

# 品質工学を適用したリブ形成条件の最適化

## PDP rib forming optimization with Robust Quality Engineering

板谷 旬展, 熊坂 治

Masanobu Itaya, Osamu Kumasaka

**要 旨** プラズマディスプレイパネル (PDP) の隔壁 (リブ) 形成に使われるサンドブラスト工法の条件最適化を品質工学の動特性および静特性解析により試みた。

工程の内乱因子に影響されにくく安定して、しかもリブの頂幅、裾幅を独立して調整することが可能な条件を見出した。

**Summary** The conditions for sandblasting used in PDP (Plazma Display Panel) rib forming were studied and optimized by means of the Robust Quality Engineering Method both in dynamic and statistic analysis. A set of sandblast parameters, which gives stability free from process variation effects and allows independent width control of the rib top and bottom, was found.

キーワード : PDP, リブ, 隔壁, サンドブラスト, 品質工学, 直交表

### 1. まえがき

プラズマディスプレイ (以下 PDP) は、隔壁 (リブ) で囲まれた自発光する微小な画素を集合させて画面を形成するフラットパネルディスプレイの一種である。

リブ形状は PDP の発光特性に大きく影響するため、試作パネルで安定して形成できないと意図する実験評価ができない。一方でパネルの高密度化に従い、安定したリブ形成は次第に難易度が高くなっている。

パネル試作課では 3 年ほど前から工程能力向上のために、品質工学を取り入れた加工条件最適化を進めてきており、今回はリブ形状コントロールを目指して適用したので報告する。

### 2. PDP のリブ形成の概要

リブ形成のプロセスを図 1 に沿って簡単に説明する。

1. 基板上にペースト状のリブ材料をテーブルコータで塗工後、乾燥する。
2. リブ材料上にフォトレジストフィルムを貼り、

フォトマスクのパターンを露光、現像工程を通してフォトレジストに転写する。

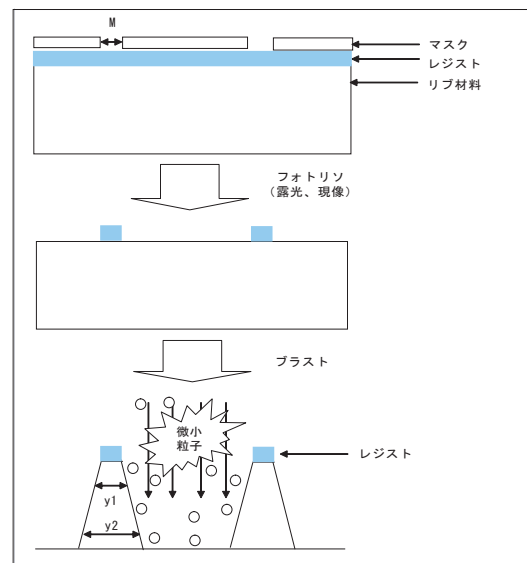


図 1 リブ形成プロセス概要

表 1 品質工学体系

品質工学技法分類	概略説明
オフライン品質工学	開発設計段階での技術的課題を扱う
パラメータ設計	内乱/外乱に強い(ロバストな)システムを設計する
動特性	システムの入力レベルによらないロバストな制御因子の組み合わせを求める
静特性	システム入力一定でのロバストな制御因子組み合わせを求める
オフライン品質工学	損失関数の考えを元に製造段階での工程最適化を図る
許容差設計	工程検査で上流下流を含め総コストを最小にする許容差を求める
検査間隔の最適化	工程検査で上流下流を含め総コストを最小にする検査間隔を求める
装置保全間隔の最適化	装置保全で総コスト最小の保全間隔を求める
工程診断, 調整の最適化	生産工程で総コストを最小にする調整頻度を求める
MTシステム	多次元情報を処理することで, 予測, 判定を行う
MT法	多数良品の多次元情報から作成した単位空間を元に, 個別の良否を判定する。
T法	多数の多次元情報から求めた相関条件で, 個別の評価特性を予測する

3. サンドブラスト工法を用いてレジストパターンに沿ってリブ材料を研削する。

サンドブラスト製法とは、微小な高硬度粒子を被加工物に高圧で噴射することで、目的とする形状に研削する工法である。

### 3. 品質工学パラメータ設計の手順

品質工学には表 1 に示すように多様な手法が混在しており、理解しにくい一因となっている。本実験ではこの中で最も広く普及しているパラメータ設計の静特性 / 動特性を適用する。両手法ともシステムの動作を乱す要因を誤差因子として積極的に評価に取り込み、技術者が自由に設定できる複数の制御因子の組み合わせで誤差因子の影響を低減する点は同じであるが、信号因子と呼ぶシステムに対する入力因子を動特性では複数、静特性では一点でのみ評価するところが異なる。いずれも開発、設計のフロントローディングに有効で、着実に普及しつつあるので、是非参考文献などで学習されたい。

## 4. 実験

### 4.1 実験の目的

リブ形状に悪影響をもたらす内乱因子 (材料, 工程, 後工程プロセスのバラツキ) に左右されにくく、かつ自由に制御できる因子を探索した。

また評価の中で品質工学の動特性と静特性の結果を比較し、扱いやすさ、結果の妥当性、拡張性に関する考察も行うこととした。

### 4.2 基本機能

品質工学動特性における入力と出力の本質的な関係を基本機能と呼び、 $y = \beta M$  といった直線が望ましいとされる。

サンドブラストを用いたリブ形成においては、フォトマスクパターンからリブ形状への寸法転写が基本機能と考えられる。

今回は、図 1 に示すリブの頂上付近の幅  $y_1$  とリブの裾付近の幅  $y_2$  を計測特性とした。

### 4.3 因子の決定

動特性での信号因子 M はフォトマスクのセル開口寸法とした。寸法は表 2 の通り 3 水準をとり、さまざまな寸法、パターンを盛り込んだ実験用フォトマスクを用いてサンプルを作成した。静特性の解析は、表 2 の水準で製品寸法に近い  $M_3$  の部分を動特性データから抜き出して行った。

表 2 信号因子 M

マスク寸法	$M_1$	$M_2$	$M_3$
-------	-------	-------	-------

制御因子は、材料および加工条件から表 3 に示す 11 因子を選択した。水準 1 が試作ラインで標準的に設定している条件、水準 2 は主として改善されると予想される条件である。

誤差因子は、一般に R) 材料の汚染・劣化, P) 工程汚染と組み立て誤差, M) 市場の使用環境の 3 種類を調査するのが、ロバスト性を確保しながら実験数を減らすために効率的とされている。本実験では、R) 材

料 F1,F2 の劣化, P) 某工程の温度変化, M) 後工程での昇温プロセスを誤差因子  $N_0, N_1$  の 2 水準に調査した。誤差因子の組み合わせを表 4 に示す。

表 3 制御因子

	水準 1	水準 2
材料 A	A1	A2
条件 B	高	低
条件 C	低	高
材料 D	D1	D2
条件 E	低	高
材料 F	F1	F2
条件 G	短	長
条件 H	強	弱
条件 I	多	少
条件 J	強	弱
条件 K	高	低

表 4 調査誤差因子

	$N_0$	$N_1$
材料劣化(R)	新品	中古
某工程温度(P)	通常	低温
後工程熱量(M)	通常	過剰

#### 4.4 実験方法

制御因子を表 5 に示すように  $L_{12}$  直交表へ割り付け、外側に信号因子と誤差因子を割り付けた。

PDP 試作ラインで実験計画に従って 12 (直交配列)  $\times$  2 (誤差水準) = 24 枚のサンプルを作成し、リブの断面を切り出して寸法  $y_1, y_2$  につき VK-9510 (キーエンス社) を用いて測定した。

なお、ブラストが過剰でリブが残らなかった部分は代用値として 0 を、ブラストが不足して削れなかったサンプルは、代用値としてセル間ピッチの値を用いて計算を行った。

### 5. $L_{12}$ 実験結果と解析

#### 5.1 動特性

$y_1, y_2$  の測定の生の値は割愛し、測定値から算出した感度, SN 比,  $\beta$  を表 6 に示す。ここで感度は、入力 (マスク寸法) に対する出力 (リブ寸法) をあらわす指標であり、値が大きければほどマスク寸法に対して大きな測定結果が得られたこととなる。SN 比は、誤差 (ノイズ) に対するばらつき指標で、SN 比が大き

表 5  $L_{12}$  直交表

実験No	因子										
	材料A	条件B	条件C	材料D	条件E	材料F	条件G	条件H	条件I	条件J	条件K
1	A1	高	低	D1	低	F1	短	強	多	強	高
2	A1	高	低	D1	低	F2	長	弱	少	弱	低
3	A1	高	高	D2	高	F1	短	強	少	弱	低
4	A1	低	低	D2	高	F1	長	弱	多	強	低
5	A1	低	高	D1	高	F2	短	弱	多	弱	高
6	A1	低	高	D2	低	F2	長	強	少	強	高
7	A2	高	高	D2	低	F1	長	弱	多	弱	高
8	A2	高	高	D1	高	F2	長	強	多	強	低
9	A2	高	低	D2	高	F2	短	弱	少	強	高
10	A2	低	高	D1	低	F1	短	弱	少	強	低
11	A2	低	低	D2	低	F2	短	強	多	弱	低
12	A2	低	低	D1	高	F1	長	強	少	弱	高

表 6 動特性計算結果

実験No	$y_1$			$y_2$		
	SN比(db)	感度(db)	$\beta$	SN比(db)	感度(db)	$\beta$
1	-31.08	-7.86	0.40	-31.04	-3.52	0.67
2	-19.34	-1.40	0.85	-23.84	8.75	2.74
3	-27.40	-0.80	0.91	-27.92	7.64	2.41
4	-26.43	-6.21	0.49	-26.40	-2.74	0.73
5	-12.86	-3.80	0.65	-22.20	4.09	1.60
6	-26.37	-6.39	0.48	-23.28	-1.65	0.83
7	-26.70	-7.05	0.44	-27.72	-0.85	0.91
8	-34.72	-15.46	0.17	-34.55	-11.84	0.26
9	-23.68	3.43	1.48	-25.61	9.16	2.87
10	-11.74	-2.22	0.77	-29.72	6.45	2.10
11	-36.71	-13.35	0.21	-26.70	-4.99	0.56
12	-31.07	-7.84	0.41	-26.59	-1.72	0.82

いほどばらつきにくいことを示す。感度と $\beta$ の間には、感度 =  $\text{Log}(\beta^2)$  の関係があり、マスク寸法に $\beta$ を乗じると、測定寸法となる。これらの算出過程は参考文献などを参照されたい。

制御因子は水準1が標準的な条件なので、全て水準1の組み合わせとなる実験1をベンチマーク(BM)水準とし、改善効果を評価する基準とした。

表6の結果より、各制御因子に水準別平均を求め

要因効果図を作成した。 $y_1, y_2$ に関する要因効果をそれぞれ図2, 図3に示す。

### 5.2 静特性

動特性のマスク寸法 $M_3$ の測定結果を抜き出し、静特性として算出したSN比, 感度を表7に示す。制御因子, 誤差因子は動特性と同様である。

表7の結果より作成した $y_1, y_2$ に関する要因効果をそれぞれ図4, 図5に示す。

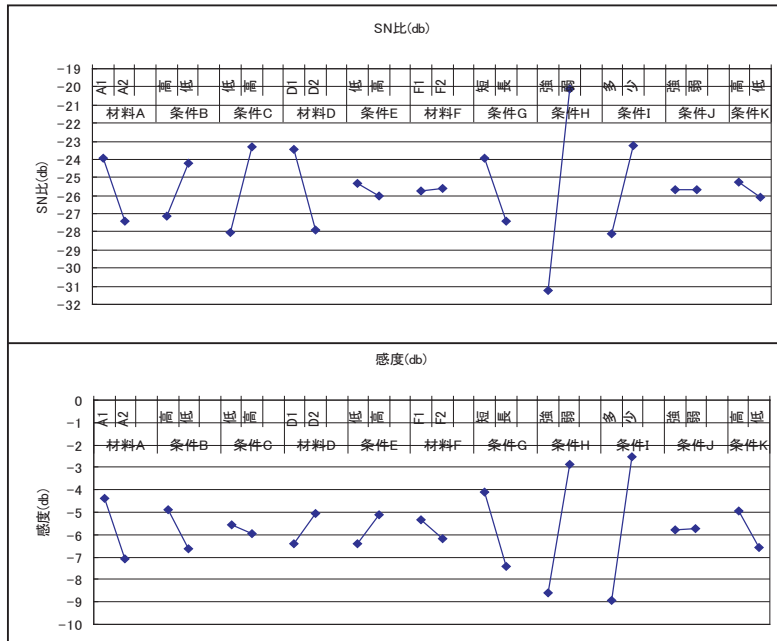


図2 動特性  $y_1$  要因効果図 (上: SN比, 下: 感度)

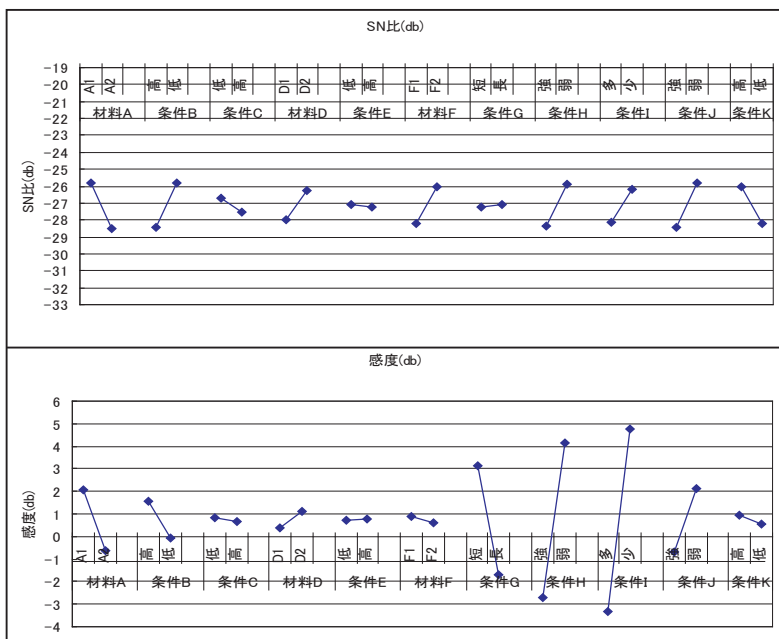


図3 動特性  $y_2$  要因効果図 (上: SN比, 下: 感度)

表7 静特性計算結果

実験	y <sub>1</sub>		y <sub>2</sub>	
	SN比	感度	SN比	感度
1	28.40	32.23	27.95	36.38
2	29.36	35.75	11.33	44.14
3	23.44	35.50	11.33	44.14
4	25.71	32.47	24.09	35.47
5	23.71	33.43	29.88	40.10
6	29.89	32.10	25.28	35.67
7	19.93	31.82	14.33	37.73
8	16.90	26.53	22.33	30.59
9	16.75	39.53	11.33	44.14
10	29.86	34.86	20.28	41.44
11	13.75	24.89	22.31	33.41
12	24.28	32.44	20.48	36.52

5.3 解析方法による最適条件の違い

表8に、動特性と静特性の要因効果図から導出したSN比が最大となる条件の組み合わせを示す。ただし、材料A、材料Dは水準1がリブ形成の条件として経済的に勝る。また条件Bの水準2ではPDPパネルの性能が悪化する。このため、これら3因子は水準1(通常条件)で固定することとしたため表8から外した。

表中で網掛けした部分は、第1, 2水準間でSN比が2db以上異なった因子である。

リブに高さがあるため、頂上付近は研磨が弱めと

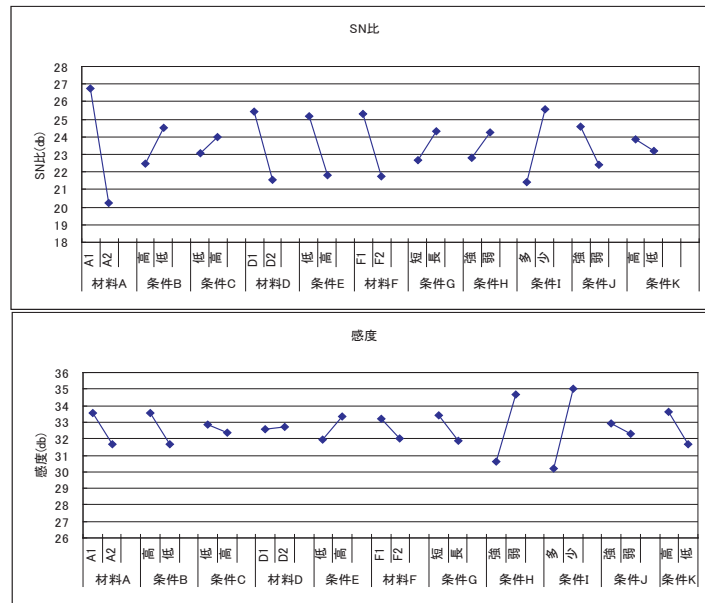


図4 静特性 y<sub>1</sub> 要因効果図 (上: SN比, 下: 感度)

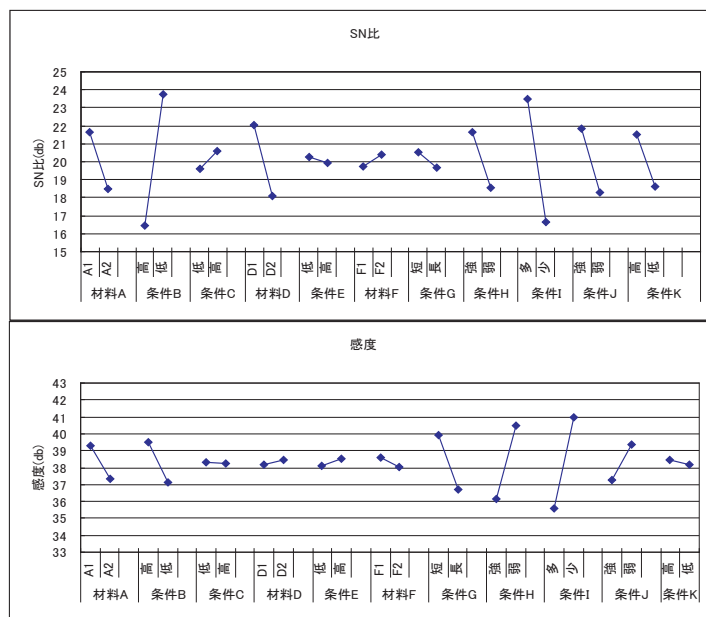


図5 静特性 y<sub>2</sub> 要因効果図 (上: SN比, 下: 感度)

なる条件が最適で、裾付近は研磨が強めとなる条件が最適にあると想定し、 $y_1$  と  $y_2$  に対する最適条件は異なる可能性が高いと想定していた。しかし動特性では  $y_1$  と  $y_2$  の最適条件で大きく相反するものはなかった。BM(実験 1),  $y_1$  最適,  $y_2$  最適の組み合わせで、SN 比, 感度,  $\beta$  を算出した結果を表 9 に示す。

BM に比べて、頂 ( $y_1$ ) 最適な組み合わせ、裾 ( $y_2$ ) 最適な組み合わせ両方とも SN 比の改善が見込まれる。ただし、頂最適の組み合わせでは  $y_2$  の  $\beta$  が 2.55 となっており、マスク寸法によっては、 $y_2$  がリブ間ピッチを超える場合があり得る。これから、確認実験を行う際

表 8 動特性と静特性の最適条件比較

因子	動特性			静特性	
	BM	$y_1$	$y_2$	$y_1$	$y_2$
条件C	低	高	低	高	高
条件E	低	低	低	低	低
材料F	F1	F2	F2	F1	F2
条件G	短	短	長	長	短
条件H	強	弱	弱	弱	強
条件I	多	少	少	少	多
条件J	強	弱	弱	強	強
条件K	高	低	高	高	高

表 9 動特性 BM,  $y_1$  最適,  $y_2$  最適の比較

水準組合せ	推測値	SN比(db)	感度(db)	$\beta$
BM	$y_1$	-31.08	-7.86	0.40
	$y_2$	-31.04	-3.52	0.67
$y_1$ 最適水準	$y_1$	-10.28	3.05	1.18
	$y_2$	-25.33	10.91	2.90
$y_2$ 最適水準	$y_1$	-18.57	0.26	0.93
	$y_2$	-21.73	9.12	2.55

表 10 静特性 BM,  $y_1$  最適,  $y_2$  最適の比較

水準組合せ	推測値	SN比(db)	感度(db)
BM	$y_1$	28.40	32.23
	$y_2$	27.95	36.38
$y_1$ 最適水準	$y_1$	36.64	38.99
	$y_2$	18.19	42.85
$y_2$ 最適水準	$y_1$	25.77	30.54
	$y_2$	29.60	35.71

は、 $\beta$  が大きくなりすぎないように考慮しながら水準を選択する必要がある。

静特性で BM(実験 1),  $y_1$  最適,  $y_2$  最適の組み合わせで、SN 比, 感度を算出した結果を表 10 に示す。静特性の分析では、条件 I が  $y_1, y_2$  で相反する水準となっている。条件 I 以外で水準 1 と 2 で 2db 以上差がついた因子では、すべて水準 1(通常条件) がよいという結果になっており、従来から大きな改善は見込めない結果となった。

また頂最適の条件では切削不足で裾が削れず、裾最適の条件では頂が削れすぎの傾向が予想されるため、この点を留意した確認実験水準を決定した。

## 6. 確認実験の結果と解析

品質工学実験では直交表を使って因子水準組み合わせの一部のみを評価するため、最適組み合わせが本当に良い結果を示すかを確認する実験が推奨されている。

前節の内容を踏まえて決定した確認実験水準を表 11 に示す。期待するリブ形状が得られない場合を想定し、 $L_{12}$  実験と水準を変更した  $L_4$  実験も同時に行った。なお材料 A は  $L_{12}$  実験のときと同じものが入手できず、改良された材料を使用した。また誤差水準となっている材料の新品が入手できなかったため、中古のみ用いて行った。このため  $L_{12}$  実験と確認実験では条件が統一されていない。

### 6.1 動特性分析

各サンプルの測定結果から算出した、サンプルごとの SN 比, 感度,  $\beta$  を表 12 に示す。

$L_{12}$  実験の動特性, 静特性分析の結果からよさそうと考えられた水準を選択したサンプルでは、 $y_2$  が形成できない、すなわち底まで掘れない結果となった。これらのサンプルでは、解析時に代用値としてリブピッチを使用している。

表 11 確認実験水準

因子	BM	動特性良好ベース	静特性良好ベース	因子 F, H, I 水準を変更した $L_4$ 割付			
				確1	確2	確3	確4
条件C	低	低	高	低			
条件E	低	低	低	低			
材料F	F1	F2	F2	F1	F1	F2	F2
条件G	短	長	短	短			
条件H	強	弱	強	弱(確)	強(確)	弱(確)	強(確)
条件I	多	少	多	少(確)	多(確)	多(確)	少(確)
条件J	強	弱	強	強			
条件K	高	高	高	高			

表 12 より導かれる L<sub>4</sub> 実験の y<sub>1</sub>, y<sub>2</sub> の要因効果を、それぞれ図 6, 図 7 に示す。

## 6.2 静特性分析

動特性の M<sub>3</sub> 部分の測定結果を抜き出して、静特性

表 12 確認実験：動特性計算結果

C						
	SN比(db)	感度(db)	$\beta$	SN比(db)	感度(db)	$\beta$
確1	-9.45	-1.37	0.73	-14.80	3.76	2.38
確2	-5.82	-4.02	0.40	-0.70	-1.44	0.72
確3	-6.93	-3.09	0.49	-9.46	-0.30	0.93
確4	-5.25	-1.93	0.64	-4.90	2.57	1.81
動特性ベース	-6.09	-0.63	0.86	-19.18	8.31	6.77
静特性ベース	-10.60	0.25	1.06	-19.18	8.31	6.77
BM	-6.90	-1.99	0.63	-12.66	1.76	1.50

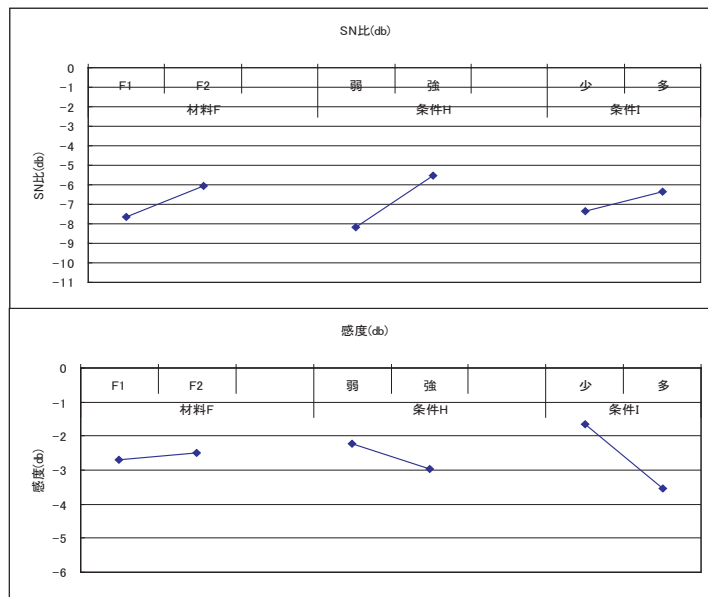


図 6 確認実験動特性 y<sub>1</sub> 要因効果図 (上：SN 比, 下：感度)

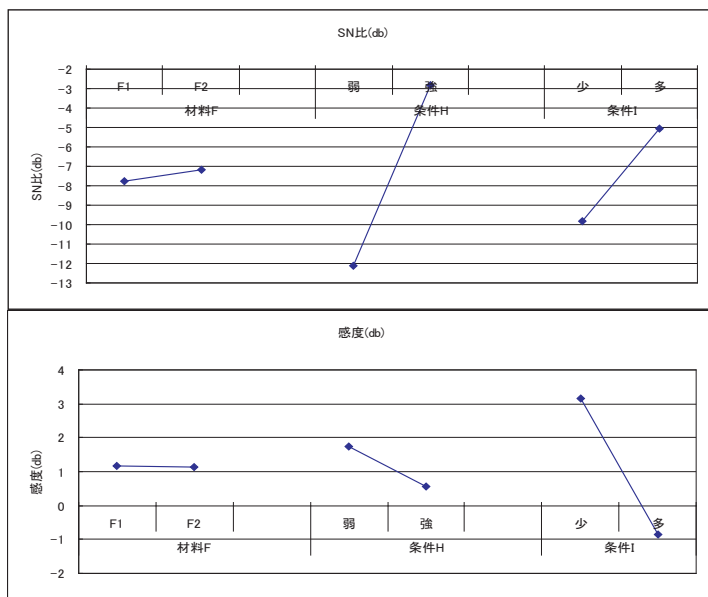


図 7 確認実験動特性 y<sub>2</sub> 要因効果図 (上：SN 比, 下：感度)



分析を行った。サンプルごとのSN比，感度を表13に示す。この結果より導かれるL<sub>4</sub>実験のy<sub>1</sub>,y<sub>2</sub>の要因効果をそれぞれ図8，図9に示す。

表13 確認実験：静特性計算結果

実験	y <sub>1</sub>		y <sub>2</sub>	
	SN比(db)	感度(db)	SN比(db)	感度(db)
確1	35.46	35.25	22.79	40.07
確2	25.23	32.95	39.80	35.35
確3	40.21	33.85	36.80	36.59
確4	31.67	34.98	27.62	39.43
動特性ベース	25.61	36.26	14.65	44.14
静特性ベース	27.51	36.84	14.65	44.14
BM	33.16	34.66	33.16	38.23

### 6.3 最適条件について

L<sub>12</sub>実験の結果による動特性の最適条件組み合わせ，静特性の最適条件組み合わせが，共にリブの底まで掘れない結果となっていたのは，条件Bを第1水準に固定した影響が大きいと考えられる。最適条件の組み合わせではセルピッチとマスク幅の関係からβが2.5程度になると予想されていたため，妥当な結果といえる。

動特性解析の図6，7の要因効果を対比すると，SN比を下げずにリブ幅y<sub>1</sub>とy<sub>2</sub>を別々に調整する方法が

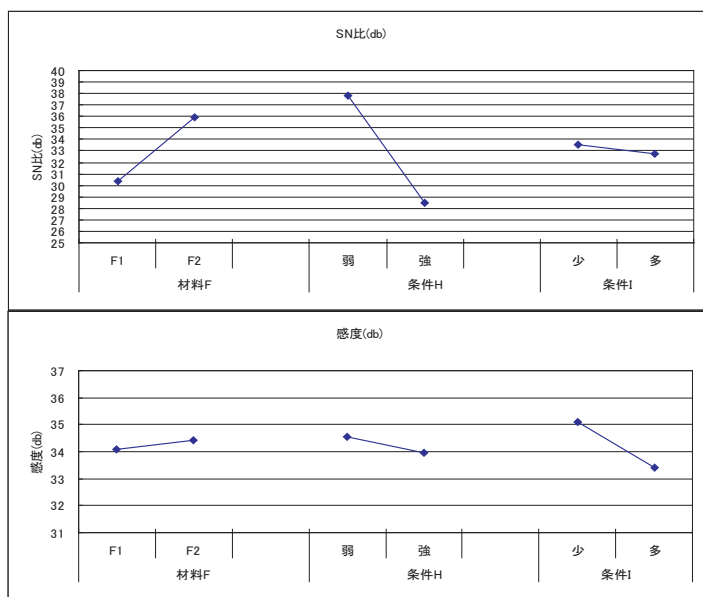


図8 確認実験静特性 y<sub>1</sub>要因効果図 (上：SN比，下：感度)

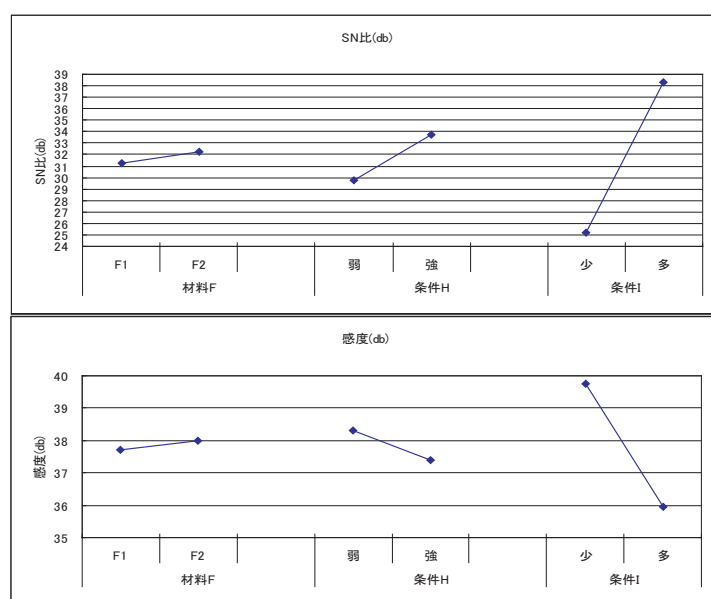


図9 確認実験静特性 y<sub>2</sub>要因効果図 (上：SN比，下：感度)



見えてくる。その組み合わせを表 14 に示す。例えば  $y_2$  を小さくしたい場合は、条件 H を弱めに調整し、 $y_1$  を小さくしたい場合は条件 I を少なく調整することが有効と考えられる。

表 14 動特性解析による調整に適する因子の組合せ

	測定値大	測定値小
全体	マスク	マスク
$y_1$	条件H	条件I
$y_2$	条件I	条件H

マスク寸法を変更することで、 $y_1$ 、 $y_2$  の寸法をおおよそ決定し、条件 H、I の変更で微調整する手順が、開発用途として実用的と考えられる。

静特性解析の結果では、図 8、9 に示すように、条件 H と I の SN 比の傾きが相反しており、SN 比の水準間準の差が大きいため、SN 比を確保したまま寸法を調整することができない。今回の実験で評価していない他の因子を探索することが必要といえる。

これまでも経験的に条件 H および I をリブ幅調整用の因子として使ってきたが、リブ頂とリブ裾を別々に制御する方法として、品質工学手法により定量的に体系付けられた。

リブを形成する材料によってブラストレートが異

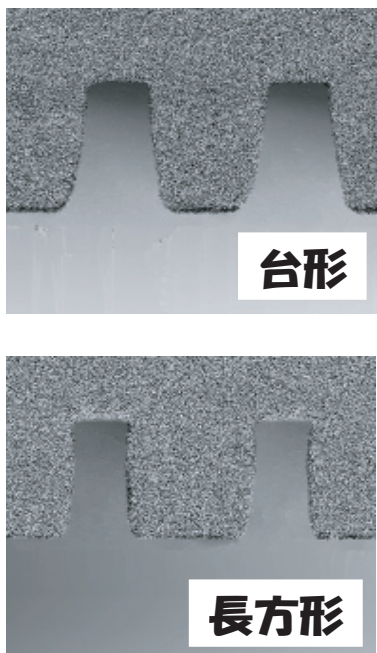


図 10 リブ断面形状

なるためさらに詳細に調整するためには材料ごとのデータ蓄積が必要であるが、形状をコントロールする知見を得たことは大きな成果である。図 10 にリブ形状の断面を示す。図より加工条件の調整により長方形や台形の断面形状を得られることが分かる。すなわち形状コントロールの可能性が示された。開発用途としては動特性分析の結果が有効であり、現在当パネル試作課では開発部から希望された構造を形成するための調整に活用している。

一方このことは生産ラインにおいてもマスク寸法と調整する条件を適切に設定することで、より安定した生産を実現するための因子組み合わせがある可能性を示唆している。

## 7. まとめ

品質工学を用いてサンドブラスト工法でのリブ形成条件最適化を試み、従来同様にマスクパターン幅と条件 H、I で調整するという結果となった。しかし寸法のばらつきを抑えながら、リブの頂上付近、裾付近の幅を別個に調整する知見を新たに見出したことは、PDP パネル開発にとって意義が深い。

また品質工学の手法を開発に適用するにあたり、動特性分析、静特性分析の特徴を、実例を持って認識したことは大きな経験であり、今後の業務に役立てていきたい。

## 8. 謝辞

本実験を行うにあたり、親身にご指導を頂いた森技術士事務所 森輝雄先生に深く感謝いたします。複雑な因子の組み合わせ実験に全面的に協力してくれたパネル試作課各位、およびマスク設計に協力してくれた PDP 開発 C 酒井氏に感謝します。

### 参考文献

最適化学講座 (5) 「タグチメソッドの応用と数理」  
(2005) 森輝雄 (トレンドブック / 森技術士事務所)

### 筆者紹介

板谷 旬展 (いたや まさのぶ)

PDP パネル開発統括部 パネル試作課

熊坂 治 (くまさか おさむ)

PDP パネル開発統括部 パネル試作課