

ステンレス鋼のドリル加工における品質工学の適用 — 切削抵抗と工具損傷 —

岩本竜一*, 田中耕治**

Optimization of Drilling Process for the Stainless Steel by Quality Engineering Method — Cutting Forces and Tool Wear —

Ryuichi IWAMOTO and Koji TANAKA

オーステナイト系ステンレス鋼 (SUS304、SUS310S) のドリル加工実験を行った。加工時の切削抵抗 (トルクおよびスラスト) および工具損傷を確認し、品質工学の手法を用いて解析を行い、切削抵抗および工具損傷を低減できる加工条件の最適化を検討した。

この結果、切削抵抗を低減するためには、送り速度、切削速度、切削油剤の順番に効果が大きい要因であることがわかった。また、工具損傷を低減するためには、送り速度、切削油剤の順番に効果が大きい要因であることがわかった。さらに、切削抵抗および工具損傷の低減を両立するための最適加工条件の可能性が見いだされた。

Keyword : ステンレス鋼, 品質工学, ドリル加工, 切削抵抗, 工具損傷

1. 緒 言

ステンレス鋼は、耐粒界腐食性、耐孔食性などの耐食性に加え、耐熱性、耐酸化性等を有しているため、建設、産業機械器具など幅広い分野に使用されている¹⁾。近年は、輸送機器や電気部品等にも積極的に使われている。本県においても、食品関連の機器、プラント等に使用され、その製造もしくは部品加工を行っている企業は多い。

このようなステンレス鋼の中でも、今後の成長が見込まれる太陽光発電装置、あるいはこれらの製造装置の材料として、オーステナイト系ステンレス鋼 (SUS310S) の使用が増えつつある。この鋼種を使用する目的は、エッチングや成膜工程などの繰り返し工程における温度や薬品等の環境変化に対して、生産設備関連装置・器具類の耐久性が必要なためである。

一般に、SUS304に代表されるオーステナイト系ステンレス鋼を切削する場合においては、一般構造用鋼や機械構造用鋼等に比較して以下のような特徴を有する²⁾。

- 加工時の切削抵抗が大きい。
- 切削温度が高い。
- 切りくずが凝着しやすい。
- 加工硬化しやすい。

このほか、切りくずが切れずに長くなるため、仕上げ面の劣化や工具等への絡まりなども生じさせやすい。ステンレス鋼は優れた材料特性を有するが、被削性の悪さは欠点である。

以上のような特徴は、切削工具の損傷などのトラブルの原因となりやすい。SUS310Sは、一般に多用されるSUS304ステンレス鋼よりも耐熱性などに優れるがゆえに、SUS304よりもさらに難削材であると言われており、穴あけやねじ切り加工に関する相談が県内企業からも寄せられている。

特に、ドリルによる穴あけ加工は、ステンレス鋼が耐熱性を有するために、ドリル先端で発生した加工熱の逃げ場が無くなり、旋削やフライス削り等の他の加工方法に比べて加工硬化しやすい切削機構であると言える。いったん加工硬化させてしまうと、ドリル切れ刃は前回の加工で加工硬化した部分を再切削することになり、工具損傷がますます進行するという悪循環に陥る。また、穴あけ後にねじ切り加工が必要な場合では、下穴加工によって生じた加工硬化部をねじ切り加工することとなり、ねじ切りタップ折損などのさらに深刻な問題となる可能性がある。

ここで、特に、下穴加工時の切削抵抗を低減することが可能になれば、発生する加工熱や被削材に与える物理的・機械的ダメージを低減でき、加工硬化の低減に寄与することができる。結果として前述の悪循環を断ち切ることが可能と考えられる。

そこで、本研究では、オーステナイト系ステンレス鋼 (SUS304、SUS310S) の下穴加工を想定した実験を行い、切削抵抗 (トルクおよびスラスト) および工具損傷を低減できる切削条件について検討した。

切削条件の最適化にあたっては、品質工学の手法を用いて解析を行い、切削抵抗および工具損傷の低減を図った。

その結果について、以下に報告する。

*生産技術部

**企画支援部

2. 実験方法

2. 1 被削材

被削材は、オーステナイト系ステンレス鋼 (SUS304_熱間圧延材, SUS304_冷間圧延材, SUS310S_冷間圧延材) を使用した。表1に成分表を示す。表中では、熱間圧延材, 冷間圧延材は、それぞれNo.1, 2Bと略して記載してある。

図1に被削材形状を示す。寸法は、50×16×12.5mmとなるようワイヤカット放電加工機で加工した。

また、表2に被削材の硬さの測定結果を示す。母材としての硬さを確認するために、測定用サンプルは、あらかじめワイヤカット放電加工機により数パス加工後、電解研磨することにより物理的・機械的加工による残留応力や加工硬化の影響の低減を図った。硬さ測定は、ピッカース硬度計 (アカシ製MVK-H1) を用いた。確認のため、ブリネル硬さ (株式会社東京衡機製造所製 油圧式ブリネルカタサ試験機) の測定結果も併せて示す。硬さ換算表から、加工硬化の影響は小さく、加工表面と母材は、同等の硬さであることが推定できる。

2. 2 実験装置

図2に実験状況を示す。実験に使用した工作機械は、三井精機工業株式会社製の立型マシニングセンタ (VT-3A) である。主軸電動機出力は15/11KW, 主軸テーパは二面拘束タイプでBBT30である。このマシニングセンタの主軸に日本キスラー製の回転型切削動力計 (Type 9125) を介して直径4mmのドリルを取り付け、加工中の切削抵抗 (トルクおよびスラスト) を計測できるようにした。ドリルを取り付ける際のコレットは16分割タイプで、つかみ代は約27.5mmで統一した。

加工実験では、穴あけ加工後に穴の内部を観察しやすくする目的のため、前項で述べた被削材を一对使用する。50×16mmの面をそれぞれ対抗して組み合わせてマシンバイスに固定し、この中心部に先端形状の異なる3種類のドリルを用いて穴あけ加工を行った。この組み合わせ面は、機械加工による残留応力や加工硬化の影響を少なくするために、ワイヤカット放電加工機により加工 (4th_cut) を行ったものである。ワイヤカット加工後の表面粗さは、算術平均高さRaが1μm以下になるよう仕上げ (実測値は、Ra≒0.5μm程度)、加工変質層を取り除くために電解研磨により数μm落とした³⁾。

切削条件を表3に示す。通常、ステンレス鋼の加工では多量の切削油剤を供給することが多いが、切りくずの排出状況などを確認するために、ミスト供給方式を採用した。使用した油剤は、ソリュブル系水溶性切削油剤と不水溶性切削油剤 (鉱物油ベース, 植物油) である。

加工後の工具損傷は、デジタルマイクロスコープ (株式会社キーエンス製 VH-8000) で観察した。

表1 被削材成分

	Chemical Composition (%)						
	Cr	Ni	C	Si	Mn	P	S
SUS304_No.1	18.04	8.00	0.05	0.46	1.00	0.33	0.04
SUS304_2B	18.62	8.78	0.04	0.28	1.79	0.32	0.18
SUS310S_2B	24.73	19.20	0.05	0.69	0.87	0.02	0.00

※ 成分値はミルシートより抜粋

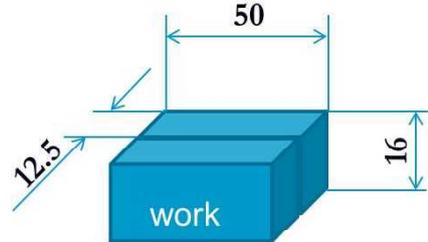


図1 被削材形状

表2 被削材硬さ

	Hardness (Hv, HB)
SUS304_No.1	244Hv, 231HB
SUS304_2B	181Hv, 172HB
SUS310S_2B	145Hv, 138HB



図2 実験状況

表3 切削条件

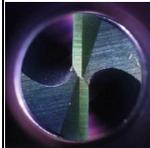
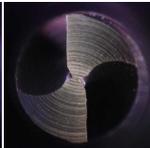
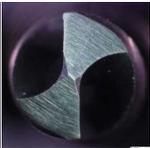
Tool Type			
	A	B	C
Tool Diameter	4 mm		
Cutting Speed	10~20 m/min		
Feed Speed	0.05~0.15 mm/rev		
Depth of Hole	10 mm		
Step Feed	2~6 mm		
Drilling Cycle	G73, G83		
Cutting Fluid (air mist)	Water soluble type Non-water soluble type Vegetable oil type		

表4 制御因子と水準値

Factor	Level			Unit
	1	2	3	
A:Drilling Cycle	G73	G83	-	-
B:Cutting Speed	10	15	20	m/min
C:Feed Speed	0.15	0.1	0.05	mm/rev
D:Step Feed	2	4	6	mm
E:Tool Type	A	B	C	-
F:Works	SUS304 No.1	SUS304 2B	SUS310S 2B	-
G:Chucking Length	43	46	49	mm
H:Cutting Fluid	Water soluble	Non-water soluble	Vegetable	-

表5 L18 直交表

No	Control Factor							
	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
*				*				
*				*				
17	2	3	2	1	3	1	2	3
18	2	3	3	2	1	2	3	1

表6 切削抵抗 (トルク) 測定結果

	トルク (N・m)			平均
	1	2	3	
L1	1.666	1.631	1.675	1.657
L2	1.499	1.531	1.505	1.512
L3	1.544	1.632	1.820	1.665
L4	1.962	1.975	2.033	1.990
L5	1.316	1.345	1.347	1.336
L6	0.924	0.899	0.863	0.895
L7	1.809	2.386	2.317	2.171
L8	1.178	1.240	1.196	1.205
L9	0.679	0.686	0.678	0.681
L10	1.522	1.521	1.586	1.543
L11	1.821	1.785	1.864	1.824
L12	1.075	0.945	1.077	1.032
L13	1.626	1.860	2.690	2.059
L14	1.208	1.306	1.500	1.338
L15	1.041	0.968	1.119	1.043
L16	1.999	2.457	2.738	2.398
L17	1.391	1.452	1.711	1.518
L18	0.619	0.588	0.582	0.596

3. 結果及び考察

3.1 制御因子および割り付け

実験および解析は、品質工学の手法を用いて行った。表3の切削条件を表4に示すとおりA~Hの8つの制御因子として取り上げ、これらの要因を表5に示すとおりL18直交表に割り付けて実験を行った⁴⁾。

3.2 切削抵抗

図3に切削抵抗の測定結果の一例を示す。上段がトルク

Measuring Data

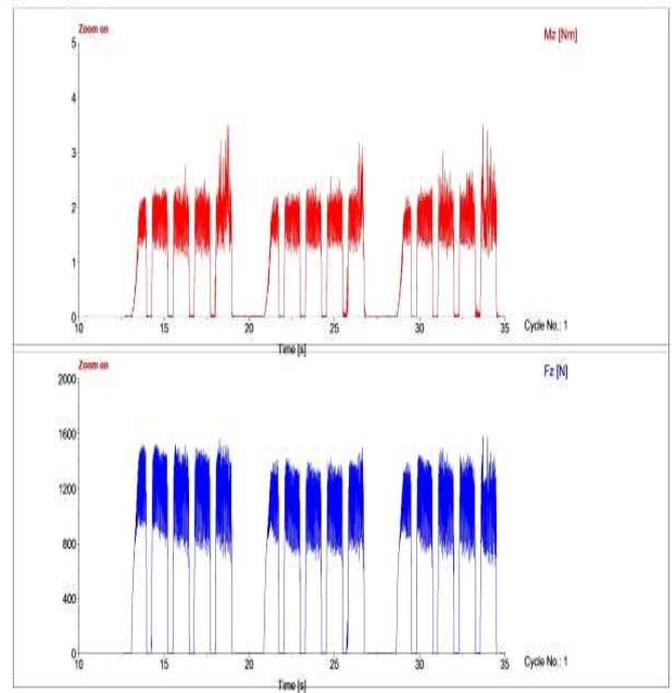


図3 切削抵抗測定例 (上段:トルク, 下段:スラスト)

表7 切削抵抗 (スラスト) 測定結果

	スラスト (N)			平均
	1	2	3	
L1	1098.8	1010.8	1030.0	1046.5
L2	847.3	892.7	944.4	894.8
L3	1189.0	1263.0	1292.0	1248.0
L4	1314.7	1353.9	1352.1	1340.2
L5	1080.2	1084.4	1075.4	1080.0
L6	626.7	598.9	600.9	608.8
L7	1099.2	1261.6	1382.4	1247.7
L8	689.1	726.1	739.7	718.3
L9	689.5	673.6	678.1	680.4
L10	1565.4	1545.6	1574.8	1561.9
L11	984.4	987.1	1008.5	993.3
L12	532.4	498.5	541.3	524.1
L13	1384.2	1421.4	3000.0	1935.2
L14	882.4	897.0	927.8	902.4
L15	476.3	472.9	540.6	496.6
L16	1367.6	1448.0	1540.0	1451.9
L17	1108.8	1111.5	1182.1	1134.1
L18	537.7	521.3	526.3	528.4

下段がスラストを示す。全ての実験条件において穴加工は3カ所連続で実施した。図の例ではステップフィードが2mmであるため、3カ所それぞれにおいて5回の断続した切削抵抗データが得られる。また、1ステップ毎に動的な成分が認められ、時間経過に伴い変動成分があることが分かる。したがって、トルクおよびスラストのそれぞれについて積分値を算出し、これを実切削時間で除したものを静的切削抵抗とした。表6, 7にこの結果を示す。以後の品質

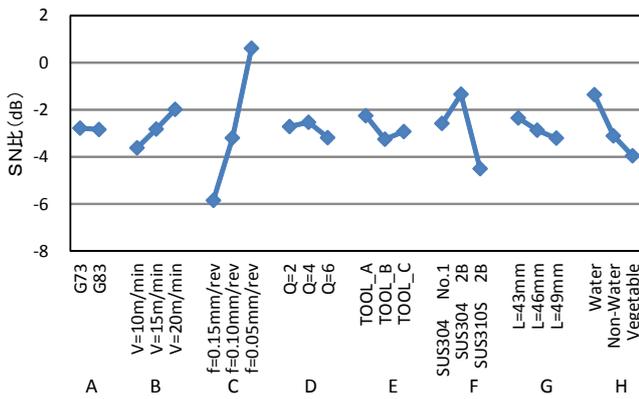


図4 要因効果図 (トルク)

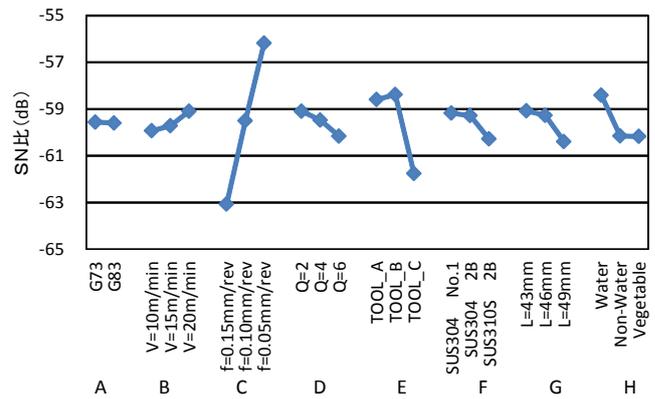


図5 要因効果図 (スラスト)

工学の手法を用いた解析は、この静的切削抵抗結果を使用した。表から、トルクの絶対値はおよそ2Nm程度以下と比較的小さいことに比較して、スラストが500~2000N程度と大きな力が作用していることが分かる。このことからドリル切れ刃の切削作用よりもチゼルエッジ部の押し込み作用が主となって穴あけ加工を行っていると考えられる。

品質工学の手法を用いた解析は、切削抵抗が正の値で、かつ、できるだけ小さい方が良いとする望小特性のSN比を用いた。ここでSN比 η は(1), (2)式で与えられる^{5) 6)}。

$$\eta = 10 \log (1 / Ve) \tag{1}$$

$$Ve = (\sum Yi^2) / n \tag{2}$$

上式により算出したSN比 η を要因別にまとめた結果を、図4, 5に示す。

図よりトルク, スラストともに送り速度(C)の影響が最大であり、送り速度を低くすると効果が大きいことが分かる。送り速度を低くすると加工能率が低下するが、切削速度(B)が早い方がSN比が高いので、切削速度を上げることで加工能率の低下をカバーできる。本実験の範囲を超える切削速度20m/min以上については、今後検討を要する。緒言で述べたように、一般にステンレス鋼の切削において送り速度を低く設定し過ぎると、加工硬化部を再切削することになり工具損傷が進行することが知られているが、本実験の範囲内ではこの影響は認められなかった。

切削油剤(H)の効果は、水溶性ミスト用いた場合がSN比が高いことが分かる。不水溶性油剤と植物油では効果に大きな差が無い。このことから、潤滑性よりも冷却性を重視した切削油剤が適していると考えられる。

ドリル形状(E)については、特に、図5のスラストの場合においてC形状(E3)のドリルのSN比が低い。表3中の写真に示したとおり、3種類のドリルの中でチゼルエッジ長さが一番大きく、シンニングによる彫り込み深さが浅い。このことがチゼルエッジ部の押し込み力増大となっていると考えられる。チゼルエッジ長さはドリル本体の剛性を決定する重要な要素ではあるが、実験中にドリルの剛性不足

を感じさせるような現象は発生しなかった。したがって、ドリルの選定に当たっては、ドリル剛性よりもチゼルエッジ長さやチゼルエッジ部のシンニング等の先端形状に留意することが重要であることがわかる。

ドリルの突き出し量(G)については、突き出し量が高い方がSN比が低くなる傾向は認められるものの、その影響は大きくなかった。ここからも、本実験の範囲内においては、前述のとおりドリル剛性が大きな問題となっていないことが分かる。

被削材(F)の影響は、SUS310SのSN比が一番低くSUS304よりも難削性を示した。ただし、その影響は他の要因と比べて大きくない。適切な切削条件を選定することで解決できる問題と考えられる。

このほか、ドリリングサイクル(A)やステップフィード(D)の影響は小さかった。本実験では加工深さが10mmだったが、より深穴加工を行う場合は影響が出る可能性がある。切りくず形状はステンレス鋼特有の長い切りくずであったが、ミストエアにより飛散し工具に絡まることは無かった。深穴加工の場合には、ドリリングサイクルやステップフィードと併せて、切りくず排出に留意する必要がある。

3.3 工具損傷

工具損傷の観察結果を図6に示す。工具損傷の形態は、外周コーナ部の摩耗とチゼル部およびすくい面を中心とする切りくずの凝着であった。前項と同様に、品質工学の手法を用いた解析は、工具損傷が正の値で、かつ、できるだけ小さい方が良いとする望小特性のSN比を用いた。

表8および図7は、工具損傷の中でも、工具の外周コーナ部逃げ面最大摩耗幅について要因別にまとめた結果である。図より、被削材材種(F)以外では、送り速度(C)、切削油剤(H)の影響が大きいことがわかる。送り速度は小さい方がSN比が高く、切削油剤は水溶性の場合がSN比が高い。これは前項の切削抵抗の場合と同じである。したがって、切削抵抗および工具損傷を同時に低減できる最適加工条件の存在が示唆される可能性が見いだされた。

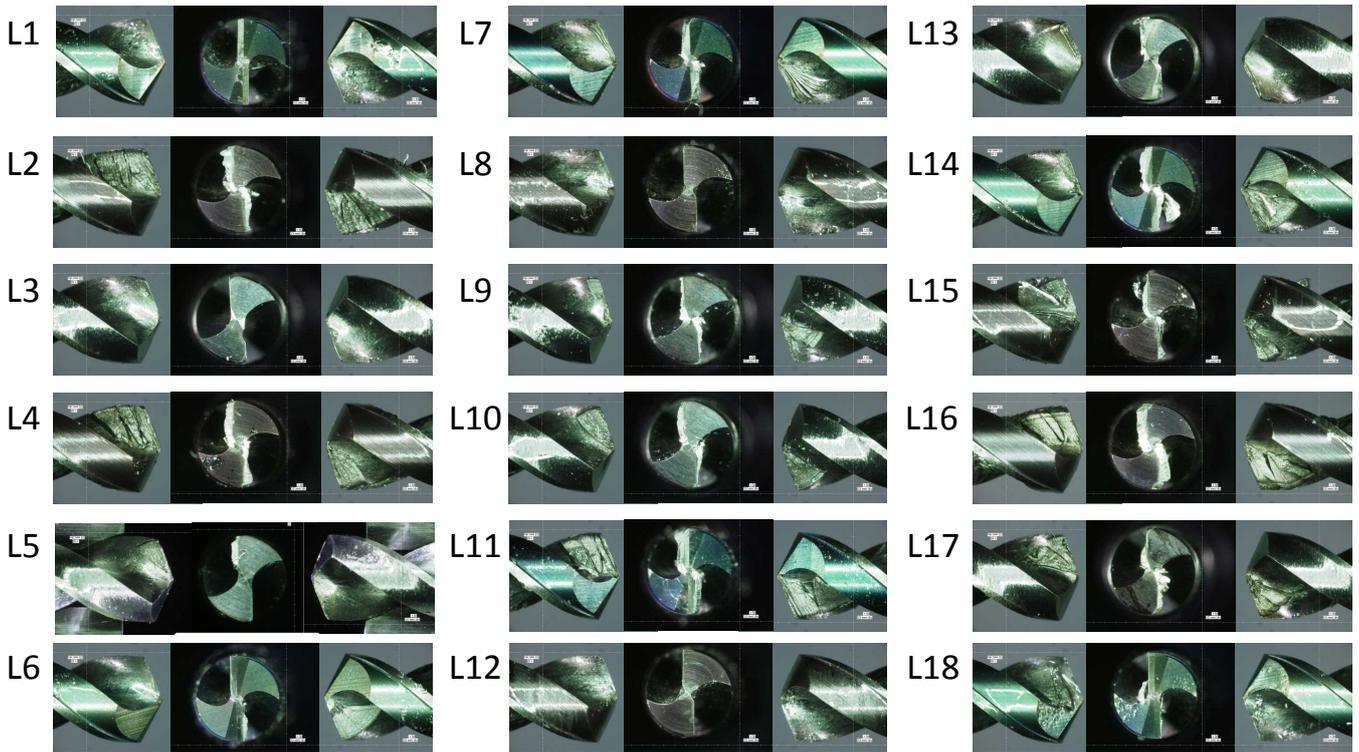


図6 工具損傷観察写真

表8 工具損傷測定結果 単位:mm

	工具損傷 (摩耗)		工具損傷 (凝着)	
	No.1	No.2	No.1	No.2
L1	0.02	0.02	0.02	0.02
L2	0.05	0.19	0.37	0.70
L3	0.15	0.08	0.40	0.29
L4	0.17	0.27	0.53	0.66
L5	0.05	0.08	0.05	0.40
L6	0.01	0.01	0.01	0.24
L7	0.66	0.63	1.08	0.85
L8	0.07	0.03	0.07	0.03
L9	0.03	0.09	0.43	0.36
L10	0.19	0.10	0.57	0.38
L11	0.08	0.21	0.44	0.62
L12	0.01	0.05	0.01	0.05
L13	0.84	0.88	0.99	1.31
L14	0.30	0.30	0.60	0.57
L15	0.03	0.04	0.37	0.29
L16	0.34	0.40	0.85	0.81
L17	0.36	0.27	0.61	0.84
L18	0.02	0.06	0.11	0.06

※ 表中のNo. 1, 2は、2枚刃ドリルのそれぞれの刃を表す

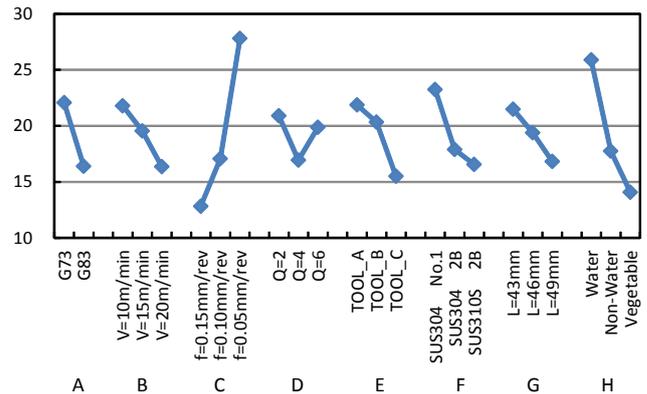


図7 要因効果図 (逃げ面摩耗)

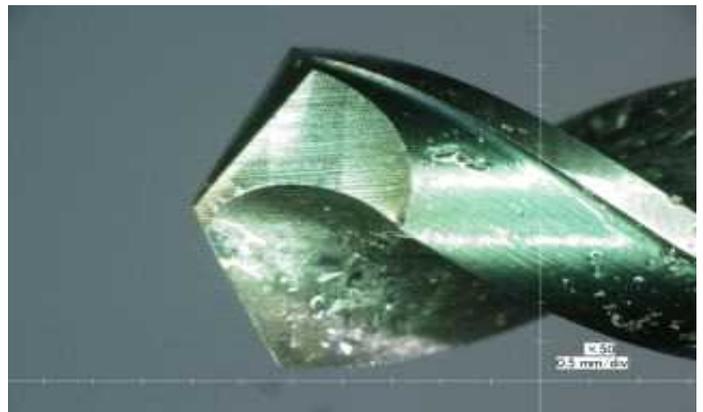


図8 要因効果図 (凝着)

図8は、図7の結果に切りくずの凝着幅を加算して解析し、これを要因別にまとめた結果である。図6の工具損傷観察写真から明らかのように、切りくずの凝着は工具摩耗に比較して遙かに大きい、条件によっては全く認められ

ない場合もある。凝着を零とすると望小特性のSN比を求める式(1),(2)では計算できなくなるため、今回は便宜上、逃げ面摩耗と切りくずの凝着を加算して解析したものを凝着として取り扱った。図7において効果の大きい要因で

あった送り速度(C), 工具形状(E), 被削材材種(F), 切削油剤(H)は, 図8においてもその効果が同様の傾向を示すが, 送り速度(C)の効果は小さくなり, 逆に, 工具形状(E), 被削材材種(F), 切削油剤(H)の効果が大きくなっている。特に, 使用した被削材の中でSUS310S(F3)のSN比が最も低く難削性を示している。また, チゼルエッジ長さが最大でスラストが大きかったC形状(E3)のドリルがSN比が低く, 切りくず凝着の影響と推定される。このことから, SUS310Sが難削性を示す原因は, 加工硬化よりも切りくずの凝着に起因するものが大きいことが推定される。

3. 4 確認実験

実験結果の再現性を検討するために確認実験を行った⁷⁾。確認実験にあたっては, 切削抵抗および工具損傷の観点から最適条件を推定した。

切削抵抗については, トルク, スラストともに送り速度の効果が最大であった。このため, 図5の要因効果図から, 効果の大きい送り速度(C3)を最適条件として選択した。

工具損傷については, 切削抵抗と同様に送り速度の効果が大きく, 送り速度(C3)のSN比が高かったが, これに加えて, 切削油剤(H)の効果が大きかったため, 図7の要因効果図から切削油剤(H1)を最適条件として選択した。

この他に, 切削抵抗と工具損傷について, 共通して効果の高い要因として工具種類(E)が上げられる。図8の要因効果図から効果の大きい工具種類(E1)を最適条件として選択した。なお, 図5において(E1)と(E2)のSN比がわずかに逆転しているが, 今回は, ほぼ同一であるとして取り扱った。以上の3因子C3, H1, E1を用いて利得を推定する。水準別SN比の合計補助表を表9~11に示す。推定される利得は以下のように計算される。

$$\frac{(-337.07)-(-356.99)}{6} + \frac{155.27-106.50}{6} + \frac{50.04-34.18}{6}$$

$$= 3.3 + 8.1 + 2.6 = 14.0(\text{dB})$$

確認実験は, 送り速度(C3), 切削油剤(H1), 工具種類(E1)で他は第2水準としたものを最適条件として, また, 全ての因子を第2水準としたものを現行条件として実験を行った。確認結果を表12に, この表から求めたSN比を表13に示す。

確認実験を行った結果, スラスト方向の切削抵抗と工具の逃げ面摩耗に関しては, 最適条件は現行条件と比べ推定値(11.4 dB)とほぼ同様な利得(10.9 dB)が得られ, 実験の再現性が確認できた。

しかし, 切りくずの凝着に関しては, 推定利得(2.6 dB)に対して, 確認実験では遙かに大きい利得(22 dB)が得られた。これは確認実験で採用した最適条件においてほとんど切りくず凝着が認められなかったために, 式(1), (2)に

よる望小特性のSN比が大きく算出されたことが原因と考えられる。

このような切りくず凝着の影響を正確に解析するには, 第一に, 切りくずの凝着と逃げ面摩耗を正確に分離して測定することであるが, これは工具の顕微鏡観察では容易ではない。第二に, チゼルやドリル溝が詰まるような切りくず凝着から, 全く切りくず凝着が認められない範囲までを, どのようなSN比を用いて解析するかという主に二つの課題を解決する必要があり, 今後, 検討を要する。

表9 水準別SN比合計補助表(スラスト) 単位 dB

	1	2	3
A	-536.02	-536.41	—
B	-359.58	-358.30	-354.55
C	-378.37	-356.99	-337.07
D	-354.58	-356.87	-360.98
E	-351.57	-350.30	-370.57
F	-355.06	-355.69	-361.69
G	-354.48	-355.60	-362.35
H	-350.47	-360.93	-361.03

表10 水準別SN比合計補助表(摩耗) 単位 dB

	1	2	3
A	198.62	147.55	—
B	130.74	117.25	98.19
C	77.01	102.42	166.75
D	125.33	101.63	119.22
E	131.21	121.95	93.01
F	139.47	107.37	99.34
G	128.89	116.30	100.98
H	155.27	106.50	84.40

表11 水準別SN比合計補助表(凝着) 単位 dB

	1	2	3
A	112.57	78.82	—
B	88.70	43.68	59.01
C	45.30	54.05	92.05
D	64.11	64.80	62.47
E	80.72	74.92	35.75
F	105.00	49.53	36.86
G	88.05	39.23	64.11
H	107.17	34.18	50.04

表12 確認実験結果

	最適条件	現行条件
切削抵抗スラスト (N)	548.9	1101.4
工具摩耗 (mm)	0.04	0.11
工具摩耗+凝着 (mm)	0.06	0.40

表13 確認実験結果 単位 dB

	最適条件	現行条件	利得	推定利得
切削抵抗スラスト	-59.0	-60.8	1.8	3.3
工具摩耗	27.7	18.6	9.1	8.1
きりくず凝着	33.0	10.8	22.2	2.6

4. 結 言

ステンレス鋼のドリル加工について実験を行い、品質工学の手法を用いて解析を行った結果、以下のことが明らかとなった。

- (1) 切削抵抗（スラストおよびトルク）の低減には、送り速度が最大の効果を示す要因であることがわかった。
- (2) 工具損傷の低減には、送り速度、切削油剤の順番に効果が大きい要因であることがわかった。
- (3) チゼルエッジに留意したドリル形状の選択および水溶性切削油剤の選択は、上記(1)、(2)に共通して効果の見込める要因であることから、これらの適切な選択により、さらなる最適加工条件の決定に寄与できることがわかった。

謝 辞

本研究は、平成22～24年に実施した九州・山口各県工業系公設試連携促進事業「難削性金属材料の精密切削加工技術の開発」の鹿児島県分担テーマの一部をまとめたものです。事業全体の研究取りまとめを行ってくださった長崎県工業技術センターの瀧内氏をはじめ、大分県産業科学技術センターの大塚氏、熊本県産業技術センターの川村、村井氏らに感謝いたします。

研究を進めるに当たり、有益な助言を賜りました鹿児島県溶接協会技術顧問森田春美氏に謝意を表します。

また、切削工具の製作に協力を賜りました株式会社信栄製作所ならびに試験片の製作などに協力を賜りました樋脇精工株式会社に謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) 山正, 森田茂, 吉武進也: “ステンレスのおはなし”, 日本規格協会(1990)p. 122
- 2) 狩野勝吉: “難削材の切削加工技術”, 工業調査会(1989) p. 155
- 3) 三菱電機(株): “放電加工のしくみと100%活用法”, 技術評論社(昭和54年)p. 62
- 4) 田口玄一: “品質工学講座3 品質評価のためのSN比”, 日本規格協会(1988)p. 123
- 5) 田口玄一: “品質工学講座3 品質評価のためのSN比”, 日本規格協会(1988)p. 19
- 6) 岩本竜一, 森田春美, 南晃: 鹿児島県工業技術センター研究報告, 13, p. 45-48(平成11年度)
- 7) 田口玄一: “品質工学講座1 開発・設計段階の品質工学”, 日本規格協会(1988)p. 81