

直交表を使った切削加工の実験におけるモータ電力解析方法の検討

桑原 修

加法性のある評価方法が再現性に大きく影響する直交表を使った実験において、6水準の確認実験により計測のS/N比を利用した再現性の評価を行った。評価の対象はドリル加工における主軸瞬時電力の解析方法とし、3種類の解析方法①電力値のmax-minを用いる方法、②平均電力値と分散を用いる方法、③max-minと分散を用いる方法と実験の再現性の関係を比較した。また、電力解析時の電力分割間隔を変化させたときの実験の再現性の違いについても評価した。

その結果、6水準確認実験による再現性評価では、①および③に比べて②の解析方法の方が実験の再現性が良くなり、約7(db)再現性が向上した。また、電力分割間隔を短くすることにより①および③の解析方法では再現性が悪くなり、②の解析方法では再現性が向上した。②の解析方法において0.01秒間隔で電力を分割して解析することにより実験の再現性が最大0.2(db)まで向上した。

キーワード：品質工学, S/N比, 直交表, ドリル加工, モータ電力

1. はじめに

直交表を使った切削加工の研究において、加工機主軸モータの電力を測定し、その瞬時電力の変化から加工条件の最適化を行う研究が多く行われている⁽¹⁾⁻⁽⁵⁾。しかし、計測した電力の解析方法については幾つもの方法が提案されているものの、どの解析方法が妥当であるかの検証はされていない。直交表を使った割付け実験においては、結果の信頼性を評価する尺度として実験の再現性⁽⁶⁾が重視される。その再現性を得るためには、加法性のある評価方法が重要である⁽⁶⁾。電力の解析も評価方法に大きく係わり、解析方法によって実験の再現性も変わってくるため、信頼性のある結果を得るためには電力の解析方法を検討する必要がある。

本研究では直交表を使ったドリル加工実験における電力解析を行い、電力解析方法と実験の再現性について調査し、その関係を明らかにした。

2. 実験方法

マシニングセンタ (MSJ25, 牧野フライス精機製) を用いてドリル加工を行い、そのとき主軸モータに流れる電流と電圧を計測した。主軸モータは3相のACスピンドルモータであり、ブロンデルの定理により2

相分の電流電圧を計測し、それぞれの電流と電圧の積を合計することにより電力を求めることができる。

S/N比の再現性は多水準の再現性実験を6水準で行うこととした。実験に用いる直交表はL18混合直交表を用い、L18の直交表実験と6水準の確認実験を同時に行った。その時の実験の組み合わせを表1に示す。

表1 L18直交表および確認実験の水準表

No	A	B	C	D	E	F	G	H
1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	2	2	2	2	2	2
3	1	1	3	3	3	3	3	3
4	1	2	1	1	2	2	3	3
5	1	2	2	2	3	3	1	1
6	1	2	3	3	1	1	2	2
7	1	3	1	2	1	3	2	3
8	1	3	2	3	2	1	3	1
9	1	3	3	1	3	2	1	2
10	2	1	1	3	3	2	2	1
11	2	1	2	1	1	3	3	2
12	2	1	3	2	2	1	1	3
13	2	2	1	2	3	1	3	2
14	2	2	2	3	1	2	1	3
15	2	2	3	1	2	3	2	1
16	2	3	1	3	2	3	1	2
17	2	3	2	1	3	1	2	3
18	2	3	3	2	1	2	3	1
19	2	3	3	1	2	2	1	1
20	2	1	1	1	2	3	3	1
21	1	2	1	3	3	3	2	2
22	1	3	2	2	3	2	3	3
23	1	1	3	3	1	1	1	3
24	2	2	2	2	1	1	2	2

No1～No18がL18直交表水準で、No19～No24が確認実験の水準である。確認実験水準はL18直交表と同じ組み合わせが発生しないように考慮した。

被加工物材質はステンレス鋼(SUS304)を用い、NC旋盤を用いて丸棒から円柱状の試験片を削りだした。その試験片に対し、マシニングセンタで穴加工を行った。

直交表を使ったオフライン品質工学⁽⁷⁾による実験を行うときの制御因子、誤差因子を表2, 3に示す。制御因子は大きく分けて2種類設定した。試験片を削りだすときの条件とドリル加工を行うときの条件である。FからHまでは試験片を削りだすときの条件であり、NC旋盤で端面（ドリル穴加工面）を加工するときの切削条件である。Hについては送り速度に関するパラメータで、Gによって変化するので、Hが水準どおりになるように送り速度を決めた。A, C, D, Eの条件はドリル加工時の切削条件であり、Dはドリルの送り速度を決めるパラメータで、ドリル直径に対する送り速度の比率を表す。Cが5mm、Dが1/20のとき $5/20=0.25$ (mm/rev)となる。誤差因子はドリルの劣化条件とし、劣化が無い条件をN1、劣化を与えた条件をN2とした。

表2 ドリル加工条件と水準 (制御因子)

条件		水準		
		1	2	3
A	ドリル材質	ハイス	粉末ハイス	-
B	(誤差列 e)	Blank	Blank	Blank
C	ドリル直径(mm)	4.1	5	6.8
D	直径と送り速度の比率	1/40	1/20	1/10
E	ドリル外周切削速度(m/min)	10	15	20
F	NC旋盤の切削速度(m/min)	100	130	160
G	バイトの切り込み(mm)	0.5	1	1.5
H	バイトの切削面積(mm ²)	0.2	0.3	0.4

表3 ドリル加工における誤差因子

項目	条件
N 1	ドリルの劣化処理なし
N 2	ドリルの劣化処理あり

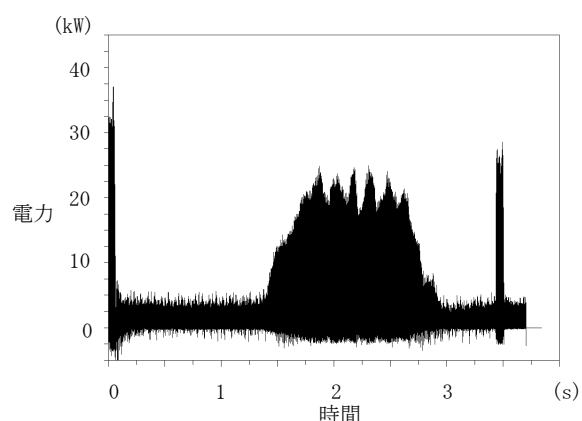
劣化条件：塩酸浸漬10分

電流の測定には電流センサ(JB-15, NECTOKIN製)を用い、電圧とともにデータレコーダ(DL750, 横河電機製)で1MS/sのサンプリング速度で計測した。電圧の測定は10:1プローブを使って直接データレコーダで計測した。

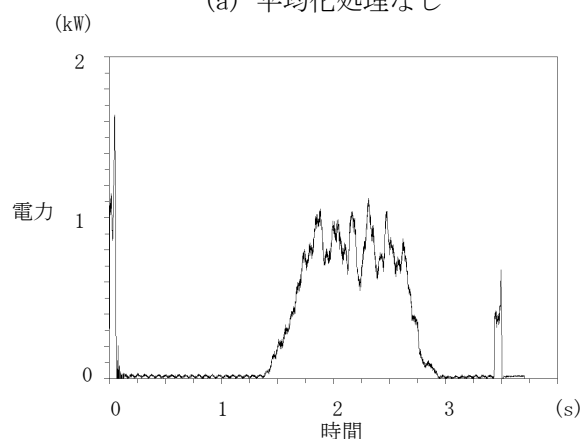
また、加工量あたりの電力で評価するため、加工前と加工後の試験片の重量を測定し、加工重量を求めた。電力の評価においては算出した電力を加工重量で除した値を用いた。

3. 電力解析

計測した電流電圧のデータの積と和から電力波形を求めると図1(a)のようになる。この電力波形では加工状態を現しているとは言えないため、データの平均化処理を行った。電力波形を1ms間隔で平均した電力波形を図1(b)に示す。図から加工時の電力変化が観察できる。本報では1ms間隔で平均化処理した電力データを用いて解析を行った。



(a) 平均化処理なし



(b) 1ms平均化後

図1 加工時の電力波形

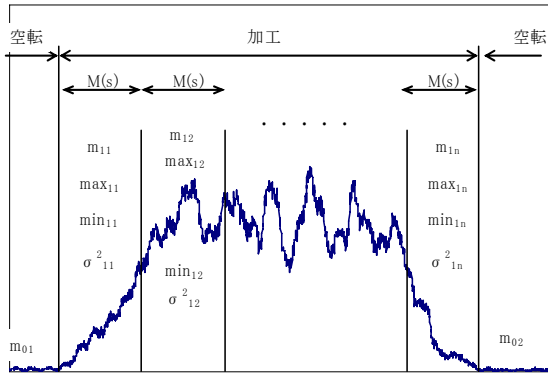


図2 電力波形から数値の抽出

切削加工時の電力データから加工のSN比を算出するとき、電力のばらつき評価として、以下の方法が報告されている。

- ・電力の最大値、最小値(max-min)を用いる方法⁽¹⁾
- ・電力の分散値(σ^2)を用いる方法⁽⁵⁾

これらからばらつきの評価方法として、以下の組み合わせで解析を行った。

- ① 電力のmax-minで解析
- ② 電力の平均と σ^2 の両方で解析
- ③ 電力のmax-minと σ^2 の両方で解析

電力を望目特性で解析し、加工のSN比を求める。電力波形を図2のように分割し、以下の手順で電力解析を行った。

- ・空転時と加工時の電力波形に分割する。
- ・空転時の平均電力 m_{01} , m_{02} を抽出する。
- ・空転電力の影響を除去するため、加工時電力から m_{01} と m_{02} の平均を引く。
- ・単位加工量あたりの電力で比較するため、加工時の電力波形を加工重量で除する。
- ・加工時電力をM(s)間隔で分割する。
- ・分割した区間の平均 m_{1n} , 最大値 max_{1n} , 最小値 min_{1n} , 分散値 σ^2_{1n} を抽出する。
- ・これを誤差因子N1,N2について行い、それぞれのデータを抽出する。

ここまでの手順で表4のデータが得られる。これらのデータを用いて解析①から③、それぞれの加工のSN比(η)を算出した。

これらの計算は以下の手順で行った。これをNo1~24までの実験に適用した結果、表5の結果を得た。

表4 抽出したデータの例

		1	2	...	n_*
m	N1	m_{11}	m_{12}	...	$m_{1(n1)}$
	N2	m_{21}	m_{22}	...	$m_{2(n2)}$
max	N1	max_{11}	max_{12}	...	$max_{1(n1)}$
	N2	max_{21}	max_{22}	...	$max_{2(n2)}$
min	N1	min_{11}	min_{12}	...	$min_{1(n1)}$
	N2	min_{21}	min_{22}	...	$min_{2(n2)}$
σ^2	N1	σ^2_{11}	σ^2_{12}	...	$\sigma^2_{1(n1)}$
	N2	σ^2_{21}	σ^2_{22}	...	$\sigma^2_{2(n2)}$

《max-minで加工のSN比を計算 ①, ③》

(全変動)

$$S_t = \sum_{i=1}^{n1} max_{li}^2 + \sum_{i=1}^{n1} min_{li}^2 + \sum_{i=1}^{n2} max_{2i}^2 + \sum_{i=1}^{n2} min_{2i}^2$$

(一般平均の変動)

$$S_m = \frac{(\sum_{i=1}^{n1} max_{li} + \sum_{i=1}^{n1} min_{li} + \sum_{i=1}^{n2} max_{2i} + \sum_{i=1}^{n2} min_{2i})^2}{2 \times (n_1 + n_2)}$$

(max-minによる変動)

$$S_{max-min} = \frac{(\sum_{i=1}^{n1} max_{li} + \sum_{i=1}^{n2} max_{2i})^2}{n_1 + n_2} + \frac{(\sum_{i=1}^{n1} min_{li} + \sum_{i=1}^{n2} min_{2i})^2}{n_1 + n_2} - S_m$$

(誤差因子による平均の変動)

$$S_{N \times m} = \frac{(\sum_{i=1}^{n1} max_{li} + \sum_{i=1}^{n1} min_{li})^2}{n_1 + n_1} + \frac{(\sum_{i=1}^{n2} max_{2i} + \sum_{i=1}^{n2} min_{2i})^2}{n_2 + n_2} - S_m$$

(誤差変動)

$$S_e = S_t - S_m - S_{N \times m} - S_{max-min}$$

(総合誤差変動)

$$S_N = S_{max-min} + S_{N \times m} + S_e$$

(誤差分散)

$$V_e = \frac{S_e}{n_1 + n_2 - 3}$$

(総合誤差分散)

$$V_N = \frac{S_N}{n_1 + n_2 - 1}$$

(電力分散)

$$\sigma^2 = \frac{\sum_{i=1}^{n1} \sigma_{li}^2 + \sum_{i=1}^{n2} \sigma_{2i}^2}{n_1 + n_2}$$

(加工のSN比・・・解析①の場合)

$$\eta_1 = 10 \log \frac{1}{V_N + \sigma^2} (S_m - V_e)$$

(加工のSN比・・・解析③の場合)

$$\eta_3 = 10 \log \frac{1}{V_N} (S_m - V_e) \frac{2n}{V_N}$$

《平均とσ²で加工SN比を計算 ②》

(全変動)

$$S_t = \sum_{i=1}^{n_1} m_{1i}^2 + \sum_{i=1}^{n_2} m_{2i}^2$$

(一般平均の変動)

$$S_m = \frac{(\sum_{i=1}^{n_1} m_{1i} + \sum_{i=1}^{n_2} m_{2i})^2}{n_1 + n_2}$$

(誤差因子による平均の変動)

$$S_{Nxm} = \frac{(\sum_{i=1}^{n_1} m_{1i})^2}{n_1} - \frac{(\sum_{i=1}^{n_2} m_{2i})^2}{n_2} - S_m$$

(誤差変動)

$$S_e = S_t - S_m - S_{Nxm}$$

(総合誤差変動)

$$S_N = S_t - S_m$$

(誤差分散)

$$V_e = \frac{S_e}{n_1 + n_2 - 1}$$

(総合誤差分散)

$$V_N = \frac{S_N}{n_1 + n_2 - 2}$$

(電力分散)

$$\sigma^2 = \frac{\sum_{i=1}^{n_1} \sigma_{1i}^2 + \sum_{i=1}^{n_2} \sigma_{2i}^2}{n_1 + n_2}$$

(加工のSN比・・・解析②の場合)

$$\eta_2 = 10 \log \frac{1}{V_N + \sigma^2} (S_m - V_e)$$

4. 結果と考察

実験の再現性はL18直交表を使った実験から、確認実験の加工のSN比を推定した。表5のデータからL18直行表部分のNo1～18の数値を用い、それぞれの制御因子の効果を要因効果の計算⁽⁸⁾により算出し、

表6に示す。それらの結果から、表1のNo19～24の確認実験条件において予測される加工のSN比を計算し、それを推定値とした。表5のNo19～24で実際に加工した電力から計算した加工のSN比を実験値とし、これらの推定値と実験値から実験の再現性を確認した。これら推定値と実験値のデータの一部を表7に示す。再現性の評価は推定値を入力、実験地を出力とした計測のSN比⁽⁹⁾を用い、これを再現性のSN比とした。

表5 各実験Noの加工SN比

	加工SN比(db) M=0.01(s)		
	①max-min	②平均とσ ²	③max-minとσ ²
No1	8.03	-0.70	7.26
No2	0.61	-4.06	0.54
No3	-3.09	-7.82	-3.10
No4	7.45	-0.90	6.75
No5	-0.69	-3.85	-0.75
No6	-0.74	-3.30	-0.79
No7	3.29	-2.27	3.13
No8	-4.24	-6.72	-4.29
No9	13.39	0.38	12.76
No10	-7.67	-10.71	-7.71
No11	11.65	-0.38	10.78
No12	3.23	-2.70	3.18
No13	-2.15	-6.13	-2.26
No14	-5.50	-5.92	-5.57
No15	16.93	0.15	16.05
No16	-6.63	-9.63	-6.67
No17	5.51	-1.88	5.30
No18	7.25	-0.41	7.18
No19	15.40	0.16	14.78
No20	5.96	-1.89	5.49
No21	-10.20	-12.13	-10.23
No22	-2.37	-4.98	-2.41
No23	-7.80	-5.47	-7.84
No24	5.10	-2.00	4.94

表6 制御因子による加工のSN比(db)の要因効果

条件	水準			
	1	2	3	
A	ドリル材質	-2.8	-4.0	-
B	(誤差列 e)	-3.8	-3.3	-3.0
C	ドリル直径	-4.7	-4.0	-1.4
D	直径と送り速度の比率	0.6	-2.5	-8.3
E	ドリル外周切削速度	-2.1	-3.6	-4.5
F	NC 旋盤の切削速度	-3.2	-3.7	-3.3
G	バイトの切り込み	-3.6	-3.2	-3.3
H	バイトの切削面積	-3.4	-3.1	-3.6

計算方法：②平均とσ²，M=0.01(s)

表7 再現性のSN比計算用の確認実験データ

実験 No	No19	No20	No21	No22	No23	No24
推定値	1.58	-1.82	-9.52	-3.64	-5.14	-1.80
実験値	1.55	-1.17	-12.56	-4.30	-12.01	-1.09

計算方法：②平均とσ²，M=0.01(s)

また、電力の解析には計算過程で電力を分割する時間M(s)の影響を強く受けることが予想されるため、再現性のSN比の計算を分割時間0.2, 0.1, 0.01の場合についてそれぞれ計算した。その結果を表8および図3に示す。

再現性のSN比については②の計算方法が①と③よりも全体的に良くなった。計算方法①と③の比較においては大きな差はなかった。また、解析における電力分割間隔Mの変化と再現性のSN比については、分割間隔を短くすると②は良くなり①と③については悪くなる結果となった。

①と③は解析にmax-minを用いており、これは極短時間の電力変動や、計測におけるノイズの影響がそのまま表れるので実験の再現性が悪くなったものと考えられる。電力分割間隔を短くすると、max-minを用いた①と③は再現性が悪くなり、平均値と σ^2 で解析した②は良くなった。①、③については計測ノイズの影響が大きくなったものと考えられ、②については平均値の時間的変化が解析に反映されたため再現性が良くなったものと考えられる。

表8 解析方法と再現性のSN比

解析方法	再現性のSN比		
	M=0.01(s)	M=0.1(s)	M=0.2(s)
①max-min	-11.4	-9.6	-9.1
②平均と σ^2	0.2	-4.3	-4.8
③max-minと σ^2	-10.9	-9.5	-9.2

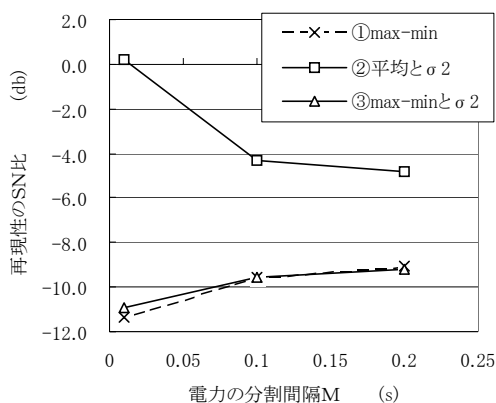


図3 解析方法と再現性のSN比

5. おわりに

ドリル加工を例に、直交表を使った切削加工の電力解析方法と実験の再現性について検討を行った。

その結果、電力波形を望目特性で解析する加工SN比においては、電力の平均値と分散値での解析がmax-min値を用いる解析よりも実験の再現性が良くなることが分かった。電力のmax-min値を用いる方法において分散値を用いる場合と用いない場合での比較では大きな差は表れなかった。また、平均値と分散値で解析する場合においては、解析時の電力の分割時間を0.1(s)以下にすることにより、実験の再現性が大きく向上することがわかった。

ばらつきを表す指標としてはレンジ(max-min)と分散(σ^2)が考えられる。加工SN比の再現性については分散(σ^2)の情報を解析に入れた方が実験の再現性が良くなり、信頼できる結果を得ることができる。

参考文献

- (1) 高橋和仁,高坂慎治,星谷清春,矢野耕也,西内典明,矢野宏:品質工学,vol8,No1,pp24-30,(2000)
- (2) 佐藤英憲,上野輝人,藤懸清,藤本良一,矢野宏:品質工学,vol10,No1,pp49-53,(2002)
- (3) 平井泰史,中西克司,福本康博,安達範久:品質工学,vol10,,No4,pp53-59,(2002)
- (4) 庄子泰弘,宇井友成:品質工学,vol13,No1,pp51-58,(2005)
- (5) 桑原修:広島市工業技術センター年報,vol.19, pp.37-40,(2005)
- (6) 田口玄一他:品質工学応用講座-機械・材料・加工の品質工学-,日本規格協会,p7,(2001)
- (7) 田口玄一:最適設計のための評価技術,日本規格協会,p34,(2000)
- (8) 矢野宏:品質工学計算法入門,日本規格協会,pp123-125,(1998)
- (9) 矢野宏:品質工学入門,日本規格協会,p19,(1995)