

ステンレス鋼の微小穴明け加工の最適化技術

機械技術部 南 晃, 森田春美

Optimization of Microhole Machining of Stainless Steel

Akira MINAMI and Harumi MORITA

微小径ドリルによる穴明け加工は突発的なドリルの折損が発生しやすく、加工現場での問題点の一つとなっている。本実験では品質工学の手法を用いて、直径 $\phi 0.5\text{mm}$ のコーティングハイスドリルによるステンレス鋼SUS316への穴明け加工実験を行い、最適な加工条件について検討した。

その結果、現状より加工時間は約2倍になるが折損寿命が約9倍になり、ばらつきの少ない加工条件が得られた。また、ステップ送り量、工具突き出し長、切削油量、切削速度などの効果が大きいことがわかった。

1. 緒言

直径 $\phi 1\text{mm}$ 以下の微小径ドリルによる穴明け加工は、部品のマイクロ化や電子部品の需要増大などにもとない必要性が増加している。また、最近では様々な材料への穴明けが要求され、ステンレス鋼など難削材への加工の機会も増加している。

しかし、微小径ドリルは剛性が低く、切屑排出性が悪いため突発的な折損が起りやすく、その修復には多くの工数が必要である。加工条件の設定も、特に高硬度材や難削材を加工する場合は適正な条件の範囲が狭く困難である。

このため、加工能率が多少悪くても切削速度や送り速度を小さく設定したり、工具交換の時期を早めにし対しているのが現状である。

本実験ではステンレス鋼の穴明け加工で、折損寿命が長く、ばらつきの少ない加工条件を得るための検討を品質工学の手法を用いて行った。

2. 実験の計画

2.1 制御因子

穴明け加工条件の中で折損寿命に影響を及ぼすと思われる要因を表1に示すとおりに選定した。これらを制御因子として水準値を設定し、 L_8 直交表に割り付けた。

現行条件は $A_1, B_2, C_2, D_2, E_2, F_3, G_1$ である。

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	センター穴	—	あり	なし	—
2	B	ドリル種類	—	a	b	c
3	C	送り量	mm/min	0.005	0.01	0.015
4	D	ステップ	mm/step	0.1	0.2	0.3
5	E	切削速度	m/min	5	10	15
6	F	切削油量	μl/min	9	18	34
7	G	突き出し長	mm	4	6	8

2.1.1 センター穴

ドリル加工では刃先中心の位置決めのため、センター穴を明ける。このセンター穴加工の影響を把握するためセンター穴あり・なしの2水準を設定した。

2.1.2 ドリル種類

ドリルはいずれもハイスの母材にコーティングを施した市販のものを使用した。形状やコーティングの種類などを変えた3種類のドリルを選択した。

使用したドリルの仕様を表2、図1に示す。

表2 ドリルの仕様

	材種	コーティング	直径 D	溝長 l	全長 L	柄径 DS
ドリル a	ハイス	TiAlN	$\phi 0.5\text{mm}$	6mm	27mm	$\phi 0.5\text{mm}$
ドリル b	ハイス	TiCN	$\phi 0.5\text{mm}$	3mm	27mm	$\phi 0.5\text{mm}$
ドリル c	ハイス	TiAlN	$\phi 0.5\text{mm}$	3mm	50mm	$\phi 3.0\text{mm}$

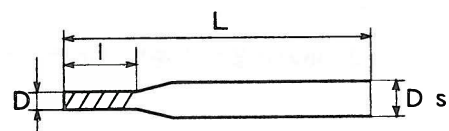


図1 ドリルの仕様

2.1.3 一刃当たりの送り量

現状では、ステンレス鋼に対してドリル加工の一刃当たりの送り量（以下、送り量と言う）は 0.01mm/rev 程度で加工している。本実験では現状に対して $\pm 0.005\text{mm/rev}$ の水準値を選択した。

2.1.4 ステップ送り量

現状では、ステップ送り量（以下、ステップと言う）は 0.2mm/step 程度であるのに対し、本実験では $\pm 0.1\text{mm/step}$ の水準値を選択した。

2.1.5 切削速度

現状では、切削速度は 10m/min 程度であるのに対し、本実験では $\pm 5\text{m/min}$ の水準値を選択した。

2. 1. 6 切削油量

切削油は多量にかけることが一般的である。本実験では、その影響を把握するために切削油量を変えて実験を行った。切削油量は噴射ノズル数を1本、2本、4本と変えることで調節した。表1の各水準値は1分間にノズルから噴射される切削油の実測値である。

2. 1. 7 突き出し長

突き出し長は一般には短い方がよいとされている。しかし、ホルダーや治具、ワークなどの干渉により短くできないケースはしばしば発生する。今回の試験では穴深さ3mmに対し4mm、6mm、8mmと設定して、その影響を調べた。

2. 2 特性値

1本のドリルを使って加工できる穴の数は多いほど経済的で、工具交換の手間などが省けるのでよいと言える。

本実験では1本のドリルが折損するまで穴明け加工を行い、折損したときの穴数を特性値とした。この値が大きくなるような加工条件が最適な条件である。

2. 3 信号因子

本実験では加工できる穴数が多い条件を制御因子の中から探し出すため、信号因子は設けない。

2. 4 誤差因子

誤差因子は実験の繰り返し数とし、今回は2回とした。

3. 実験の方法

3. 1 試験片

被削材は板厚5mmのステンレス鋼 (SUS316) を使用した。被削材の表面をフラットエンドミル (OSG SUS-EDS φ16) で切削したものを加工試験片とした。

3. 2 加工穴

直径0.5mm、深さ3mmの止まり穴をX、Y方向とも2.5mmピッチで明けた。

3. 3 穴明け加工サイクル

FANUCの固定サイクルG83を使用した。所定の深さまで一定のステップで少しづつ穴明けを行う加工法で、切屑の排出性が良いので小径・深穴加工に適している。図2にG83固定サイクルを示す。

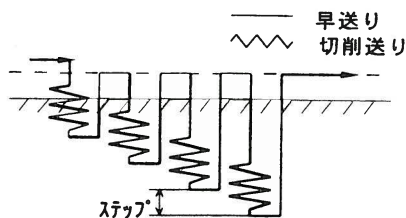


図2 G83固定サイクル

3. 4 固定条件

固定条件は以下のとおりとした。

工作機械：マシニングセンタVT3A (三井精機株)

ホルダ：BBT30-MEGA6N-60 (大昭和精機株)

切削油：TRIM VHP E210 (水溶性) を約10:1に希釈

4. データの解析

4. 1 SN比の計算

実験の目的から加工できる穴数は多いほど良い。従って望大特性のSN比を求めた。SN比は下の式で求められる。

$$VT=1/n (1/y_1^2+1/y_2^2) \tag{1}$$

$$SN比 \eta = -10 \cdot \log VT \tag{2}$$

実験の結果と求めた各行のSN比を表3に示す。

表3 実験の結果とSN比

行	1回目	2回目	SN比	行	1回目	2回目	SN比
1	381	357	51.33	10	146	192	44.32
2	933	42	35.47	11	187	283	46.87
3	2	4	8.06	12	11	2	8.89
4	85	93	38.96	13	7	91	19.89
5	67	68	36.59	14	66	219	39.02
6	15	14	23.21	15	68	151	38.86
7	567	861	56.52	16	87	27	31.24
8	2	70	9.03	17	395	500	52.84
9	1500	2313	65.01	18	31	44	31.09

4. 2 制御因子の効果の検討

加工穴数に影響を及ぼす制御因子の効果を検討するためにSN比を分散分析した。表3のSN比をもとに、各制御因子の効果を求めるため、制御因子の各水準ごとのSN比の和と平均値を求めたものが表4である。

表4 分散分析の補助表と各行のSN比の平均

因子	SN比ηの和			SN比ηの平均		
	1	2	3	1	2	3
センター穴	A 324.17	313.01	—	36.02	34.78	—
ドリル種類	B 194.93	196.53	245.71	32.49	32.75	40.95
送り量	C 242.25	219.81	175.12	40.37	36.64	29.19
ステップ	D 293.86	188.43	154.88	48.98	31.41	25.81
切削速度	E 248.04	162.44	226.69	41.34	27.07	37.78
切削油量	F 165.18	253.86	218.14	27.53	42.31	36.36
突き出し長	G 232.07	251.21	153.90	38.68	41.87	25.65
誤差項	e 211.20	221.68	204.29	35.20	36.95	34.05

この表より、修正項CFは、

$$CF = \frac{(\text{全データの和})^2}{\text{全データ数}} \\ = \frac{(36.02+34.78+\dots+34.05)^2}{18} \\ = 22555.1339$$

と求められる。

センター穴の有無の効果 S_A は、

$$S_A = \frac{\{(A_1\text{の和})^2 + (A_2\text{の和})^2\}}{9} - CF \\ = \frac{\{(324.17)^2 + (313.01)^2\}}{9} - CF \\ = 6.9153$$

と求められる。

同様にドリルの種類の効果 S_B は

$$S_B = \frac{\{(B_1\text{の和})^2 + (B_2\text{の和})^2 + (B_3\text{の和})^2\}}{6} - CF \\ = 277.8006$$

と求められる。

その他の制御因子も同様に計算し、その効果を求めるため分散分析した結果を表5に示す。

また、図3に各制御因子について水準間のSN比の傾向を示す。

表5 分散分析の結果

制御因子	平方和S	自由度	分散V
S _A センタ-穴 A	6.92	1	6.92
S _B ドリル種類 B	277.80	2	138.90
S _C 送り量 C	389.30	2	194.65
S _D ステップ D	1753.26	2	876.63
S _E 切削速度 E	661.73	2	330.86
S _F 切削油量 F	663.64	2	331.82
S _G 突き出し長 G	885.89	2	442.95

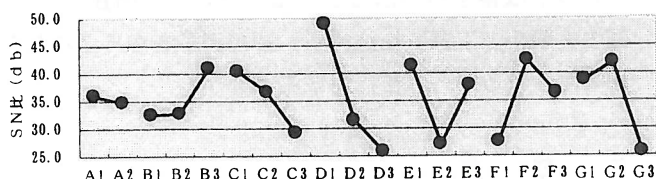


図3 水準間のSN比の傾向

4. 3 最適条件の推定

表4、表5から、最も効果の大きい制御因子はステップである。以下、突き出し長、切削油量の順で効果が大きかった。各制御因子でSN比の平均が最も高い水準を組み合わせ得られた条件が最適な加工条件となる。

各制御因子ごとに最適な水準を選んだときの条件は以下のとおりである。

- センター穴 : A₁ あり
- ドリル種類 : B₃ ドリルc
- 送り量 : C₁ 0.005mm/rev
- ステップ : D₁ 0.1mm/step
- 切削速度 : E₁ 5m/min
- 切削油量 : F₂ 18ℓ/min
- 突き出し長 : G₂ 6mm

ここで、穴明け加工時間は切削速度、送り量、ステップで決まる。切削速度の最適条件は5m/minだったがこの条件では加工時間が現行条件の約4倍にもなってしまうため、切削速度はSN比に大きな差のない15m/minとした。

突き出し長の最適条件は6mmであるが、一般的に短い方がよいと言われていること、最適条件と比べて差が小さいことから4mmと6mmの2種類で推定と確認実験を行った。

この最適条件で穴明け加工をしたときに得られるSN比の推定値 $\hat{\mu}$ を、表4の平均値を用いて計算する。

しかし、これらの全ての条件で推定すると過大推定となることが考えられるので効果の大きい要因であるステップ(D)、突き出し長(G)、切削油量(F)、切削速度(E)を用いて計算した。

最適条件のSN比の推定値 $\hat{\mu}$ は、下の式で求められる。
突き出し長4mmの場合

$$\begin{aligned} \hat{\mu} &= D_1 + E_3 + F_2 + G_1 - (3 \times \text{SN比の総平均}) \\ &= 48.98 + 37.78 + 42.31 + 38.68 - (3 \times 35.40) \\ &= 61.55 \text{ (db)} \end{aligned}$$

突き出し長6mmの場合

$$\begin{aligned} \hat{\mu} &= D_1 + E_3 + F_2 + G_2 - (3 \times \text{SN比の総平均}) \\ &= 48.98 + 37.78 + 42.31 + 41.87 - (3 \times 35.40) \\ &= 64.74 \text{ (db)} \end{aligned}$$

また、現行条件のSN比の推定値は、下のとおりである。

$$\begin{aligned} \hat{\mu} &= D_2 + E_2 + F_3 + G_1 - (3 \times \text{SN比の総平均}) \\ &= 31.41 + 27.07 + 36.36 + 38.68 - (3 \times 35.40) \\ &= 27.32 \text{ (db)} \end{aligned}$$

最適条件が現行条件に対してどの程度改善されたかを見るために利得を求める。

利得は最適条件のSN比 $\hat{\mu}$ - 現行条件のSN比 $\hat{\mu}$ で求められ、大きいほど改善された度合いが大きいと言える。

突き出し長4mmの場合

$$61.55 - 27.32 = 34.23 \text{ (db)}$$

突き出し長6mmの場合

$$64.74 - 27.32 = 37.42 \text{ (db)}$$

となる。

5. 確認実験

実験結果の再現性を確認するために、表6に示す各条件で確認実験を行った。また、確認実験の結果とSN比の推定値の比較を表7に示す。

表6 確認実験の条件

制御因子		最適条件				現行条件	
		突き出し長4mm		突き出し長6mm		水準値	
		水準値	水準値	水準値	水準値	水準値	水準値
センター穴	A	1	あり	1	あり	1	あり
ドリル種類	B	3	c	3	c	2	b
送り量	C	1	0.005	1	0.005	2	0.01
ステップ	D	1	0.1	1	0.1	2	0.2
切削速度	E	3	15	3	15	2	10
切削油量	F	2	18	2	18	3	34
突き出し長	G	1	4	2	6	1	4

表7 確認実験の結果

		確認実験の結果		推定値(db)
		穴数	SN比(db)	
現行条件		162	44.19	27.32
突き出し長4mm	最適条件	1542	63.76	61.55
	利得	—	19.57	34.23
突き出し長6mm	最適条件	918	59.26	64.74
	利得	—	15.07	37.42

6. 実験の結果および考察

6. 1 実験の結果

推定では突き出し長6mmの方が4mmよりも良い結果が得ら

れたが、確認実験では突き出し長4mmの方が良い結果となり、最適条件は現行条件に比べて19.57 (db) の利得を得られた。

その結果、加工時間は約2倍になったがドリルの折損寿命は約9倍に改善された。

6. 2 考察

(1) 表3に示すようにL₁₀直交表に割り付けた各条件での実験結果はばらつきが大きかった。

これは、ステンレス鋼における微小穴明け加工の最適条件の範囲は狭いことを示しており、適正な設定をしないと工具折損が頻発する可能性があることがわかった。

(2) 制御因子の中でステップの効果が最も大きかった。

これは、直径の小さいドリルは剛性が低いので、ステップが小さくなるとドリルへの負荷が低くなるためと考えられる。

送り量もステップと同様に小さい方がよかったが、折損寿命への効果はステップと比べて小さいので加工時間を重視するときはステップよりも送り量を速くすればよいことがわかった。

(3) 切削油量は大量にかける方がよいといわれているが、本実験では、2水準の18ℓ/minの方が3水準の34ℓ/minより良いという結果となった。

これは単に切削油量だけではなく、ノズル数、噴射の方向等多くの要因が絡んでいるものと思われ、今後検討して行かなくてはならない。

(4) 切削速度には10m/min付近で折損寿命の谷間があり、そこを越えるとむしろ良い結果が得られることがわかった。切削速度を大きくすることは、加工時間の短縮につながるため、切削速度を上げたときの折損寿命の変化について検討する必要がある。

(5) ドリルは、3水準のドリルcが最も良い結果となった。

これは、他の2種類のものに比べて柄部が太く溝長が短いのでドリル剛性が高いためと考えられる。

(6) センター穴は折損寿命にはあまり影響のないことがわかった。しかし、今回は評価しなかったが穴の位置精度という点では明らかにセンター穴があった方が効果が高いのでセンター穴は必要と思われる。

(7) 確認実験の利得が推定値より小さい値となった。また、突き出し長が推定と確認実験で逆の結果になった。

この理由としては誤差因子が実験の繰り返し数2回と少なく設定したためと思われる。

これを改善する方法としては、ゼロ点比例式にして1回の実験の加工穴数を決める、誤差因子を多くとるなどが考えられるが、今後検討する必要がある。

7. 結 言

本実験は品質工学の手法を用いて折損寿命が長く折損時期のばらつきの少ない穴明け加工条件について検討したものである。

その結果、前節に記したことがわかったが、利得が推定値より小さかったり、推定と確認実験で逆の結果が出たりしてしまった。今後は実験の方法を検討し、時間の短縮と信頼性の向上を図る必要がある。

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)
- 3) 新井亮一ら：長野精密工業試報，10，5(1997)