

2007.12.05

第17回 JUSEパッケージ活用事例シンポジウム

統計的工程管理の再考

名古屋工業大学

仁科 健

講演要旨

統計的工程管理(SPC)は品質管理の伝統的な管理体系の一つです。
しかし、生産技術や計測技術の進歩など生産ラインの環境は様変わりしています。
また、物理的加工と化学的加工とではSPCの考え方が違って来るのかもしれませんが、
これらを踏まえ、SPCを再考します。

講演内容の背景

テキスト(もしくは ISO, JIS)どおりでは管理図が使えない！
半導体製造工程のSPCからの発信
SPCとAPC^{注)}の融合(Box博士, *Technometrics*論文(1992))
ISO 3534-1, -2 (JIS Z 8101-1, -2)の改訂

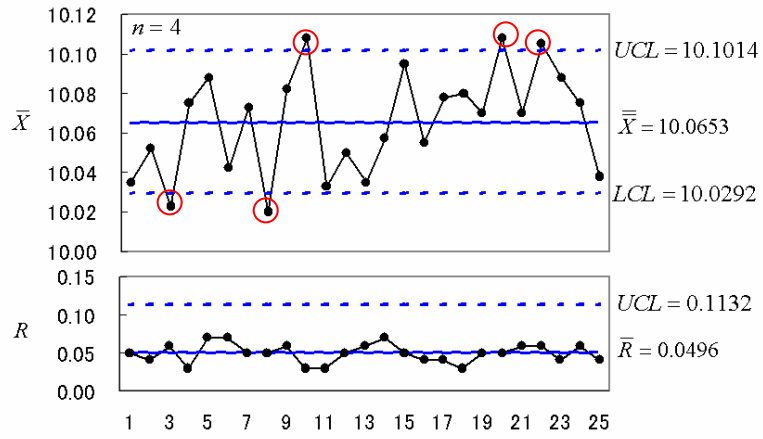
注)APC: Automatic Process Control

講演内容の項目

- 1) 管理限界外の点が多発. しかし, 工程変動の大きさには問題ない.
- 2) 工程能力は十分. しかし, 不具合が発生.
- 3) 管理図の異常判定ルールをどのように使えばよいか?
- 4) 半導体製造工程のSPCからの発信
(NECエレクトロニクス(株)との共同研究)
- (5) [トピックス]SPC関連のISOの動向)

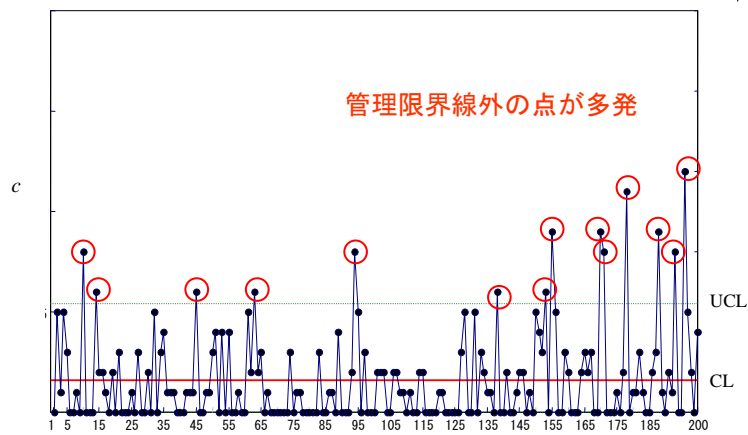
- 1)管理限界外の点が多発.
しかし, 工程変動の大きさには問題ない.**

葛谷の例 (熱処理工程)



群内(バッチ内)変動を偶然変動とした \bar{X} -R管理図

Kawamura *et.al* の例 c 管理図



半導体ウェハのごみの管理

Kawamura, Nishina and Higashide (2007): "Control Charts Based on Negative Binomial Distribution in the Semi-conductor Manufacturing Process", Proceeding of ANQ 2007, 401-407.

問題の所在

何を偶然変動とみなすか

従来の偶然変動の設定 → Shewhartの提案「群」

合理的な群とは:

群内変動の要因が、偶然原因のみであるような群分け

[参考] JIS Z 8101-2での合理的な群の定義

ブロック内の変動は、偶然原因のみによるものであり、
ブロック間の変動に、検出可能であり、
かつ重要な突き止められる原因によるものが想定できる工程のブロック。
ここで、ブロックとは、その内部では比較的均一な条件になるように
工程を時間的に分割したものである。

従来方法への問題提起(1)

Caulcutt (Applied Statistics 1995)

✓群内変動を偶然変動とすることは必ずしも適切ではない

葛谷 (JSQC研究発表会 2000)

✓デンソーにおける本流動時の管理図63ケースを調査.

✓工程能力指数はすべてのケースで1.33以上.

✓しかし、約半数の管理図で管理外れが多発.



偶然変動として群間変動の一部を含めることを考えるべき
初期流動の最終段階での工程能力を偶然変動とすべき

従来への方法への問題提起(2)

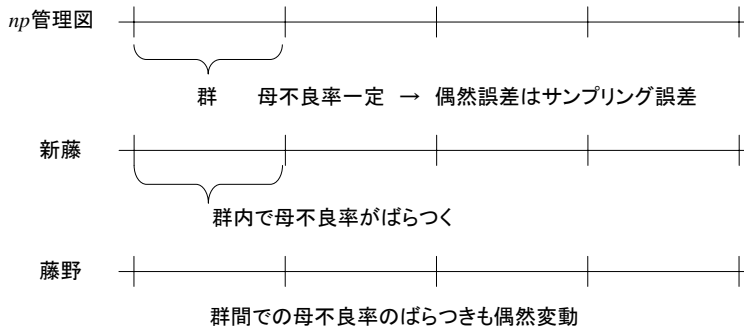
新藤(品質, Vol. 13, 1983)

群内で母不良率が一定でない場合がある.

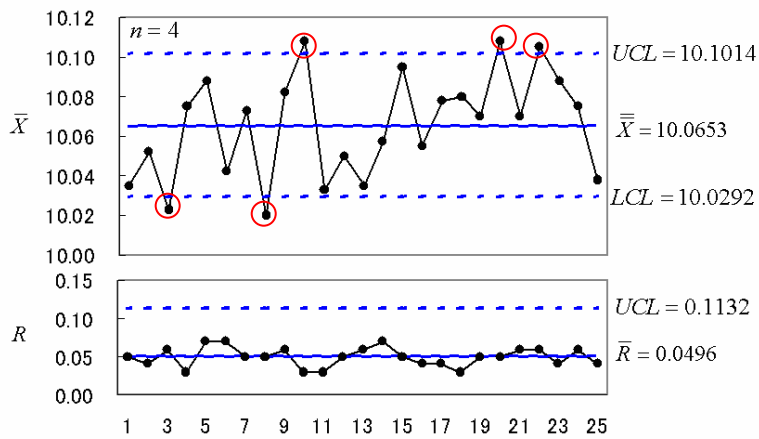
→ ベータ二項分布を想定した $\bar{p}-R_p$ 管理図

藤野(品質, Vol. 17, 1987)

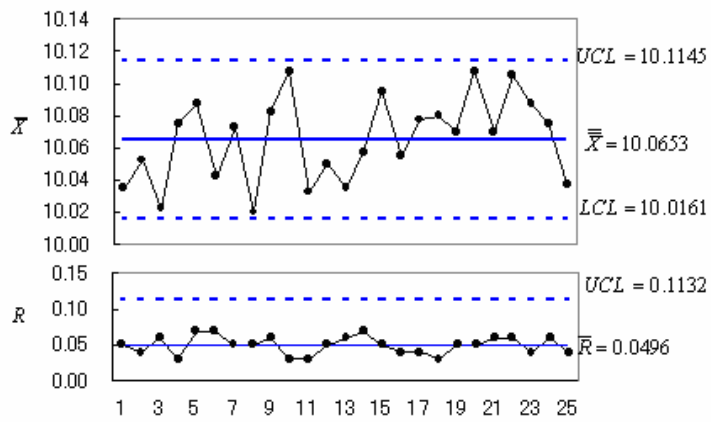
群間変動を考慮した管理限界 → ベータ二項分布を想定



葛谷の例 (熱処理工程)



群内(バッチ内)変動を偶然変動とした \bar{X} -R管理図



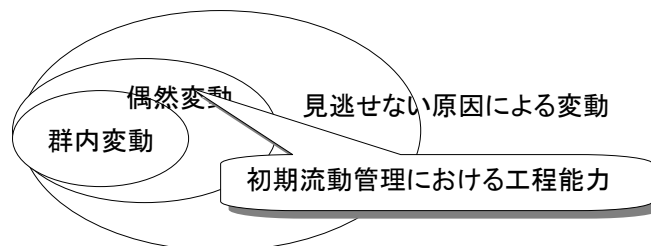
全変動を偶然変動とした \bar{X} -R管理図

群内変動 ≠ 偶然変動

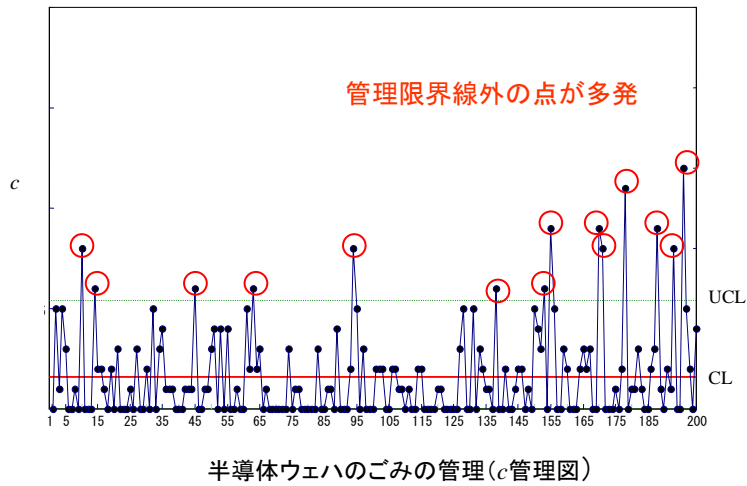
✓ 群の構成と管理限界の設定

初期流動時における管理状態と工程能力の確保

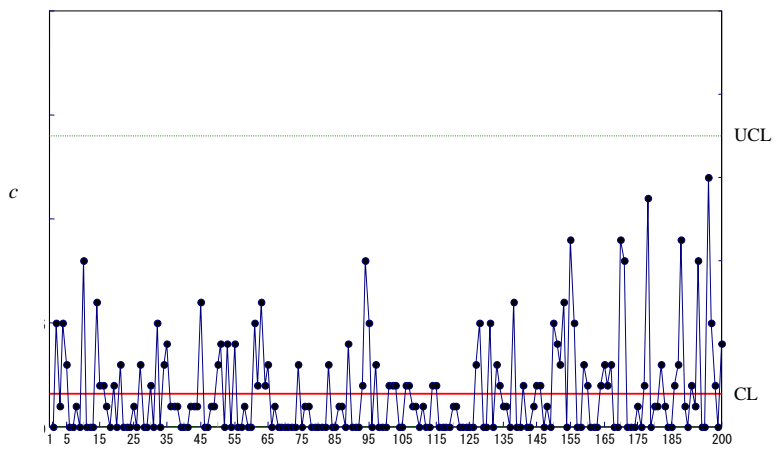
工程能力の分散成分の解析



Kawamura *et.al* の例 c 管理図



負の二項分布を仮定



負の二項分布を仮定する意味

ウェハ内での付着率はばらつく ← 偶然変動

[参考] ベータ二項分布と負の二項分布

✓ベータ二項分布

二項分布 $f(x) = {}_n C_x P^x (1-P)^{n-x}$

P がベータ分布に従う $f(P) = \frac{P^{a-1}(1-P)^{b-1}}{B(a,b)}$ $B(a,b)$ はベータ関数

✓負の二項分布

ポアソン分布 $f(x) = \frac{\lambda^x}{x!} e^{-\lambda}$

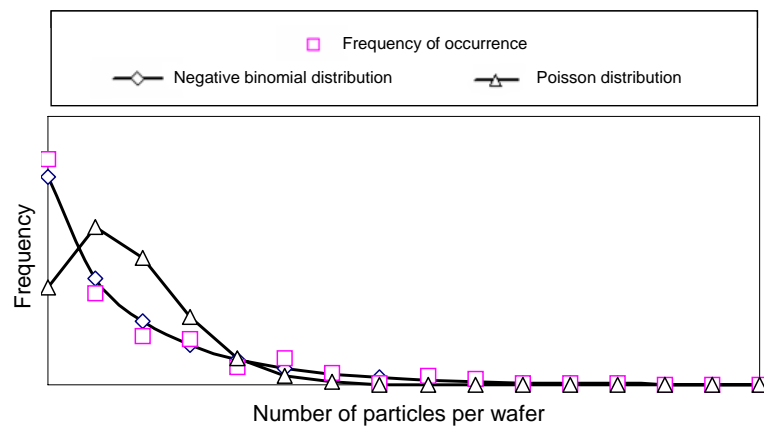
λ がガンマ分布に従う $f(\lambda) = \frac{b^a \lambda^{a-1} e^{-b\lambda}}{\Gamma(a)}$ $\Gamma(a)$ はガンマ関数



過大分散 (overdispersion)

負の二項分布の妥当性評価

実データによるポアソン分布と負の二項分布のあてはめの評価



(by Kawamura *et.al* (2007))

まとめ

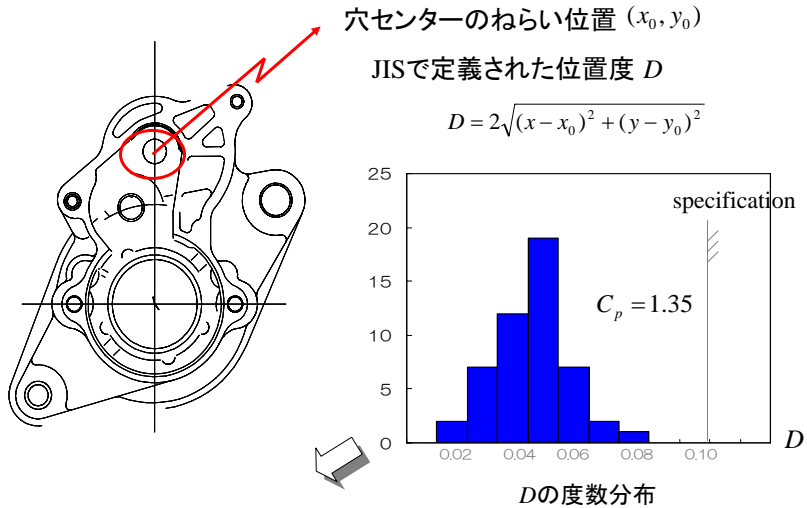
- ✓何を偶然変動とみなすかは管理図の活用上重要なポイントである.
- ✓偶然変動は“いつもの状態”の変動から設定する.
- ✓偶然変動は必ずしも群内変動ではない.
- ✓母不良率や母欠点率の変動を偶然変動に含める場合もある.

2) 工程能力は十分. しかし、不具合が発生.

[参考文献]

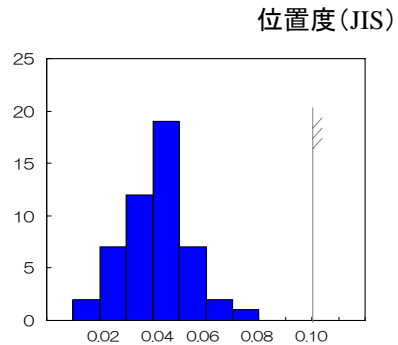
K. Nishina, Y. Isaki and K. Kuzuya (1995):
Proceedings of International Conference on Quality '05 -Tokyo-

二次元データの工程能力とは？(位置度の精度)

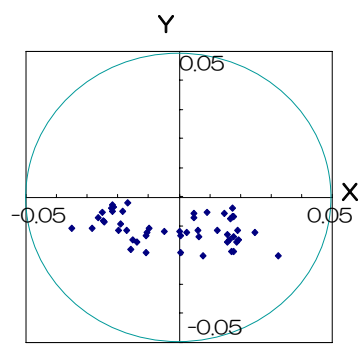


工程能力は十分！よし、本流動段階に移そう！
 しかし、本流動で不具合が. なぜ？

位置度のヒストグラム



位置度のX-Y座標プロット

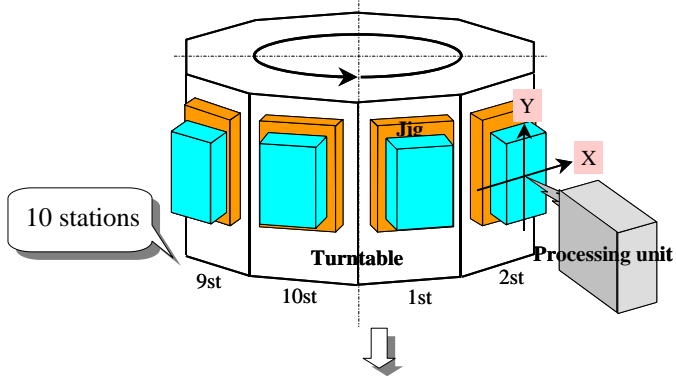


$$s_x = 0.0177 > s_y = 0.0050$$

$$C_{p_x} = 0.94 \quad C_{p_y} = 3.35$$

X軸方向のばらつきがY軸方向に比べて極端に大きい

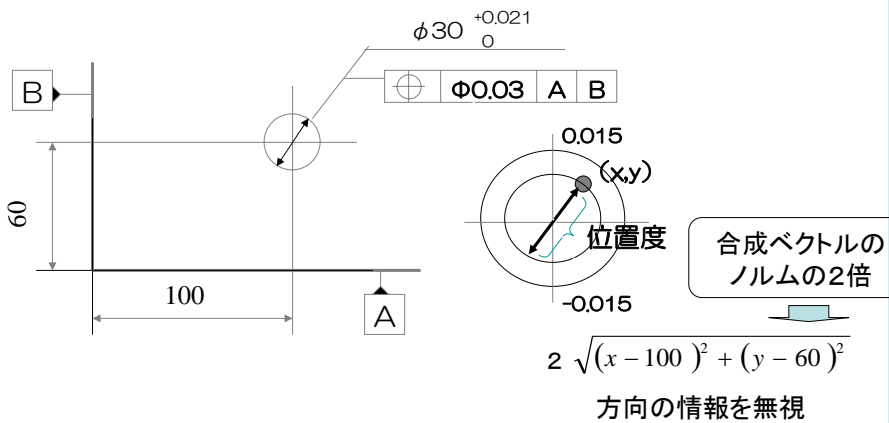
✓トランスファーマシンのしくみ



X軸方向の工程能力が低い原因は停止位置のばらつき

ISO (JIS)で規定されている特性は総合特性. 管理すべき特性は何か？

[参考]位置度の定義 (JIS B0621)



まとめ

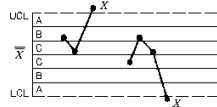
- ✓管理特性は工程の変動要素に対応するものを選択すべきである.
- ✓管理特性は必ずしも保証特性と一致しない.

3) 管理図の異常判定ルールを どのように使えばよいか？

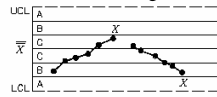
[参考文献]

K. Nishina, K. Kuzuya, N. Ishii (1995):
Frontiers in Statistical Quality Control, Vol. 8, 136 - 150

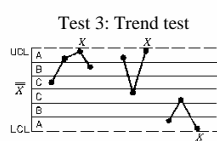
ISO(JIS)の異常判定ルールは以下のとおりだが？



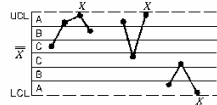
Test 1: 3 sigma rule



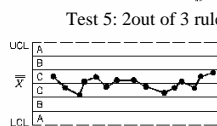
Test 2: Run test



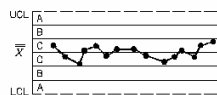
Test 3: Trend test



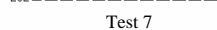
Test 4



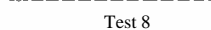
Test 5: 2 out of 3 rule



Test 6: 4 out of 5 rule



Test 7



Test 8

✓複数のルールを採用すると
第1種の過誤が過大になる。

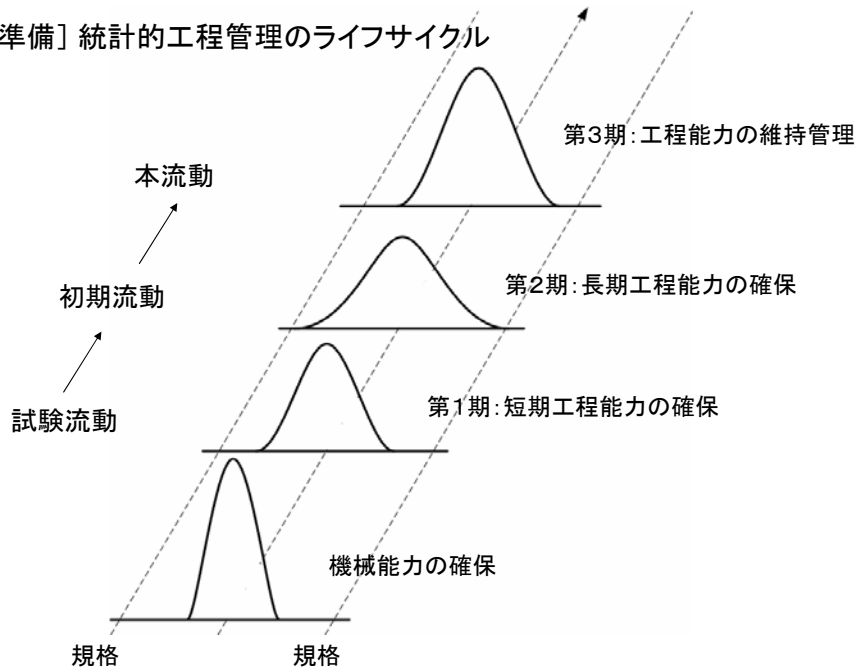
✓規定されているルールは妥当か？

✓ルールの使い分けは？

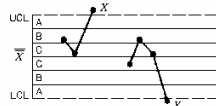
✓管理図法の使い分けは？

ISO 8258 (Shewhart control charts)
JIS Z 9021

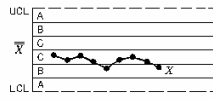
[準備] 統計的工程管理のライフサイクル



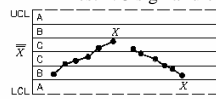
➤管理図のルールをいかに使うべきか 管理図は仮説検定か？



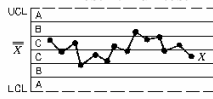
Test 1: 3 sigma rule



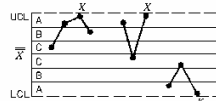
Test 2: Run test



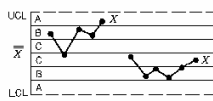
Test 3: Trend test



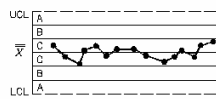
Test 4



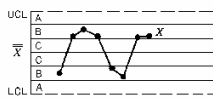
Test 5: 2out of 3 rule



Test 6: 4 out of 5 rule



Test 7



Test 8

ISO 8258 (Shewhart control charts)

初期流動段階

積極的に異常を検出し
工程能力向上／工程安定化を
図りたい



探索的データ解析
右のルールを積極的に用いる

本流動段階

初期流動で実現した工程能力
／工程安定の維持管理

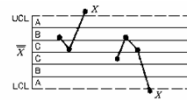


確証的データ解析
第1種の過誤が重要
むやみにルールを併用しない

✓各ルールの役割

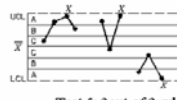
①基本ルール

本流動時にはこのルールのみでも可

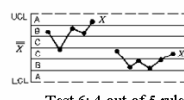


Test 1: 3 sigma rule

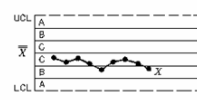
②工程平均のシフト変化の検出力を上げたい場合の補助ルール



Test 5: 2out of 3 rule



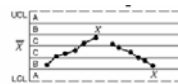
Test 6: 4 out of 5 rule



Test 2: Run test

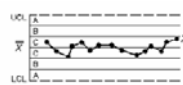
③工程平均のトレンドの検出力を上げたい場合の補助ルール

(ただし、効果は?)

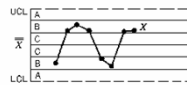


Test 3: Trend test

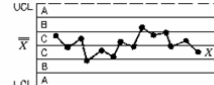
④群分けの評価(群内変動を構成する要素の吟味)



Test 7



Test 8



Test 4

仮説検定として用いる管理図

仮説検定としての機能が要求される状況

1) 工程の維持管理をしたい(本流動第3期)

正常(いつもの)状態であることを確認したい

→ 第1種の過誤を重視

いつもの状態であるときに異常を示さない

2) 異常であれば迅速なアクションが必要とされる場合

特定の異常パターンを早く検出したい

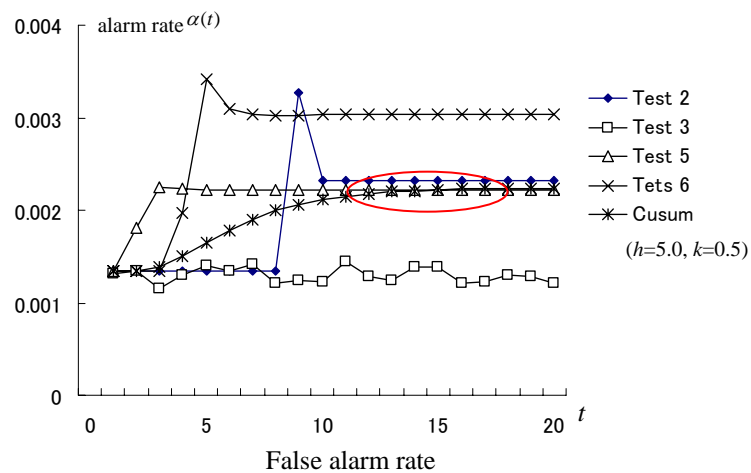
全数自動計測が可能 & 高精度が要求される特性

→ 検出力も考慮

累積和管理図が有用

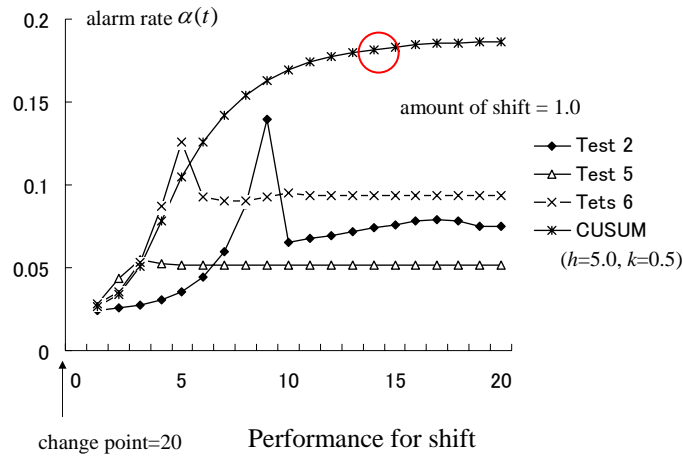
Shewhart管理図の補助ルールと比較した累積和管理図($h=5.0, k=0.5$)の特徴

第1種の過誤(動特性)



Shewhart管理図の補助ルールと比較した累積和管理図($h=5.0, k=0.5$)の特徴

検出力(動特性)



まとめ

- ✓管理図の見方(異常判定ルール)は利用する状況に応じて異なる.
- ✓本流動(第3期)に移るまでは“探索的”に用いるべき
この場合は積極的に判定ルールを活用してよい
- ✓本流動に移ってからは“確証的”(仮説検定として)に用いるべき
- ✓確証的に用いるとき(一般には)第1種の過誤を重視すべき
- ✓全数自動計測が可能であり, 高精度が要求される工程では,
ある異常パターンを早期に検出したい状況もある.
この場合は検出力も併せて考慮すべき(狙い撃ちをしたい)

4) 半導体製造工程のSPCからの発信

(NECエレクトロニクス(株)との共同研究から)

プロセス工程の特殊性&SPCとAPCの融合

Box and Kramer *Technometrics*論文(1992)

“SPCとAPCは発展過程でそれぞれ異なった背景をもつ。
活用されてきた産業分野が異なる。
SPCは部品加工で活用され、APCはプロセス工程で活用されてきた。

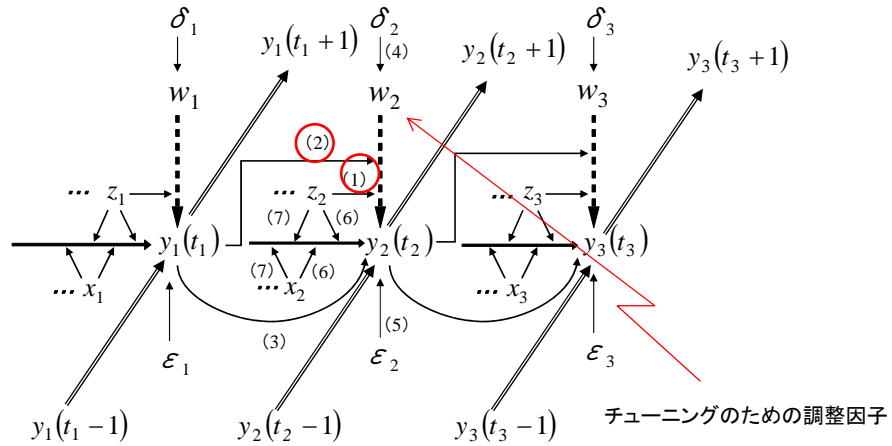
(中略)

また、加工工程では素材の特性が比較的管理しやすい。
一方、プロセス工程では、温度などのコントロールが難しい環境要因が
無視できない要因となり、工程平均がドリフトする。
例えば目標値からのずれをフィードバック制御により調節しなければならない。
加工工程では工程調節のコストは高く、プロセス工程では低い。”



半導体製造工程SPCの特殊性?である
“チューニングとメンテナンス”に焦点を

半導体製造工程における特性要因図 (by 川村他, 品質投稿中)



要因効果(1), (2): 調整因子 × 前工程の特性 & 要因の交互作用

→ チューニングシステムの設計と管理

チューニングシステムの設計と管理

✓調整因子がらみの交互作用対策

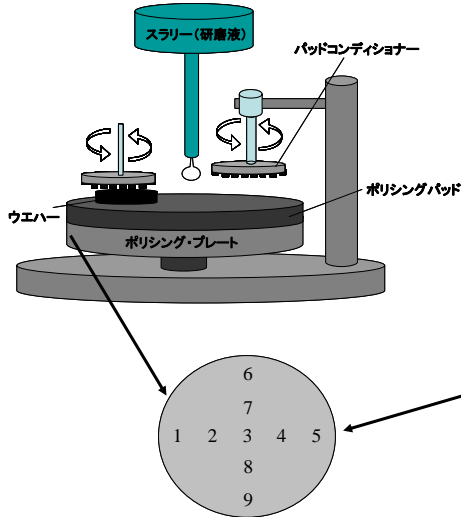
- 内乱に対してロバストなチューニングシステムの設計
 - 内乱因子との交互作用が小さい調整因子の選択
 - それでも、交互作用は残る
 - チューニングシステムの維持管理の必要性

✓チューニングによって異常パターンが隠される？

“調整因子の値”と“特性の値”との関係のモニタリングが有効^{注)}
 モニタリング値の自己相関への対応

注) 中條武志(1995): 品質, 25, 4, 87-94.

事例 CMP工程のメンテナンス



CMP工程

目的: ウエハー表面の凸凹を取り除き、平坦化すること

実際には表面に、細かい凸凹が残る

手順

- ①: 前の工程でAI配線を作成し、上に膜を形成する
- ②: 目標の研磨量を定め、研磨する
- ③: 各測定ポイントの残膜厚を計る

1枚のウエハーについて

①, ②, ③の手順が繰り返される

M. Higashide *et. al* (2007):

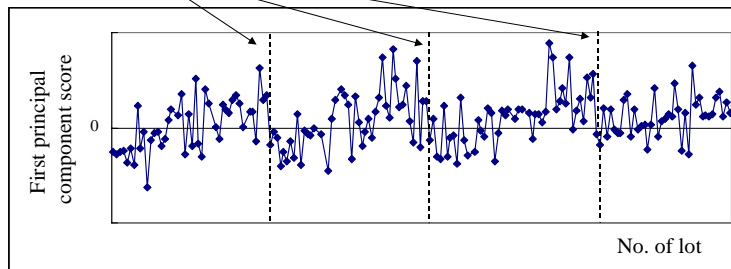
Proceedings of the IXth International Workshop on Intelligent Statistical Quality Control, 97 - 110.

ウェハ内変動のくせ(パターン)の抽出

サンプル×測定ポイントを二重中心化して主成分分析

固有値	83489.72	26026.51	15146.84
寄与率	53.75	16.76	9.75
累積寄与率	53.75	70.50	80.25
固有ベクトル			
point 1	-0.267	0.115	0.320
point 2	0.155	0.147	0.174
point 3	-0.424	0.519	-0.116
point 4	0.086	0.398	0.071
point 5	0.627	0.115	0.198
point 6	0.253	-0.354	0.063
point 7	-0.342	-0.577	0.407
point 8	0.220	-0.186	-0.647
point 9	-0.308	-0.177	-0.470

メンテナンス



[参考]二重中心化

ポジション サンプル	1	2	3	9	平均値
1						$\bar{x}_{i.}$
2			x_{ij}		
3						
⋮			⋮			
n						
平均値			$\bar{x}_{.j}$			$\bar{\bar{x}}_{..}$



$$y_{ij} = x_{ij} - \bar{x}_{i.} - \bar{x}_{.j} + \bar{\bar{x}}_{..}$$

パターン(交互作用要素)の抽出

半導体製造工程におけるチューニングとメンテナンスの考え方

- ✓SPC第2期までのポイントの一つにチューニングとメンテナンスの標準化があり、第3期における管理のポイントはチューニングとメンテナンスの維持管理である。
- ✓メンテナンスは処理バッチ内のばらつき(あるいは変動パターン)の変化が許容範囲を超えたときに行う。
- ✓チューニングによるばらつき減らしはチューニングは平均値への対応であり、処理バッチ内の変動パターンへの対応ではない。
- ✓チューニングによるアクションは加工ロット間で行う。ロット内ではチューニングしない。
- ✓チューニングにおける調整因子は他の要素との交互作用ができるだけ小さい(交互作用が小さい)ものを選ばれる。



他業種の製造工程でも同様な考え方が展開可能？

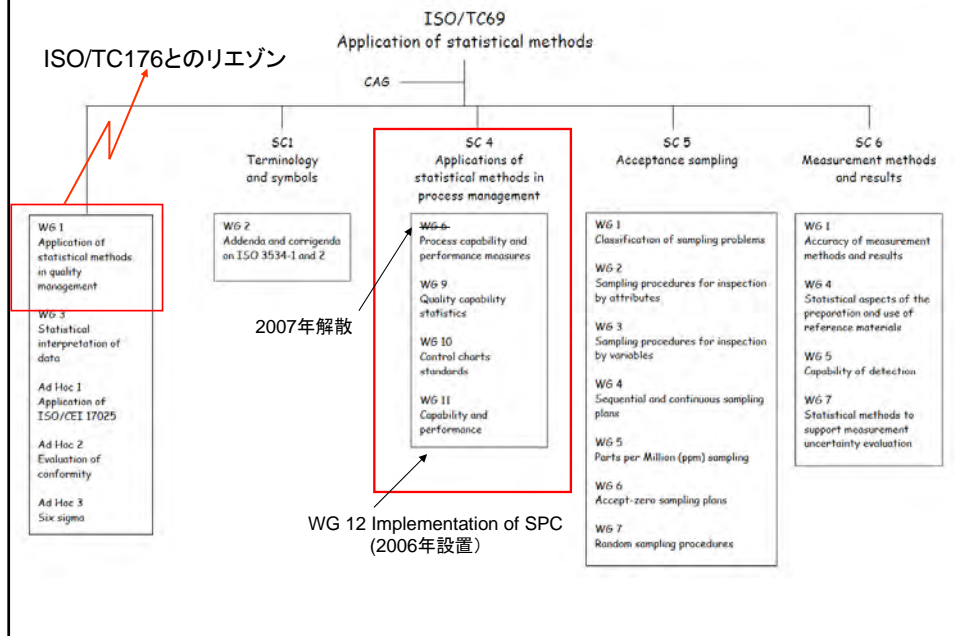
まとめ

- ✓半導体製造工程のSPCではチューニングとメンテナンスが重要
- ✓チューニングは平均値へのアクションであり、ロット内ではチューニングしない.
- ✓内乱に対してロバストなチューニングシステムの設計をすべき
- ✓チューニングは異常変動を隠してしまう.
調整量と特性の変化量との関係をモデリングすべき
- ✓処理バッチ内のパターンの変動に対してメンテナンスによって対応する.
- ✓半導体製造工程におけるチューニングとメンテナンスの考え方を
他の業種への展開も可能？

[トピックス]

5) SPC関連のISOの動向

ISO/TC 69 ("統計的方法の活用" 専門技術委員会の組織図)



WTO/TBT協定(1995)によるJISのISOとの整合化



ISO/TC69/SC4/WG10(管理図関連ISO原案作成WG)の動向

管理図ファミリの規格 (ISO 7870 シリーズ)

- Part 1: Control charts –General Guide- JIS Z 9020が対応規格
つい最近発刊
- Part 2: Shewhart control charts
ドラフトが完成間近
2008年3月開催の中間会議で継続審議
異常判定ルールの改訂など
- Part 3: Acceptance control charts
現ISO 7966を改訂
- Part 4: Process adjustment charts
- Part 5: Specialized control charts
EWMA, Cusumなど
- Part 6: Applications of control charts

ISO/TC69/SC4(工程能力関連ISO原案作成WG)の動向

工程能力ファミリ規格 (ISO22514 シリーズ)

Statistical methods in process management
– Capability and performance –

- Part 1: General principles
CD 22514-1 Capability and performance Part 1
– General principle and concepts
- Part 2: Statistics for measured quality characteristics
ISO 21747 Process capability and performance statistics
- Part 3: Machine performance study
ISO/CD 13700 Machine performance studies
- Part 4: process capability estimates and performance measures
ISO/DTR 12783 Process capability and performance measures
- Part 5: 多変量
- Part 6: 計数值
- Part 7: performance of measuring equipments

Process CapabilityとProcess Performanceの違い(1)

ISO/TS 16949 SPC Reference Manual(米国流)では

Process Capability – The 6σ range of a process's inherent variation, for statistical stability processes only, where σ is unusually estimated by \bar{R}/d_2

→ 工程能力は管理状態とみなせるときの群内変動
(管理図から求める)

注)
Process Performance – The 6σ range of a process's total variation, where σ is unusually estimated by s , the sample standard deviation.

→ 工程パフォーマンスは工程変動(群内変動+群間変動)
(ヒストグラムから求める)

注)JISでの和訳をどうする?
プロセスパフォーマンス指数, **工程変動指数**

[参考]工程能力指数と工程変動指数

工程能力指数 (process capability index)

$$C_p = \frac{USL - LSL}{6\bar{R}/d_2}$$

$$CPL = \frac{LSL - \bar{X}}{3\bar{R}/d_2} \quad (\text{下側能力指数}) \quad CPU = \frac{USL - \bar{X}}{3\bar{R}/d_2} \quad (\text{上側能力指数})$$

$$C_{pk} = \min(CPU, CPL)$$

工程変動指数 (process performance index)

$$P_p = \frac{USL - LSL}{6s}$$

$$P_{pk} = \min\left(\frac{USL - \bar{X}}{3s}, \frac{LSL - \bar{X}}{3s}\right)$$

Process CapabilityとProcess Performanceの違い(2)

ISO 3534-2

3.2.7.1

process capability

statistical estimate of the outcome of a **characteristic** (3.1.1.2) from a **process** (3.2.1.1) which has been demonstrated to be in a **state of statistical control** (3.2.2.7)

NOTE 1 The outcome is a **distribution** (3.2.5.1) the **class** (3.2.5.3) of which needs determination and its parameters estimated.

NOTE 2 For a normal distribution, described in terms of its standard deviation, which represents only within subgroup variation, its standard deviation, S_w , can be estimated thus :

$$S_w \approx \frac{\bar{R}}{d_2} \text{ or } \frac{\sum s_i}{k \cdot c_4} \text{ or } \sqrt{\frac{\sum s_i^2}{k}}$$

where, \bar{R} is the average range calculated from a set of k subgroup ranges,

s_i is the observed sample standard deviation of the i^{th} subgroup,

k is the number of subgroups of the same size, n ,

d_2, c_4 are constants based on subgroup size, n (see ISO 8258).

3.2.6.1

process performance

statistical measure of the outcome of a **characteristic** (3.1.1.2) from a **process** (3.2.1.1) which may not have been demonstrated to be in a **state of statistical control** (3.2.2.7)

NOTE 1 The outcome is a **distribution** (3.2.5.1) the **class** (3.2.5.3) of which needs determination and its parameters estimated.

NOTE 2 Care should be exercised in using this measure as it may contain a component of variability due to **special causes** (3.2.2.4) the value of which is not predictable.

NOTE 3 For a normal distribution described in terms of the standard deviation, S_t , estimated from only one sample of size N , the standard deviation is expressed thus:

$$S_t = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum (x_i - \bar{x}_t)^2}$$

where

$$\bar{x}_t = \frac{1}{N} \sum x_i$$

This descriptor takes into account the variation both due to **random (common) causes** (3.2.2.5) and also any **special causes** which may be present. Hence S_t is used here instead of σ_t as the total standard deviation is not an estimator but a statistical descriptive measure

ISO(欧州流?)では

3.2.7.2

process capability index

index describing **process capability** (3.2.7.1) in relation to **specified tolerance** (3.3.1.6)

NOTE 1 Frequently the process capability index is designated C_p and expressed as the value of the **specified tolerance** (3.3.1.6) divided by a measure of the length of the **reference interval** (3.2.5.8) for a process (3.2.1.1) in a **state of statistical control** (3.2.2.7), namely as:

$$C_p = \frac{U - L}{X_{99.865\%} - X_{0.135\%}}$$

NOTE 2 For a normal distribution the reference interval is equal to $6S_p$ (see clause 3.2.7.1, Notes)

NOTE 3 For a non-normal distribution the reference interval can be estimated using the method described in ISO/TR 12783.

3.2.6.2

process performance index

index describing **process performance** (3.2.6.1) in relation to **specified tolerance** (3.3.1.6)

NOTE 1 Frequently, the process performance index is designated P_p , and expressed as the value of the **specified tolerance** (3.3.1.6) divided by a measure of the length of the **reference interval** (3.2.5.8), namely as :

$$P_p = \frac{U - L}{X_{99.865\%} - X_{0.135\%}}$$

NOTE 2 For a normal distribution the reference interval is equal to $6S_t$ (see clause 3.2.6.1, Note 3)

NOTE 3 For a non-normal distribution the reference interval can be estimated using the method described in ISO/TR 12783.

掲載されている著作物の著作権については，制作した当事者に帰属します．

著作者の許可なく営利・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>