

演習問題 4 解答用紙

問 1.1 工程の 4M のフレームワークに当てはめながら、「レジスト寸法のばらつきに影響を与えている」と考えられる変動要因を図に整理することにした。図中の空欄を埋めよ。

工程の 4M (M , M , M , M) のフレームワークに当てはめながら、図 1 のような を作成した。

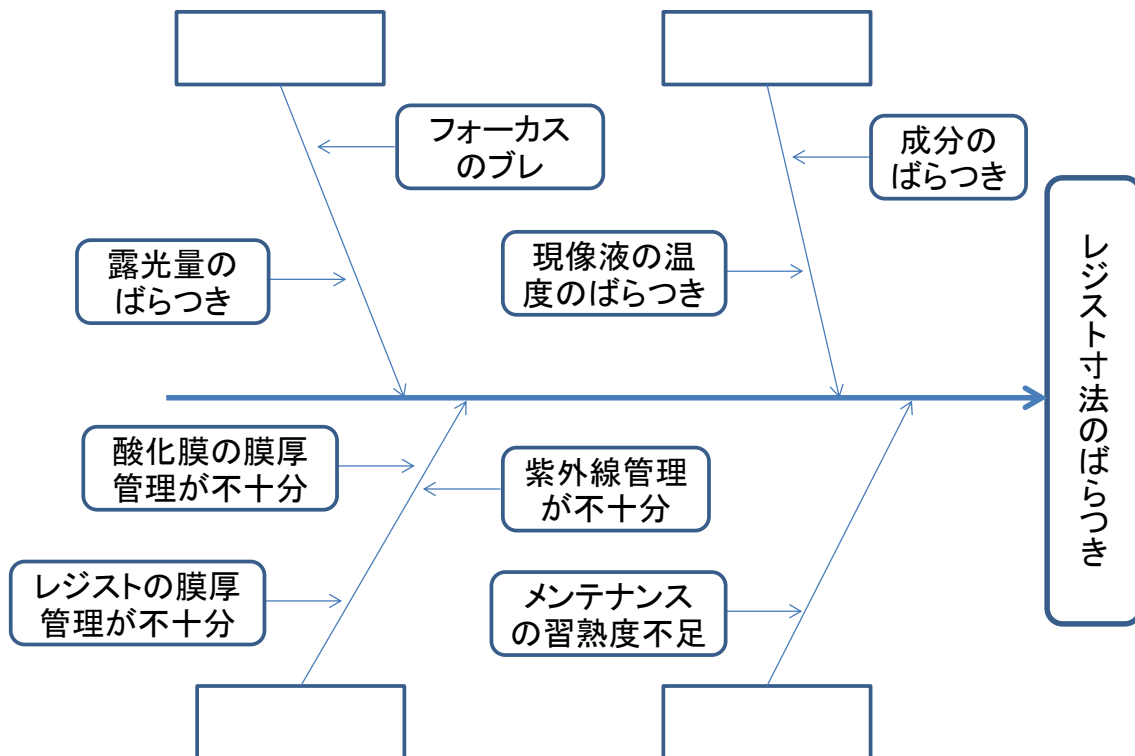
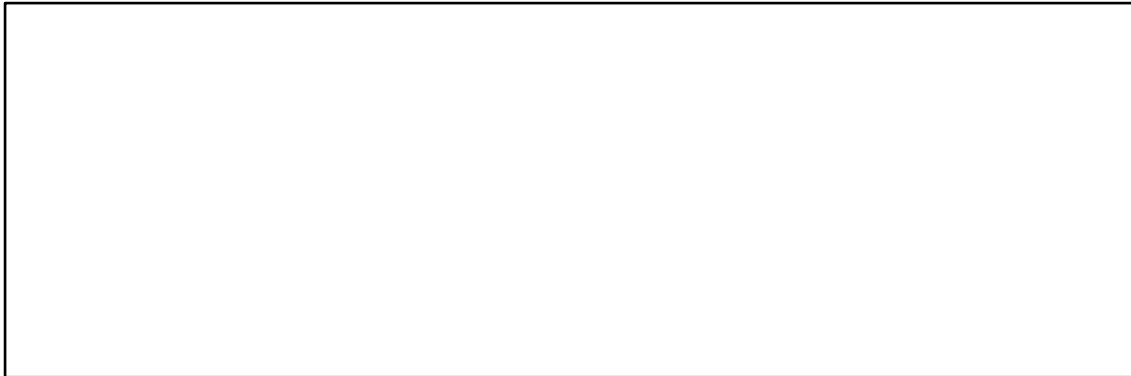


図 1 ばらつきに影響すると考えられる原因を整理した図

問 1.2 5 人の技術者がブレインストーミングを行っている。このような状況で、「どのようなメンバーを集めるべきか」について述べよ。



問 2.1 表 4.1 のデータを利用して、「レジスト寸法のヒストグラム」を作成し、 C_p および C_{pk} の値を計算した後に得られる情報を考察せよ。

【ヒストグラムの作成】

「レジスト寸法のヒストグラム」を作成せよ。

【得られる情報】

まず、作成した「レジスト寸法のヒストグラム」をしてみる。レジスト寸法のばらつきが大きいと認識されていたとおり、規格に対してばらつきが { 大きく , 小さく } , C_p の値は であり、 C_{pk} の値は である。どちらの値であっても、1.33 を下回っていることから、工程能力は { 十分 , 不十分 } である。また、両規格の中心は 0 であり、平均値が約 0.95 であることから、偏りがあるときの工程能力指数である { C_p , C_{pk} } の値で評価するのが妥当である。なお、レジスト寸法の平均値は、露光量を操作変数として制御可能であることからあまり問題ではなく、レジスト寸法のばらつきのほうが深刻な問題である。

問 2.2 表 4.1 のデータを利用して、「レジスト膜厚のヒストグラム」を作成し、分布の状況について考察せよ。なお、レジスト膜厚は 0 ± 4 に入ることを目標に制御されている。

【ヒストグラムの作成】

「レジスト膜厚のヒストグラム」を作成せよ。

【得られる情報】

「レジスト膜厚のヒストグラム」をしてみると、上側規格を超えているデータ数が 100 個中 個あり、{ 大きな , 小さな } 偏りが見られる。当然、 C_{pk} は 0.144 と非常に { 高い , 低い } 値となっている。だが、この結果は、4 人の技術者の見解とは一致しな

かった。なぜなら、レジスト膜厚は、塗布機の回転速度で制御されていることから、これほどばらつきが大きいことは考えられなかった。そこで、データ収集の際に記入していた付随情報を確認してみると、自工場のデータと関連会社である他工場のデータが混在していることがわかった。このことから、ヒストグラムが { 正規分布形 , 歯抜け形 , 右歪み型 , 左絶壁形 , 二山型 , 離れ小島形 } となっていることについても納得できる。

問 2.3 表 4.2 のデータを利用して、「レジスト膜厚のヒストグラム」を作成し、 C_p および C_{pk} の値も計算せよ。

【ヒストグラムの作成】

「レジスト膜厚のヒストグラム」を作成せよ。

【得られる情報】

「レジスト膜厚のヒストグラム」を見ながら、社内データベースから抽出した自工場のレジスト膜厚のデータから計算し直すと、 C_p の値は , C_{pk} の値は であり、ヒストグラムからも他工場のデータが混在していた場合に比べ、ばらつきが { 大きく , 小さく } なっていることがわかる。

問 2.4 表 4.1 のデータを利用して、「フォーカス値および酸化膜の膜厚のヒストグラム」を作成し、 C_p および C_{pk} の値も計算せよ。なお、フォーカス値の規格は 0 ± 4 に入ることとを制御されており、酸化膜の膜厚の規格は 0 ± 2 である。

【ヒストグラムの作成】

「フォーカス値および酸化膜のヒストグラム」を作成せよ。

【得られる情報】

「フォーカス値のヒストグラム」を見てみると、 C_p の値は であり、1.33 を超えていることから、工程能力は { 十分 , 不十分 } であると判断される。 C_{pk} の値は であり、偏りを考慮すると工程能力は少し不足しているが、それほどばらつきは大きくないことがわかる。

対照的に「酸化膜厚のばらつき」は大きく、 C_p の値は であり、 C_{pk} の値は である。変動要因であるレジスト膜厚、フォーカス値および酸化膜の膜厚のなかで、最も酸化膜の膜厚の C_{pk} の値が低いことから、「酸化膜の膜厚変動の低減がレジスト寸法のばらつき低減に有効である」と推察される。

問 2.5 レジスト膜厚のデータのみ表 4.2 を使用し、他の変動要因とレジスト寸法について

は表 4.1 のデータを使用して、多変量連関図を作成せよ。また、散布図ごとに相関係数の値も計算せよ。

【多変量連関図の作成】

「多変量連関図」を作成しなさい。

【得られる情報】

「多変量連関図」のなかにある「レジスト寸法と各変動要因との散布図」を見てみると、「レジスト寸法とレジスト膜厚」および「レジスト寸法とフォーカス値」の散布図では{ 正の相関関係がある , 負の相関関係がある , 相関関係がない }。これらは事前に特性要因図から予想した結果と一致している。しかし、酸化膜の膜厚に関しては、予想に反して{ 正の相関関係がある , 負の相関関係がある , 相関関係がない }。酸化膜の膜厚は、規格に対してばらつきが大きいことは事実であるが、レジスト寸法とは{ 正の相関関係がある , 負の相関関係がある , 相関関係がない } ことから、改善対象の変動要因からは取り除くことにした。

問 3.1 今回の実験では繰返しが2回となっている。実験を簡略化するために、同じ膜厚のレジストを1個のみ作製して実験データを得ることは正しいだろうか。理由とともに答えなさい。

問 3.2 「組合せにおける膜厚の平均値，因子における各水準の平均値」の表の空欄を埋めよ．

【グラフの作成】

得られた表 4.5 の実験データから，因子の水準の組合せに対して平均値を求めて、「組合せにおける膜厚の平均値，因子における各水準の平均値」の表を作成する．

表 1 組合せにおける膜厚の平均値，因子における各水準の平均値

		因子 A：レジスト膜厚		行の平均値
		A ₁ ：1.0	A ₂ ：2.0	
因子 B： フォーカス値	B ₁ ：5.0			
	B ₂ ：6.0			
列の平均値				

問 3.3 「因子 A および因子 B」それぞれの「主効果グラフおよび交互作用グラフ」を作成し，考察せよ．

【グラフの作成】

上記で作成した表 1 の値を用いて「因子 A および因子 B」それぞれの「主効果グラフおよび交互作用グラフ」を作成せよ．

【得られる情報】

「主効果グラフ」から，レジスト膜厚（因子 A）は，第 1 水準から第 2 水準へ変化させると，レジスト寸法は短くなる．逆にフォーカス値（因子 B）は，第 1 水準から第 2 水準へ変化させると，レジスト寸法は長くなる．その一方で，「交互作用グラフ」を見ると，因子 A に対して B₁ および B₂ の変化パターンはほぼ平行移動の関係になっていることから，2 因子交互作用（A×B）の存在可能性は { 高い，低い } と推察できる．

問 3.4 主効果（因子 A および因子 B）の平方和，自由度，平均平方をそれぞれ計算せよ．

因子 A における各水準の平均値（表 4.4 の列の平均値）から，

$$S_A = \boxed{}$$

と求められる。因子 B についても同様にして、以下のように求められる。

$$S_B = \boxed{}$$

主効果の平方和の自由度は、これも 1 元配置と同様、「(水準数) - 1」であるので、因子 A の平方和の自由度は $\phi_A = \boxed{}$ ，因子 B の平方和の自由度は $\phi_B = \boxed{}$ である。平均平方は、平方和を自由度で割る。因子 A の平均平方は $V_A = \boxed{}$ ，因子 B の平均平方は $V_B = \boxed{}$ である。

問 3.5 「2 因子交互作用効果の推定値」の表の空欄を埋めよ。

表 2 2 因子交互作用効果の推定値

		因子 A : レジスト膜厚	
		$A_1 : 1.0$	$A_2 : 2.0$
因子 B : フォーカス値	$B_1 : 5.0$		
	$B_2 : 6.0$		

問 3.6 2 因子交互作用効果の平方和，自由度，平均平方をそれぞれ求めよ。

表 2 の数値をすべて 2 乗して合計すると因子 A と因子 B の 2 因子交互作用効果の平方和 $S_{A \times B}$ は、以下ようになる。

$$S_{A \times B} = \boxed{}$$

2 因子交互作用効果の平方和 $S_{A \times B}$ の自由度 $\phi_{A \times B}$ は、以下ようになる。

$$\phi_{A \times B} = \boxed{}$$

2 因子交互作用効果の平均平方は、以下ようになる。

$$V_{A \times B} = \boxed{}$$

問 3.7 レジスト寸法の誤差を求め、その表の空欄を埋めよ。

表 3 レジスト寸法の誤差

		因子 A : レジスト膜厚	
		$A_1 : 1.0$	$A_2 : 2.0$
因子 B : フォーカス値	$B_1 : 5.0$		
	$B_2 : 6.0$		

問 3.8 誤差平方和, 自由度, 平均平方をそれぞれ求めよ.

誤差平方和 S_e は, 以下のようになる.

$$S_e = \boxed{}$$

誤差平方和の自由度 ϕ_e は, 総平方和 S_T の自由度 ϕ_T を用いて,

$$\phi_e = \phi_T - \phi_A - \phi_B - \phi_{A \times B}$$

であることから, 以下のようになる.

$$\phi_e = \boxed{}$$

また, 平均平方は, 以下のようになる.

$$V_e = \boxed{}$$

問 3.9 レジスト寸法の各データと全平均との差をそれぞれ求め, その表の空欄を埋めよ.

表 4 データの全平均との差

		因子 A : レジスト膜厚	
		$A_1 : 1.0$	$A_2 : 2.0$
因子 B : フォーカス値	$B_1 : 5.0$		
	$B_2 : 6.0$		

問 3.10 総平方和を求めよ.

表 4 の個々の値を 2 乗し, 合計したものが総平方和 S_T であることから, 以下のようになる.

$$S_T = \boxed{}$$

【分散分析】

以上の計算結果を分散分析表にまとめ, 主効果および交互作用効果の有無を判定せよ.

問 3.11 分散分析表を作成し, 主効果および交互作用効果の有無を判定せよ.

【2 因子交互作用効果の検定】

2 因子交互作用効果の検定を行う際の帰無仮説および対立仮説は,

$$\begin{array}{l} H_0 : \boxed{} \\ H_1 : \boxed{} \end{array}$$

である. もし, 2 因子交互作用効果がなければ, $F_0 = V_{A \times B} / V_e$ は分子の自由度 1, 分母の自由度 4 の F 分布に従うことから,

$$F_0 \geq F(1, 4; 0.05)$$

のとき, 帰無仮説を棄却する. 今回は, $F(1, 4; 0.05) = \boxed{}$ なので, $F_0 \leq F(1, 4; 0.05)$ が成り立ち, 「2 因子交互作用効果がある」とはいえない. よって, 組合せを考慮する必要のないことがわかる.

次に主効果の検定を行う.

【因子 A (レジスト膜厚) の検定】

帰無仮説と対立仮説は,

$$H_0 : \text{レジスト膜厚 (因子 A) に効果が \{ ある, ない \}}$$

$$H_1 : \text{レジスト膜厚 (因子 A) に効果が \{ ある, ない \}}$$

である. もし, 効果がなければ, $F_0 = V_A / V_e$ は分子の自由度 1, 分母の自由度 4 の F 分布に従うことから,

$$F_0 \geq F(1, 4; 0.05)$$

のとき, 帰無仮説を棄却する. $F(1, 4; 0.05) = \boxed{}$ なので, $F_0 \geq F(1, 4; 0.05)$ が成り立ち, 「レジスト膜厚は効果がある」といえる. また, $F(1, 4; 0.01) = \boxed{}$ であるから, 因子 A の主効果は高度に { 有意である, 有意でない } である.

【因子 B (フォーカス値) の検定】

帰無仮説と対立仮説は,

H_0 : フォーカス値 (因子 B) に効果が { ある , ない }

H_1 : フォーカス値 (因子 B) に効果が { ある , ない }

である. もし, 効果がなければ, $F_0 = V_B / V_e$ は分子の自由度 1, 分母の自由度 4 の F 分布に従うことから,

$$F_0 \geq F(1, 4; 0.05)$$

のとき, 帰無仮説を棄却する. $F(1, 4; 0.05) = \boxed{}$ なので, $F_0 \leq F(1, 4; 0.05)$ が成り立ち, 「フォーカス値の主効果がある」とはいえない.

【分散分析表の作成】

分散分析表を作成せよ.

【得られる情報】

「分散分析表」(表 5) の解析結果より, 相関分析からレジスト寸法のばらつきに効いている変動要因として, レジスト膜厚とフォーカス値の 2 つが有力な候補であったが, 実験により実際に効いている変動要因は { レジスト膜厚 , フォーカス値 } のみであることがわかった. したがって, { レジスト膜厚 , フォーカス値 } のばらつきを抑えることができれば, レジスト寸法のばらつき低減が期待できる. よって, レジスト膜厚の規格幅を現状よりも狭くし, 管理を徹底する対策をとった.

表 5 分散分析表

要因	平方和	自由度	平均平方	F_0
A				
B				
AB				
誤差 e				
計				

問 4.1 母分散の点推定および信頼率を 95%とした区間推定を行え.

はじめに母分散の点推定を行うと,

- ・点推定：

$$\hat{\sigma}^2 = \boxed{}$$

となり，信頼率を 95%としたときの区間推定は，以下のようになる．

- ・区間推定：

$$(\boxed{}, \boxed{})$$

問 5.2 改善効果の有無を検定により判定せよ.

母分散の統計的検定の手順に従って解析を行う．なお，基準値を σ_0^2 ，そのときの検定統

計量を χ_0^2 で表す．

手順 1 仮説の設定

- ・帰無仮説 H_0 : $\sigma^2 = 1.11 (= \sigma_0^2)$

- ・対立仮説 H_1 : $\boxed{}$

手順 2 有意水準 α の設定 (0.05 あるいは 0.01)

$\alpha = 0.05$ とする．

手順 3 棄却域 R の設定

対立仮説 H_1 が $\boxed{}$ であり，有意水準 $\alpha = 0.05$ であることから，棄却域 R は，以下のようになる．

$$\chi_0^2 \leq \chi^2(n-1, 1-\alpha) = \boxed{}$$

手順 4 検定統計量の計算

$$\chi_0^2 = \boxed{}$$

手順 5 判定

手順 4 で計算した検定統計量の値が，手順 3 で設定した棄却域 R に含まれていることから，帰無仮説 H_0 は { 棄却される ， 棄却されない }．つまり，母分散は改善目標値であった 1.11 よりも { 大きい ， 小さい } と判定されたことになる．したがって，{ 改善活動の効果はあった ， 改善活動の効果はなかった } と結論づけることができる．