クリーンルーム評価における逐次検定法の特徴

SEQUENTIAL SAMPLING FOR EVALUATION OF LOW CONCENTRATION IN CLEANROOM

藤井修二^{*1}, 湯浅和博^{*2}, 今井田尚文^{*3}, 西村直也^{*4}, 田村 一^{*5}
Shuji FUJII, Kazuhiro YUASA, Naofumi IMAIDA, Naoya NISHIMURA
and Hajime TAMURA

The sequential sampling is one of the evaluation methods for high class cleanroom to reduce sampling duration.

In this paper, sequential sampling is simulated by Monte Carlo method and characterized in the case of different concentration and its distribution of particles. Two types of model are considered as sequential samplings. One is the particle arrival model and the other is the constant unit sampling model.

These models are applied to simulate particle concentration.

Keywords : cleanroom, sequential sampling, monte carlo method
クリーンルーム, 逐次検定法, モンテカルロ法

1. はじめに

高潔度クリーンルームにおいては、潔度評価の指標となる浮遊微粒子の濃度が極めて低く、平均濃度から統計的に潔度を評価する従来の評価方法においては、統計的評価に十分な粒子数を得るために大量のサンプリング空気量を必要とし、莫大な計測時間を要するという問題点が生じている。

日本では泉本らが、高潔度クリーンルーム評価において、確率統計的処理をすることにより潔度の推定を行うほか、計測時間の短縮に有効な方法として逐次検定法を提案し、評価線図を作成した¹⁾。現在、逐次検定法は日本工業規格(JIS B 9920)²⁾に採用されている。また米国連邦規格(FED-STD-209)においても1992年に209Dから209Eに改訂されるにおよび、クーバーらの提案による逐次検定線図をもとにした、逐次検定法が導入されているしかし、両者いずれにおいても対象空間の濃度分布との対応や、評価特性に関する検証は十分ではないと考えら

れる。

本研究の目的は、モンテカルロ法を用いたシミュレーションにより、逐次検定法の潔度評価特性を把握する点にある。本報では、まず、逐次検定法のシミュレーションモデルを作成し、モデルとしての評価特性の検討を行った。次に、クリーンルームの潔度評価に逐次検定法を用いた場合の、評価対象空間の平均粒子濃度およびその分布形に対する特性について検討した。

2. 逐次検定法

図-1に逐次検定法の評価線図を示す。評価線図は横軸にサンプリング回数、縦軸に粒子の累積カウント数を取り、線に区切られた「合格」、「不合格」及び「サンプリング続行」の3つの領域からなっている。逐次検定法では、サンプリングごと^{*1}の粒子計数値の累積数をプロットし座標が合格(不合格)領域に入った時点で「合

本論文は文献3), 4)を修正・加筆したものである

^{*1} 東京工業大学工学部建築学科 助教授・工博

^{*2} 東京工業大学工学部建築学科 助手・工博

^{*3} 清水建設(株)設計本部・工修

^{*4} (株)大林組東京本社設計本部・工修

^{*5} (株)テクノ菱和技術本部

Assoc. Prof., Tokyo Institute of Technology, Dr. Eng.

Research Assoc., Tokyo Institute of Technology, Dr. Eng.

Shimizu Corp., M. Eng.

Obayashi Corp., M. Eng.

Techno Ryowa Ltd.

格（不合格）」の判定を下す。どちらの領域にも入らず計数値が10以上に達した場合は判定不能となる。

信頼区間法では、観測値に対するポアソン分布の上側信頼限界及び下側信頼限界によって、評価線図における領域の境界が決定される。一方、クーパーらによって提案されているワルドミニマックス法においては、ワルドの理論により2本の直線となる境界線が決定される。⁵⁾

図-1 逐次検定法の評価線図

- * 1 1 サンプル量はクラス別上限許容粒子数(個/㎡)に対して1(個/回)の粒子が検出されると期待される値で表される。
 例えば対象粒径0.1 μmのクラス1は上限許容粒子数は1.0³(個/㎡)であるので1 サンプル量は1(個/回)/1.0³(個/㎡)=0.1(㎡/回)となる。

3. モンテカルロ法のシミュレーションモデル

粒子計数器に検出される粒子の到着モデルとして、図-2に示すように一定時間到着粒子数モデルと粒子到着間時間モデルを検討した。一定時間到着粒子数モデルは一定時間における一定体積のサンプリング空気中に検出される粒子数を表現する離散分布型モデルであり、一方粒子到着間時間モデルは、2つの粒子が検出される時間間隔を表現する連続分布型モデルである。

本研究においては、空間の粒子濃度が時系列的に変化しない場合、粒子計数値は平均濃度によって定まるポアソン分布に従うと仮定している。事象がポアソン分布に従う場合、事象が起こる時間間隔は指数分布に従う。

図-3に、粒子到着間時間に対して設定した分布の確率密度関数を示す。アーラン分布をガンマ関数により拡張したもので、パラメータkが正整数の時アーラン分布に一致し、k=1の時指数分布に一致する。アーラン分布の変動係数は $1/\sqrt{k}$ で与えられ、kを大きくすると規則的な到着、k=1でポアソン(ランダム)到着を表現することができる。パラメータkにより分布形を変化させることとした。

シミュレーションに用いる算術乱数は表-1に示す乗算型合同法の線形漸化式により発生させた。初期値 X。

a) constant unit sampling model

P_i : particle number at i-th sampling
 t : i-th sampling time(min; const.)
 V : i-th sampling volume(m³; const.)
 v : sample flow rate(m³/min)
 $V=vt$
 C_i : accumulated particle concentration at i-th sampling(p/m³)
 $C_i = P_i / (V_i)$

b) particle arrival model

t_j : interval time between j-1 and j-th particle arrival(min)
 V_j : sampling air volume for t_j (m³)
 $V_j = vt_j$
 C_j : accumulated particle concentration at j-th particle arrival(p/m³)
 $C_j = j / V_j$

図-2 一定時間粒子到着数モデルと粒子到着間時間モデル

図-3 粒子到着間時間分布の確率密度関数

表-1 一様疑似乱数の発生方法

(congruential method)

$$X_i = C \cdot X_{i-1} \pmod{1}$$

$$C = 10011$$

$$X_0 = .53952704$$

及び係数 C を設定して乱数列を作成し、頻度検定、系列相関検定、連の検定により最適な一様疑似乱数列を選定した。

一様疑似乱数を、逆関数法により粒子到着間時間の分布形に従う乱数に変換する(粒子到着間時間モデルに対応する)。図-4は、その変換した乱数列の頻度分布をk=0.5, 1.0, 1.5, 2.0に対して示したもので、確率密度関数によく一致していることが確認できる。さらにこの乱数を、一定時間に検出される粒子数の分布に従う乱数へと変換し(一定時間粒子到着数モデルとなる)、こ

の乱数を用いて逐次検定をシミュレートを行い、合格、不合格及び測定不能の各判定回数及び判定所要時間を結果として出力する。

図-4 乱数の頻度分布

4. 一定時間粒子到着数モデルと粒子到着間時間モデル

シミュレーションモデルとしての特性を把握することを目的に、一定時間粒子到着数モデルと粒子到着間時間モデルにより逐次検定法のシミュレーションを行った。分布形についてはポアソン分布と指数分布を設定した。なお本報で示した各図表は、クラス1、粒子計数器の吸引流量 100 l/min の場合を表したものであるが、判定までの平均所要時間及び濃度の軸に対し表-2に示す係数を乗じることによりクラス2～4に対応し、また実際の時間単位：分に変換することができる。

平均到着粒子濃度(以下、平均濃度)に対する各判定確率を図-5に、また平均判定所要時間を図-6に示す。粒子到着間時間モデルは一定時間粒子到着数モデルに比べて左寄り、すなわち不合格寄りの判定となっており、また平均判定所要時間については、特にクラス基準より低濃度において差が大きくなっている。これは同じ事象を表現する場合でも、粒子到着間時間モデルは一定時間粒子到着数モデルに比べ、評価線図において左寄りの座標を通るためと考えられる。

以上の結果から、実際の逐次検定のサンプリング法と一致する一定時間粒子到着数モデルを以降のシミュレーションに用いることとした。

表-2 時間係数と粒子濃度係数

- for time -	- for particle concentration -
$A = \frac{10^3}{SV \cdot 10^{CL}}$	$B = 10^{CL-1}$
SV : air flow rate (l/min)	
CL : cleanliness class

図-5 平均濃度に対する各判定の確率

図-6 平均濃度に対する平均判定所要時間

5. 信頼区間法とワルドミニマックス法

信頼区間法とワルドミニマックス法について、清浄度クラスのクラス1を対象として、平均濃度を $10^0 \sim 10^2$ (個/m³) まで40段階、分布形のパラメータkを0.1～2.0まで20段階に変化させて、各1000回のシミュレーションを行った。

図-7に平均濃度及びその分布形に対する各判定の確率、平均判定所要時間を示す。両検定法ともk値の増加に伴い判定不能の確率が増加し、その傾向は基準濃度付近で特に顕著であり、それに伴って判定所要時間も長くなっている。

また、図-8に平均濃度に対する各判定の確率を分布形のパラメータk=1に対して示す。信頼区間法は判定力が低く、基準濃度付近で約80%の確率で判定不能となっており判定所要時間が相対的に長くなっている。ワルド法は、クラス基準以上の平均濃度において合格判定の確率が30%を越えているのに対して、信頼区間法は10%以下と安全側の判定を下すことがわかる。

95%の確率で合格と判定される平均濃度は、k=1のとき信頼区間法で3.7(個/m³)ワルド法で4.7(個/m³)であり、k値が小さくなり粒子到着が不規則になると急

激に低くなる傾向にある。不合格判定では、信頼区間法で26.9 (個/㎡) ワルド法で20.2 (個/㎡) でk値による変化はあまりない。

図-7 平均濃度および分布形に対する判定確率と平均所要時間

図-8 平均濃度に対する各判定の確率 (k=1)

6. 逐次検定法による各測定点及び空間全体の評価

図-9に、J I Sに規定されている信頼区間法による

逐次検定の評価手順を、また、図-10にクーパーらにより提案されているワルド法を変形した逐次検定評価線図を示す(以下ワルド応用法とする)⁶⁾。J I Sでは2回を限度に逐次検定を行い、クラスと対象粒径により決められる最小サンプリング量(クラス1・対象粒径0.1 μm以上の場合 $2,000 \times 10^{-3} \text{ m}^3$)の3倍の空気量をサンプリングし、計数値の平均濃度と上限濃度に0.6をかけた値と比較して判定を行う。ワルド応用法は、最大カウント数20を上限値として設定している。

図-9 日本工業規格における逐次検定法の評価手順

図-10 クーパーらによる逐次検定法の評価線図

次に、実際のクリーンルーム評価方法に準じた逐次検定法のシミュレーションを行い、一測定点の評価特性を信頼区間法(J I S)およびワルド応用法により検討した。図-11に、両評価法による合格判定確率と平均判定所要時間を平均濃度およびその分布形に対して示す。ワルド応用法では、基準濃度付近において合格と判定される確率が約50%に達し、判定所用時間は相対的にJ I Sの評価法より短いことがわかる。

図-12は平均濃度に対するJ I Sの評価方法の判定確率を示したものである(k=1)。基準濃度付近において約70%程度が最終検定に至っており、また最終検定において合格と判定される確率は、概して10%以下となっている。

平均濃度に対する合格判定確率を図-13に、平均判定

所要時間を図-14に示す($k=1$)。JISによる正規の評価方法(以下JIS正規法)に関しては、平均濃度が上限濃度以下であった場合を合格としており、“2回の逐次検定で判定不能の場合、最終検定を行わずに不合格の判定を下す”とした場合でも、判定確率はあまり変わることなく大幅に判定所要時間が短縮され、最終検定が平均判定所要時間に大きく影響することがわかる。またJIS正規法では、吸引流量3(ℓ/min)の粒子計数器を使用したとすると約33時間の計測時間を必要とするが、逐次検定法を用いた評価方法は計測時間の短縮に有効であるといえる。

図-15は95%の確率で合格及び不合格と判定される平均濃度を示したものであるが、逐次検定法はJIS正規法に比べて分布形の変化の影響が大きいことがわかる。

図-11 平均濃度および分布形に対する合格判定確率と平均所要時間

図-12 平均濃度に対する各判定確率(日本工業規格)

次に、逐次検定法を用いた評価方法及びJIS正規法による空間全体の評価特性を検討した。測定点を6点、空間全体の粒子濃度が一樣であると仮定し、各測定点に

図-13 平均到着粒子濃度に対する合格判定確率

図-14 平均到着粒子濃度に対する平均判定所要時間

図-15 95%の確率で合格及び不合格となる平均到着粒子濃度

おける合格判定の確率を6乗することにより逐次検定法の合格判定の確率を求めた。図-16は $k=1$ として、空間全体の評価において逐次検定法および正規評価法の平均濃度に対する合格判定確率を示したもので、いずれの評価方法によっても、クラス基準濃度以上の平均濃度において合格と判定される確率はほぼ0となっている。図-17に95%の確率で合格および不合格と判定される平均濃度を示す。両逐次検定評価法ともJIS正規法より厳しい安全側の判定を下すことがわかる。

図-16 平均到着粒子濃度に対する合格判定確率

図-17 95%の確率で合格及び不合格と判定される平均濃度(空間全体)

7. おわりに

本研究では、モンテカルロ法によるシミュレーションに基づき、クリーンルームの清浄度評価における逐次検定法の特徴を把握しその有効性を確認した。本研究の成果をまとめると以下の通りである。

(1) 粒子計数器に検出される粒子の到着分布シミュレーションモデルとして、一定時間粒子到着数モデルと粒子到着間時間モデルを設定し、モデルとしての特性を明らかにした。

(2) 信頼区間法とワルドミニマックス法の平均到着粒子濃度及びその分布形に対する清浄度評価特性を把握した。

(3) 光散乱式粒子計数器の偽計数の発生頻度分布をポアソン分布とし清浄度評価への影響とともに、発生頻度の許容上限値を示した。

(4) 日本工業規格に規定されている逐次検定法及びクーパーらにより提案されているワルドミニマックス法を変形した評価法のクリーンルームの各測定点における空間全体における評価特性をJIS正規法とともに比較し明らかにした。

なお逐次検定法は、クリーンルームに限らず低濃度評価に応用できるものと考えられ、今後他分野への応用も望まれる。

〈参考文献〉

- 1) 泉本利章他：スーパークリーンルームの確率論的清浄度評価，第4回空気清浄とコンタミネーションコントロール研究大会予稿集，PP. 99～104，1985
- 2) 日本規格協会：JIS B 9920，クリーンルームにおける浮遊微粒子の濃度測定及びクリーンルームの空気清浄度の評価方法，1990
- 3) 藤井修二他：クリーンルームの清浄度評価における逐次検定法の特徴 その1 モンテカルロ法のシミュレーションモデル，日本建築学会大会学術講演梗概集，PP. 689～690，1991
- 4) 藤井修二他：クリーンルームの清浄度評価における逐次検定法の特徴 その2 逐次検定法による測定点および空間の評価，日本建築学会大会学術講演梗概集，PP. 691～692，1991
- 5) D.W.Cooper：A Sequential Sampling Statistics for Evaluating Low Concentrations，Journal of the environmental science(Sep/Oct)1988
- 6) D.W.Cooper：A Sequential Sampling Plan for Federal Standard 209，Journal of the IES(Sep/Oct)1990

(1993年6月10日原稿受理，1993年10月27日採用決定)