

実験計画・パラメータ設計・
MTシステムとの出会い

品質工学・品質管理コンサルタント
(元) 富士ゼロックス
立林 和夫

1. 統計学・実験計画法・タグチメソッドとの接点

(赤い字は、後の事例で紹介する)

- 1948年6月 島根県松江市に生まれる。
- 1968年4月 1浪の後、大阪大学基礎工学部に入学。
- 1969年 教養科目として「統計学」を履修。分布論が中心で、何の役に立つのか疑問を感じた。
- 1972年4月 富士ゼロックス(株)に入社。設計標準化グループに配属。先輩A氏がDEセミナー(日本規格協会)を受講。興味をもつ。
- 1973年3月 希望して信頼性グループに異動。信頼性試験法・信頼性手法・信頼性管理の研究を担当。カシオミニ(電卓)を購入。
- 同年 過去の寿命試験で「試験⇒NG⇒改良」を12回繰り返したやり方に疑問を感じる。どの設計が良いかをうまく評価したい。
- 1974年4月 同期のB氏がDEセミナー(日本規格協会)を受講。少し焦る。
- 1975年10月 社内SQCベーシックコースの「信頼性データ解析」の講師を担当。講師全員に森口繁一「統計的方法」が配布され通読。
- 1976年4月 **1年下のC氏がDEセミナーを受講して実験**。大いに焦る。
- 1976年4月 DEセミナーテキスト(日本規格協会)の田口・横山「実験計画

1. 統計学・実験計画法・タグチメソッドとの接点（続き）

- 法」を入手し、電卓で全計算をトレースして4回通読。
- 1976年10月 トナー熱定着用ハロゲンランプの寿命試験法の改善に着手。田口先生の指導を仰ぐ。先生を見て驚愕・話を聞いて驚愕。
- 1976年11月 社内QC研究会に参加。パラメータ設計を知り、ピンの寿命試験・焼結軸受けの寿命試験、その他に適用。
- 1978年2月 研究部門の実験計画法指導員を拝命。田口先生指導会の全テーマを聴講。
- 1978年 田口「第3版実験計画法」上下巻(丸善)を入手。上巻の全計算をトレースし、32カ所の計算ミスを発見。
- 1979年 社内パラメータ設計コースを開設し、主任講師を担当。
- 1980年 信頼性保全性シンポジウムにて「ワイブル解析とハザード解析の比較」を発表。解析手法を計測器とみなしSN比を適用。
- 1980年4月 社内実験計画法事例集(1)の編纂に参加。
- 1980年11月 富士ゼロックスがD賞実施賞を受賞。信頼性管理・新製品開発でのパラメータ設計・営業のTQCが「売りもの」。

1. 統計学・実験計画法・タグチメソッドとの接点（続き）

- 1981年8月 社内実験計画法事例集(2)の編纂に参加。
- 1982年6月 社内版「疑問に答える実験計画法問答集」の編纂に参加。
- 1989年4月 子会社である鈴鹿富士ゼロックスにて、電子基板のはんだ印刷品質の改善でパラメータ設計を適用。
- 1989年4月 「疑問に答える実験計画法問答集」(日本規格協会)を上梓。
- 1989年11月 「疑問に答える実験計画法問答集」が日経品質管理文献賞を受賞。
- 1991年2月 全社TQM推進室に異動。開発部門のプロセス改革・パラメータ設計の普及を推進。
- 1993年3月 品質工学会設立。理事に就任。
- 1995年4月 研究部長と共同作業で、研究・技術開発でのパラメータ設計の活用を推進。以降、年間30～60件の事例を指導。
- 1998年4月 品質工学の全社推進を開始。
- 1999年4月 全社戦略商品の開発でパラメータ設計を組織的に適用。

1. 統計学・実験計画法・タグチメソッドとの接点（続き）

- 1999年6月 社内品質工学発表大会の開催。
- 2001年 **アルプス電気のマイクロスイッチの出荷検査、日産自動車のカーレースの故障予知でのMT法の適用を見て、大いに焦る。**
- 2001年6月 品質工学会理事を退任。
- 2003年10月 「タグチメソッドーその特徴と発展、品質管理技術の中での位置づけー」がJSQC品質技術賞を受賞。
- 2004年4月 初の著書「入門タグチメソッド」(日科技連出版社)を上梓。
- 2004年11月 「入門タグチメソッド」が日経品質管理文献賞を受賞。
- 2008年12月 「入門MTシステム」(日科技連出版社)を上梓。
- 2011年6月 富士ゼロックスを退社。以降、品質工学・品質管理コンサルタントとして活動。
- 2011年10月 JSQC品質管理推進功労賞を受賞。

(**)会社勤務のかたわら、明治大学非常勤講師、東京工業大学非常勤講師、統計数理研究所客員教授などを歴任。

2. 取り上げる因子の数が多い直交表実験

製品設計や工程設計では、ときには因子の数が10個を超える場合が出てくる。研究段階では因子の数が少数であることも多いが、製品設計や工程設計では本気で成果を上げるために、このように多数の因子を取り上げることが多い。

[実際にあった例] 2頁目C氏の実験

因子A、D、H、Iが3水準、B、C、E、G、J、K、L、Mが2水準である。ただし、因子GはCに対して各々2水準の変身因子*である。さらに因子Fは4水準因子である。これに交互作用A×L、A×M、L×Mを取り上げたい。これを実験規模の観点から、直交表 L_{32} で行いたい。

(*)変身因子とは、ある因子の水準として方式などを取り上げた場合、別の因子の水準がその方式ごとによって変わってしまうような因子をいう。

[要因の自由度]

F	3
A, D, H, I	$2 \times 4 = 8$
B, C, E, G, J, K, L, M	$1 \times 8 = 8$
A×L, A×M	$2 \times 1 \times 2 = 4$
L×M	$1 \times 1 = 1$
C→G (変身分の交互作用)	$1 \times 1 = 1$

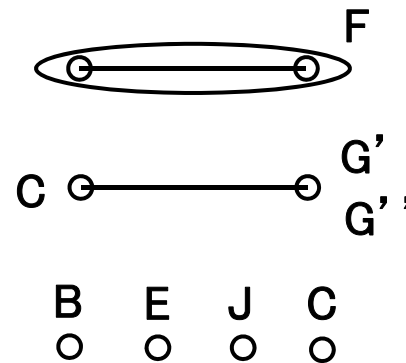
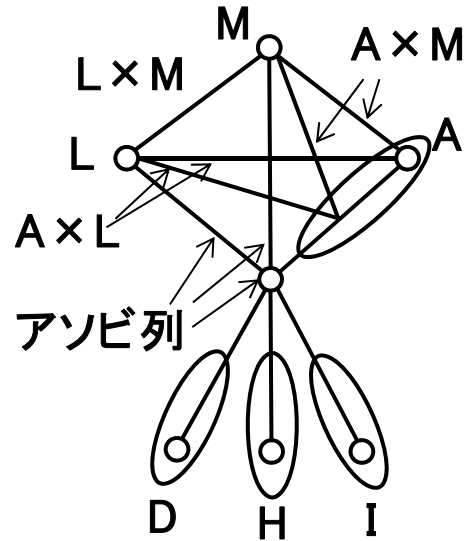
[自由度の合計] 25

自由度からは直交表 L_{32} にわりつけ可能である。要求される線点図と直交表 L_{32} の列への割り付けは？

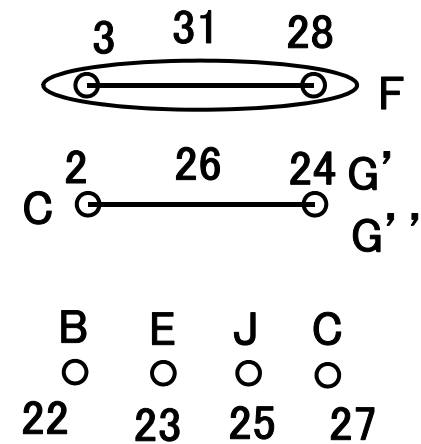
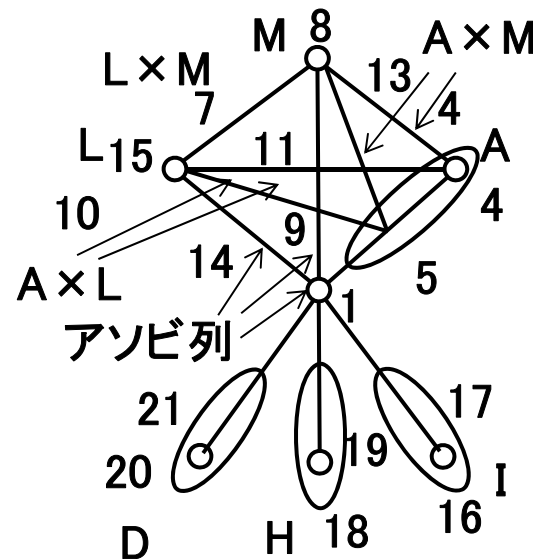
解答例は、富士ゼロックスQC研究会編「疑問に答える実験計画法問答集」、日本規格協会p78～p82を参照

2. 取り上げる因子の数が多い直交表実験 (続き)

すべてのアソビ列を共通させて、要求される線点図をまとめる



列への割り付け例は右図



2. 取り上げる因子の数が多い直交表実験(解答例)

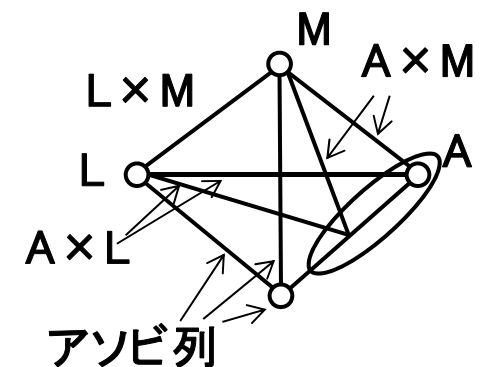
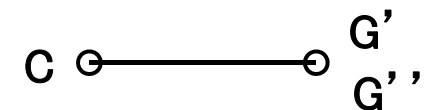
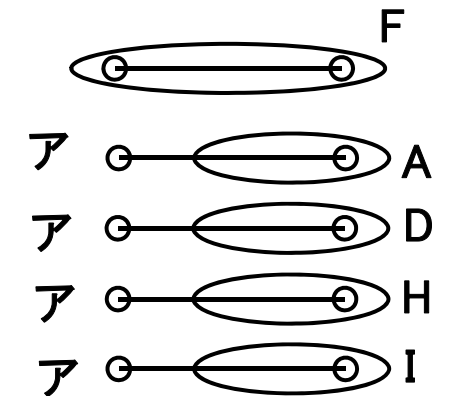
4水準の因子F …多水準作成法で4水準を作る

3水準の因子A, D, H, I …あそび列法で3水準を作る

変身する因子Gとその頭となる因子C …変身法で4水準を作る

交互作用を考慮しない2水準の因子B, E, J, K

交互作用を考慮する2水準因子L, Mと3水準因子A



3. 実験計画法からパラメータ設計へ 実験計画法

ある製品の開発において、「用紙が斜めに送られる問題」が発見された。対策を講じるために、直交表による実験を行うことにした。

1) ステップ1 テーマの背景、目的を整理する

開発段階の評価試験で「斜め送り」が露呈した。その原因を見つけるのが実験の目的である。

2) ステップ2 対象システム、出力(応答)、目標値を決める

現象をよく観察したところ、用紙送り装置の出口ですでに「斜め送り」が発生しているとわかったため、対象システムは用紙送り装置とした。応答は用紙の「傾き(mm)」とし、斜め送りは小さいほどよく、目標値は製品規格である「±1.0mm以内」とした。

3) ステップ3 因子と水準を決める

他製品の用紙送り担当者ともよく相談し、特性要因図をまとめた。その中から次の5因子と交互作用A×Bの6要因を実験に取り上げることにした。

3. 実験計画法からパラメータ設計へ 実験計画法

要因	現状規格	水準1	水準2
A ゲート高さ (mm)	0.89~1.15	1.15	0.89
B ローラ1 とローラ2 の平行度 (mm)	0~0.26	0	0.26
交互作用 A×B			
C 上側シュートと下側シュートの隙間 (mm)	0.26~0.89	0.89	0.26
D 用紙送りローラ圧力 (gr)	390~415	440	390
E 上側シュートの平行度 (mm)	0~0.68	0.68	0

4) ステップ4 実験計画を組み立てる

要因の全自由度(因子数と水準数)、実験にかけられる時間から、直交表 L_8 の実験を行うことにした。直交表への因子の割り付けは右表のようにした。

5) ステップ5 実験を実施し、データを採取する

直交表 L_8 の8回の実験を全ランダムイズし、データを採取したのが右表である。

列 No.	A × B C D E e							斜め 送り量 (mm)
	A 1	B 2	B 3	C 4	D 5	E 6	e 7	
1	1	1	1	1	1	1	1	0.40
2	1	1	1	2	2	2	2	0.64
3	1	2	2	1	1	2	2	2.36
4	1	2	2	2	2	1	1	3.46
5	2	1	2	1	2	1	2	1.96
6	2	1	2	2	1	2	1	1.08
7	2	2	1	1	2	2	1	3.78
8	2	2	1	2	1	1	2	2.92

3. 実験計画法からパラメータ設計へ 実験計画法

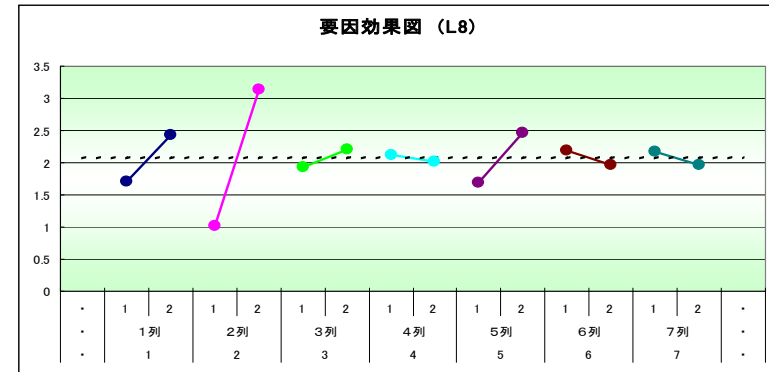
6) データを解析する

直交表 L_8 の解析を行い、要因効果図を右図のように得た。目視では因子A、B、Dに効果があり、その他の因子には効果がない。分散分析表は右表で、Bが1%有意、AとDが5%有意である。

有意要因を使用して、A1B1D1条件での母平均を推定すると、 0.275 ± 1.03 であり、点推定では目標範囲に入っているが、信頼区間では目標範囲を飛び出ている。

7) ステップ7 結果を設計に反映する／より詳細な解析を行う

実はこれでは不十分で、さらなる改善を狙い、二度目の改善実験を行うことにした。



要因	S	ϕ	V	Fo
A ゲート高さ	1.04	1	1.04	11.24*
B ローラ平行度	8.90	1	8.90	96.22**
A×B	0.16	1	*	*
C シュートの隙間	0.02	1	*	*
D 送りローラ圧力	1.19	1	1.19	12.86*
E シュート平行度	0.10	1	*	*
E 誤差 (7列+*)	0.37	4	0.093	—
T 全体	11.49	7		

3. 実験計画法からパラメータ設計へ パラメータ設計

先用の紙送りの「斜め送り」問題で、その後「用紙の種類」によって斜め送りの量が大きく変わることがわかった。ザラザラ厚紙では斜め送り量が大きく、ツルツル薄紙では小さい。そこで、誤差因子に「ザラザラ厚紙」と「ツルツル薄紙」を取ったパラメータ設計を行った。

1) テーマの背景、目的を整理する

用紙の種類によらず、「斜め送り」が小さくなるパラメータ設計を行う。

2) 対象システム、出力(応答)、目標値を決める

前回と同じ用紙送り装置とし、目標値も同じ「±1.0mm以内」とした。

3)、4) 因子と水準の決定、実験計画の組み立て

前回の実験は「斜め送り」が大きい「ザラザラ厚紙」だけで行ったが、今回「ツルツル薄紙」の実験データを追加した。因子と水準、直交表への割り付けは前回と同じ。

5) 実験の実施、データの採取

9頁のデータに「ツルツル薄紙」のデータを追加した。

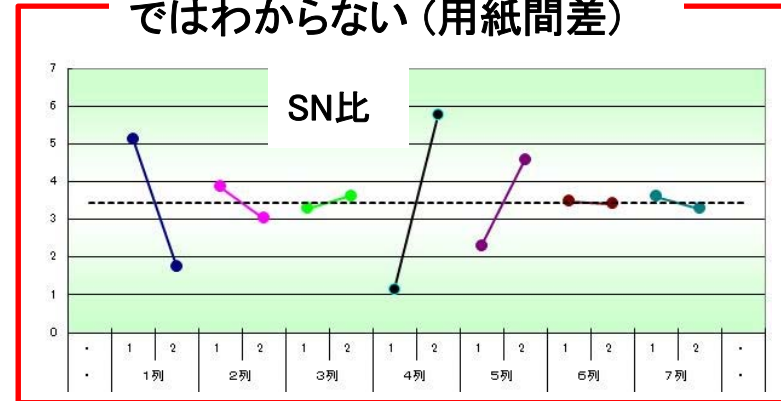
3. 実験計画法からパラメータ設計へ パラメータ設計

6) データの解析

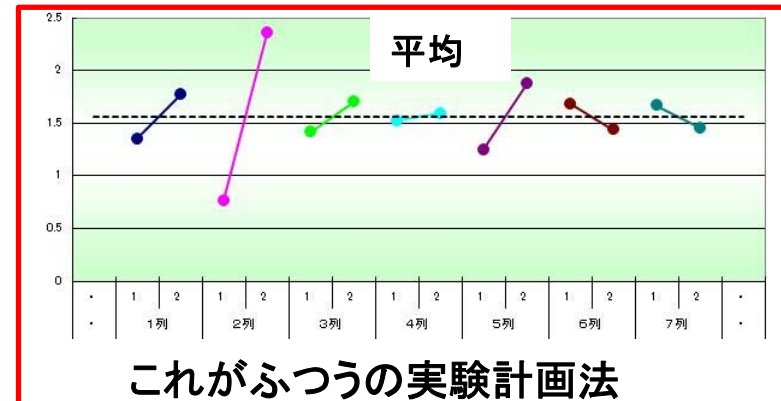
望目特性のパラメータ設計の解析を行った。

列 No.	A ×							斜め送り量 (mm)		SN 比 (db)	平均 (mm)
	A	B	B	C	D	E	e	薄紙	厚紙		
1	1	1	1	1	1	1	1	0.19	0.40	2.14	0.30
2	1	1	1	2	2	2	2	0.42	0.64	8.63	0.53
3	1	2	2	1	1	2	2	1.06	2.36	1.24	1.71
4	1	2	2	2	2	1	1	2.26	3.46	8.51	2.86
5	2	1	2	1	2	1	2	0.87	1.96	1.05	1.42
6	2	1	2	2	1	2	1	0.58	1.08	3.65	0.82
7	2	2	1	1	2	2	1	1.58	3.78	0.13	2.68
8	2	2	1	2	1	1	2	1.39	2.92	2.21	2.16

これはふつうの実験計画法
ではわからない(用紙間差)



これがふつうの実験計画法
で得られる結果(平均の変化)



6) データの解析

10頁の要因効果図と比べると、平均についてはほとんど変わらないが、SN比(用紙間の差)に対して因子A、B、C、Dが効果をもち、特にCの効果が大きかった。

3. 実験計画法からパラメータ設計へ パラメータ設計

A1B1C2D2条件でのSN比と平均の母平均を推定すると、SN比は8.56(db)、平均は0.24(mm)となった。SN比8.56(db)から平均0.24(mm)のときのばらつきを推定すると、 $\sigma=0.09$ (mm)となり、 $\mu + 3\sigma$ でも0.51(mm)となり目標を達成できることがわかった。

[補足] 8～10頁の実験では平均値の信頼限界を求めて、それをばらつき範囲と考えた。一方、11～12頁の実験では、SN比 (μ^2 / σ^2)から平均値 $\mu = 0.24$ (mm)のときのばらつき σ を直接推定している。後者の方がばらつきの推定としては妥当と思われる。

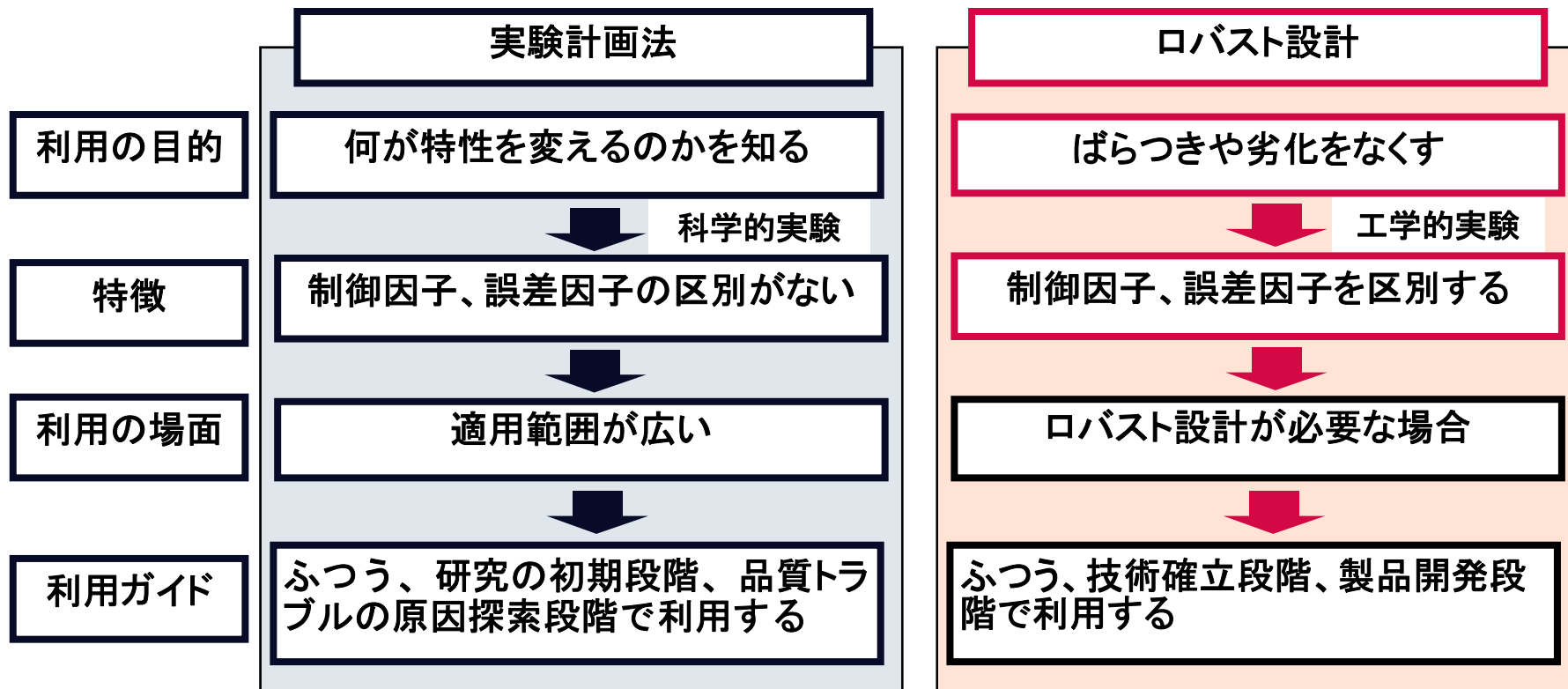
なお、11～12頁のパラメータ設計の実験によって、ばらつきだけに影響する因子Cが存在することがわかった。また、因子Bはばらつきは変えず、平均だけを変える因子であることもわかった。これは、誤差因子を取り上げないふつうの実験計画法の実験では得られなかった情報であった。

4. 実験計画法とパラメータ設計の使い分け方のノウハウ

ロバスト設計と実験計画法は、**実験の目的に応じて使い分ける**のがよい。



実験の目的は、ふつうは**開発の段階**に応じて決まってしまう。



5. ハロゲンランプの寿命試験への直積実験の適用

[直積実験]

部品の構造や材料などの設計因子による寿命の違いが使用条件などの標示因子によってどのように変わるのがかを調べる実験



右図のような直交表 × 直交表の実験配置
(設計因子と標示因子との交互作用がわかる)

[設計因子]

- A: タングステンメーカ
- B: フィラメント線径
- C: フィラメント長さ
- D: ステム部カシメ方法

➡ 直交表L9へ
割り付け

[標示因子]

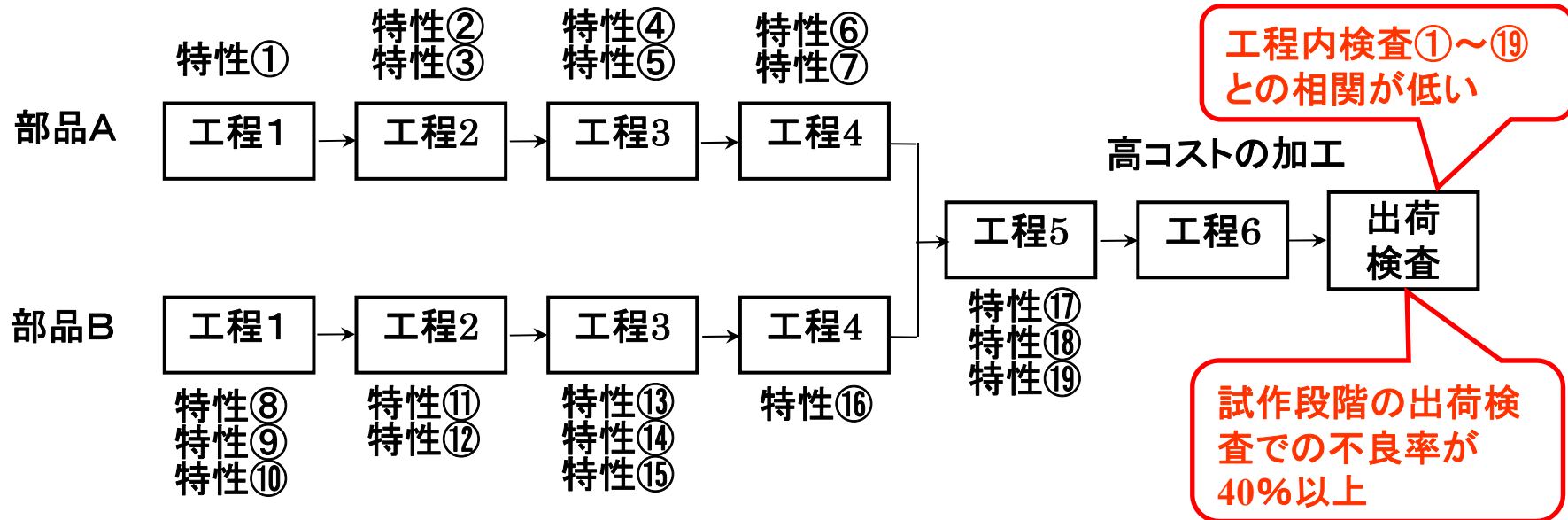
- P: 印加電圧波形
- Q: 冷却位置
- R: 管壁温度

➡ 直交表L4へ
割り付け

列 No.	A	B	C	D					
	1	2	3	4					
1	1	1	1	1	○	○	○	○	各○の条件で n個ずつの寿命試験
2	1	1	1	2					
3	1	2	2	1					
4	2	2	2	2					
5	2	1	2	1					
6	2	1	2	2					
7	3	2	1	1					
8	3	2	1	2					
9	3	2	1	2					

富士ゼロックスQC研究会編「疑問に答える実験計画法問答集」、日本規格協会、p301～p303
「直積実験とは？」を参照

6. MT法の工程不良発生予測への適用



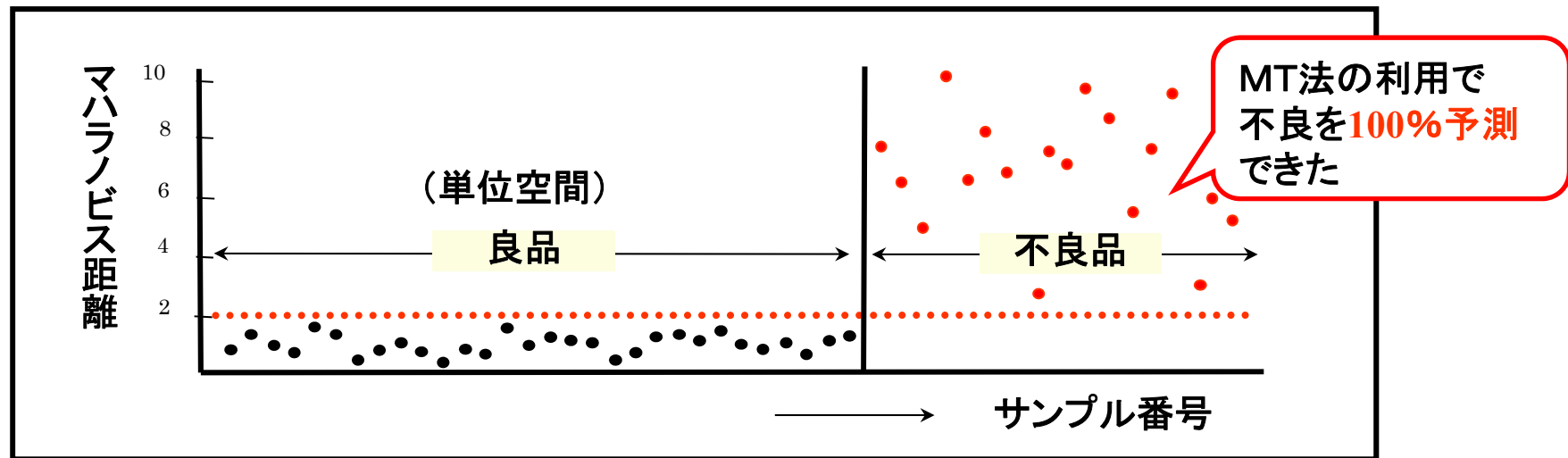
40%ある不良品に、コストの高い工程6の加工を行っている。

工程6以前で不良品を除去したい。

工程内検査項目①～⑱は出荷検査のデータと相関が低く、工程内検査項目の規格が作れない。

6. MT法の工程不良発生予測への適用（続き）

出荷検査での良品を単位空間にしたマハラノビス距離の計算



結果

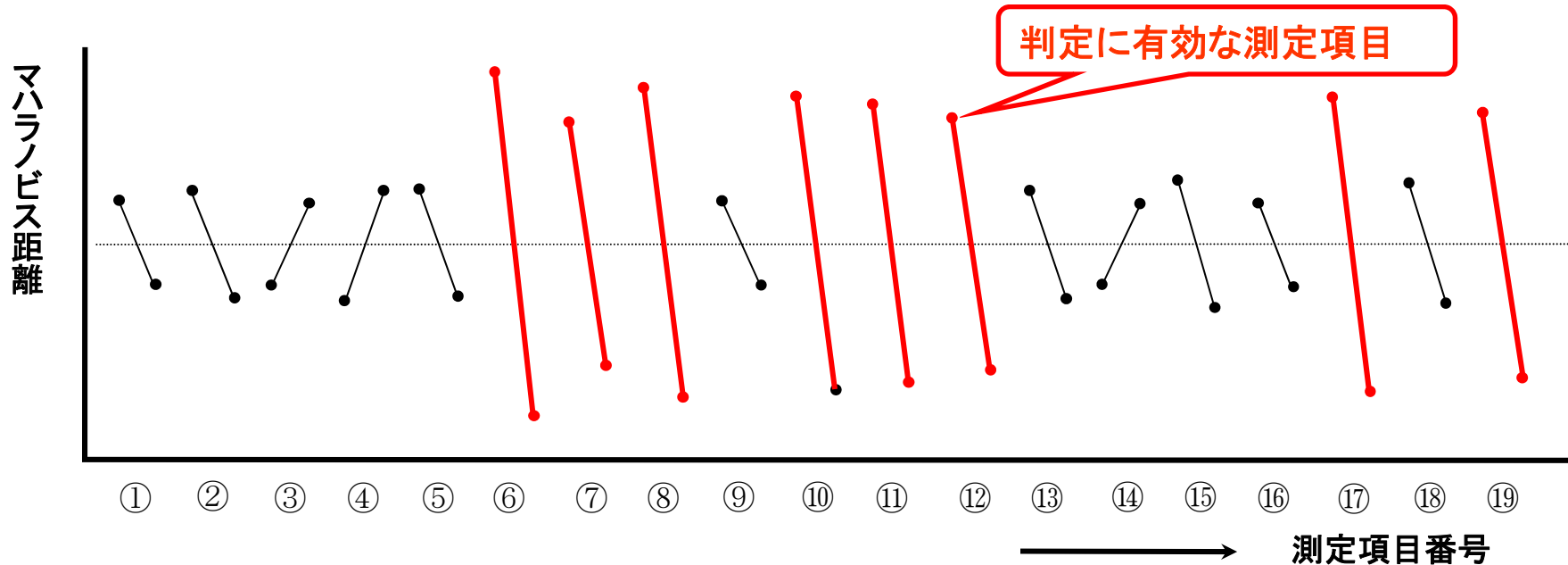
工程内検査項目①～⑱からマハラノビス距離を計算すれば、不良であることを100%予測できる（マハラノビス距離 ≥ 2 ）。

不良品をコストの高い工程6の前に除去できる。

6. MT法の工程不良発生予測への適用（続き）

直交表を利用した項目選択

①～⑱の工程内測定項目を19個の「因子」と考えて、直交表に割り付ける。第1水準はその項目を「使う」、第2水準はその項目を「使わない」とし、直交表の指示する条件でマハラノビス距離を計算。



工程5の測定項目も含めなければ、良／不良の判定がうまく行えないことを示している。

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いただけます <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>