

実務での管理図の応用：検出力や実験計画法との関連

横河電機（株）半導体センター 小川 昭

1. はじめに

「QC 7つ道具」の1つである管理図は、工程の管理状態を判断するためのものである。管理状態にない場合はその原因を究明する必要があるが、管理図自体は原因を指摘することができない。このため、「管理図は役に立たない」といわれることがある。管理図を実務で活用するため、その特徴を理解したうえで、原因究明に必要な検出力とサンプルサイズの問題を検討し、実験計画法との連携を考察する。

2. 管理図の特徴

管理図の主な特徴と実務での注意点は以下のようなものである

- 特徴
- (1)時系列データを整理する系統的、合理的な方法
 - (2)プロセスへのランダムでない影響を明確にする
 - (3)不良が発生する前に、工程の問題を指摘することができる

- 注意点
- (1)問題を明らかにするのに時間がかかる
 - (2)問題を指摘するが、その原因を指摘しない
 - (3)管理されたプロセスが必ずしも能力を持つとは限らない

3. 実務への適用事例

横河電機の差圧伝送機で使用されているシリコンセンサーは半導体ウエハプロセスを用いて製造されている。そのプロセスで管理図を適用した事例を紹介する。

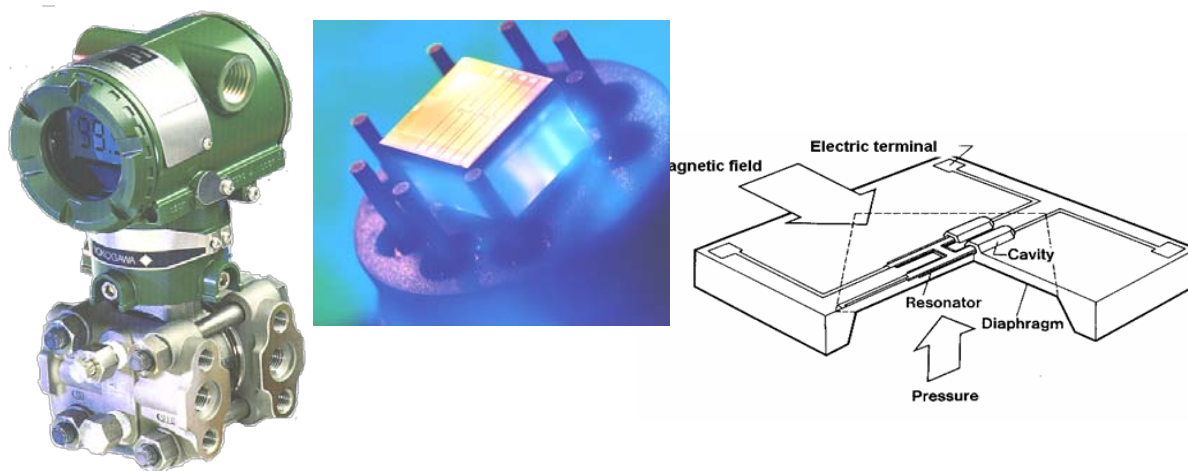


Fig1 差圧伝送器（左），内部のシリコンセンサー（中央），シリコンセンサーの構造（右）

3-1. 異物数管理の概要 半導体ウエハプロセスには、洗浄、酸化・拡散、露光・現像、エッチング、成膜などの工程がある。洗浄工程では、ウエハ表面の異物を除去する「洗浄能力の管理」だけでなく、周囲から付着する異物の数を一定値以下に維持する「ウエハダスト管理」(Wafer Dust Quality Control : WDQC) も重要である。異物の発生源は、ウエハ自体、純水、薬品、洗浄機及び洗浄治具、作業員、クリーンルーム環境などがある。またウエハの移載方法（機械化または手作業）や測定方法（異物粒径、測定器種類）なども WDQC に大きく影響する。WDQC は日常作業として実施され、主に洗浄機の「自己発塵量」を管理していることになる。その方法は、十分に清浄なウエハ 3 枚を洗浄機の Position1 の Slot1, 10, 25 にセットして洗浄し、洗浄前後の異物増加数を測定するもので、装置異常の有無をチェックしていることになる。概要を Fig2 に示す。異物数を測定する測定器は洗浄前後とも同じもの（1 台）を使用している。

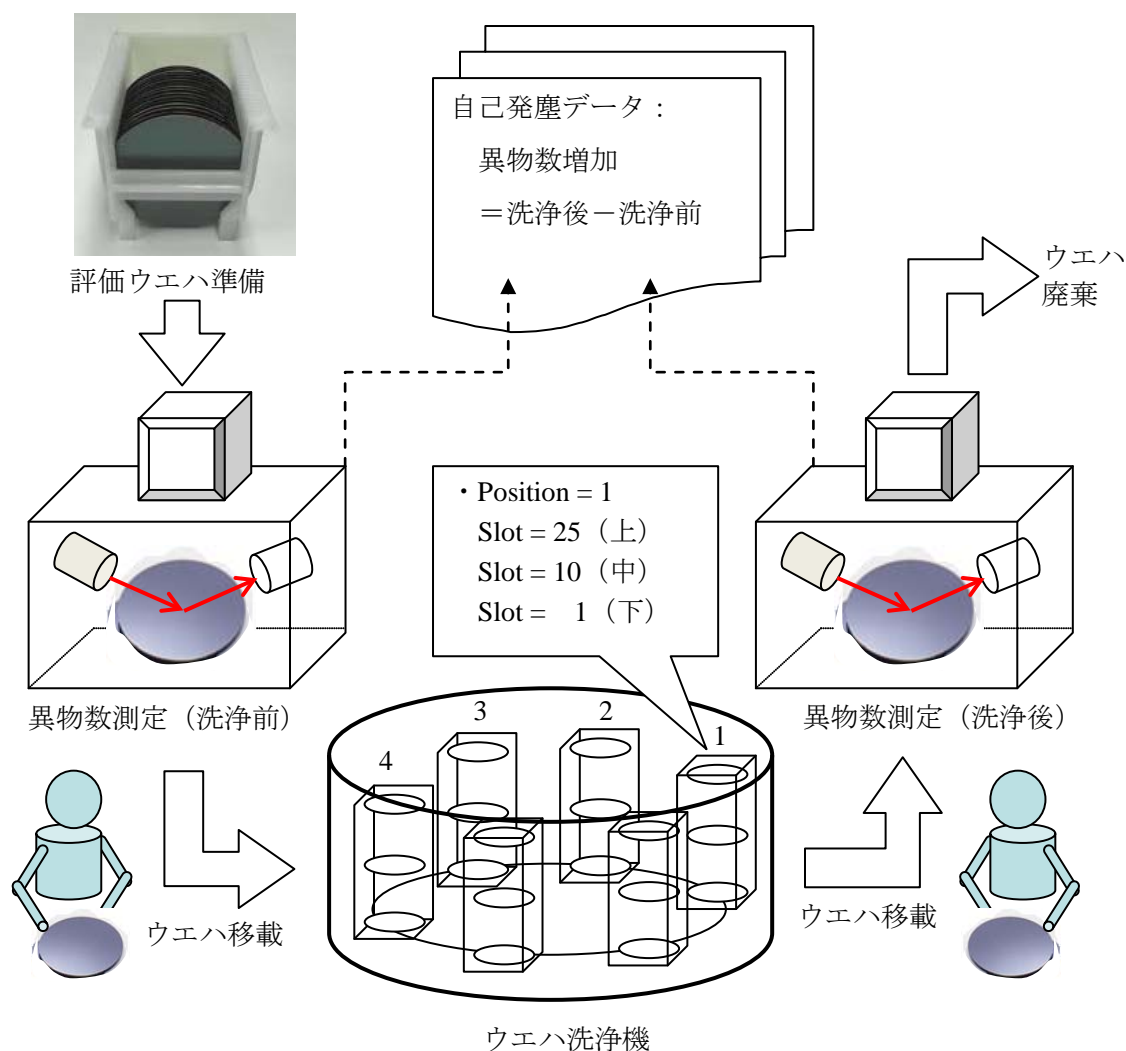


Fig2 ウエハ洗浄機の自己発塵データ収集の概要

3-2. 現状把握：安定状態 装置が安定状態にあった 2011/5/6 から 2011/9/30 までの 27 週間の、自己発塵による異物数を Slot ごとに C 管理図とヒストグラムに示したものが Fig3 である。ヒストグラムから明らかなように異物数の分布は正規分布ではない。一般にキズやピンホールなどの欠点数はポアソン分布に従うとされており本件も同様と思われる。異物数の平均は Slot1, 10, 25 の順に大きく C 管理図の UCL も同様である。異物数は UCL を超えることがたびたびあるが、WDQC による装置管理としては Slot によらず経験的に管理限界値を 20 としている（補足説明は 3-12：課題を参照）。Slot1 での突発的な異常値の発生が 1 回あるが原因は不明である。

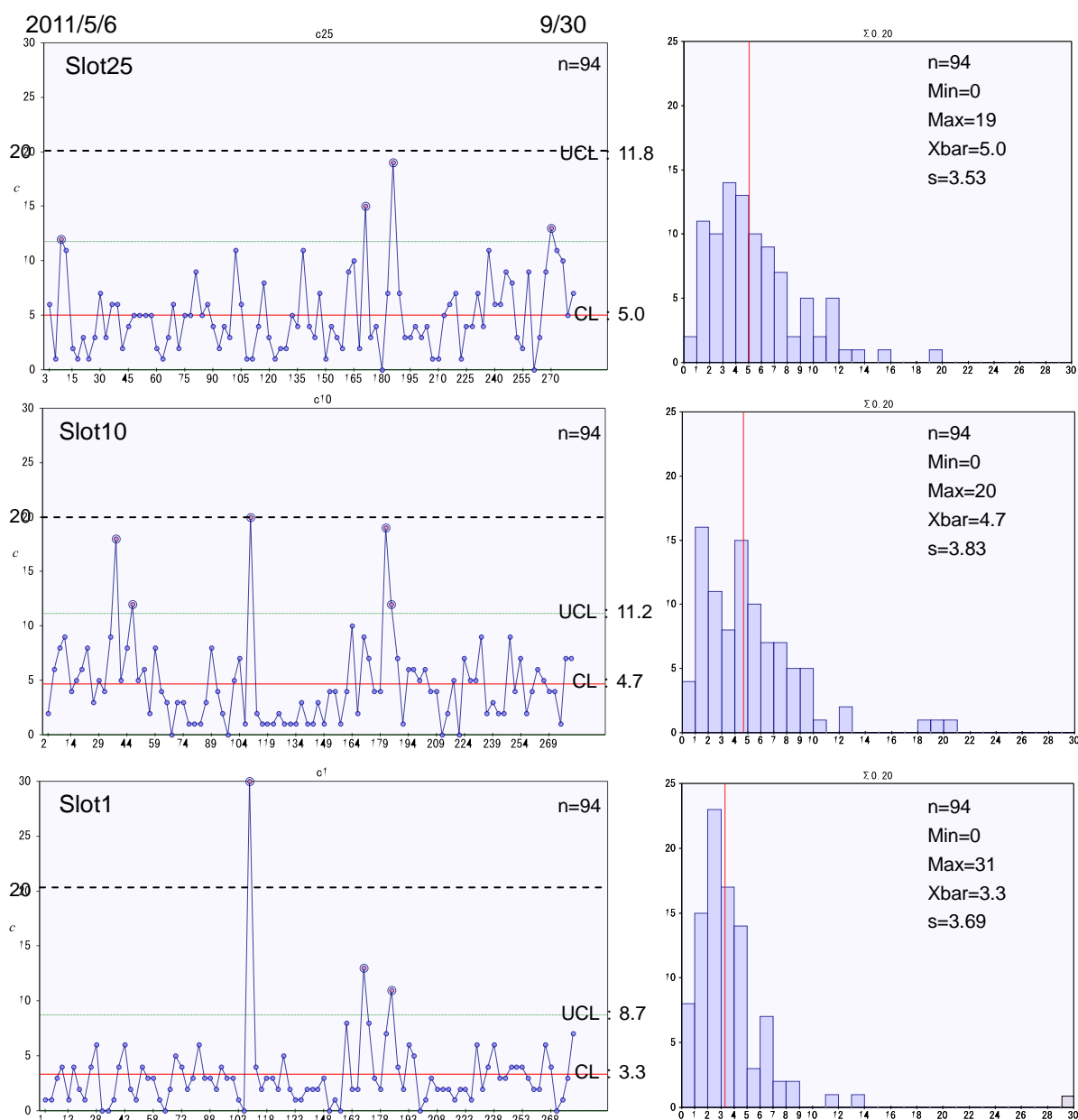


Fig3 Slot ごとの C 管理図 (2011/5/6~2011/9/30) とヒストグラム

3-3. 問題の定義：異物数の増大 その後 2012/2/13 までのデータを Xbar-R 管理図として Fig4 に示す。2011/11 初旬から Xbar, R とともに増加傾向にあり 11/17 では (Xbar, R) = (27, 34) と管理限界値の 20 を初めて超えたためライン停止し処置 (5M の点検) をしたが改善の兆しがなかった。再度 5M を点検し, ウエハ種類を 11/9 (一点鎖線部) に Wf1 から Wf2 に変えたことが原因と推定し, 詳細解析を開始した。ウエハと slot で層別した C 管理図を Fig5 に示す。Wf2 は異物数大の傾向があり, Slot10, 25 で顕著であることがわかる。

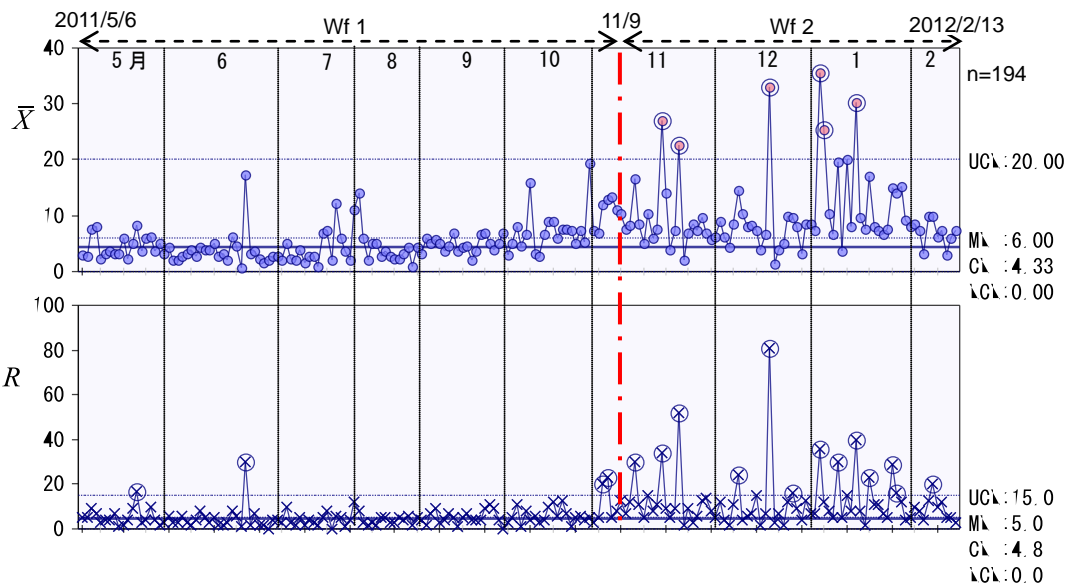


Fig4 異物増加数の Xbar-R 管理図 (2011/5/6~2012/2/13)

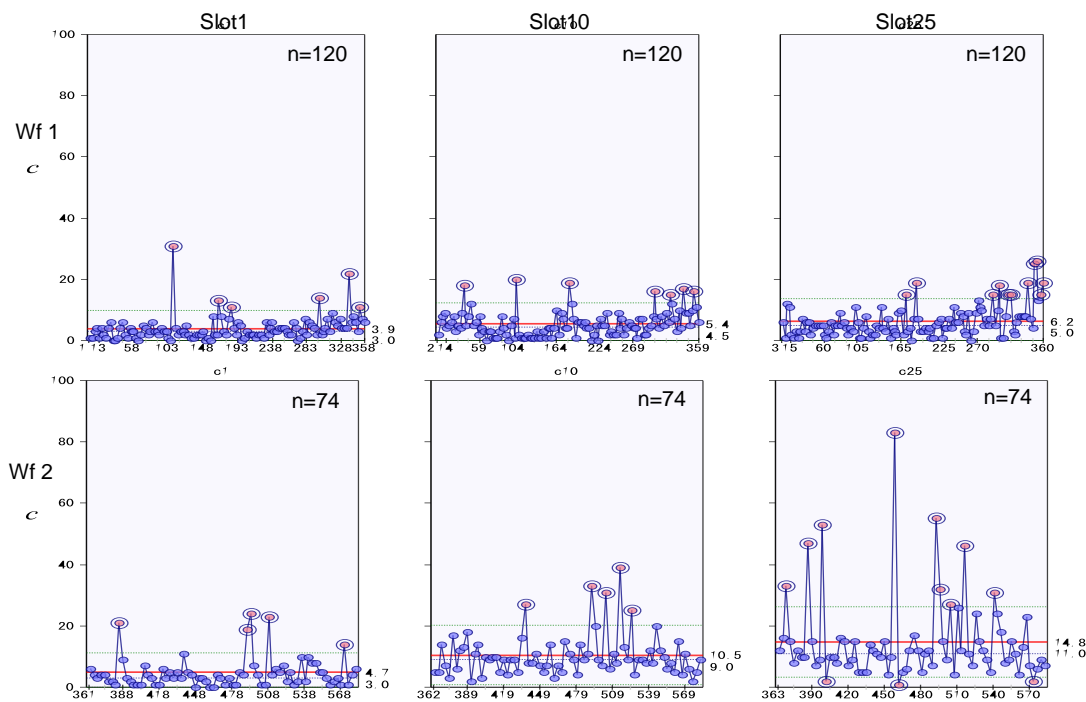


Fig5 Wf と Slot による層別した C 管理図：Wf1 (2011/5/6~11/8), Wf2 (1/11/9~2012/2/13)

3-4. 現状把握 3 : Wf ウエハと Slot により層別したヒストグラムを Fig6 に示す. 分布形状は Fig3 と同様ポアソン分布に近い. Wf2 は Wf1 より平均値, 標準偏差とも大きい. Fig6 のデータを対数変換 (0 のあるデータのため 0.5 を加えて Log10 で変換) したものを Fig7 に示す. 平均値の差は Slot1, 10, 25 の順にそれぞれ 0.049, 0.314, 0.358 である. Slot1 では Wf1, 2 の平均値の差は小さいが Slot25 では顕著である. Wf1 から Wf2 への変更が異物数増加の原因であるかを確認するため両者を同時に洗浄し平均値の差を検出したい. Slot25 で確認することとして実験回数と検出力を検討する.

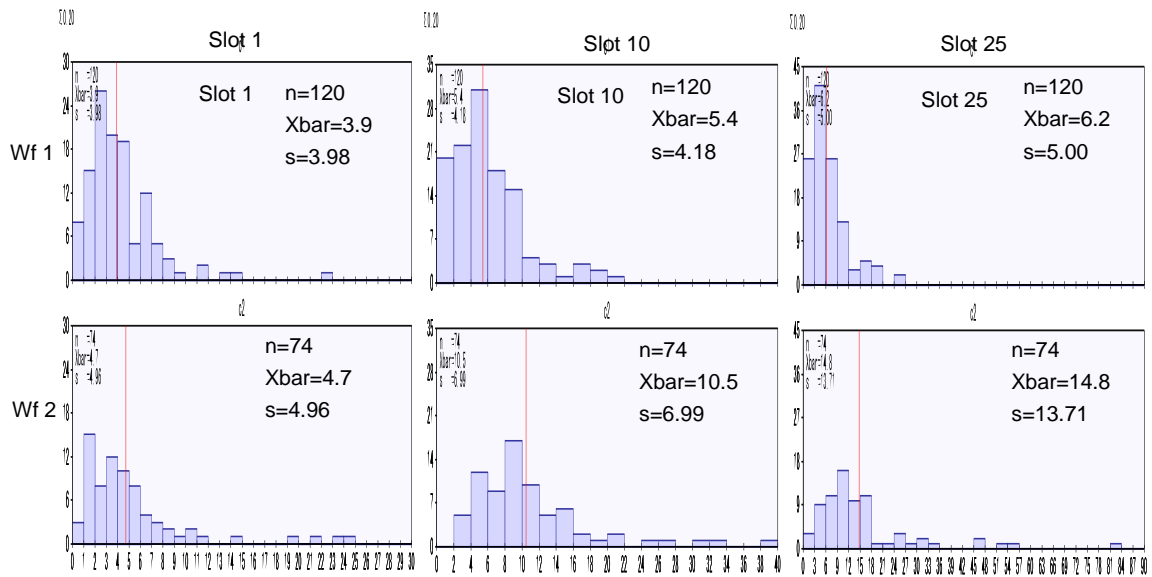


Fig6 Wf と Slot による層別したヒストグラム: Wf1 (2011/5/6~11/8), Wf2 (1/11/9~2012/2/13)

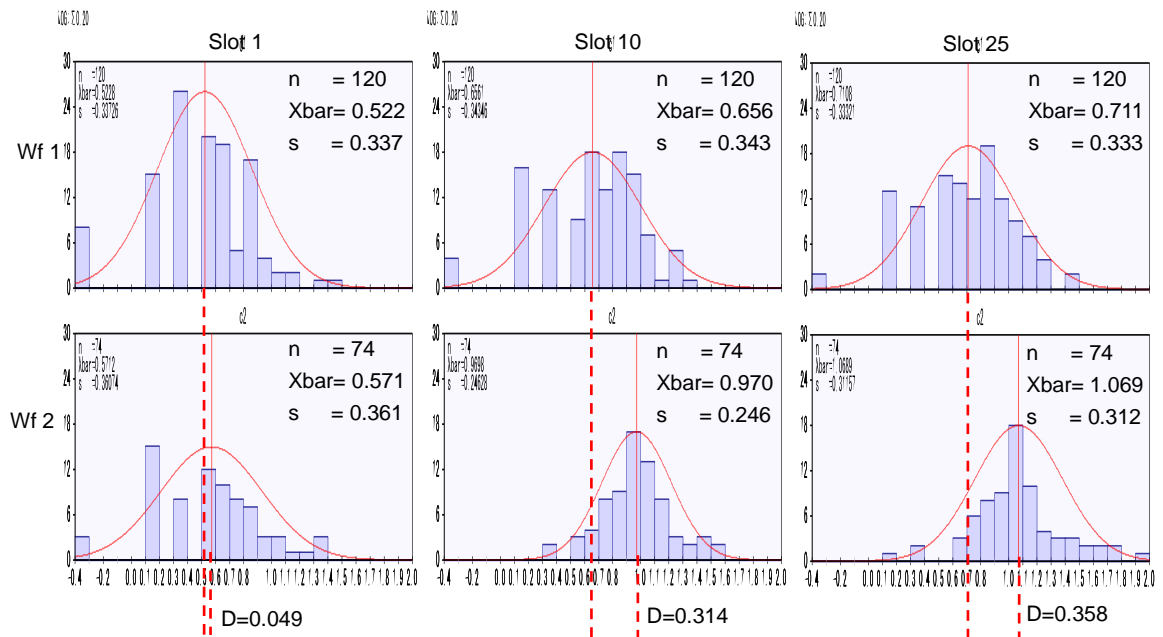


Fig7 Fig6 の対数変換後のヒストグラム: Wf1 (2011/5/6~11/8), Wf2 (1/11/9~2012/2/13)

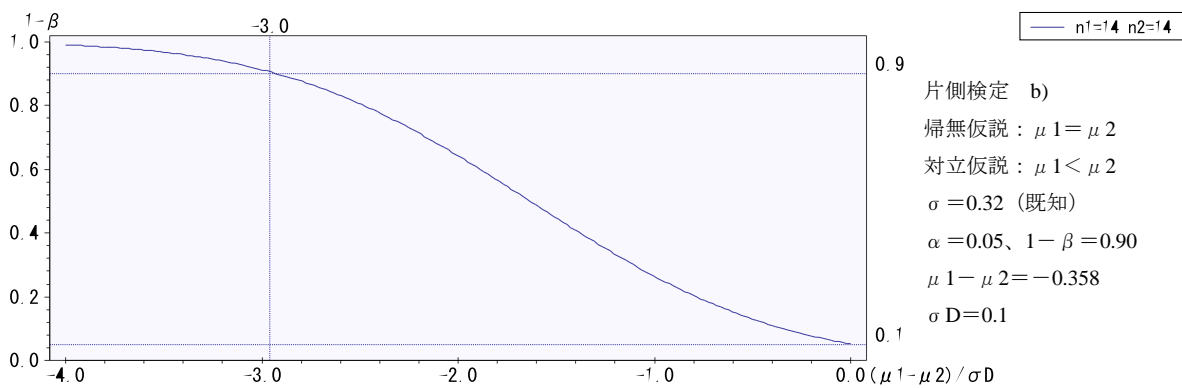
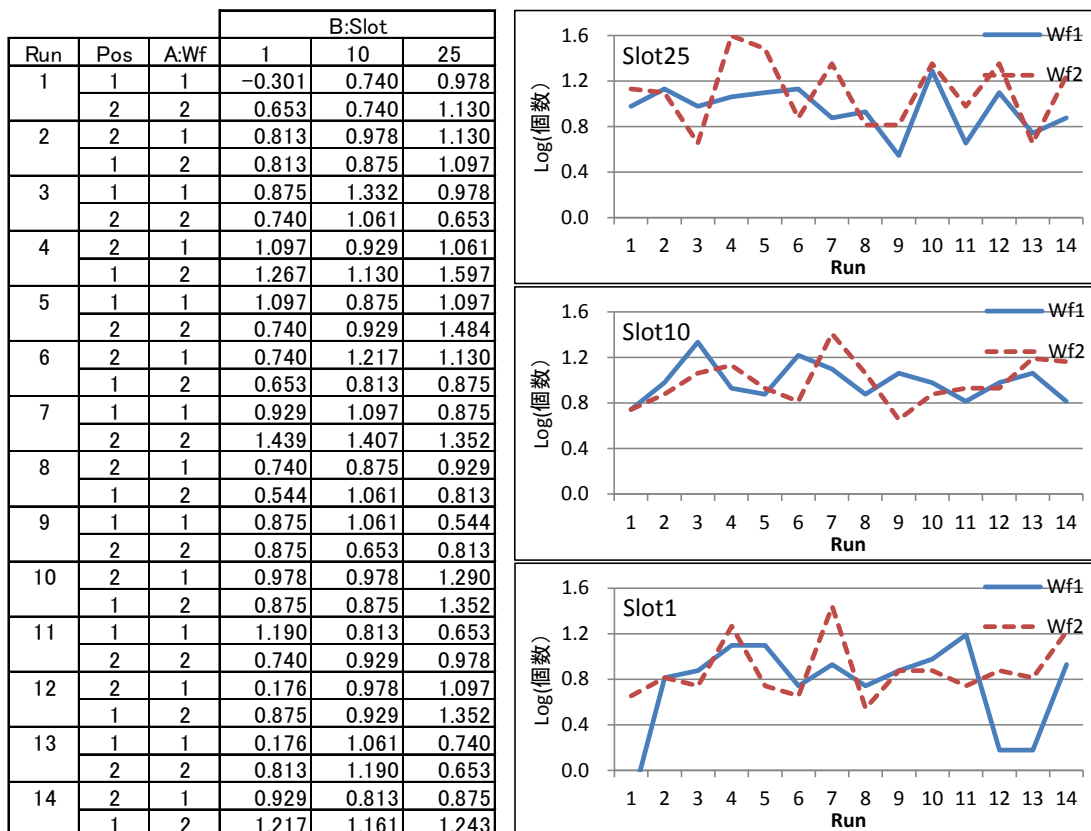


Fig8 Slot25 での Wf1, Wf2 の平均値の差を検出するための検出力曲線と条件 (右)

3-5. 実験計画 Wf1, Wf2 の平均値をそれぞれ μ_1 , μ_2 とし Fig8 右の条件で平均値の差 = $\mu_1 - \mu_2 = -0.358$ を危険率 $\alpha = 0.05$, 検出力 $(1 - \beta) = 0.9$ で検出するための実験回数を StatWorks で計算すると $n_1 = 14$, $n_2 = 14$ となった. よって実験回数 (Run) 14 回の実験を表示 1 の要領で計画した. 1 回の実験 (1Run) で対向する 2 つの Position (Pos1, 2) の Slot1, 10, 25 に Wf1, Wf2 各 3 枚をセットした. Position の影響はないと (無視) している.

3-6. 実験結果 異物数を対数変換した結果, 及び Slot ごとに経時データとして折れ線グラフ化したものを表示 1 に示す. Run ごととのばらつきが大きく慎重に解析する必要がある.

表示 1 Run14 の実験, 異物数データ (対数変換後) (左) と Slot ごとの折れ線グラフ (右)

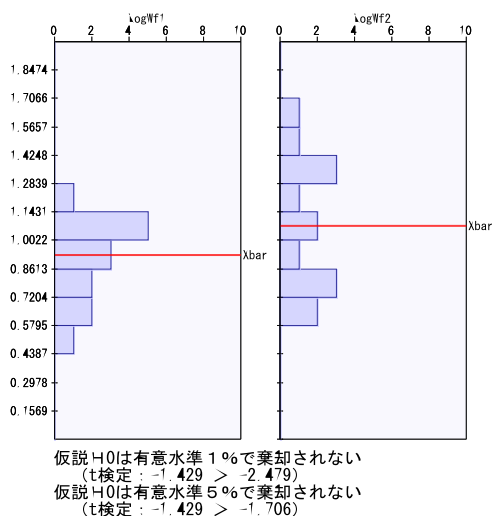


3-7. 実験結果の解析 1：分散分析、通常の t 検定 Run14 の実験は Pos を無視すれば Wf と Slot の 2 因子で反復数 14 の分割実験と考えられる。その分散分析表を表 1 (上) に示す。Slot が 1%有意 (P 値=0.00), Wf が有意でない (P 値=0.09) 以外に, 反復が 5%有意 (P 値=0.02), すなわち実験ごとのばらつきが無視できないことがわかる。反復を誤差にプーリングしたものが表 1 (下) である。Slot と Wf の有意判定は変わらないが, いずれも P 値が増大する方向に変化している。実験ごとのばらつきを考慮しなければ Wf の違いによる平均値の差が検出し難いことがわかる。Slot25 における Wf1 と Wf2 の平均値の差を通常の t 検定として StatWorks で検定した結果を Fig9 に示す。検定統計量 t_0 の P 値=0.082 であり有意とならない理由は, 実験ごとのばらつきが誤差に含まれることで誤差が大きくなり, 要因効果が相対的に小さくなっていること, その理由で検出力が低いことである。

表 1 分散分析表：(上) Run を反復として考慮 (分割実験) (下) Run を考慮しない

No		要因	平方和	自由度	分散	分散比	検定	P値(上側)
1		R:反復	1.775	13	0.137	2.178	*	0.02
2		A:Wf	0.186	1	0.186	2.968		0.09
3		B:Slot	0.769	2	0.384	6.129	**	0.00
4		AB	0.092	2	0.046	0.734		0.48
5	誤差	RAB	4.075	65	0.063			
6		計	6.897	83				

No		要因	平方和	自由度	分散	分散比	検定	P値(上側)
1		A:Wf	0.186	1	0.186	2.481		0.12
2		B:Slot	0.769	2	0.384	5.123	**	0.01
3		AB	0.092	2	0.046	0.614		0.54
4	誤差	RAB	5.850	78	0.075			
5		計	6.897	83				



変数名	logWf1	信頼率	95 %
データ数	14	下限値	上限値
平均値	0.9275	0.8005	1.0545
分散	0.04836	0.02541	0.12551
標準偏差	0.21990		
自由度	13		
変数名	logWf2		
データ数	14		
平均値	1.0769	0.8902	1.2635
分散	0.10451	0.05493	0.27126
標準偏差	0.32328		
自由度	13		
平均値の差	-0.1494	-0.3641	0.0654
差の自由度	26		
母標準偏差	未知		
帰無仮説 H0	$\mu_1 = \mu_2$		
対立仮説 H1	$\mu_1 \neq \mu_2$		
	有意水準 1%	有意水準 5%	
検定方法	t 検定	t 検定	
統計量 t_0	-1.429	-1.429	
P 値 (下側)	0.082	0.082	

Fig9 2つの母平均の差の検定 (通常の t 検定)

3-8. 実験結果の解析 2：対応のある t 検定 実験ごとのばらつきを考慮した解析を行うためには「対応のある t 検定」を採用すれば実験ごとのばらつきの影響を全く受けず、平均値の差の検出力を高めることができる。結果を Fig10 に示す。検定統計量 t_0 の P 値=0.037 であり 5%有意となる。すなわち異物数（対数）の平均値 $\mu_1=0.9275$ と $\mu_2=1.0769$ の差 $\mu_1 - \mu_2 = -0.1494$ は有意な差であり Wf1 から Wf2 に変えたことで異物数が増えたと考えられる。

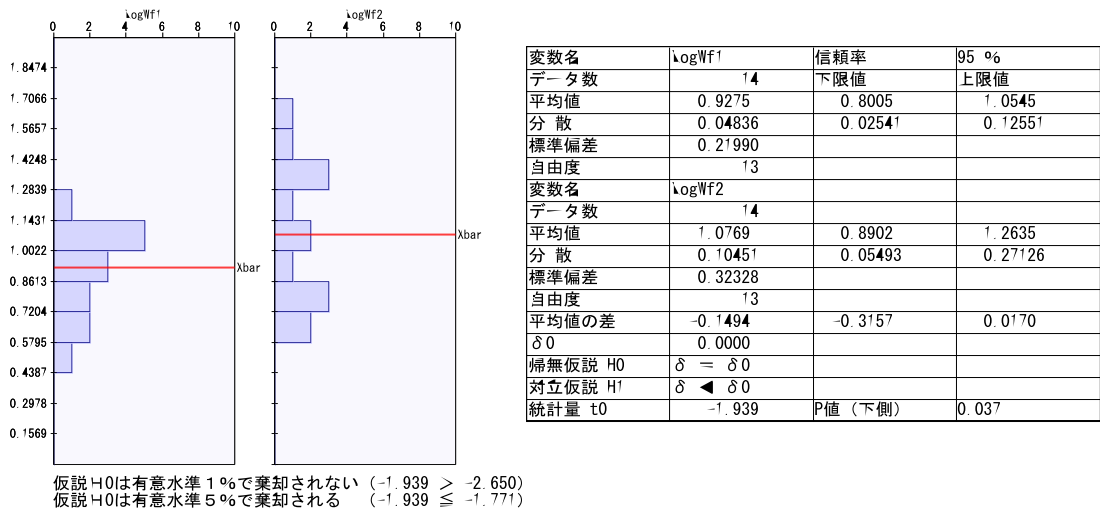


Fig10 対応のある場合の母平均の差の検定（対応のある t 検定）

3-9. 効果の確認 2012/3/12 以降、Wf2 から Wf1 に切り替えて 6/20 まで評価を行った結果を Xbar-R 管理図として Fig11 に示す。従来（2011/5/6～11/9）とほぼ同じ状態に復旧したことがわかる。LCL 近くの値が若干上昇していることは 3-11. 横展開を参照。

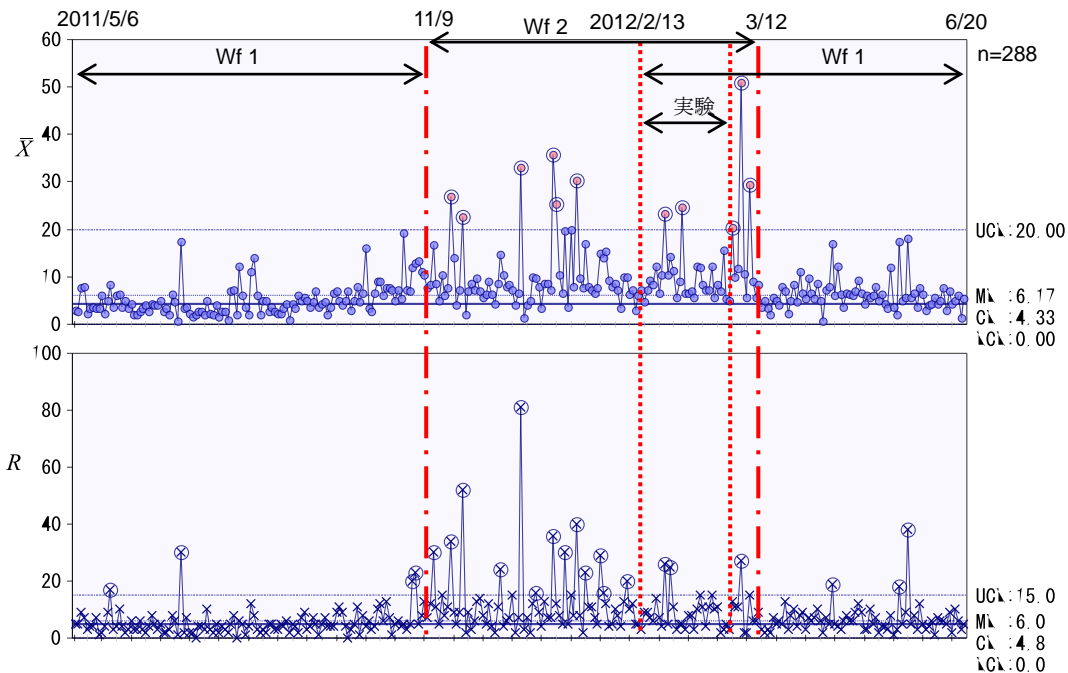


Fig11 異物増加数の Xbar-R 管理図（2011/5/6～2012/6/20）

3-10. 歯止め：固有技術の知見 解析を進める中で「Wf1 と Wf2 は表面における電気的な性質が異なり異物吸着力が異なること、Wf2 が Wf1 より吸着力が強いこと」が判明した。Wf2 の異物数が多いという固有技術の裏付けが得られたことになる。

3-11. 横展開：累積和管理図 異物数が増加し始めた時期のデータを \bar{X} 及び累積和 (CUSUM) 管理図で解析した結果を Fig12 に示す。累積和管理図は、工程平均の小さなシフトも検出でき、その発生時期も推測できる点が優れている。Fig12 では Wf 変更時 (No121, 一点鎖線) 以前の No105 (破線) から増加が始まったことが示されている。増加要因の第一が Wf であることは効果の確認 (Fig11) から明らかであるが、その他の要因 (装置や治図の劣化、クリーンルーム環境の悪化、等) も否定できない。詳細は紙面の関係から省略する。

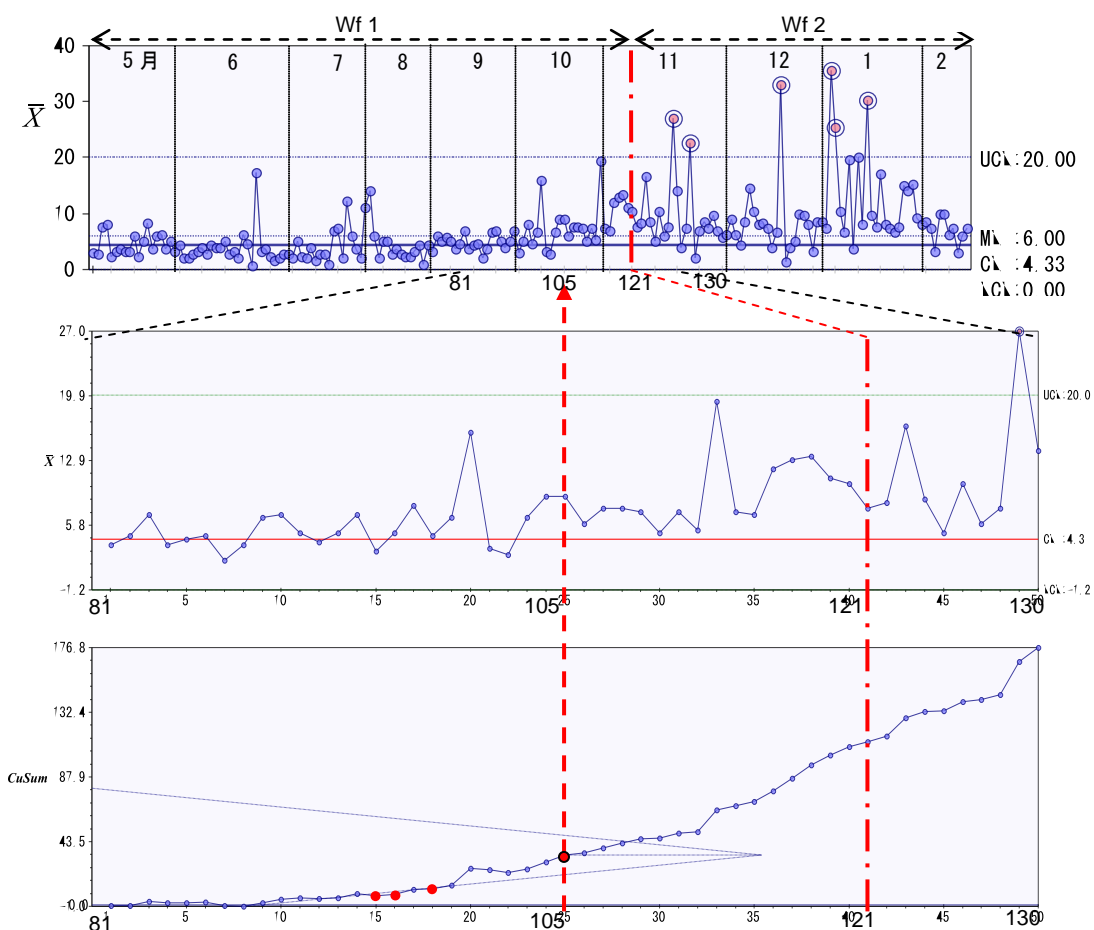


Fig12 累積和管理図による解析

3-12. 課題 1：ポアソン分布と負の二項分布について ウエハに付着する異物はポアソン分布に従うとされていたが、最近の研究では負の二項分布に従うという報告がある^[1]。安定状態（2011/5/6～2011/9/30, Fig3）のデータの分布を解析したものが Fig13 である。Slot1 はポアソン分布と負の二項分布に、Slot10, 25 では負の二項分布に近い。また負の二項分布から計算された Slot10, 25 の UCL はそれぞれ 19.0, 21.2 であり、経験的な管理限界値=20 と極めて近く、1 つの理論的な裏付けが得られたことになる。ポアソン分布では個々の事象が独立に発生しているという前提がある。Slot10, 25 がポアソン分布に従わないということは、「異物付着の個々の事象が独立でない」ことを示している。そのメカニズムの解明と分布との関連は固有技術の視点からも今後の課題である。

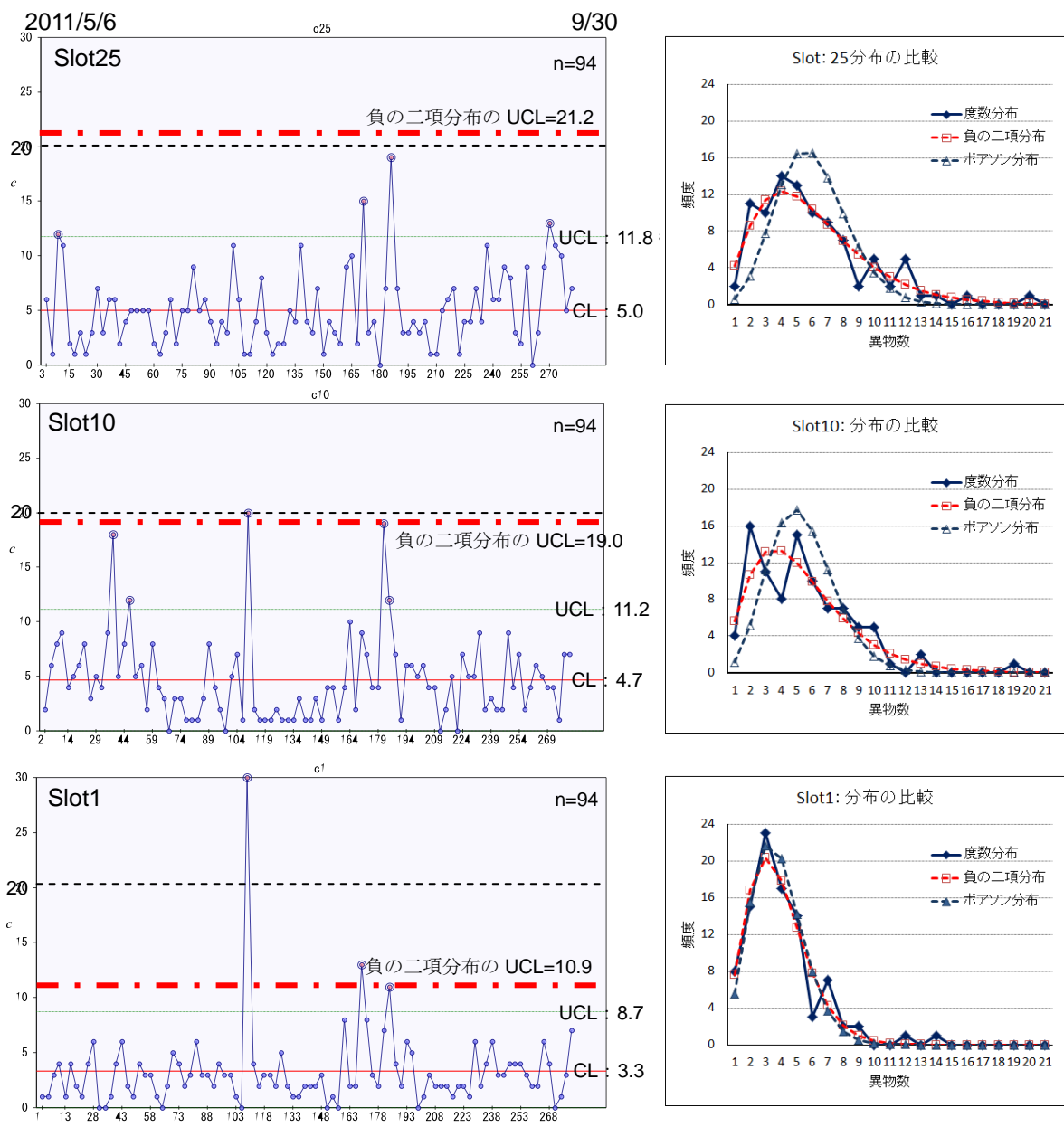


Fig13 負の二項分布とポアソン分布の比較(右)及び負の二項分布に基づく UCL の表示(左)

3-13. 課題 2: 異物付着パターンの解析 洗浄前の異物数 (Before), 洗浄後の異物数 (After)
 では, 異物の数だけでなく位置情報 (マッピング) も得られている. 増加数 (Addor) とは
 洗浄前は無く、洗浄後に有る異物の総数である. Fig14 は 11/17 に初めて管理限界値の 20
 を超えた時の 3 枚の Wf2 のマッピングであり, 以下のことが確認できる.

- Before の異物数は少なく (0~2), これらは洗浄で除去されている (After には無い)
- After で測定された異物は全て「後から付着した」異物である (After=Addor)
- 安定状態 (平均値は Slot1,10,25 = (3.3,4.7,5.0)) と比較し Addor は 3~9 倍の増加
- Slot25 の Addor はウエハー上側周辺に密集し, 安定状態の分布とは明らかに異なる

これらのマッピング情報は, 異常の早期発見, 装置構造との関連や付着メカニズムの解明
 に役立つもので, 数値だけでなく「画像」情報を積極的に活用することが課題である.

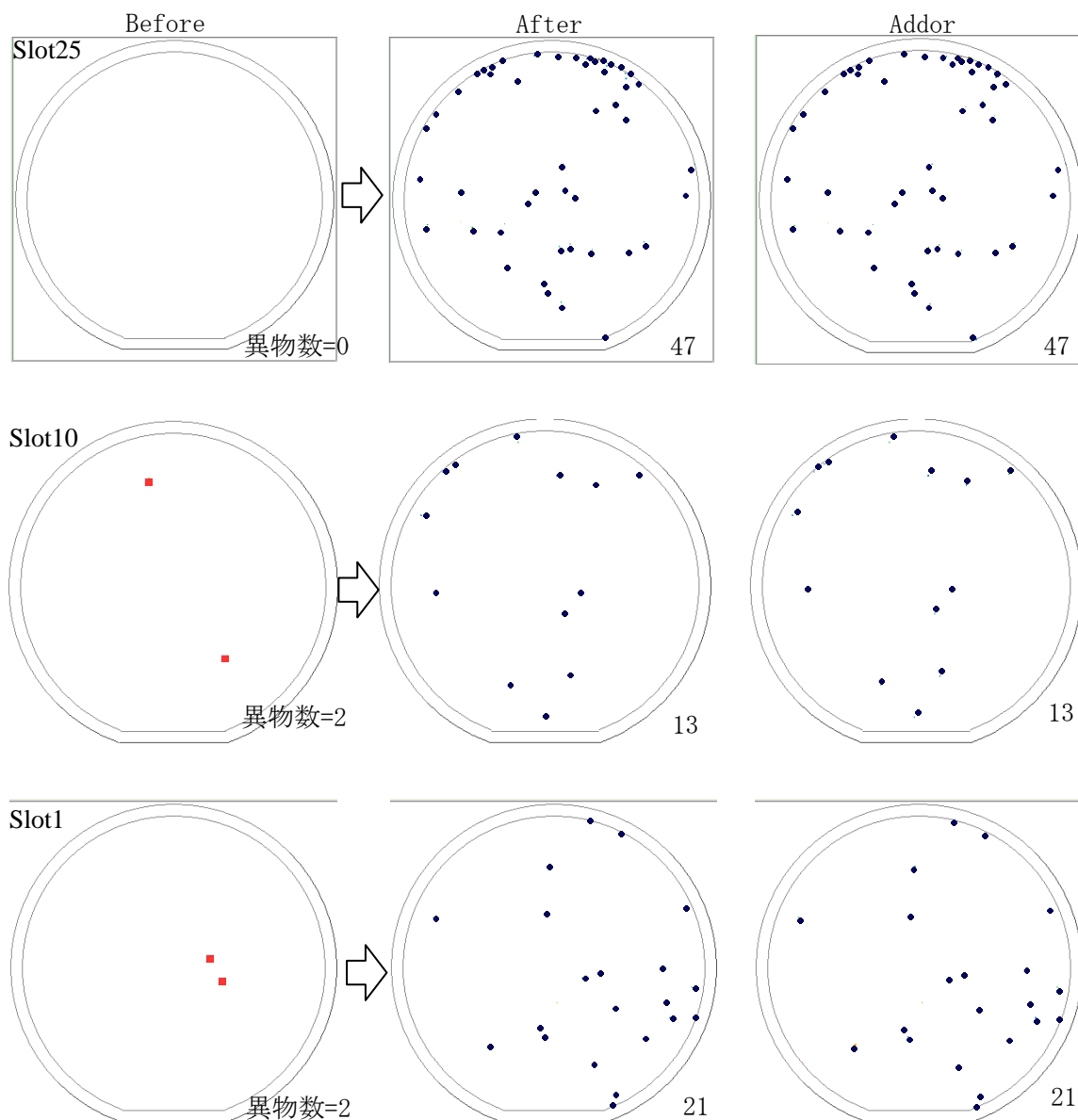


Fig14 11/17 の洗浄前 (Before), 後 (After) 及び増加 (Addor) の異物マッピング

3-14. 課題 3：共分散分析 洗浄前の異物数（Before）と増加数（Addor）との関係を Slot ごとに散布図で示したものが Fig15 である。データは Wf1 から Wf2 に変えた 11/9 の前後各 59Run のもので、確率楕円は 2σ である。Wf2 は Wf1 より異物吸着力が強いため、「Wf2 は Before が大きく、その影響で Addor が大きい」と想定したが、Fig15 からその可能性は小さいことがわかる。また Before の値は十分に小さいという前提で WDQC を実施しているが、実際には 0 から 80 程度まで幅があり、特に Slot1 の Wf1 では 100 以上のウェハも使用されている。Before は制御されていないが計測はされているという意味で補助因子または共変量といえる。補助因子の影響を評価し、その影響を除いて制御因子の効果を精度よく解析する方法が共分散分析法である。解析 1 で分散分析を行い、制御因子である Wf や Slot の効果を評価した。さらに Before の情報を加えれば評価精度が向上すると期待したが、実際には上述したように Before が Addor に与える影響は小さいため、Before を共変量とした解析は行わない。共変量としては他に異物の粒径や作業曜日などがあり、今後はそれらの影響評価を加えた共分散分析が課題となる。

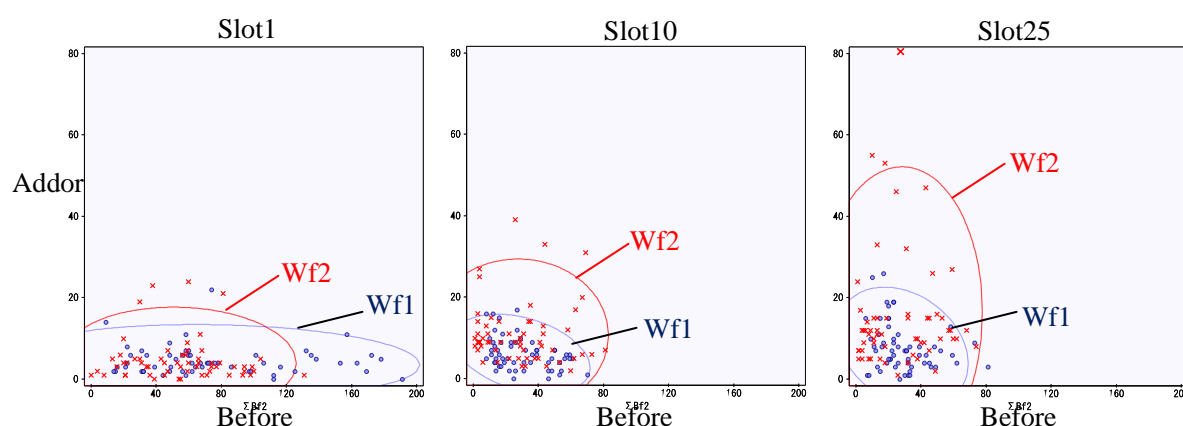


Fig15 洗浄前の異物数（Before）と増加数（After）との散布図

4. おわりに

半導体ウェハ洗浄工程の事例をもとに、実務家の立場から「いろいろな手法を併用すれば」「管理図は役にたつ」という内容を書いた。品質管理や数理統計の専門家諸氏からは内容の不備に対して忌憚ないご意見を伺いながら、今後の課題に向けてさらに検討を続けていきたい。最後に、分散分析、累積和管理図、負の二項分布について懇切丁寧なご指導を頂いた日科技研数理事業部の犬伏氏に深く感謝致します。

5. 参考文献

[1] Kawamura, H., Nishina, K. and Higashide, M. (2008), "Control Charts for Particles in the Semiconductor Manufacturing Process". Economic Quality Control, Vol.23, No.1, pp.95-107.

本著作物は原著作者の許可を得て、株式会社日本科学技術研修所（以下弊社）が掲載しています。本著作物の著作権については、制作した原著作者に帰属します。

原著作者および弊社の許可なく営利・非営利・イントラネットを問わず、本著作物の複製・転用・販売等を禁止します。

所属および役職等は、公開当時のものです。

■公開資料ページ

弊社ウェブページで各種資料をご覧ください <http://www.i-juse.co.jp/statistics/jirei/>

■お問い合わせ先

(株)日科技研 数理事業部 パッケージサポート係 <http://www.i-juse.co.jp/statistics/support/contact.html>