

## StatWorks/V5による直積法の解析事例

※この資料は、StatWorks/V5活用ガイドブックから一部を抜き出し、編集・加工したものです。本資料の内容は予告なく変更されることがあります。

ある精密機器メーカーC社では、薄膜金属材料Zの表面加工を行っています。今回は表面加工を開始してから5分後の表面の「加工深さ」を特性値として、それをできるだけ小さくしたいと考えています。（できれば90[μm]以下にしたい）。制御因子は下記のAからHまでの8因子で、これをL18(2×3<sup>7</sup>)にわりつけて実験を行いたいと考えています。

しかし場合によっては、劣化したエッチング液(旧)を使用することがあり、エッチング液の新旧は選べない状況となっています。

因子種類	因子記号	因子名	第1水準	第2水準	第3水準
内側因子 (制御因子)	A	アルミ配線工程有無	有	無	—
	B	薬剤B割合	10%	15%	20%
	C	薬剤C割合	5%	8%	10%
	D	レジストベーク温度	100度	120度	150度
	E	エッチング液温度	20度	25度	30度
	F	薬剤F濃度	20%	30%	40%
	G	薬剤G濃度	10%	20%	30%
	H	シート抵抗値	100Ω	125Ω	140Ω
外側因子 (誤差因子)	I	エッチング液の新旧	エッチング液 (新)	エッチング液 (旧)	—

実験データ

No	I								I	
	A	B	C	D	E	F	G	H	エッチング液(新)	エッチング液(旧)
1	1	1	1	1	1	1	1	1	170.8	217.9
2	1	1	2	2	2	2	2	2	130.2	196.6
3	1	1	3	3	3	3	3	3	129.5	137.3
4	1	2	1	1	2	2	3	3	100.0	159.9
5	1	2	2	2	3	3	1	1	99.3	118.2
6	1	2	3	3	1	1	2	2	179.5	293.4
7	1	3	1	2	1	3	2	3	168.8	243.5
8	1	3	2	3	2	1	3	1	123.0	181.8
9	1	3	3	1	3	2	1	2	94.2	107.0
10	2	1	1	3	3	2	2	1	58.0	66.0
11	2	1	2	1	1	3	3	2	166.3	237.1
12	2	1	3	2	2	1	1	3	99.3	175.0
13	2	2	1	2	3	1	3	2	71.4	77.3
14	2	2	2	3	1	2	1	3	165.9	270.6
15	2	2	3	1	2	3	2	1	109.7	170.6
16	2	3	1	3	2	3	1	2	70.0	162.4
17	2	3	2	1	3	1	2	3	60.9	66.9
18	2	3	3	2	1	2	3	1	163.6	264.9

以上の情報をもとに、エッチング液の新旧の影響を受けにくく、加工深さを小さくするような最適条件を求めます。

参考文献：棟近雅彦監修，山田秀，立林和夫，吉野睦著（2012）：「パラメータ設計・応答曲面法・ロバスト最適化入門」，日科技連出版社

※説明用にデータを加工しています。

### 手順 1

本事例のサンプルデータを読み込みます。

1 列目 (サンプル名) には内側因子のわりつけ情報, 2~9 列目 (質的変数) には内側因子の水準, 10 列目と 11 列目 (量的変数) には, エッチング液 (新), エッチング液 (旧) それぞれを使った時の加工深さのデータが入っています。

	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	N10	N11	
S1	内側わりつけ	アルミ配線	薬剤割合	薬剤割合	レジストバーク温度	エッチング液温度	薬剤濃度	薬剤濃度	薬剤濃度	シート抵抗値	エッチング液 (新)	エッチング液 (旧)
A	有	10%	5%	100度	20度	20%	10%	100%	170.8	217.9		
B	有	10%	8%	120度	25度	30%	20%	125%	130.2	196.6		
C	有	10%	10%	150度	30度	40%	30%	140%	129.5	137.3		
D	有	15%	5%	100度	25度	30%	30%	140%	100.0	159.9		
E	有	15%	8%	120度	30度	40%	10%	100%	99.3	118.2		
F	有	15%	10%	150度	20度	20%	20%	125%	179.5	293.4		
G	有	20%	5%	120度	20度	40%	20%	140%	168.8	243.5		
H	有	20%	8%	150度	25度	20%	30%	100%	123.0	181.8		
I	有	20%	10%	100度	30度	30%	10%	125%	94.2	107.0		
J	無	10%	5%	150度	30度	30%	20%	100%	59.0	66.0		
K	無	10%	8%	100度	20度	40%	30%	125%	166.3	237.1		
L	無	10%	10%	120度	25度	20%	10%	140%	99.3	175.0		
M	無	15%	5%	120度	30度	20%	30%	125%	71.4	77.3		
N	無	15%	8%	150度	20度	30%	10%	140%	165.9	270.6		
O	無	15%	10%	100度	25度	40%	20%	100%	109.7	170.6		
P	無	20%	5%	150度	25度	40%	10%	125%	70.0	162.4		
Q	無	20%	8%	100度	30度	20%	20%	140%	60.9	66.9		
R	無	20%	10%	120度	20度	30%	30%	100%	163.6	264.9		

### 手順 2

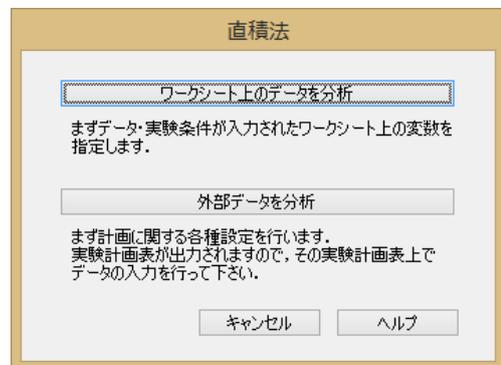
メニューから「手法選択」 - 「実験計画法」 - 「直積法」を選択します。



### 手順 3

ここでは予めワークシート上にデータを入力しているため、「ワークシート上のデータを分析」をクリックします。

一方, もし Excel 上等にデータがある場合は「外部データを分析」を選択します。



### 手順 4

「変数の指定」ダイアログで, 特性値に「エッチング液 (新)」と「エッチング液 (旧)」, 実験条件に「アルミ配線」から「シート抵抗値」までの内側因子 7 つ, そして, わりつけとして既にわりつけ情報が入力されている「内側わりつけ」を指定して次に進みます。

特性値	No.	変数名	変換
N	10	エッチング液(新)	N10
N	11	エッチング液(旧)	N11

実験条件	No.	変数名	変換
C	2	アルミ配線	C2
C	3	薬剤割合	C3
C	4	薬剤割合	C4
C	5	レジストバーク温度	C5
C	6	エッチング液温度	C6

わりつけ	No.	変数名	変換
S	1	内側わりつけ	S1

### 手順 5

「因子数・水準数の指定」ダイアログでは、まず内側実験回数が18で、外側実験回数が2であることを確認します。また、内側因子の因子名や水準に間違いがないかどうかを確認します。

さらに外側因子の因子数を「1」、水準数を「2」にして、因子名を「エッチング液新旧」とします。

因子数・水準数の指定

内側実験回数: 18      外側実験回数: 2

内側因子      因子数: 8

No	記号	因子名	水準数
1	A	アルミ配線	2
2	B	薬剤B割合	3
3	C	薬剤C割合	3
4	D	レジストベーク温度	3
5	E	エッチング液温度	3
6	F	薬剤F濃度	3
7	G	薬剤G濃度	3
8	H	シート抵抗値	3

外側因子      因子数: 1

No	記号	因子名	水準数
1	1	エッチング液の新E	2

<戻る      次へ>      キャンセル      ヘルプ

### 手順 6

「計画種類の指定」ダイアログでは、内側計画が直交配列表、外側計画が要因配置計画（繰り返し：なし）になっていることを確認して次へ進みます。

計画種類の指定

内側計画

直交配列表

要因配置計画

繰り返し      繰り返し数: [ ]

外側計画

直交配列表

要因配置計画

繰り返し      繰り返し数: [ ]

<戻る      次へ>      キャンセル      ヘルプ

### 手順 7

内側計画に直交配列表を用いているため、次に内側因子のわりつけ画面が表示されます。

L18(2<sup>1</sup>×3<sup>7</sup>)の直交配列表が選択されていますが、正しくわりつけがされていることを確認した上で、次へ進みます。

わりつけ (内側因子)

直交配列表: L18(2<sup>1</sup>×3<sup>7</sup>)

わりつけを因子記号で指定して下さい。  
(主効果の例: A, 交互作用の例: AB, 誤差: (空白))

列番	わりつけ
1	A
2	B
3	C
4	D
5	E
6	F
7	G
8	H

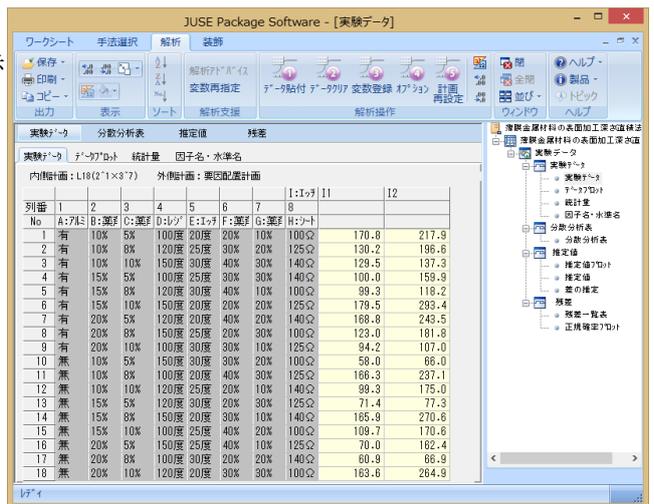
記号	水準数	因子名
A	2	アルミ配線
B	3	薬剤B割合
C	3	薬剤C割合
D	3	レジストベーク温度
E	3	エッチング液温度
F	3	薬剤F濃度
G	3	薬剤G濃度
H	3	シート抵抗値

<戻る      次へ>      キャンセル      ヘルプ

**手順 8**

「実験データ」タブに、各実験の条件と、特性値が表示されます。

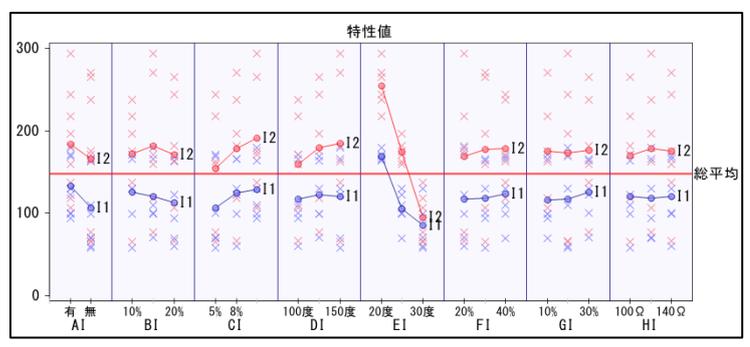
次に、各因子の効果を視覚的に確認します。画面上部の「データプロット」タブをクリックします。



**手順 9**

「データプロット」タブでは、各因子の主効果や交互作用を確認します。

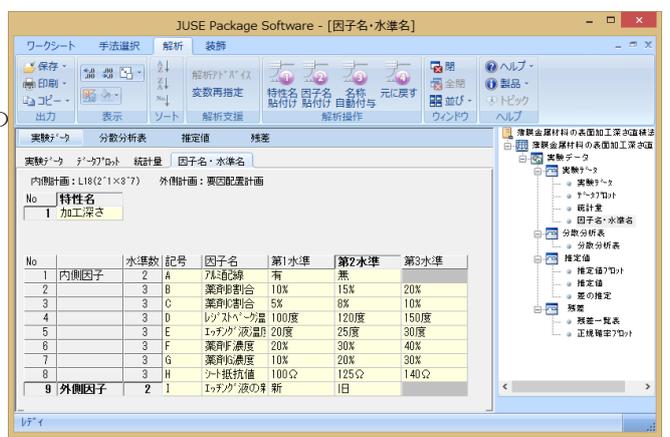
例えば因子 E と I の要因効果図からは、E×I の線が平行でなく、E×I の交互作用が大きそうに見えます。



**手順 10**

「因子名・水準名」タブでは、特性値の名称や、因子名・水準名を変更することができます。

「特性名」を「加工深さ」、外側因子 I (エッチング液の新旧) の第 1 水準の名称を「新」、第 2 水準の名称を「旧」に変更しておきます。



**手順 11**

画面上部の「分散分析表」タブをクリックすると、分散分析表の画面が表示されます。ここでは主効果や交互作用のプーリングを行うことができます。

内側因子と外側因子の交互作用は、分散比が 2.0 以下の A×I, B×I, C×I, F×I, G×I, H×I をプーリングします。プーリングの方法は、プーリングしたい行をクリックし水色に反転した上で、「プーリング」ボタンを押します。

次に内側因子の主効果の B, F, G, H をプーリングします。

No	要因	平方和	自由度	分散	分散比	検定	P 値 (上側)
1	A:加工深さ	4334.028	1	4334.028	22.636	*	0.041
2	B:薬液割合	521.602	2	260.801	1.362		0.423
3	C:薬液割合	5626.569	2	2813.284	14.693		0.064
4	D:レジスト厚	1483.887	2	741.944	3.875		0.205
5	E:エッチング液濃度	89389.344	2	44694.672	233.432	**	0.004
6	F:薬液濃度	387.944	2	193.972	1.013		0.497
7	G:薬液濃度	234.681	2	117.340	0.613		0.620
8	H:ショット抵抗値	81.496	2	40.748	0.213		0.825
9	1次誤差	382.936	2	191.468	1.543		0.393
10	I:エッチング液の	27005.444	1	27005.444	217.675	**	0.005
11	A I	118.810	1	118.810	0.958		0.431
12	B I	363.162	2	181.581	1.464		0.406
13	C I	297.982	2	148.991	1.201		0.454
14	D I	709.057	2	354.529	2.858		0.259
15	E I	9466.507	2	4733.254	38.152	*	0.026
16	F I	88.274	2	44.137	0.356		0.738
17	G I	92.624	2	46.312	0.373		0.728
18	H I	188.162	2	94.081	0.758		0.569
19	2次誤差	248.127	2	124.063			
20	計	141020.636	35				

### 手順 1 2

さらに 1 次誤差の分散比も 2.0 以下のためプーリングを行います。

No	要因	平方和	自由度	分散	分散比	検定	P 値 (上側)
1	A:アルミ記線	4334.028	1	4334.028	26.942	**	0.000
2	C:薬劑の割合	5626.569	2	2813.284	17.488	**	0.001
3	D:レジストパター	1483.887	2	741.944	4.612	*	0.038
4	E:エッチング液濃	89389.344	2	44694.672	277.838	**	0.000
5	1次誤差	1608.658	10	160.866	1.497		0.244
6	I:エッチング液の	27005.444	1	27005.444	251.278	**	0.000
7	D I	709.057	2	354.529	3.299	*	0.069
8	E I	9466.507	2	4733.254	44.042	**	0.000
9	2次誤差	1397.141	13	107.472			
10	計	141020.636	35				

### 手順 1 3

プーリングされていない主効果や交互作用の分散比は全て 2.0 以上になっています。これでプーリングは完了です。

No	要因	平方和	自由度	分散	分散比	検定	P 値 (上側)
1	A:アルミ記線	4334.028	1	4334.028	33.163	**	0.000
2	C:薬劑の割合	5626.569	2	2813.284	21.527	**	0.000
3	D:レジストパター	1483.887	2	741.944	5.677	**	0.010
4	E:エッチング液濃	89389.344	2	44694.672	341.998	**	0.000
5	I:エッチング液の	27005.444	1	27005.444	206.642	**	0.000
6	D I	709.057	2	354.529	2.713		0.088
7	E I	9466.507	2	4733.254	36.218	**	0.000
8	誤差	3005.799	23	130.687			
9	計	141020.636	35				

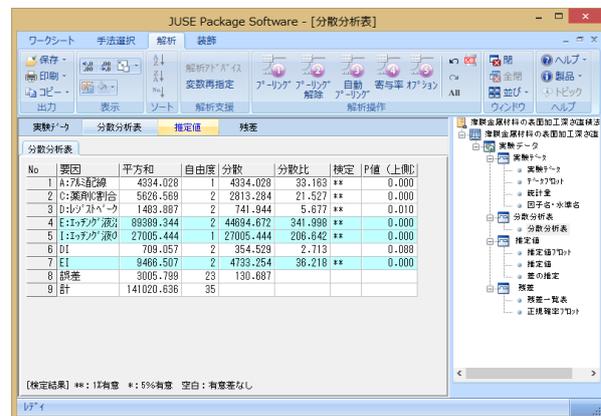


プーリングの絶対的な基準は存在しませんが、目安として、分散比が 2.0 以下の因子をプーリングすることが多いようです。

### 手順 1 4

分散分析表より、外側因子 I (エッチング液の新旧) と内側因子 E (エッチング液温度) との交互作用が有意であるため、この組み合わせで推定を行います。

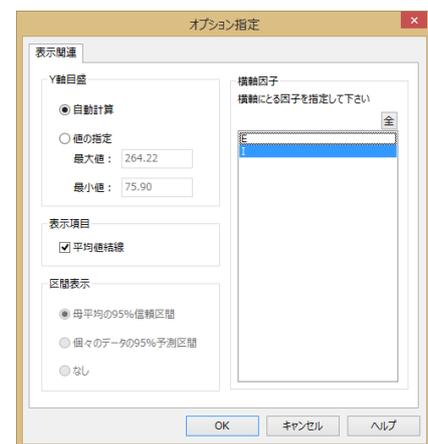
推定に用いる主効果と交互作用「E」、「I」、「EI」の 3 つの行をクリックし水色に反転させた状態にして、「推定値」タブへ移ります。



### 手順 1 5

「推定値プロット」画面では、外側因子 I (エッチング液の新旧) の水準によるばらつきの違いを見るために、横軸を I に設定します。

「推定値プロット」画面上部の「オプション」ボタンを押し、横軸因子を「I」のみに設定した上で、「OK」ボタンを押します。



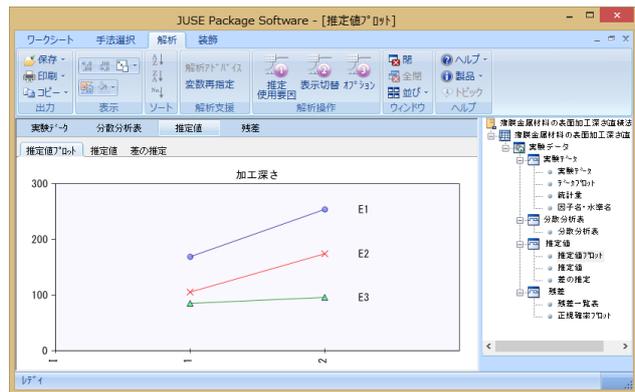
### 手順 1 6

「推定値プロット」画面で、E(エッチング液温度)の各水準によって、特性値である加工深さにどれくらい違いが出るかどうか（ばらつきが大きいかどうか）が分かります。



### わかること

E (エッチング液温度) が E3 (30 度) の時、加工深さに大きな違いはなく、ばらつきが小さくなります。



### 手順 1 7

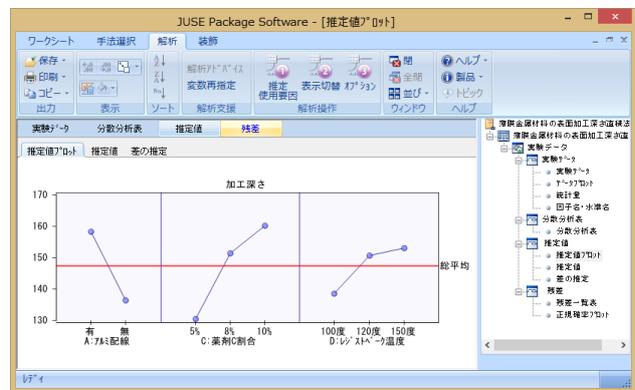
次に、内側因子の最適水準を求めます。「分散分析表」タブに戻り、有意となった因子「A」, 「C」, 「D」を選んだ状態で「推定値」タブをクリックします。

「推定値プロット」タブの画面上部の「表示切替」ボタンを押して、各因子の水準を横軸としたグラフを表示し、加工深さを小さくするような水準を求めます。



### わかること

A (アルミ配線) は A2 (無), C (薬剤 C 割合) は C1 (5%), D (レジストベーク温度) は D1 (100 度) の時に、加工深さを小さくすることが分かります。以上より、最適水準 A2C1D1E3 が求まりました。



### 手順 1 8

また、その時の加工深さの推定値を求めます。「分散分析表」タブに戻り、推定に用いる「A」, 「C」, 「D」, 「E」, 「I」, 「EI」を選んだ状態で、「推定値」グループの「推定値」タブをクリックします。

母平均の点推定値に加え、母平均の信頼区間や新たに採取されるデータの予測区間も出力されます。

No	A	C	D	E	I		母平均	信頼区間			予測区間		
								下限(95%)	上限(9%)	幅	下限(95%)	上限(9%)	幅
58	無	5%	100度	25度	旧		137.53	124.458	50.603	13.072	110.509	64.552	27.021
59	無	5%	100度	30度	新	min	48.70	35.625	61.769	13.072	21.676	75.718	27.021
60	無	5%	100度	30度	旧		58.60	45.525	71.669	13.072	31.576	85.618	27.021



### わかること

最適水準 A2C1D1E3 において、誤差因子 I (エッチング液新旧) が I1 (新) の時に、加工深さが最小となります。目標は加工深さを 90[ $\mu$ m]以下とすることでしたが、母平均の点推定値は 48.70、95% 予測区間は、21.676~75.718 となり、目標値をクリアしました。



## まとめ

### わかること

- ・外側因子 I (エッチング液の新旧) と内側因子 E (エッチング液温度) には交互作用がありますが、誤差因子である I (エッチング液の新旧) の変動を最も小さく抑える水準は E3 (30 度) です。
  - ・特性値である加工深さを最小にする水準は A2C1D1 (A (無), C (5%), D(100 度) です。
  - ・最適条件 A2C1D1E3 で、特性値が最大, 最小になるのは
    - 最小: I1 (エッチング液 (旧))  $48.70 \pm 27.021$  (21.676, 75.718)
    - 最大: I2 (エッチング液 (新))  $58.60 \pm 27.021$  (31.576, 85.618)
- となります。
- ・設問より, 薄膜金属材料 Z の加工深さは小さいほど良く, かつ  $90[\mu\text{m}]$  以下であることが望ましい状態でした。よって使用するエッチング液の新旧に関わらず, 求められた最適水準 A2C1D1E3 では目標を満たすことが分かりました。

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>