

品質工学に基づくエンドミルによる焼入鋼切削の最適化

和合 健**、若槻 正明**、堀田 昌宏**、
飯村 崇**、多田 三郎**

品質工学の手法に従い、市販の高硬度材切削用エンドミルを用いて焼入鋼切削における加工条件の最適化及び切削時の状態観察を試みた。被削材は焼入鋼SKD11(HRC50)とSKS3(HRC58)の2材種を用い、工具は6枚刃超硬(Al,Ti)Nコーティングエンドミルを使用し、品質工学に基づく実験計画で直交表L₉に従い切削実験を行った。その結果、切削寸法を重視するときは、工具径の太いエンドミルを使用し、切削速度300(m/min)の切削条件で良好な寸法精度が得られた。以上の実験から、焼入鋼SKD11(HRC50)とSKS3(HRC58)がエンドミルにより十分切削可能であることがわかった。

キーワード：焼入鋼、エンドミル、切削加工、品質工学

Optimization on Endmill cutting for Hardened Steel Using Quality Engineering Method

WAGO Takeshi, WAKATUKI Masaaki, HOTTA Masahiro,
IIMURA Takashi and TADA Saburo

According to method of Quality Engineering, we try to cut hardened steel for the purpose of optimization of cutting parameters and observation of cutting characteristics by hardness cutting endmill on the market using. For the work materials, SKD11(HRC50) and SKS3(HRC58) are used and, we choice endmill which is made from cemented carbide, have six cutting tooth, and is coated (Al,Ti)N, We make a processing experiment of orthogonal array L₉ under the basis of Quality Engineering. As a result, we got a good precision length if we choiced a thick endmill with cutting speed 300(m/min). In conclusion, we find out that hardened steel SKD11(HRC50) and SKS3(HRC58) can be cut by endmill.

key words : hardened steel, endmill, cutting, quality engineering

1 緒 言

オーステンパ球状黒鉛鋳鉄(ADI)の窒化処理による金型の研究や、放電プラズマ焼結法により金型部品を製作する研究など金型材料の高機能化、高硬度化への研究が進められている一方で、硬い金型を加工するための技術開発が要求されている。従来、焼入鋼など高硬度材の加工は、放電加工により行っているが低加工能率、段取り替えの多さなど問題が多い。特に、型修正などの部分的な加工では、エンドミルなどの切削加工が応用できれば加工時間の短縮が可能となる。しかし、エンドミル

による焼入鋼切削は、断続切削による工具欠損、低剛性による工具破損など解決すべき多くの問題があり、企業において一般に行われていない。近年、高硬度材切削用エンドミルが市販され始め、我々ユーザとしても汎用的な焼入鋼切削のために切削条件、加工精度など基本的なデータ蓄積は重要と考えられる。

筆者らは、品質工学の手法に従い、市販の高硬度材切削用エンドミルを用いて、マシニングセンタ(以下、MC)による焼入鋼切削における加工条件の最適化及び切削時の状態観察を試みたので報告する。

* 高硬度難加工材のエンドミル加工技術の確立(第1報)

** 電子機械部

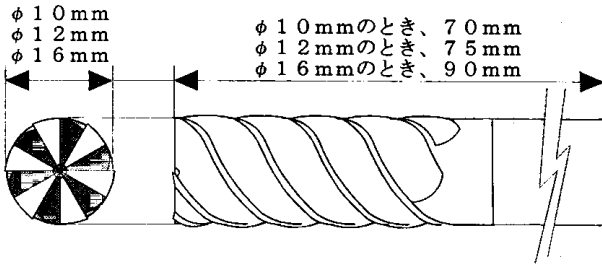
2 実験装置及び実験方法

2-1 加工機械及び工具

表1にMCの主な仕様、図1に実験に使用したエンドミルを示す。

表1 MCの主な仕様

立/横形の形式	立形マシニングセンタ(三井精機VS3A)
スピンドル回転	20000rpm(MAX)
送り速度	4000mm/min(MAX)
主軸モータ	スピンドル一体型高周波モータ
位置決め精度	±2.0μm以下

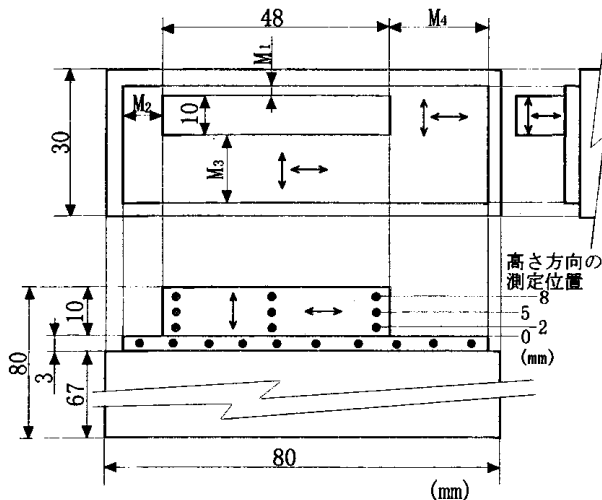


K社製 6枚刃超硬(Al, Ti)コーティングエンドミル

図1 実験に使用したエンドミル

2-2 供試材料

図2に、切削加工後のテストピースの形状と計測位置を示す。SKD11(HRC50)とSKS3(HRC58)の2種類を被削材とし、エンドミル加工は側面削りで、80mm×30mm×80mmブロックから表2のM₁、M₂、M₃、M₄に示す目標の寸法に仕上げる。テストピースの形状を決める要点として、焼入鋼における切削特性を重視したことから、MCの送り誤差による影響が少ない1軸送りで加工できる単純な形状とした。



- 寸法測定の測定点
(9点、ただし、高さ方向は2mm, 5mm, 8mmの位置、横方向は任意の位置)
- 寸法測定の基準点
(10点の平均値)

↑ ↓ 表面粗さの測定位置

図2 切削加工後の形状と計測位置

2-3 計測

図2のM₁、M₂、M₃、M₄を三次元測定機(ZEISS製UPMC550-CARAT-HSS)で測定した。エンドミルのたわみによる形状誤差を算出するために、高さ方向に正確な位置決めを行い、面全体を9点測定した。表面粗さは、図2に示すM₃、M₄の面についてエンドミルの側刃による切削面と底刃による切削面を測定した。測定点数は1面あたり4点とし、表面粗さパラメータはR_zとした。

2-4 信号因子と水準

信号因子は表2のとおりとした。信号因子が切削寸法の場合は、転写性となりゼロ点比例式 $y = \beta M$ より実測値 y 、感度 β 、指示値 M で $\beta = 1$ が目標値となる。表面粗さは、望小特性によりSN比を求めた。

表2 信号因子と水準

信号因子	水準 (単位: mm)			
	M ₁	M ₂	M ₃	M ₄
切削寸法	2	8	14	20

2-5 誤差因子

誤差因子は、特に割り付けなかった。しかし、エンドミルのたわみによる被削材の形状誤差¹⁾を考慮して計測を行い、SN比の算出でエンドミルのたわみによるばらつきを誤差として計算した。

2-6 制御因子と水準

表3に制御因子と水準を示す。制御因子は工具メーカー推奨値²⁾を参考に直接加工に影響がありそうな因子を4種類割り付け、特に切削速度は高切削速度の設定とした。表4にその他の切削条件を示す。

表3 制御因子と水準

制御因子	水準	水準		
		1	2	3
A 切削速度 V(m/min)		100	300	400
B 一刃あたりの送り Sz(mm/tooth)		0.01	0.03	0.05
C 半径方向切り込み rd(mm)		0.01D	0.03D	0.05D
D 工具径 φ(mm)		10	12	16

注) Dは工具径

表4 その他の切削条件

切削方式	エンドミルによる側面切削
工具	6枚刃超硬(Al, Ti)コーティングエンドミル
切削方向	ダウンカット
冷却方式	エアブロー
軸方向切り込み	10mm
被削材	SKD11(HRC50) SKS3(HRC58)

2-7 割り付け

被削材及び表4に示す制御因子を、表5のように直交表L₉に割り付けた。

表5 直交表L₉の割り付け表

No.	制御因子				被削材	信号因子(切削寸法)			
	A	B	C	D		M ₁	M ₂	M ₃	M ₄
1	1	1	1	1	SKD11	計測データ			
2	1	2	2	2	SKS3				
3	1	3	3	3	SKD11				
4	2	1	2	3	SKD11				
5	2	2	3	1	SKS3				
6	2	3	1	2	SKD11				
7	3	1	3	2	SKD11				
8	3	2	1	3	SKS3				
9	3	3	2	1	SKD11				

注) 表面粗さは望小特性によりSN比を算出

2-8 SN比の算出³⁾

2-8-1 寸法精度を重視して解析した場合

(寸法を特性値として動特性のSN比を算出した場合)

表6の実験番号No.1の測定値よりSN比ηと感度βをゼロ点比例式y = βMより求める。

表6 実験番号No.1の測定値

(単位: mm)

高さ方向 の位置	横方向 の位置	水準			
		M ₁	M ₂	M ₃	M ₄
		2.0000	8.0000	14.0000	20.0000
線形式L ₁ 2mm	1	1.9885	7.9947	14.0775	19.9812
	2	1.9909	7.9965	14.0834	19.9835
	3	1.9929	7.9979	14.0877	19.9795
線形式L ₂ 5mm	1	1.9886	8.0074	14.1065	19.9993
	2	1.9880	8.0072	14.1022	19.9973
	3	1.9842	8.0046	14.0972	19.9954
線形式L ₃ 8mm	1	1.9771	8.0029	14.0918	19.9842
	2	1.9801	8.0040	14.1000	19.9826
	3	1.9820	8.0057	14.1022	19.9852

信号値の平方和より有効除数rを求める。

$$r = M_1^2 + M_2^2 + M_3^2 + M_4^2$$

$$= 2.0000^2 + 8.0000^2 + 14.0000^2 + 20.0000^2$$

$$= 664$$

線形式L₁~L₃を求める。

$$L_1 = M_1 y_{111} + M_1 y_{112} + M_1 y_{113} +$$

$$M_2 y_{211} + M_2 y_{212} + M_2 y_{213} +$$

$$M_3 y_{311} + M_3 y_{312} + M_3 y_{313} +$$

$$M_4 y_{411} + M_4 y_{412} + M_4 y_{413}$$

$$= 2 \times 1.9885 + 2 \times 1.9909 + 2 \times 1.9929 +$$

$$8 \times 7.9947 + 8 \times 7.9965 + 8 \times 7.9979 +$$

$$14 \times 14.0775 + 14 \times 14.0834 + 14 \times 14.0877 +$$

$$20 \times 19.9812 + 20 \times 19.9835 + 20 \times 19.9795$$

$$= 1994.2218$$

L₂、L₃も同様に求める。

$$L_2 = 1996.1978$$

$$L_3 = 1995.1352$$

全2乗和S_Tを求める。

$$S_T = y_{111}^2 + y_{112}^2 + y_{113}^2 + y_{211}^2 + \dots$$

$$+ y_{432}^2 + y_{433}^2$$

$$= 1.9885^2 + 1.9909^2 + 1.9929^2 + 7.9947^2 +$$

$$\dots + 19.9826^2 + 19.9852^2$$

$$= 5995.19447 \quad (\text{自由度 } f = 36)$$

比例回帰項の変動S_βを求める。

$$S_\beta = (L_1 + L_2 + L_3)^2 / (3 \times 3 \times r)$$

$$= (1994.2218 + 1996.1978 + 1995.1352)^2$$

$$/ (3 \times 3 \times 664)$$

$$= 5995.12488 \quad (\text{自由度 } f = 1)$$

感度βを求める。

$$\beta = (L_1 + L_2 + L_3) / (3 \times 3 \times r)$$

$$= (1994.2218 + 1996.1978 + 1995.1352)$$

$$/ (3 \times 3 \times 664)$$

$$= 1.0015988$$

エンドミルのたわみを誤差因子としたβとの交互作用

S_{β×N}を求める。

$$S_{\beta \times N} = (L_1^2 + L_2^2 + L_3^2) / (3 \times r) - S_\beta$$

$$= (1994.2218^2 + 1996.1978^2 + 1995.1352^2)$$

$$/ (3 \times 664) - 5995.12488$$

$$= 0.0009819 \quad (\text{自由度 } f = 2)$$

誤差変動S_eを求める。

$$S_e = S_T - S_\beta - S_{\beta \times N}$$

$$= 5995.19447 - 5995.12488 - 0.0009819$$

$$= 0.0686106 \quad (\text{自由度 } f = 36 - 1 - 2 = 33)$$

誤差分散V_eを求める。

$$V_e = S_e / 33$$

$$= 0.0686106 / 33$$

$$= 0.00207911$$

調合ノイズの誤差分散V_Nを求める。

$$V_N = (S_{\beta \times N} + S_e) / 35$$

$$= (0.0009819 + 0.0686106) / 35$$

$$= 0.0019883$$

SN比η(mm⁻²)を求める。

$$\eta = 1 / (3 \times 3 \times r) \times (S_\beta - V_e) / V_N$$

$$= 1 / (3 \times 3 \times 664) \times (5995.12488 - 0.00207911)$$

$$/ 0.0019883$$

$$= 504.5369 \text{ (mm}^{-2}\text{)}$$

$$\eta = 10 \times \log 504.5369$$

$$= 27.0289 \text{ (db)}$$

$$= 27.0 \text{ (db)}$$

誤差限界を求める。ほぼ95%信頼限界に相当する。

$$\pm 3 / \sqrt{\eta} = \pm 3 / \sqrt{504.5369}$$

$$= \pm 0.133559 \text{ (mm)}$$

$$= \pm 134 \text{ (}\mu\text{m)}$$

2-8-2 表面粗さを重視して解析した場合

(表面粗さ (Rz) を特性値として望小特性のSN比を算出した場合)

表7の実験番号No.1の測定値よりSN比ηを望小特性より求める。なお、表面粗さの測定位置については図2を参照のこと。

表7 実験番号No.1の側刃切削面の測定値

測定位置 No.	(単位: μm)			
	M ₃ の切削面		M ₄ の切削面	
y: 実測値	3.75	5.54	9.62	10.08

全2乗和S_Tを求める。

$$S_T = y_1^2 + y_2^2 + y_3^2 + y_4^2 \quad (\text{自由度 } f = 4)$$

$$= 3.75^2 + 5.54^2 + 9.62^2 + 10.08^2 = 239.12001$$

全2乗和S_Tの平均V_Tを求める。

$$V_T = S_T / 4$$

$$= 239.12001 / 4$$

$$= 59.78000$$

SN比ηを求める。

$$\eta = 1 / \sqrt{V_T}$$

$$= 1 / \sqrt{59.78000}$$

$$= 0.016728 (\mu m^{-2})$$

$$\eta = 10 \times \log(1 / \sqrt{V_T})$$

$$= -17.76556$$

$$= -17.8 (\text{db})$$

誤差限界を求める。ほぼ95%信頼限界に相当する。

$$\pm 3 / \sqrt{\eta} = \pm 3 / \sqrt{0.016728}$$

$$= \pm 23.19525$$

$$= \pm 23.2 (\mu m)$$

3 実験結果及び考察

3-1 寸法精度を重視して解析した場合

(寸法を特性値とした場合)

図3にSN比と感度の要因効果図を示す。図3のSN比の要因効果図より最適条件は、A₃B₁C₂D₃となるが、因子BとCは因子AとDと比較して因子間の効果は小さいことから、因子AとDを有意とし、因子BとCは誤差eに含まれると判断した。そこで最適条件は、A₃に対して切りくずが赤化せず工具負荷が軽減されるA₂、高切削能率B₃C₃を考慮してA₂B₃C₃D₃とした。

すなわち、図3に示したSN比の要因効果図から、被削材がSKD11 (HRC50)またはSKS3 (HRC58)のときで、寸法精度を重視する場合は、工具径が太い工具を使用し、切削速度は300(m/min)に設定して、一刃あたりの送り、半径方向の切り込みは一般的な範囲内で状況に応じて任意に設定すれば、良好な寸法精度が得られる。

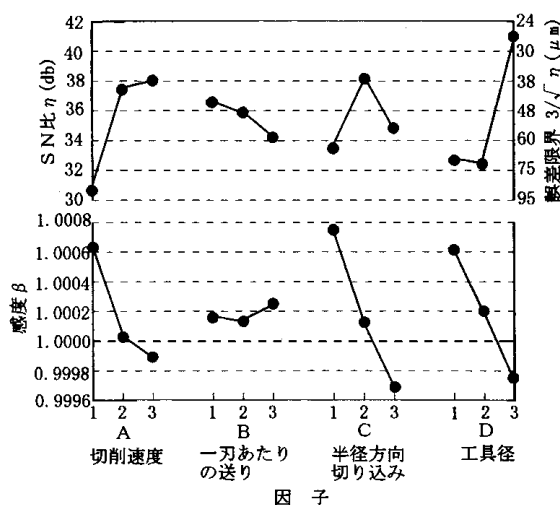


図3 信号因子を寸法とした場合のSN比と感度の要因効果図

表8に実験番号No.1の分散分析表を示す。表8に示した分散分析表などを参考に、エンドミルのたわみによる形状誤差を示すβ×Nの効果の大きさについて考察した結果、誤差eと比較してβ×Nが小さいことからエンドミルのたわみによる被削材の形状誤差はない。

表8 信号因子を寸法としたときの実験番号No.1の分散分析表

(単位: mm ²)			
source	f	S	V
β	1	5995.1249	5995.1249
β×N	2	0.00098	0.00049
e	33	0.06861	0.00208
T	36	5995.1945	-

表9に被削材種のSN比と誤差限界の平均値を示す。

SKD11 (HRC50)がSKS3 (HRC58)よりSN比が小さい結果となっている。しかし、大きな差はないことから被削材種、硬度の相違による条件設定の偏りは小さいと推測される。

表9 被削材種のSN比と誤差限界の平均値

パラメータ	単位	SKD11 (HRC50)	SKS3 (HRC58)
SN比η	db	35.3	37.4
誤差限界	μm	63	47

3-2 表面粗さを重視して解析した場合

(表面粗さを特性値とした場合)

図4にSN比の要因効果図を示す。エンドミルの側刃と底刃では切削方式が異なるため、図4の要因効果図より最適条件が相違したものとなっている。エンドミルの側刃切削での最適条件は、A₂B₂C₂D₃となり、底刃切削での最適条件はA₂B₁C₁D₁となった。

つまり、図4に示したSN比の要因効果図より、被削材がSKD11 (HRC50)またはSKS3 (HRC58)のときで表面粗さを重視する場合は、エンドミルの側刃と底刃切

削では最適条件の設定が異なる。エンドミルの側刃切削面では、特に一刃あたりの送りを0.03(mm/tooth)に設定し、工具径の太い工具を使用することで表面粗さが小さくなる。また、エンドミルの底刃切削では、半径方向の切り込みを小さくし、一刃あたりの送りを小さくすることで表面粗さが小さくなる。

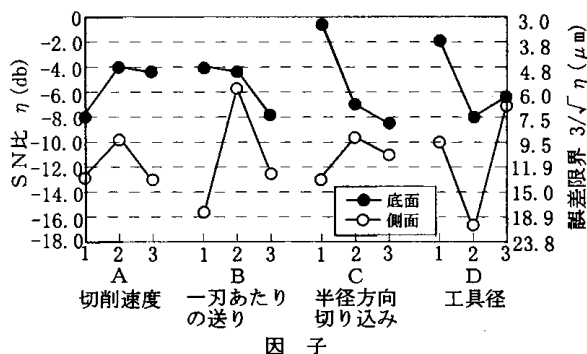


図4 信号因子を表面粗さとした場合のSN比と感度の要因効果図

3-3 確認実験

寸法を特性値とした場合において、最適条件と初期条件の因子の組み合わせにより確認実験を行い、得られた結果を表10に示す。なお、効果が小さい因子BとCは、最適条件と初期条件で同一の高切削能率の設定とし、被削材はSKS3 (HRC58)とした。

表10 確認実験の結果

		推定値	確認実験
最適条件 A ₂ B ₃ C ₃ D ₃	SN比 η (db)	43.2	44.8
	感度 β	0.999580	1.000062
初期条件 A ₁ B ₃ C ₃ D ₁	SN比 η (db)	28.1	34.7
	感度 β	1.001074	1.000081
利得	SN比 η (db)	15.1	10.1

この結果、推定値と確認実験の利得はほぼ一致し、利得の大きさは確認実験で10.1(db)となり、

$$\eta = 10 \log (\beta^2 / \sigma^2) \text{ より}$$

$$10.1 = 10 \log (\beta^2 / \sigma^2)$$

ここで、 $\beta \approx 1$ だから分散(ばらつき)は、

$$\sigma^2 = 10^{-1.01} \approx 0.0977 \approx 1/10.2$$

となる。また誤差(標準偏差)は、

$$\sigma \approx 0.3126 \approx 1/3.2$$

となる。すなわち、ばらつきは分散で1/10.2、標準偏差で1/3.2になることが期待できる。これは、最適条件が初期条件よりもばらつきが小さくなり、指示値が目標値に近づきやすいことを示している。

4 切削実験での切削状態観察

4-1 切削時の状態観察

品質工学に基づく切削実験と平行して切削時の状態観

察を行った。エンドミルによる焼入鋼切削の現象として、切削速度を400(m/min)程度に設定したときに、写真1に示すような切りくずが赤化する現象が多く観察される。

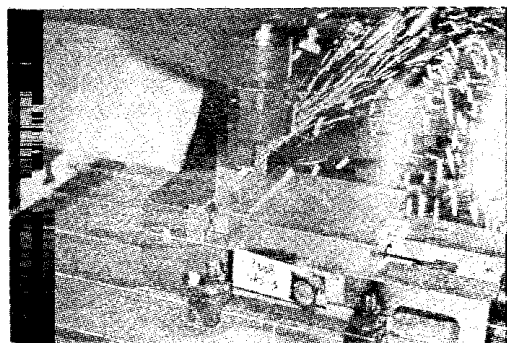


写真1 直交表L₈実験番号No.8の切削時の状況(被削材はSKS3 (HRC58))

4-2 被削材の表面状態

確認実験において最適条件で切削した被削材表面について、写真2に側刃切削面、写真3に底刃切削面を示す。側刃切削面は、エンドミルの円形状が転写された様子が見られ、底刃切削面は、繰り返し切削する方式のため十字のカッターマークが見られる。また、全般に被削材表面は鏡面状になっている。

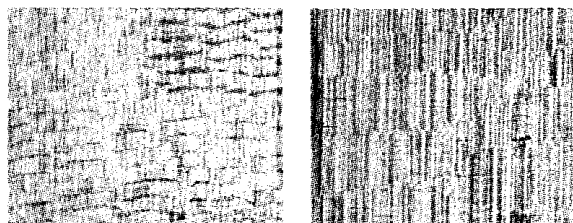


写真2 側刃切削面(右図は拡大したもの)(被削材はSKS3 (HRC58))

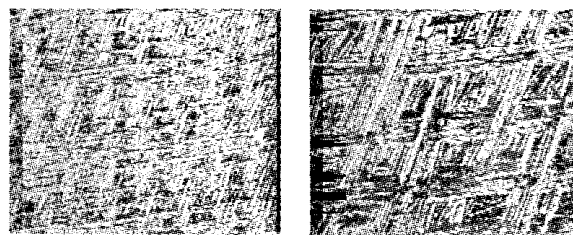


写真3 底刃切削面(右図は拡大したもの)(被削材はSKS3 (HRC58))

4-3 工具摩耗について

実用的な切削では、工具摩耗は少なく工具寿命が長いことが経済性、加工段取りなど多くの点で有利となる。しかし、ここでの切削実験では、焼入鋼切削に対して工具摩耗の進行が早く、特に底刃と側刃が交わるエッジ部の摩耗が大きいと観察された。写真4は、確認実験での最適条件で使用したエンドミルで工具摩耗は少ない。一方、写真5は、参考資料として実験番号No.5でSKS3

(HRC58)を加工後、連続して焼入鋼SKH51(HRC60)を切削したエンドミルで、写真4と比較して工具摩耗が進行しているのがわかる。

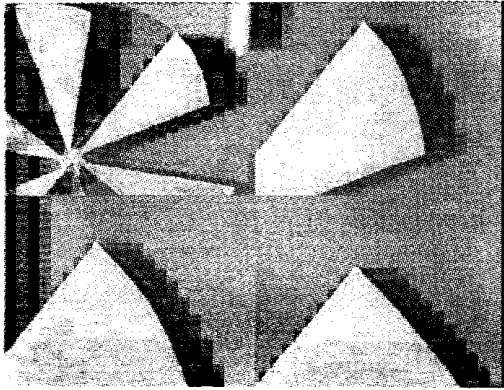


写真4 確認実験の最適条件で使った
エンドミルの底刃
(被削材はSKS3(HRC58))

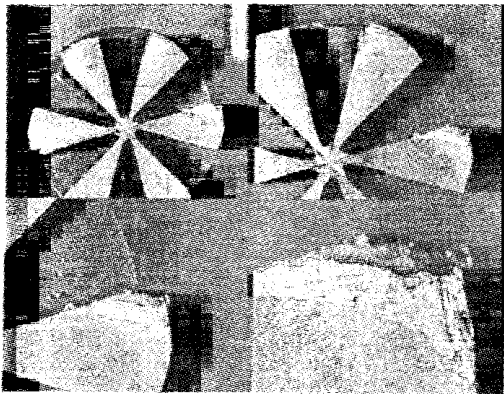


写真5 焼入鋼SKH51(HRC60)
を切削したエンドミルの底刃

4-4 切りくずについて

切りくずは、切削加工での切削状態を判断するうえで重要な信号となり、工具の切り込み、工具の送り、切削速度などその設定条件で転写された切りくず形状となる。本実験では、写真6に示すような針状の切りくずが多く観察される。

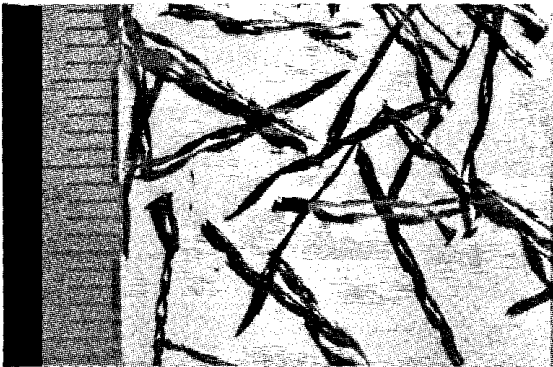


写真6 直交表L。実験番号No.2の切りくず
(被削材はSKS3(HRC58))

5 結 言

本実験の結果、焼入鋼のエンドミル加工において、被削材が焼入鋼SKD11(HRC50)またはSKS3(HRC58)の場合で以下のことが明らかとなった。

- ・寸法精度を重視する場合、工具径が太い工具を使用し、切削速度が300(m/min)の設定で良好な寸法精度が得られる。
- ・エンドミルのたわみによる形状誤差を示す $\beta \times N$ の効果の大きさは、誤差 e と比較して小さいのでエンドミルのたわみによる被削材の形状誤差はないと推測される。
- ・エンドミルの側刃と底刃では切削方式が異なるため、最適条件が相違した結果となっている。エンドミルの側刃切削面では、特に一刃あたりの送りを0.03(mm/tooth)に設定し、工具径の太い工具を使用することで表面粗さが小さくなる。
- ・エンドミルの底刃切削では、半径方向の切り込みを小さくし、一刃あたりの送りを小さくすることで表面粗さが小さくなる。
- ・確認実験より利得がほぼ再現され、最適条件では初期条件よりばらつきが標準偏差で1/3.2と小さくなることが期待できる。これは、最適条件のとき指示値が目標値に近づき易いことを示している。
- ・切削時の状態観察より特徴的な事項として、切りくずが赤化する現象が見られるなど、工具への負荷が大きく、特に工具摩耗の進行の速さが顕著に観察された。今後、実用的な焼入鋼切削への技術移行の前提として工具の寿命試験は必須と思われる。

本研究は、平成8年度から3年間国庫補助事業東北ブロック広域共同研究岩手県分担テーマ「高硬度難加工金属材料の高精度加工技術の開発」の小テーマとして実施している。

謝 辞

本研究を進めるにあたり、品質工学に基づく実験計画についてご指導頂いた宮城教育大学技術科小野元久助教授、エンドミルの切削加工特性についてご指導頂いた機械技術研究所生産情報研究室宮沢伸一室長、並びに碓井雄一主任研究官に感謝いたします。

文 献

- 1) 竹山秀彦ほか：フライス加工ハンドブック、切削油技術研究会(1988)
- 2) 神鋼コパル：高能率加工のポイントと高硬度材・難削材の加工方法、神鋼コパル(1996)
- 3) 田口玄一ほか：転写性の技術開発、(財)日本規格協会(1992)