(1-a)\}t}) \text{ ----- (2-10)}$$

N_1 を清浄化能力線、 N_2 を汚染粒子線と呼ぶ。 N_1 は、清浄空気を室内に送風することにより室内を清浄化する能力を示す。 N_2 は、流入及び室内発じんにより室内が汚染される状態を示す。したがって、室内のじんあい濃度は、 N_1 と N_2 の和で示される。2-8 式において $t \rightarrow \infty$ とすると、じんあい濃度定常値が得られる。

$$N_{t \rightarrow \infty} = \frac{NKS(1-a) + 60G/V}{K\{1 - (1-s)(1-a)\}} \text{ ----- (2-11)}$$

これは、じんあい濃度が飽和した状態である。これらの関係を図 2 に示す。

2-2 外気濃度の影響

外気濃度中、 $0.5 \mu m$ 以上の粒子濃度が $1 \times 10^5 \sim 1 \times 10^7$ ケ / ft^3 に変化したとき、室内のじんあい濃度と与える影響を 2-8 式を用い図 3 に示す。

外気じんあい濃度が、 1×10^5 、 1×10^6 、 1×10^7 ケ / ft^3 のとき、室内のじんあい濃度が、定常値の 1.2 倍になるまでに用する時間は、それぞれ 0.21、0.28、0.35 hour である。従って、外気じんあい濃度が増加するに従って、清浄化される時間が長くなる。しかし、清浄化能力線の傾きは同一であり、室内の清浄化能力は同等である。

次に、外気濃度が室内じんあい濃度の定常値 (2-11 式) と与える影響を図 4 に示す。外気じんあい濃度が高くなるにつれて、室内じんあい濃度の定常値は高くなる。しかし、循環回数 K が少ない場合は、外気じんあい濃度の影響は少ない。

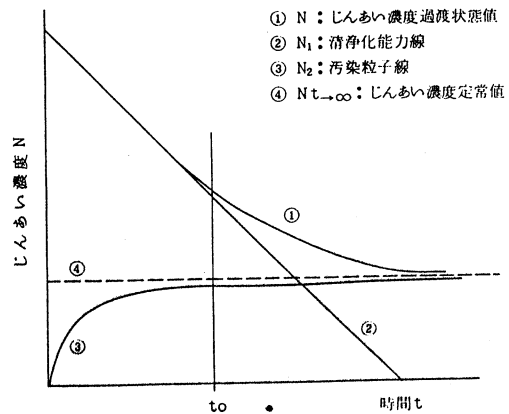


図 2 じんあい濃度線図

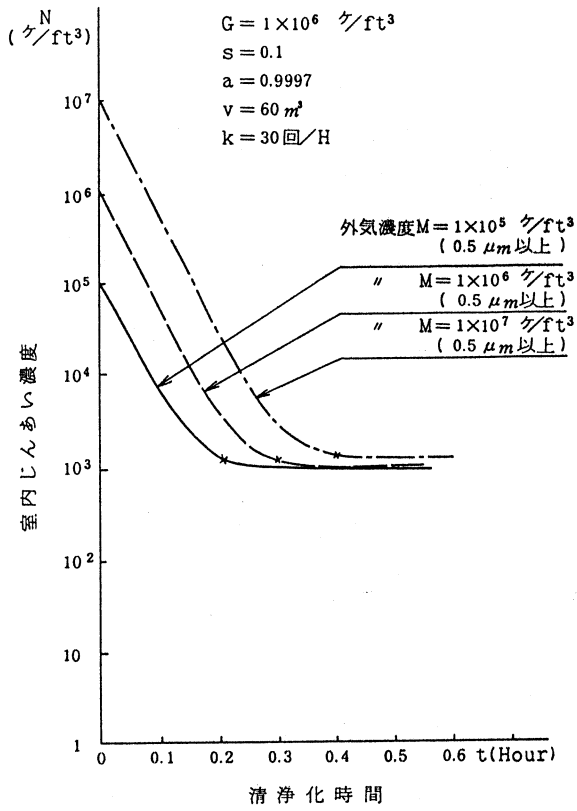


図3. 外気じんあい濃度が室内じんあい濃度に与える影響

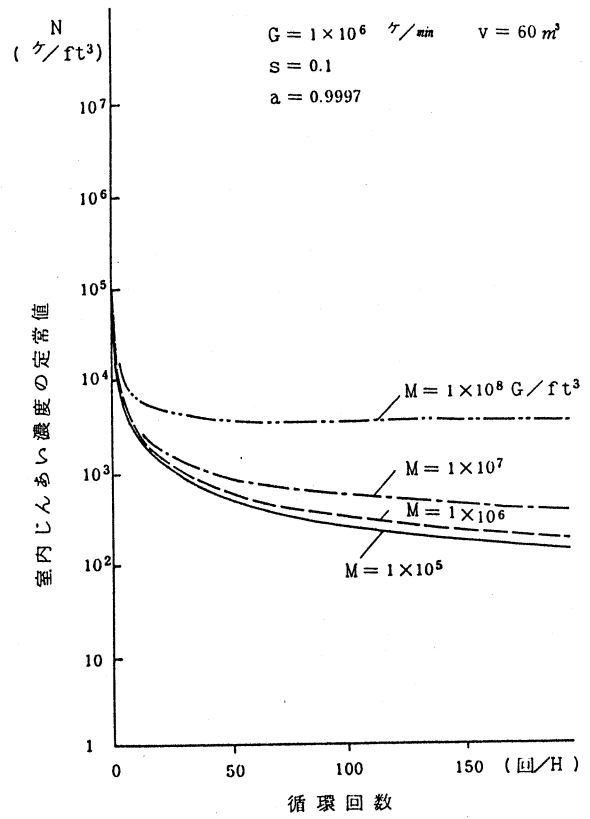


図4. 外気濃度が定常値に与える影響

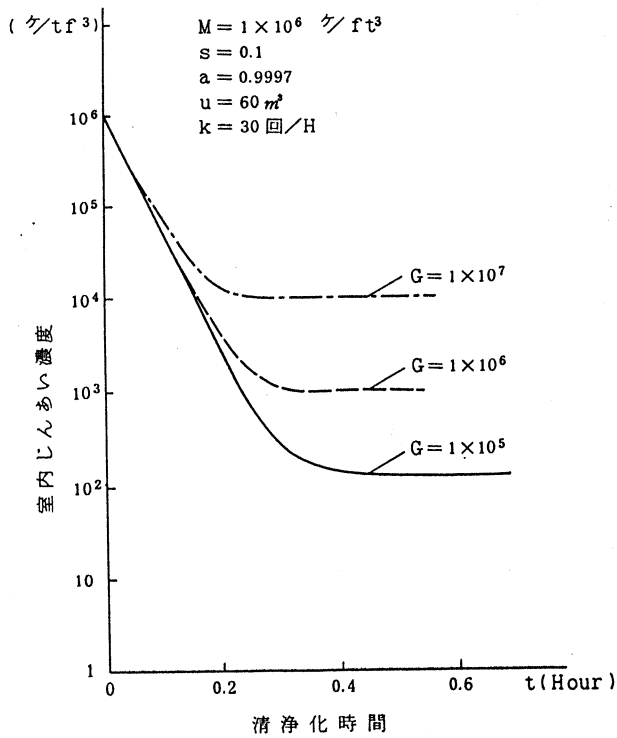


図5. 室内発じんがじんあい濃度に与える影響

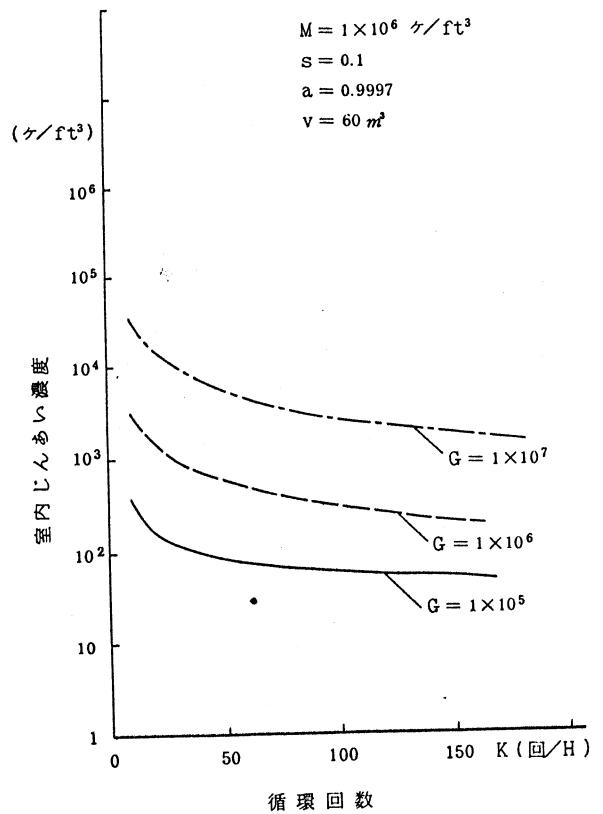


図6. 室内発じんが定常値に与える影響

2-3. 室内発じん量の影響

一般に、室内での発じん量がじんあい濃度に与える影響は大であると考えられている。これを図5に示す。発じん量が、 1×10^5 , 1×10^6 , 1×10^7 G/min と増加すると、室内のじんあい濃度は、飽和するに従い、その差が大となる。しかし、清浄化能力線の傾きは同一であり、清浄能力は同等である。従って、室内のじんあい濃度を低下させるには、室内での発じん量を減少させる必要がある。

図6に、室内発じん量を変えたときの室内のじんあい濃度の定常値を示す。室内の発じん量が増加すると、室内じんあい濃度は著るしく増加する。

2-4 循環回数による影響

室内の清浄化能力は、循環回数が主な要素となる。これを図7に示す。清浄化能力線は循環回数Kの関数であり(2-9式参照)、Kの増加により、清浄化能力線の傾きは急峻となる。

循環回数が定常値に与える影響を図6で見ると、 $K = 10$ 回/H のとき $N = 3,100$ ケ/ft³, $K = 20$ 回/H のとき、 $N = 1,700$ ケ/ft³, $K = 100$ 回/H のとき、 $N = 580$ ケ/ft³ となり、循環回数Kの増加により室内のじんあい濃度は減少している。しかし、一般に経験する程、顕著な減少ではない。

ここで、それぞれの循環回数において定常値になるまでの時間を表1に示す。じんあい濃度の定常値は、各循環回数とも先に述べた如く大差はないが、定常値になるまでに要する時間ははなはだしく異なる。例えば $K = 10$ 回/H のとき、定常値Nは $3,100$ ケ/ft³ であるが、定常値に達する時間は、約1.5時間を要することとなる。よって、この場合、 $K = 10$ 回/H はクリーンルームに適した値とは言えない。また、じんあい濃度の定常値によりクリーンルームを設計することは全く意味のないことが分る。

循環回数 $K = 100$ 回/H では、0.1時間後に定常値になる。従って、循環回数Kが100回/H以上となる場合は非常に短時間で定常状態になると考えられる。局所的に発じんがあっても、すみやかに排除される。よって、このような場合にはじんあい濃度の過渡状態は

3. 定常式による設計の誤り

いままでの説明により、じんあい濃度の定常値に設計法は、実際の値と大巾に異なることが、ほぼ理解出来たと思う。

考慮しなくてよい。じんあい濃度を問題とするのは、循環回数Kが100回/H以下となる場合である。

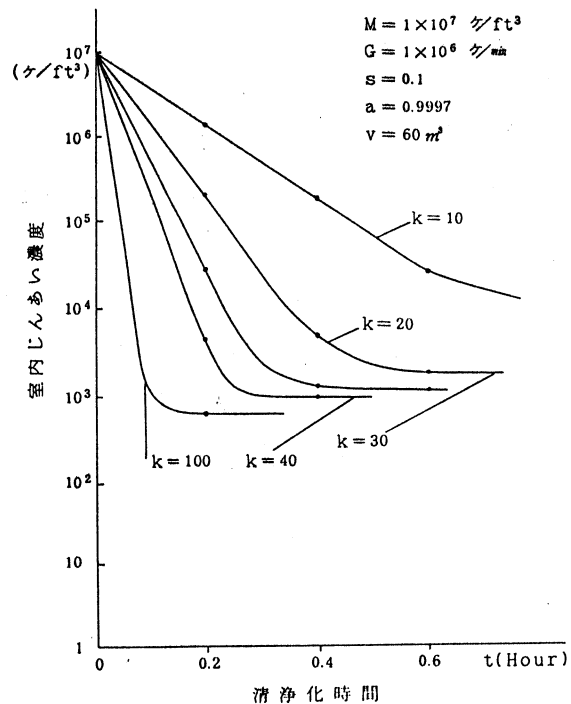


図7. 清浄化能力線図

表1. 循環回数と定常値に達するまでの時間

循環回数 K (回/時)	定常値に達するまでの時間 (時間)	定常値 (ケ/ft³)
10	1.5	3,100
20	0.7	1,700
30	0.5	1,000
40	0.4	750
100	0.1	580

$$G = 1 \times 10^6 \text{ ケ/min} \quad s = 0.1 \quad v = 60 \text{ m}^3$$

$$1 \times 10^6 \text{ ケ/ft}^3 \quad a = 0.9997$$

本項ではじんあい濃度の定常式を用いた設計法の誤りと、それに代る方法として過渡状態を用いた場合について説明する。以下の定数例により説明する。

$$M = 1 \times 10^7 \text{ケ/ft}^3$$

$$G = 1 \times 10^6 \text{ケ/min}$$

$$a = 0.9997 \text{ (HEPA フィルター, 99.97\% 以上)}$$

$$s = 0.1 \text{ (外気量は全風量の 10\%)}$$

$$U = 60 \text{ m}^3$$

この条件で、室内のじんあい濃度を 1,000, 10,000, 100,000ケ/ft³とする場合の循環回数を算出する。また、そのことの定常値に達するまでに要する時間を計算すると表 2 の如くなる。N = 1,000 ケ/ft³ に対して循環回数 K =

40 回/H, それまでに要する時間 t = 0.4 H であるが, N = 10,000ケ/ft³ の場合, 循環回数 K は 2.9 回/H でよく, 定常値になるまで 5 時間もかかる。N = 100,000ケ/ft³ においては, 循環回数 K は 0.3 回/H しか必要としないが, 50 時間経過しないと設計値にならない。これは明らかに, じんあい濃度の定常式による設計値が適切でないことを示している。

表 2. 定常値による設計値

目標じんあい濃度 N (ケ/ft ³)	循環回数 K (回/H)	定常値になるまでの時間 t (H)
10,000	40.2	0.4
10,000	2.9	5
100,000	0.3	50

ここで、目標のじんあい濃度 N に達するまでの時間を指定した場合、つまりじんあい濃度の過渡状態を用いた場合の必要循環回数を図 8 に示す。ここでは、到達時間を 0.2 時間に設定する。N = 1,000, 10,000, 100,000ケ/ft³ に対し、循環回数 K は、それぞれ 15, 35, 150 となり、経験値に近い値となる。

4. 過渡状態式を用いた設計法

以上の検討により、じんあい濃度の過渡状態式を用いた場合の設計法を示す。

4-1 じんあい負荷の設定

クリーンルーム内のじんあい負荷は、外気から取り入れる空気によるものと、室内で発生するものとに大別できる。両者の簡易的な設定法を以下に示す。

(a) 外気じんあい濃度

外気のじんあい濃度は、風速、交通量等によって異なり、広い範囲に分布する。これを図 9 に示す。一般に、粒径 0.5 μm 以上のじんあい濃度は、1 × 10⁵ ~ 1 × 10⁷ ケ/ft³ に分布する。これを分類すると、

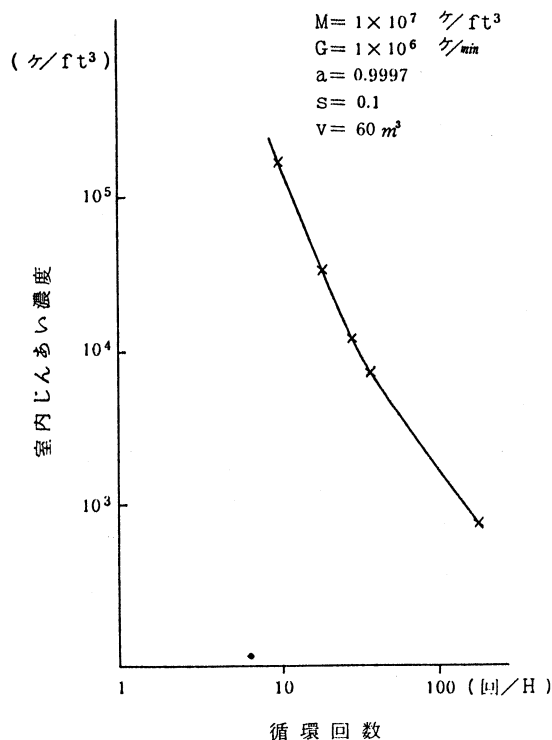


図 8. 必要循環回数

表3の如くなる。

表3. 外気じんあい濃度

	じんあい濃度(ケ/ft ³)
清 淨 環 境	~ 5 × 10 ⁵
一 般 環 境	5 × 10 ⁵ ~ 5 × 10 ⁶
汚 染 環 境	5 × 10 ⁶ ~

この表より、適用されるクリーンルームの外気じんあい濃度を選択すればよい。

(b) 室内発じん量

室内での発じん量は、人からの発じんと床、壁面からの発じんに大別できる。人体からの発じん量は、オースチンの汚染係数³⁾が参照される。これを表4に示す。

表4. オースチンの汚染係数

発生率	活動状況
100,000個/分	起立または着席—活動なし
500,000 "	起立または着席—前腕および頭の軽い運動
1,000,000 "	—全腕, 手, 頭および胴の運動
2,500,000 "	椅子に座る動作または起立動作
5,000,000 "	歩行—2マイル/時(3.6Km/h)
7,500,000 "	— 3 $\frac{1}{2}$ " (5.6 ")
10,000,000 "	— 5 " (8 ")
10,000,000 "	椅子に登る動作
15,000,000 "	} 跳躍
30,000,000 "	

クリーンルーム内で人の動作は、比較的小運動と考えられる。一般に人からの発じん量は1×10⁷ケ/min 以下と考えてよい。

近年、発じん性の少ない無じん衣が開発されており、これによりさらに発じんを低下させることは可能となっている。また、床材に塩ビシート等を用い、床からの発じんの減少に努めている。

これから、一人当りの発じん量Gを表5に示す。

室内の作業者をPとすると、室内での発じん量Gは4-1式で表わされる。

$$G = G \times P \quad \text{ケ/min}$$

$$P = \text{作業者数(人)}$$

次に、ルーム容積当りの発じん量G'

を4-2式に示す。

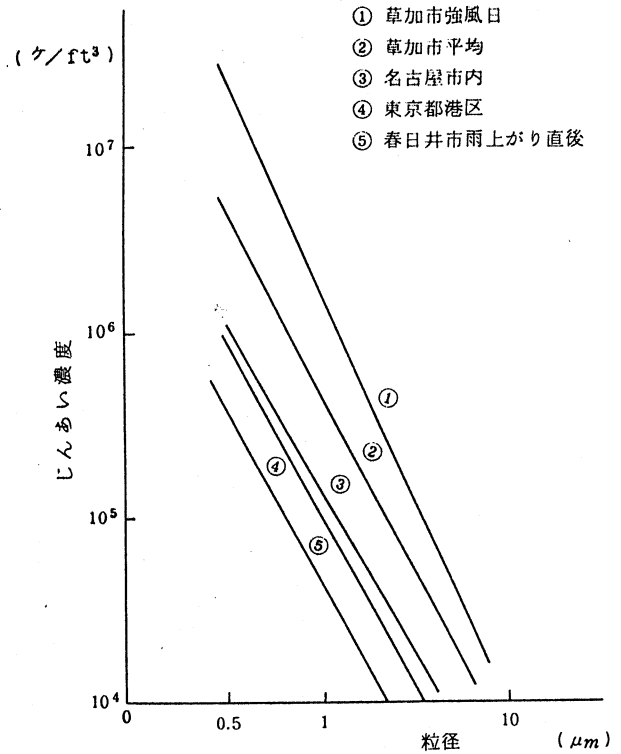


図9. 外気じんあい濃度

表5. 一人当りの発じん量

動作	発じん量G(ケ/ft ³ 人)
軽作業	1 × 10 ⁵ ~ 1 × 10 ⁶
中作業	1 × 10 ⁶ ~ 1 × 10 ⁷
激しい動き	1 × 10 ⁷ ~ 3 × 10 ⁷

$$G' = 60 / v' \times G \quad \cdot$$

$$= 60 / v' \times G \times p$$

$$= 1.69 \times G \times p / v \quad (\text{ケ/ft}^3 \cdot \text{H})$$

ただし、V': ft³

$$V : m^3$$

とする。

4-2 クリーンアップタイムの設定

循環回数を決定する前に、室内のじんあい濃度の目標値に達するまでの時間（ここでは、クリーンアップタイムと称す）を決定しなければならない。クリーンルーム内の発じん量は、その使用法により異なる。例えば、人の出入が多かったり、発じんが多い場合は、清浄化能力を増して、クリーンアップタイムを小とするよう設計しなければならない。しかし一方、自動機器等の導入により室内のじんあい負荷の変動が少ない場合は清浄化能力を低下させ、クリーンアップタイムを大とすることも可能となる。ここでは、一般的な値として、0.2時間をクリーンアップタイムとする。

4-3 循環回数の決定

循環回数の決定すれば、クリーンルームの必要風量が求まる。4-1, 2項で選定した外気じんあい濃度 M 、発じん係数 G' を用い、外気じんあい濃度-発じん係数曲線 ($M-G'$ 曲線 図10~図12)により、適切な循環回数 K を決定すればよい。

ここで、下記の条件を例にとる。

- 室内じんあい濃度 $N = 10,000 \text{ヶ}/\text{ft}^3$
- 外気じんあい濃度 $M = 1 \times 10^7 \text{ヶ}/\text{ft}^3$
- 室内発じん量 $G' = 1 \times 10^7 \text{ヶ}/\text{ft}^3 \cdot \text{H}$
- 全風量に対する新鮮空気量 $S = 0.1$
- クリーンアップタイム $t = 0.2$

この場合、図11を用い、 M 及 G' 値の交点を求めると、 $K = 40$ 回/H付辺となる。従って、 $K = 40$ 回/Hが必要循環回数となる。

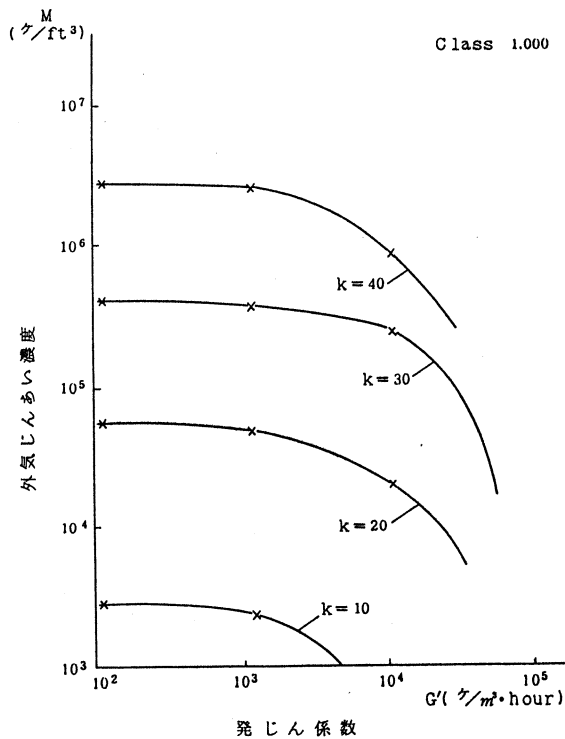


図10. 外気じんあい濃度-発じん係数曲線

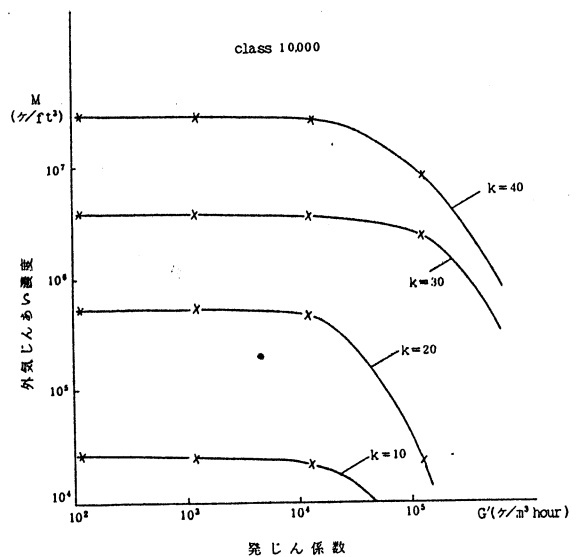


図11. 外気じんあい濃度-発じん係数曲線

4-4. 適用される清浄度

本項で述べたじんあい濃度の過渡状態式は清浄度レベル、クラス 1,000 以上のクリーンルームに適用される。クラス 100 では、瞬時に定常値に達し、過渡状態式は適用されない。

5. おわりに

クリーンルーム内のじんあい濃度を表わすには、じんあい濃度の定常式では適格に表わすことはできない。これに代わる方法として、クリーンルームの清浄化能力を考慮し、じんあい濃度の過渡状態式を用いた設計法を確立することができた。実際に、クリーンルーム内の発じん量は時間的に大きな変化があり、これを一定として計算することは不可能である。このため、定常式では不合理が生じた。これに対し、清浄化能力を加えた今回の方法は、瞬時的な発じんが起った場合、実際のクリーンルームのじんあい濃度に追従することができる。

今回は、じんあい濃度の過渡式の導入、及びその用い方を示した。今後、不確定要素である発じん状態、吹出される清浄空気の分布等、解決しなければならない問題が残される。

参考文献

- 1) 吉沢普：空気浄化計算法，空気調和衛生工学：41-6
- 2) 早川他：空気清浄室に関する研究：空気調和・衛生工学：46-9
- 3) P. R. Austin: Contamination Index: proc. 4th, Tech, Conf, AACC

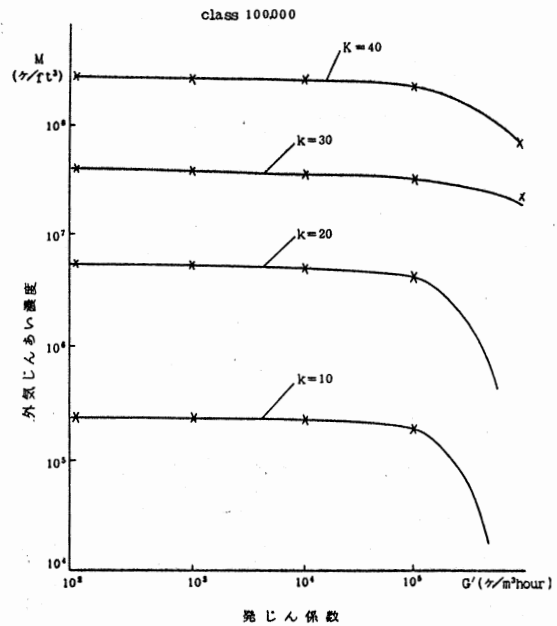


図12. 外気じんあい濃度-発じん係数曲線