

# アルミ材の三次元加工条件の最適化に関する研究

機械技術部 南 晃, 市来浩一, 竹中幸三\*

## Study on Optimization of Three Dimensions Cutting Condition of Aluminum Materials

Akira MINAMI, Kouichi ICHIKI and Kouzo TAKENAKA

近年、金型や機械部品の加工において、従来の平面的な二次元加工だけでなく立体的に加工する三次元加工を行う機会が増加している。しかし、二次元加工に比べて加工が複雑で検討すべき要因が多く存在するため、条件設定は容易ではない。本研究ではアルミ材の三次元加工条件の最適化を加工精度について検討し、品質工学の手法を用いて実験・解析を行った。

その結果、切り込み量、パスの種類、切削速度、加工方向の順で効果が大きいことがわかった。また、最適条件での加工では最悪条件のときと比べて約16dBの利得を得られた。

### 1. 緒言

ボールエンドミルによる三次元加工では、工具とワークの位置関係が一定とは限らないため切削速度や切削抵抗など加工における条件が刻々と変化する。この影響をなるべく小さくし高い能率の加工を行う方法として、最近では小径工具による高送り速度、高切削速度、小切り込み量による高速切削加工が研究されているが、検討すべきパラメータが多数存在するため、加工条件の設定は難しい。また、工具の動きを制御するためのプログラム（以下、工具パスと言う）もCAD/CAMによって自動生成されるため、ある程度のパターン選択はできても形状に応じた細かい設定を行うのは困難である。

本研究では、小径工具を用いたアルミ材の三次元加工における加工精度に関して、品質工学の手法を用いて実験を行い、データを解析して加工条件の最適化を試みた。

### 2. 実験方法

#### 2.1 実験手順

被削材は広く利用されているA5024を使用した。この被削材をマシニングセンタ（三井精機VT3A）によりあらかじめ削り代を残して荒加工をする。次に品質工学の手法により設定した18通りの条件で図1に示すような円すい形に加工を行う。

加工後は、三次元測定機（ミツトヨLEGEX707）で形状を測定し、得られた測定値をデータとして解析を行う。

NCプログラムは三次元CAD/CAMシステム（セイコーインスツルメンツU-Graph）を使用して生成する。

#### 2.2 加工形状

加工形状は図1に示すように底面の直径 20mm、高さ10mm、頂角90°の円すい形とした。



図1 加工形状

### 3. 実験計画

#### 3.1 制御因子

三次元加工において、加工精度に影響を及ぼすと思われる要因を8つ選んで制御因子とした。それぞれの制御因子に対して2または3つの水準で実験を行う条件を設定した。制御因子と水準値を表1に示す。これらの因子を表2のようにL<sub>18</sub>直交表に割り付けた。

表1 制御因子と水準値

列記号	制御因子	単位	水準値		
			1	2	3
1 A	加工方向	-	UPCUT	DOWNCUT	-
2 B	切り込み	mm	0.25	0.5	1
3 C	切削速度	m/min	100	200	400
4 D	送り量	mm/刃	0.025	0.050	0.100
5 E	工具種類	-	a	b	c
6 F	締付トルク	kg.m	4.5	4.0	3.5
7 G	切削油	リットル/min	なし	9	18
8 H	パスの種類	-	A	B	C

\* (有)新光エンジニアリング

表2 制御因子のL<sub>18</sub>直交表への割り付け

行	制御因子							
	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	2	2	1	1	1	1	1	1
5	2	2	2	2	2	2	2	2
6	2	2	3	3	3	3	3	3
7	3	3	1	1	1	1	1	1
8	3	3	2	2	2	2	2	2
9	3	3	3	3	3	3	3	3
10	2	3	1	1	1	1	1	1
11	2	3	2	2	2	2	2	2
12	2	3	3	3	3	3	3	3
13	3	2	1	1	1	1	1	1
14	3	2	2	2	2	2	2	2
15	3	2	3	3	3	3	3	3
16	1	2	1	1	1	1	1	1
17	1	2	2	2	2	2	2	2
18	1	2	3	3	3	3	3	3

3.1.1 加工方向

図2に示すようにワークと工具の位置関係によって、UP CUTとDOWNCUTの2つの加工方向があり、それぞれ加工特性が異なるため、2水準を設定した。

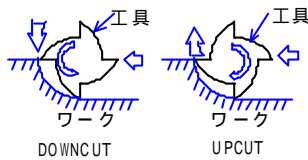


図2 加工方向

3.1.2 切り込み

仕上げ加工における切り込み量0.25, 0.5, 1.0mmの3水準を設定した。切り込み量は加工面に対して垂直方向の値である。

3.1.3 切削速度

切削速度は100m/min, 200m/min, 400m/minの3水準を設定した。

3.1.4 送り量

送り量は0.025mm/刃, 0.05mm/刃, 0.1mm/刃の3水準を設定した

3.1.5 工具の種類

工具は直径5mmのボールエンドミルで、材質はハイス、ハイスコート、超硬を使用した。表3に工具の仕様を示す。

表3 工具の種類

工具	材種	コーティング	直径 D	刃長 l	全長 L	柄長 DS
a	ハイス	なし	5mm	10mm	90mm	6mm
b	ハイス	あり	5mm	10mm	90mm	6mm
c	超硬	なし	5mm	10mm	90mm	6mm



3.1.6 締め付けトルク

工具をホルダに取り付ける際の付けトルクは、4.5kg・m, 4.0kg・m, 3.5kg・mの3水準を設定した。締め付けは専用のトルクレンチを使用した。

3.1.7 切削油

切削油は水溶性のものを約1/10に希釈して使用した。

0 $\frac{1}{2}$ l/min, 9 $\frac{1}{2}$ l/min, 18 $\frac{1}{2}$ l/minの3水準を設定した。

3.1.8 工具パスの種類

CAD/CAMで工具パスを作成するとき、メニューの中のいくつかのパターンから選択する。本研究では図3に示すように外側から内側に渦巻き状に進むフォローポケット、逆に外側から内側に進むフォローポケット、左右に直線的に進むジグザグの3種類のパターンを選択して実験を行った。

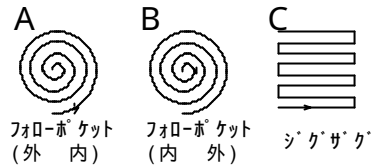


図3 工具パスの種類

3.2 信号因子

NC工作機械で加工を行うとき、指令された寸法どおりに加工できることが理想である。

品質工学では特に入力に対して出力のばらつきの大小が重視される。本実験の場合、工具パスによってマシニングセンタが受ける指令値が入力であり、これを信号因子と言う。出力は実際に加工された寸法である。

信号因子は図4に示すように、高さ3, 5, 7mmにおける円すいの直径をそれぞれ

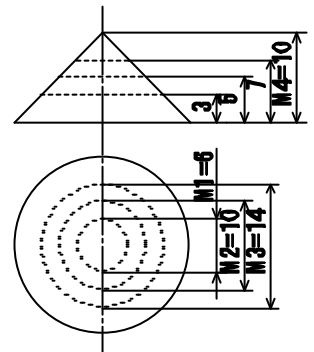


図4 信号因子

M1=6mm, M2=10mm, M3=14mm, 円すいの高さをM4=10mmと設定した。

3.3 誤差因子

誤差因子は、加工に及ぼす外的影響を故意に与えることでこのような外的影響にも乱されない条件を見いだすことを目的として設定する因子である。本実験では1本の工具により同一条件で同じ円すい形を3個削ることで誤差因子とした。

4. 実験結果の解析

4.1 SN比の計算

ワークを加工するためのマシニングセンタへの指令値をM, 加工された寸法をyとする。指令値Mが0の時、yも0でなくてはならない。また、Mとyが常に一定の比率を保つこと、すなわちy = Mの関係が成立することが理想である。このような場合、ゼロ点比例式のSN比を求めて解析を行う。表4はL<sub>18</sub>直交表の第1行目の条件で加工し

た結果を示す。このデータを例として用いて、解析手順及び結果を一例として以下に示す。

表4 測定データの例(第1行)

	1	2	3	信号因子	
直径	Z=7	5.952	5.950	5.951	M1=6
	Z=5	9.937	9.942	9.938	M2=10
	Z=3	13.937	13.932	13.949	M3=14
円錐の高さ	9.972	9.978	9.973	M4=10	

・全2乗和

$$S_T = 5.952^2 + 5.950^2 + \dots + 9.973^2 = 1283.9803$$

・線形式

$$L_1 = 6.0 \times 5.952 + 10.0 \times 9.937 + 14.0 \times 13.937 + 10.0 \times 9.972 = 429.920$$

$$L_2 = 6.0 \times 5.950 + 10.0 \times 9.942 + 14.0 \times 13.932 + 10.0 \times 9.978 = 429.948$$

$$L_3 = 6.0 \times 5.951 + 10.0 \times 9.938 + 14.0 \times 13.949 + 10.0 \times 9.973 = 430.102$$

・有効除数

$$r = 3 \times (6.0^2 + 10.0^2 + 14.0^2 + 10.0^2) = 1296.0$$

・比例項の変動

$$S = (L_1 + L_2 + L_3)^2 / r = 1283.9768$$

・誤差変動

$$S_e = S_T - S = 1283.9803 - 1283.9768 = 0.0035$$

・誤差分散

$$V_e = S_e / (n-1) = 0.0003$$

以上の計算結果をもとにSN比と感度を計算する。

$$SN \text{ 比} = 10 \times \log \{ (S - V_e) / V_e r \} = 34.92 \text{ (dB)}$$

$$\text{感度 } S = 10 \log \{ (S - V_e) / r \} = -0.04 \text{ (dB)}$$

これと同様に他の行についても解析を行い、SN比と感度を計算した。SN比と感度の解析結果を表5に示す。

表5 各行のSN比と感度

行	SN比	感度 S	行	SN比	感度 S
1	34.92	-0.040	10	15.36	0.063
2	15.05	0.024	11	-1.43	0.357
3	6.93	0.020	12	9.08	0.099
4	6.41	0.357	13	7.75	0.291
5	7.90	0.240	14	-3.42	0.719
6	1.67	-0.030	15	7.61	0.224
7	3.12	0.476	16	3.54	0.407
8	2.17	0.296	17	-3.43	0.855
9	8.45	0.178	18	5.12	0.115

#### 4.2 制御因子の効果の検討

解析結果から各制御因子の効果をSN比について検討した。計算のための補助表を表6に示す。また、この表をもとに作成した各制御因子の水準ごとの効果を図4に示す。

これにより制御因子ごとに最適な加工条件はどこにあるかを検討した。SN比はその値が高いほど入力に対してノイズが小さい。つまり、指令値に対して加工寸法のばらつきが小さい安定した加工を行っていることを示している。

表6 分散分析の補助表

因子	SN比の平均			感度Sの平均		
	1	2	3	1	2	3
加工方向 A	9.62	4.46	-	0.17	0.35	-
切り込み B	13.32	4.65	3.16	0.09	0.30	0.39
切削速度 C	11.85	2.81	6.48	0.26	0.42	0.10
送り量 D	8.76	8.00	4.37	0.32	0.21	0.25
工具種類 E	6.66	7.31	7.16	0.27	0.23	0.27
締付トルク F	8.69	7.83	4.61	0.25	0.24	0.29
切削油 G	10.08	6.56	4.49	0.27	0.27	0.24
バスの種類 H	12.18	5.84	3.12	0.15	0.20	0.42

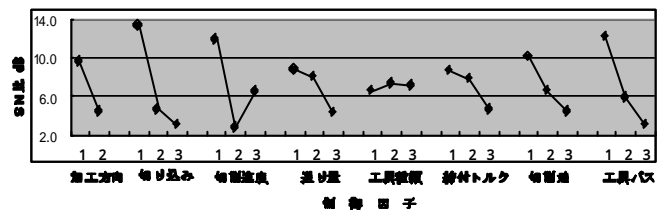


図4 要因効果図

その結果、

加工方向：UPCUT(1水準)

切り込み：0.25mm(1水準)

切削速度：100m/min(1水準)

送り量：0.025m/刃(1水準)

工具種類：ハイスコート(2水準)

切削油：なし(1水準)

バスの種類：フォローポケット外 内(1水準)

がそれぞれSN比が最も高いことが分かった。しかし、水準間におけるSN比の差は制御因子ごとに異なる。さらに分散分析をおこない各制御因子が加工精度に与える影響を検討した。分散分析の結果を表7に示す。この結果、切り

込み量，パスの種類，切削速度，加工方向の順で効果が大  
きいことがわかる。

表7 分散分析の結果

制御因子	平方和S	自由度	分散V	順位
加工方向 A	119.81	1	119.81	4
切り込み B	360.96	2	180.48	1
切削速度 C	248.20	2	124.10	3
送り量 D	65.89	2	32.94	6
工具種類 E	1.39	2	0.69	8
締付トルク F	55.52	2	27.76	7
切削油 G	95.66	2	47.83	5
パスの種類 H	259.50	2	129.75	2

4.3 最適条件の推定

各制御因子の最もSN比の高い水準の組み合わせが最適  
な条件であり，それぞれのSN比を加えたものが最適条件  
のSN比である。同様にSN比の最も低い組み合わせが最  
悪条件である。また，両者のSN比の差が利得であり，最  
悪条件に対して最適条件ではどの程度安定した加工が行  
えるかを示している。以上の結果をもとに最適条件と最悪  
条件の推定を行い，利得を計算した。最適条件と最悪条件  
の組み合わせとそのSN比を表8に示す。

表8 最適条件と最悪条件の推定

制御因子		最適条件		最悪条件		順位
		水準	SN比(dB)	水準	SN比(dB)	
加工方向 A	1	9.624	2	4.464	4	
切り込み B	1	13.318	3	3.161	1	
切削速度 C	1	11.848	2	2.805	3	
送り量 D	1	8.756	3	4.373	6	
工具種類 E	2	7.310	1	6.661	8	
締付トルク F	1	8.693	3	4.611	7	
切削油 G	1	10.077	3	4.491	5	
パスの種類 H	1	12.179	3	3.117	2	

これらすべてを用いて計算すると過剰推定となるので，  
分散分析の結果から効果の大きい切り込み量，パスの種類，  
切削速度，加工方向の4つの要因を用いて推定を行った。  
SN比の推定値を $\hat{\mu}$ ，SN比の平均をTとすると計算式は  
下式のとおり。

・最適条件の推定

$$\hat{\mu} = B_1 + H_1 + C_1 + A_1 - 3T$$

$$= 13.32 + 12.18 + 11.85 + 9.62 - 7.044 \times 3 = 25.84 \text{ (dB)}$$

・最悪条件の推定

$$\hat{\mu} = B_3 + H_3 + C_2 + A_2 - 3T$$

$$= 3.16 + 3.12 + 2.81 + 4.46 - 7.044 \times 3 = -7.58 \text{ (dB)}$$

・利得の計算

$$\text{最適条件} - \text{最悪条件} = 25.84 - (-7.58)$$

$$= 33.42 \text{ (dB)}$$

5. 確認実験

実験結果の再現性を検討するために表9に示す条件で確  
認実験を行いSN比を求めて解析した。確認実験の結果を  
表10に示す。

表9 確認実験の条件

制御因子	単位	最適条件		最悪条件	
		水準	水準	水準	水準
加工方向 A	-	1	Upcut	2	Downcut
切り込み B	mm	1	0.25	3	1
切削速度 C	m/min	1	100	2	200
送り量 D	mm/刃	1	0.025	3	0.1
工具種類 E	-	2	b	1	a
締付トルク F	kg.m	1	4.5	3	3.5
切削油 G	%/min	1	なし	3	18
パスの種類 H	-	1	A	3	C

表10 確認実験の結果

	推定値	確認実験
最適条件	25.84	15.03
最悪条件	-7.58	-1.08
利得	33.42	16.11

6. 結果および考察

本実験はアルミニウム材の三次元加工において，加工精  
度にどのような要因が影響するかを品質工学の手法を用いて  
検討したものである。

実験の結果，切り込み量，パスの種類，切削速度，加工  
方向などの要因が大きく影響することがわかった。

切り込み量

加工精度に対して切り込み量の影響が大きいことがわか  
った。特に小径工具を使ったので切削抵抗が工具の変形量  
などに与える影響が顕著に現れたものと思われる。

近年注目を浴びている高速切削加工でも小径工具による  
微小切り込み加工が前提であるのはこのような理由からで  
ある。

パスの種類

パスの種類はフォローポケットと呼ばれる渦巻き状で外  
側から内側に加工するパスがもっとも良好な結果であった。

同じフォローポケットでも逆の場合，円すいの頂点から  
底辺方向へ降りていく加工となるため，工具がワークに押  
しつけられるような力が加わるうえ，工具の刃部でも先端  
に近い比較的切削速度の低い領域での加工が行われるため  
加工精度が劣化したものと思われる。

また，フォローポケットの方が直線的に加工するジグザ  
グ加工より形状に沿った形で加工を行えるため結果が良好  
であった。加工形状に適した工具パスの選択の重要性は  
重要であることがわかった。

切削速度

100m/minがもっとも良好であった。200m/minを越して40  
0m/minになると良好な結果となった。加工時間を重視する  
場合，加工精度を多少犠牲にして高い切削速度を選択する  
ことで，加工時間短縮を図ることも可能である。

加工方向

アップカットの方が良好な結果になった，従来でもアップカットは仕上げに使われていたがこれを裏付ける結果となった。また，その効果も大きいので荒加工と仕上げ加工の明確な使い分けが大切である。

確認実験の結果，最適な条件の組み合わせで加工を行うことで形状精度は高まることがわかった。しかし，表5において，確認実験で得られたSN比の利得は推定値の利得に近いほど再現性は良いと言えるが，今回の実験では半分程度であった。

## 7. おわりに

本研究では，アルミ材を被削材として円すい形に加工する実験を行った。三次元加工では形状が複雑になり，パラメータが増加する。今後はいろいろな形状パターン，工具パスのパターン，被削材などについて検討していきたい。

## 参 考 文 献

- 1) 田口玄一，小西省三： ” 品質工学講座3 品質評価のためのSN比 ”，日本規格協会(1994)p.50
- 2) 森田春美ら：鹿児島県工業技術センター研究報告書, 11, 31(1998)

