

プレス打抜き加工における加工条件の最適化^[1]

Optimization of Press Stamping Conditions

有限会社 増田技術事務所

代表取締役 増田雪也

(info2qe@po27.lcv.ne.jp)

研究の目的は2つある。1つ目は「品質工学が機械加工技術の分野でも適用可能なのかを確かめる」こと、2つ目は「プレス打抜き加工の最適条件を求める」ことである。この実験の結果、品質工学は機械加工技術の分野でも十分に適用可能であることがわかった。また、プレス打抜き加工における最適な加工条件を求めることができた。

最適条件			
制御因子	水準		
	1	2	3
A パンチ材質	SKD	超硬	
B パンチシャワー角 ω (deg)	0	2.86	5.71
C クリアランス(μ m)	20	40	60
D 板押さえ力 (N)	125	245	535
E 打抜きスピード(mm/s)	40	25	10
F 潤滑	あり	なし	

制御因子	水準		
	1	2	3
A パンチ材質	SKD	超硬	
B パンチシャワー角 ω (deg)	0	2.86	5.71
C クリアランス(μ m)	20	40	60
D 板押さえ力 (N)	125	245	535
E 打抜きスピード(mm/s)	40	25	10
F 潤滑	あり	なし	

キーワード：タグチメソッド、パラメータ設計、ロバストデザイン、品質工学会

Key Words：Taguchi Methods, Parameter Design, Robust Design, Quality Engineering Society

実験計画

研究は先ず【基本機能】1の検討から始めた。エネルギー変換の考え方を元に、プレス打抜き加工における「切れ刃の長さ」である「せん断周囲長さ」に対して、「打抜きエネルギー」が比例することを基本機能とした。この打抜きエネルギーは、パンチにかかる【打抜き荷重】2を測定し、パンチストロークで積分することにより求めた。

【誤差因子】3には、パンチとダイの摩耗を設定した。いつも新品の金型で加工できるならば良いが、それではコストが高くなる。コストを下げたいならば、金型寿命を伸ばすことが大切である。よって、金型の摩耗を誤差因子に設定し、摩耗の影響を受けにくい最適打抜き加工条件を探すことにした。

加工条件である【制御因子】4には、6つの条件を設定した。この中から最適な加工条件を求めることになる。

実験

【実験装置】5を用いて、純アルミニウムの【試験片】6を打抜く実験を行った。現行条件にて【予備実験】7を実施した結果、直線性は良好であり、設定した基本機能が適切だと判断した。

実験結果

次に【L18直交表実験】8へと進み、108回の実験を行った。実験には約2週間を要した。L18直交表実験結果の【1行目と16行目の実験結果】9を見ると、各行でノイズに対する影響の受け方に違いがあることがわかった。これらの結果から【要因効果図】10を作成した。これにより各加工条件の影響が明らかとなり、最適加工条件を求めることができた。【利得の再現性】11は、推定値3.61dbに対して確認値3.55dbとなり、この要因効果図は十分に信用できることが証明された。【最適条件の決定】12で最適条件を決定した。

確認実験での【最適条件と比較条件の結果】13を見ると、確かに最適条件の方が、金型の摩耗の影響を受けにくいことがわかる。また、プレス打抜きした試験片を【バリの大きさの比較】14で評価してみると、最適条件では、見た目の良さ（バリが小さい）も良好であることが確認できた。

次に「打抜きエネルギー」ではなく「最大打抜き荷重」で評価した場合での結果を見てみると、【要因効果図】15は、打抜きエネルギーで評価した場合のそれとは異なる傾向を示した。このときの【利得の再現性】16は、推定値9.88dbに対して確認値3.15dbとなり、再現性が乏しい結果となった。

結論

以上が実験の概要であるが、機械加工の場合でも、品質工学は十分に適用することが可能であることがわかった。また、エネルギー変換の考え方がとても重要であることも明らかとなった。

[1] 「品質工学」(J. QE.Soc.,Japan),Vol.12.No.1,pp.97-104,February 2004

1 基本機能を設定する

プレス打抜き加工は、金型（パンチおよびダイ）を用いて被加工物をせん断する加工方法である。金型の切れ刃と被加工物の接触する長さが長くなれば、打抜きに要するエネルギーも大きくなると考えられる。よって、「切れ刃の長さ」である「せん断周囲長さ」の平方根Mと打抜きエネルギーの平方根yがゼロ点比例することを基本機能とした。

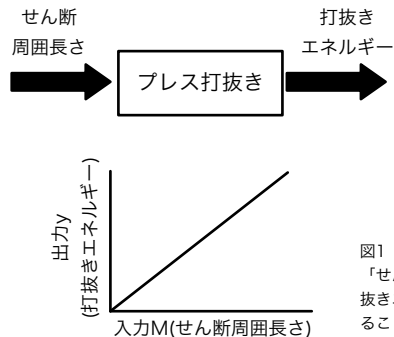


図1 入出力の関係を示す。「せん断周囲長さ」が「打抜きエネルギー」に比例することを基本機能とした。

2 打抜きエネルギーを測定する

金型が被加工物を打抜く過程は、まずパンチが被加工物に食い込むにしたがって荷重が増加し、クラックの発生と共に荷重が減少し切断に至る。特性値としての打抜きエネルギーは、この打抜き荷重をパンチストロークで積分することにより算出した。

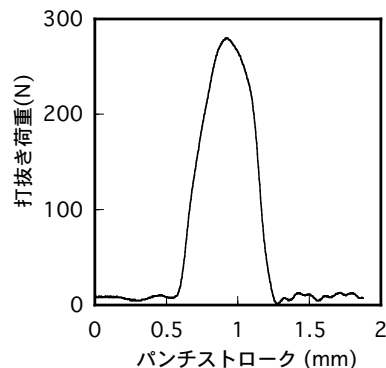


図2 打抜き時にパンチにかかる荷重およびパンチストロークの関係を示す。

3 誤差因子を設定する

パンチおよびダイは、打抜き回数が多くなると刃先が摩耗し丸くなる。この摩耗の有無に影響を受けないで、安定した打抜きを行えることが理想である。そこで今回は、パンチおよびダイの刃先の摩耗を誤差因子に設定した。

摩耗なしの場合は、新品の金型を用いた。また、摩耗ありの場合は、新品金型の刃先に0.1Cの面取り加工を施した。実際の金型の摩耗は、丸みをおびるのが普通であるが、加工が複雑になるため、今回の実験では面取り加工で代用した。

誤差因子	水準	
	摩耗なし (新品金型)	摩耗あり (刃先に0.1Cの面取り)

表1 誤差因子を示す。刃先に0.1Cの面取り加工を施すことにより、摩耗の効果を設定した。

4 制御因子を設定する

L18直交表に6因子を割り付けて実験を行った。本来ならば8つの因子を割り付けることができるが、実験の規模および費用が膨大になることが予想されたため、6つの因子のみを割り付けることとした。

◆パンチ材質

パンチ材質は、超硬および調質した冷間金型用合金工具鋼（SKD）を設定した。どちらも高硬度の材質であるが、超硬の方が剛性が高いため、打抜き時の変形は小さいと考えられる。また、ダイ材質については、超硬をダイ形状に加工することが困難であるため、SKDのみを使用した。

◆パンチシャープ角

パンチシャープ角 ω は、パンチ先端を斜めに加工することにより、打抜きが局部的に行われるため、打抜き荷重が小さくなる効果がある。今回の実験では、パンチシャープ角を付けない水準と試験片板厚0.5mmの1/4と1/2になるような角度を付けた水準を設定した。

◆クリアランス

クリアランスはパンチとダイの隙間である。打抜きにおける最も重要な因子であり、最適なクリアランスでは、打抜きエネルギーが最小になると考えられている。今回は、試験片板厚0.5mmに対して、4%、8%および12%となるようなクリアランスを設定した。

◆板押さえ力

板押さえ力は、打抜き加工時に試験片の両側を押さえる力である。文献によれば、板押さえ力は打抜き荷重の30～50%程度が適当とされている。今回は、最大打抜き荷重の約50%、100%および200%となるような水準に設定した。

◆打抜きスピード

打抜きスピードに関しては、高速度打抜きと呼ばれるような数m/s以上の速度での打抜きに比べると、かなり小さい値を設定せざるを得なかった。この理由は、今回用いたプレス機の性能限界によるものである。しかし、今回の実験の目的は、プレス打抜き加工における品質工学適用の可能性を検討することであるため、支障はないと考えた。

◆潤滑

潤滑は、金型の摩耗や欠損を防止する効果がある。試験片表面に潤滑油を塗布することにより潤滑を行った。

制御因子	水準		
	1	2	3
A パンチ材質	SKD	超硬	
B パンチシャープ角 ω (deg)	0	2.86	5.71
C クリアランス(μ m)	20	40	60
D 板押さえ力 (N)	125	245	535
E 打抜きスピード(mm/s)	40	25	10
F 潤滑	あり	なし	

表2 制御因子を示す。この6つの因子の中から、最適条件を求めることになる。

5 実験装置を製作する

打抜きは試験片を板押さえバネで押さえた後、パンチが打抜くようになっている。パンチおよびダイのクリアランスは、ダイとダイ枠の間に市販のシックネステープ（厚さ5、10、50 μ m）を挟み込むことにより調整した。打抜き荷重はプレス機がパンチを押すシャフトに2枚の半導体ストレインゲージ

を貼付して測定を行った。このデータをストレインアンプ(Filter=100Hz)により増幅してパソコンに取り込み、時間軸をパンチストロークに変換し、積分することにより打抜きエネルギー値を算出した。また、打抜き荷重のサンプリングレートは8000sample/sに設定した。これは今回の打抜きの様子を測定するのに十分に高速なレートである。

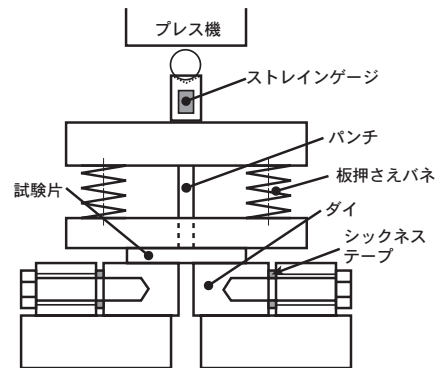


図3 実験装置の概略図を示す。この金型をダイセットに組み込み、プレス機で押し込むような構造にした。

6 打抜きの様子と信号因子の設定

試験片には純アルミニウム（JIS A1050）の板を用いた。これは、打抜き荷重測定システムの都合上、測定荷重の最大値に制限があったため、軟らかい材質を選択した。信号因子の水準は、試験片の幅を変えることにより、せん断周囲長さを3水準(8,12,16mm)設定した。

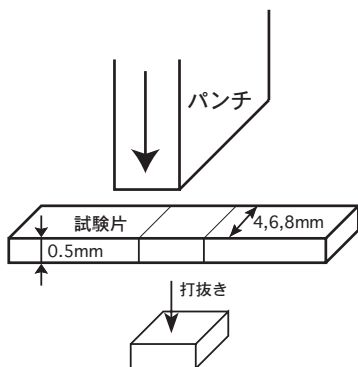


図4 試験片寸法および打抜きの様子を示す。

7 予備実験を実施する

L18直交表実験を行う前に、せん断周囲長さと打抜きエネルギーの比例関係および設定外の因子の有無について確認するために予備実験を行った。

測定値のばらつきは小さく、また直線性も非常に良好であった。この結果から設定した基本機能は実際に比例関係を示し、また、実験に重要な影響を与えるような設定外の因子

もないと判断し、L18直交表実験に進んだ。また、測定値がシステムの最大測定荷重限界値（1500N）をオーバーすることによる欠測値の発生を予防するために、打抜き荷重が最大となるような制御因子の水準の組み合わせで予備実験を行った。この結果、最大となる組み合わせでの荷重は、システムの最大測定荷重より小さいことを確認した。

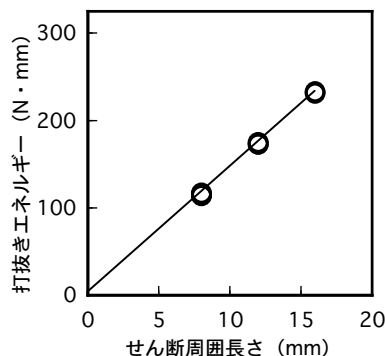


図5 誤差因子および制御因子をある条件に固定し、3回の繰り返し測定を行った結果を示す。

8 L18直交表実験を実施する

L18直交表に制御因子を割り付け、18通りの加工条件を設定し、プレス打抜きを行った。1つの加工条件において、試験片の幅を変えて3水準と摩擦の有無で2水準、合計3 $\times$ 2=6個の測定データ数となる。この6個のデータを用いて、この加工条件でのSN比と感度を計算する。

例えば、1行目の加工条件では、

- ・パンチ材質：SKD
- ・パンチシャープ角：0deg
- ・クリアランス：20 μ m
- ・板押さえ力：125N
- ・打抜きスピード：40mm/s
- ・潤滑：あり

という設定になる。

この条件で打抜きを行った結果、(9.25,11.56,11.21,14.07,13.07,15.87)という測定データを得て、SN比=7.90db、感度=11.23dbとなる。

							信号因子：せん断周囲長さ						S N比		感度	
							M1 8 摩擦		M2 12 摩擦		M3 16 摩擦					
							A パン チ 材 質	B パン チ シャ ー 角	C グ リ ア ラ ン ス	D 板 押 さ え 力	E 打 抜 き ス ピ ー ド	F 潤 滑				
1	SKD	0	20	125	40	あり	9.25	11.56	11.21	14.07	13.07	15.87	7.90	11.23		
2	SKD	0	40	245	25	なし	8.77	10.71	10.92	12.86	13.26	15.92	8.86	10.96		
3	SKD	0	60	535	10	なし	9.20	10.46	11.67	13.43	13.19	15.21	11.40	11.02		
4	SKD	2.86	20	125	25	なし	8.60	10.55	10.31	12.92	12.21	14.89	8.06	10.57		
5	SKD	2.86	40	245	10	なし	8.60	10.41	10.71	12.74	12.33	15.01	8.94	10.61		
6	SKD	2.86	60	535	40	あり	9.73	10.81	12.45	14.43	14.89	16.89	11.10	11.74		
7	SKD	5.71	20	245	40	なし	8.48	10.84	10.72	13.09	12.77	15.48	8.04	10.82		
8	SKD	5.71	40	535	25	あり	9.32	10.82	11.82	13.99	13.46	15.58	10.43	11.24		
9	SKD	5.71	60	125	10	なし	8.77	11.18	10.89	13.68	12.61	15.89	7.13	11.00		
10	超硬	0	20	535	10	なし	8.87	10.50	11.62	13.41	13.43	15.60	10.44	11.07		
11	超硬	0	40	125	40	なし	9.40	11.50	11.27	13.06	13.27	15.30	10.15	11.07		
12	超硬	0	60	245	25	あり	9.26	11.30	11.38	13.44	13.22	16.39	8.49	11.24		
13	超硬	2.86	20	245	10	あり	8.84	10.71	10.80	12.95	12.60	15.30	8.89	10.78		
14	超硬	2.86	40	535	40	なし	9.46	10.91	12.04	14.36	14.89	16.82	10.17	11.67		
15	超硬	2.86	60	125	25	なし	8.69	10.66	10.92	12.87	12.72	14.65	10.12	10.69		
16	超硬	5.71	20	535	25	なし	9.44	10.99	11.83	13.51	13.71	15.69	11.61	11.26		
17	超硬	5.71	40	125	10	あり	8.90	10.45	10.70	12.67	12.71	14.61	10.65	10.63		
18	超硬	5.71	60	245	40	なし	9.95	10.68	11.73	13.82	13.45	15.88	10.93	11.29		

図6 L18直交表の割り付けおよび測定データを示す。6つの測定データにより、SN比と感度を計算している。

9 加工条件が変わると誤差因子による影響の度合いが変化する

1行目（SN比=7.9db）の加工条件では、誤差因子の影響により大きなバラツキが発生しているが、直線性は良好であった。一方、16行目（SN比=11.6db）の加工条件では、1行目に比べるとバラツキは小さく、直線性も良好であった。

この2つの加工条件の違いは、制御因子のパラメータの違いにより、誤差因子の影響の受けやすさに差があることを意味している。よって、制御因子の水準の最適化によるSN比の向上が期待できる。

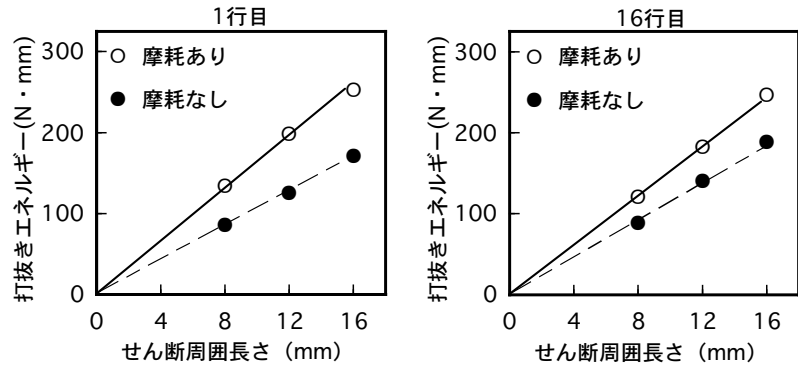


図7 直交表による実験のうち、L1行目およびL16行目の測定結果を示す。加工条件が変わると、誤差因子による影響の度合いも変化する。

10 要因効果図を作成し、各加工条件（制御因子）の影響を確認する

この図は各加工条件（制御因子）が打抜きエネルギーに与える影響を表している。例えば、制御因子Aである「パンチ材質」について見てみると、SN比はA1(SKD)よりもA2(超硬)の方が高いことがわかる。つまり、A2の方が誤差因子（摩耗）の影響を受けにくいということを意味している。

この結果から、最適条件および比較条件を以下のように設定し、確認実験を行った。

最適条件 A2B3C2D3E3F2

比較条件 A1B1C1D2E2F1

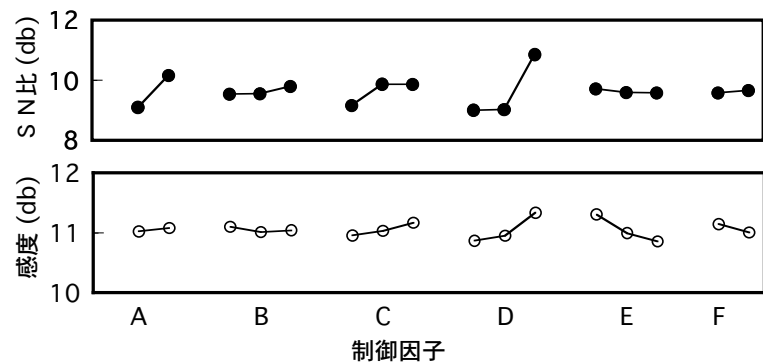


図8 要因効果図を示す。SN比と感度のそれぞれについて、各加工条件（制御因子）の影響を示している。

11 利得の再現性を確認する

SN比は推定3.61dbに対して確認3.55dbとなり、再現していると言える。また、感度についても再現していると言える。これらのことから、プレス打抜き加工において、品質

工学が適用できることが明らかとなった。
また、【要因効果図】10は、信用できることが証明された。

	SN比 η (db)		感度 S (db)	
	推定	確認	推定	確認
最適条件	11.63	11.04	11.14	11.12
比較条件	8.02	7.49	10.89	11.38
利得	3.61	3.55	0.25	-0.25

表3 利得の再現性を示す。利得は再現している。

12 最適加工条件を決定する

S N比の高い水準を選択することは当然であるが、感度に関しては低い方を選択する必要がある。なぜならば、打抜きエネルギーが小さい方が、金型に与えるダメージを低減でき、金型の長寿命化や微細金型への応用が期待できるからである。また、被加工物に与えるダメージも小さくすることができるため、被加工物の変形を最小にすることが可能となる。さらに、打抜き時の騒音や振動についても低減できると考えられる。以上のような観点から、実際にプレス打抜き加工を行う上での最適条件を選択する。

◆パンチ材質

パンチ材質については、超硬の方がS N比が高く、また二つの水準間の差も大きい。感度はその差が小さいため、どちらを選んでも同じである。よって、超硬を選択する。

◆パンチシャープ角

パンチシャープ角については、S N比および感度はどちらも水準間の差は小さい。シャープ角が大きい方が若干S N比および感度について有利であるが、シャープ角の加工にコストおよび時間がかかるため、シャープ角0を選択した。

◆クリアランス

クリアランスは、S N比については20 μ mのみ低く、40および60 μ mについては同じレベルである。また、感度はクリアランスが大きいくほど高くなる。よって、S N比が高く、しかも感度もそれほど高くない40 μ mを選択する。

◆板押さえ力

板押さえ力については、強い押さえ力の方がS N比は圧倒的に高くなる。感度についても同様に高くなってしまいが、S N比の方を優先し、535Nを選択する。

◆打抜きスピード

打抜きスピードについては、S N比に大差はなく、速い方が若干高くなる程度である。一方、感度は速い方がかなり高くなってしまいうことから、一番感度が低く、エネルギー的に有利な10mm/sを選択する。

◆潤滑

潤滑は、S N比および感度ともに水準間の差は小さい。潤滑なしの方が若干感度が低いいため、そちらを選択する。

以上のことから、最終的に選択した最適条件では、S N比=11.04dbのプレス打抜き加工を行うことが可能となった。

制御因子	最適条件		
	水準	1	2
A パンチ材質	SKD	超硬	
B パンチシャープ角 ω (deg)	0	2.86	5.71
C クリアランス(μ m)	20	40	60
D 板押さえ力(N)	125	245	535
E 打抜きスピード(mm/s)	40	25	10
F 潤滑	あり	なし	

表4 最終的に選択した最適条件を示す。S N比が高い水準を選ぶのはもちろんであるが、感度も重要である。また、コストも重要となる。

13 最適条件と比較条件を比べる

最適条件に比べると比較条件はバラツキが大きくなっており、直線性も良くないことがわかる。特に比較条件のせん断周囲長さ16mmの摩耗ありでは、打抜きエネルギーが高い値となっている。これは、パンチ材質の剛性が超硬（最適条件）に比べて低いSKD（比較条件）を使用しているため、パンチに反りなどの変形が発生していることに起因するものと考えられる。

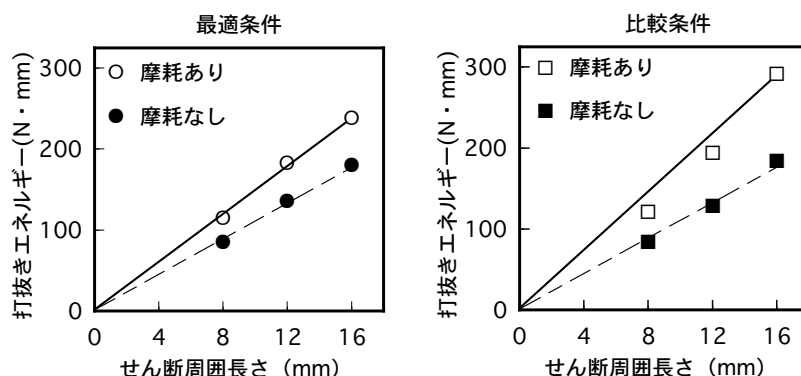


図9 確認実験で行った最適条件（11.04db）および比較条件（7.49db）での、せん断周囲長さと打抜きエネルギーの関係を示す。

14 バリの大きさを比較する

両条件ともに摩耗なしの方が、バリは小さくなっている。摩耗ありでは、比較条件の方がバリは大きくなっており、また、同一試験片内でのバラツキも大きい。

プレス打抜き加工では通常、その加工の善し悪しを「バリの大きさ」で評価する。しかし、品質工学では、バリという見た目の善し悪しではなく、基本機能で評価することを推奨している。今回の実験でも、見た目の善し悪し（バリの大きさ）ではなく、基本機能（せん断周囲長さや打抜きエネルギー）で最適条件を求めた。その結果、見た目の良さである「バリの大きさ」も改善されることが明らかとなった。

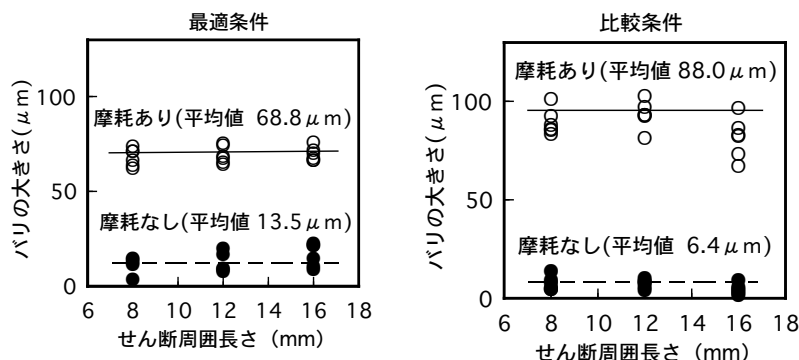


図10 最適条件および比較条件における、試験片のバリの大きさを示す。光による非接触の測定器を用いて、一つの試験片に対して6カ所のバリの大きさを測定したものである。

15 異なる基本機能での解析

【要因効果図】10（特性値：打抜きエネルギー）とは明らかに傾向が異なる。また、パンチシャー角およびクリアランスにおいて、大きな山谷型の傾向が見られることから、制御因子間の交互作用の存在が予想される。

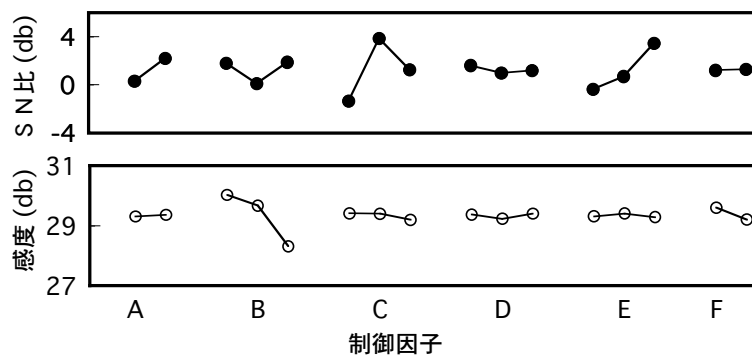


図11 基本機能の特性値を最大打抜き荷重に変更して解析を行った要因効果図を示す。

16 利得の再現性が悪化する

SN比の推定値9.88dbに対して確認実験値3.13dbとなり、再現性が乏しい結果となった。よって、本研究において、「最大打

抜き荷重」で評価するのは適切ではなく、「打抜きエネルギー」を評価する方が適切であると言える。

	SN比 η (db)		感度 S (db)	
	推定	確認	推定	確認
最適条件	7.03	2.13	28.28	28.87
比較条件	-2.85	-1.00	30.29	30.77
利得	9.88	3.13	-2.01	-1.90

表5 最大打抜き荷重で解析を行った時の利得の再現性を示す。