

高硬度材の切削加工における品質工学の適用*

後 藤 卓 三**

田 野 俊 昭***

大 東 卓 央**

【要 旨】

近年のコーティング技術の向上により、高性能な切削工具が存在し、従来は切削加工が不適とされた被削材質、特に高硬度材についても切削加工適用の道が開かれつつある。高硬度材加工への切削加工適用は、金型製造におけるコストダウン、短納期化など大きな効果を生むものである。

そこで、品質工学の手法を取り入れ、マシニングセンタによる高硬度材の切削加工実験を行い、高硬度材の切削加工性について検討を行った。その結果、高硬度材の切削性について一定の知見を得た。

1 緒 言

景気の低迷の長期化など、製造業において前途が不透明な状態が続いている。金型製造業においても、受注の確保のために、大幅なコスト低減と納期の短縮を余儀なくされている状況にある。このような企業間競争を勝ち抜くための手段として、金型の直彫り加工技術という高硬度材の切削加工が注目されている。

また近年、金型加工業界、切削工具業界においては、活発に高硬度材の切削加工技術の研究が行われており、切削条件、工具材質、加工機など諸要素の適性条件の検討がなされている。

本研究では、機械加工関連の中小企業における、高硬度材への切削加工技術のより実用的な適用の可能性を探ることを目的に、当センターのマシニ

ングセンタ(以後、MCと略する)による切削加工実験を行い、品質工学の手法を用いた検討を行った。

2 実験方法

当センターの門形MCを用いて、高硬度材SKD61、SKD11(合金工具鋼鋼材、硬度値HRC50、HRC60)のエンドミル加工実験を行い、品質工学の手法を取り入れて、切削性の検討を行った。

評価法としては、三次元座標測定機による寸法測定、並びに表面粗さ測定機による切削面の表面粗さ測定を用いた。

また、工具の損耗状態については、万能測定顕微鏡を用いて観察した。

2.1 加工機

表1にMCの主な仕様を示す。

高硬度材の切削加工においては、工具の振れが工具寿命に多大な影響を及ぼす。そこで、現在使用している3種類のミーリングチャックのうち、一番振れの少ないミーリングチャック(プルス

* 「特定中小企業集積活性化促進事業」(共通技術研究開発事業「金属加工・表面加工の応用・高度化に関する技術支援」)

** 機械電子課 主任研究員

*** 同 上 技 師

表1 MCの主な仕様

門型MC	UA-53
最高主軸回転数	: 10,000 (rpm)
最高切削送り速度	: 3,000 (mm/min)
主軸端形式	: BT35
移動距離	: (X軸) 500 (mm) (Y軸) 350 (mm) (Z軸) 280 (mm)
クローズドループ制御 (光学スケール)	
ATC装置	: 24 (本)
製造年	: 平成3年
位置決め精度	: $\pm 2 \mu\text{m}$
運動精度 (DBB測定)	: $5 \mu\text{m}$ (XY, YZ, ZX平面)

タッド一体型の特注品) を使用して切削実験を行った。

2.2 テストピース

加工後のテストピース形状と寸法測定位置を図

1に示す。100mm×30mm×75mmのブロックからエンドミルによる側面切削で所定の寸法に仕上げた。

2.3 計測

図1のa, b, c, d, e, f, g, hそれぞれの頂点の位置は、頂点近傍の3平面をCNC三次元座標測定機(ライツ製PMM866)を用いて測定し、3平面の交点として求めた。

表面粗さは、エンドミルの側刃による切削面と底刃による切削面を表面粗さ測定機(テーラーホブソン製フォームタリサーフS6)を用いて測定した。表面粗さパラメータは、Raを用いた。

2.4 信号因子と水準

転写性の考え方を適用し、MCによる入力デー

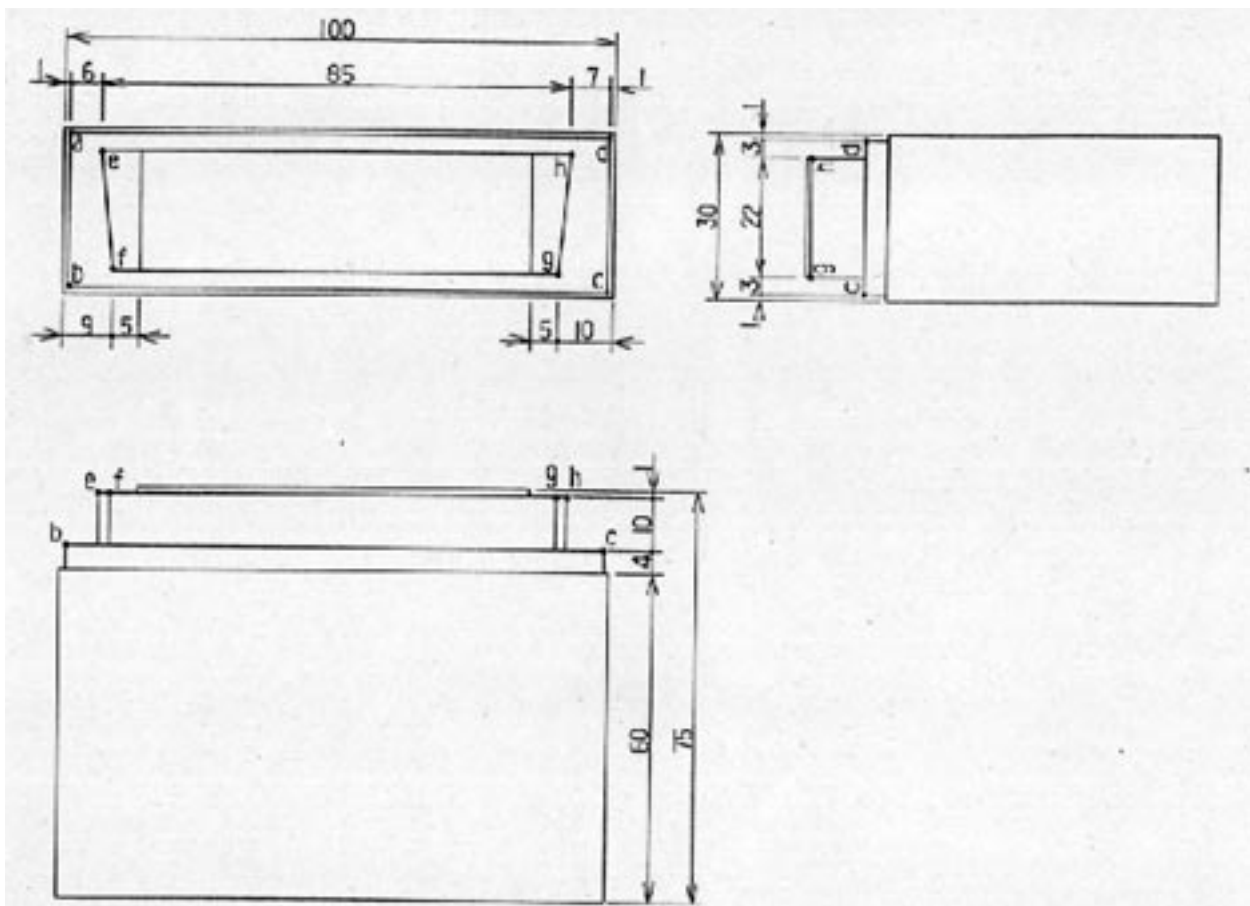


図1 加工後のテストピース形状と寸法測定位置

タ（切削寸法）を信号因子Mとし、入力信号に対応した製品寸法を出力yとした場合、入力信号Mと出力yの間には、 $y = M$ の比例関係が成立する。この場合、比例定数 = 1が目標値となる。表2に信号因子（図1の各頂点間の距離）とその水準を示す。

表2 信号因子とその水準

信号因子	水 準						
	M ₁	M ₂	...	M ₈	...	M ₂₇	M ₂₈
	a - b	a - c	...	b - c	...	f - h	g - h
寸法(mm)	28.000	101.922	...	98.000	...	85.866	22.091

表面粗さについては、望小特性によりSN比を求めた。

2.5 制御因子、誤差因子と水準

表3に制御因子、誤差因子とその水準を示す。使用したエンドミルは、工具メーカーが高硬度材切削

表3 制御因子、誤差因子とその水準

因 子	水 準			
	1	2	3	
制 御 因 子	A：切削方向	UP	DOWN	-
	B：切削速度(m/min)	50	125	220
	C：1刃当たりの送り量(mm/tooth)	0.02	0.04	0.06
	D：半径方向切込み量(mm)	0.1	0.3	0.6
	E：工具メーカー	E ₁ 社	E ₂ 社	E ₃ 社
	F：工具径(mm)	10	12	16
誤 差 因 子	N：材料硬度	HRC50	HRC60	-
		(SKD61)	(SKD11)	

1刃当たりの送り量は、6枚刃の工具のときの値である。
8枚刃の工具の送り速度は、6枚刃の工具の時の送り速度を適用する。
メーカー推奨値は、

切削方向 : DOWN
 切削速度 : 30~300(m/min) [HRC50]
 17~20(m/min) [HRC60]
 1刃当たりの送り量 : 0.05~0.06(mm/tooth) [HRC50]
 0.02~0.04(mm/tooth) [HRC60]
 半径方向切込み量 : 0.05D₀(mm) [HRC50]
 0.02~0.025D₀(mm) [HRC60]
 軸方向切込み量 : 1.5D₀(mm) [HRC50]
 1.0~1.5D₀(mm) [HRC60]
 D₀：工具径
 メーカーにより推奨値が異なっている。

用に開発した超硬コーティングエンドミルである。

制御因子は、工具メーカー推奨値並びに昨年の実験結果¹⁾を考慮して、切削に影響があると考えられる6因子を用いた。そして、被削材の材料硬度を誤差因子とした。

表4にその他の切削条件を示す。

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
軸方向切込み量	15mm、11mm及び1mm
工具突出し量	10：30mm
	12：35mm
	16：45mm
工具の刃数	E ₃ 社の16mmのみ8枚、他の工具は6枚。
クーラント	水溶性切削液

2.6 実験条件の割り付け

表5に実験条件の割り付けを示す。

表5 実験条件の割り付け

直交表 L 18

No.	制 御 因 子					
	A	B	C	D	E	F
1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	2	2	2	2
3	1	1	3	3	3	3
4	1	2	1	1	2	3
5	1	2	2	2	3	1
6	1	2	3	3	1	2
7	1	3	1	2	3	2
8	1	3	2	3	1	3
9	1	3	3	1	2	1
10	2	1	1	3	2	2
11	2	1	2	1	3	3
12	2	1	3	2	1	1
13	2	2	1	2	1	3
14	2	2	2	3	2	1
15	2	2	3	1	3	2
16	2	3	1	3	3	1
17	2	3	2	1	1	2
18	2	3	3	2	2	3

×

信号因子と誤差因子

誤差因子	信 号 因 子					
	M ₁	M ₂	M ₃	...	M ₂₇	M ₂₈
N ₁	101	102	103	...	127	128
N ₂	201	202	203	...	227	228

×部は、二つの実験を組み合わせることを示す。

表 2 に示す制御因子を直交表 L_{18} に割り付け、外側に信号因子 $M_1 \sim M_{28}$ と誤差因子 N_1, N_2 を割り付けて、 N_1, N_2 についてそれぞれ実験 (1 ~ 18) を行った。

2.7 寸法データと計算

寸法を特性値としてゼロ点比例式 $y = M$ より、動特性の SN 比 と比例定数 を求める。

(1) 材料硬度 N を誤差因子とする場合、

それぞれの実験 について

全 2 乗和

$$S_T = y_{101}^2 + \dots + y_{228}^2 \quad (\text{自由度 } f = 56)$$

線形式

$$L_1 = M_1 \times y_{101} + \dots + M_{28} \times y_{128}$$

$$L_2 = M_1 \times y_{201} + \dots + M_{28} \times y_{228}$$

有効除数

$$r = M_1^2 + \dots + M_{28}^2$$

回帰変動

$$S = (L_1 + L_2)^2 / (2 \times r) \quad (f = 1)$$

回帰項と誤差因子との交互作用の変動

$$S \times N = (L_1 - L_2)^2 / (2 \times r) \quad (f = 1)$$

誤差変動

$$S_e = S_T - S - S_{\times N} \quad (f = 56 - 1 - 1)$$

誤差分散

$$V_e = S_e / 54$$

調合誤差分散

$$V_N = (S_e + S_{\times N}) / (54 + 1)$$

SN 比

$$= 10 \times \log [\{ (S - V_e) / (2 \times r) \} / V_N] \quad (\text{db})$$

比例定数

$$= \{ (S - V_e) / (2 \times r) \}^{1/2}$$

(2) 材料硬度 N を標示因子とする場合の N_1 の例、

それぞれの実験 について

全 2 乗和

$$S_T = y_{101}^2 + \dots + y_{128}^2 \quad (f = 28)$$

線形式

$$L_1 = M_1 \times y_{101} + \dots + M_{28} \times y_{128}$$

有効除数

$$r = M_1^2 + \dots + M_{28}^2$$

回帰変動

$$S = (L_1)^2 / r \quad (f = 1)$$

誤差変動

$$S_e = S_T - S \quad (f = 28 - 1)$$

S に含まれている誤差分散

$$V_e = S_e / 27$$

SN 比

$$= 10 \times \log [\{ (S - V_e) / r \} / V_e] \quad (\text{db})$$

比例定数

$$= L_1 / r$$

2.8 表面粗さデータと計算

エンドミル側刃による切削面の切削方向の表面粗さプロファイルは、工具 1 回転当たりの送り量に一致した波形になる。そのため、1 刃当たりの送り量が大きいとき、基準長さ内に所定の山谷数が取れず、十点平均粗さ R_z が測定できない。そこで、表面粗さの評価パラメータは、算術平均粗さ R_a を用いた。

表面粗さ R_a を特性値として望小特性の SN 比を求める。

(1) 材料硬度 N を誤差因子とする場合、

それぞれの実験 について

全 2 乗和

$$S_T = y_{101}^2 + \dots + y_{228}^2 \quad (f = 56)$$

目標値 (ゼロ) からの誤差分散

$$V_T = S_T / 56$$

SN 比 (望小特性)

$$= -10 \times \log V_T \quad (\text{db})$$

(2) 材料硬度Nを標示因子とする場合のN1の例、

それぞれの実験 について

全2乗和

$$S_T = y_{101}^2 + \dots + y_{128}^2 \quad (f = 28)$$

目標値(ゼロ)からの誤差分散

$$V_T = S_T / 28$$

SN比(望小特性)

$$= -10 \times \log V_T \quad (\text{db})$$

3 実験結果及び考察

3.1 寸法を特性値とした場合

(1) 材料硬度Nを誤差因子とする場合

図2にSN比と比例定数の要因効果図を示す。

HRC60のときの実験 16は、焼き付けを起こしてしまい、切削を完了することができず、寸法測定ができなかった。そこで、欠測値の処理を逐次近似法⁴⁾を用いて行った。

図2のSN比において、有意差が比較的認められる制御因子としては、半径方向切込み量(D)と工具メーカー(E)が挙げられる。

(2) 材料硬度Nを標示因子とする場合

材料硬度の違いにより、切削性状に相違が認められる。そこで、材料硬度Nを標示因子として、N₁(HRC50)とN₂(HRC60)のそれぞれについて求めたSN比と比例定数の要因効果図を図3に示す。

図2において、工具メーカーの制御因子(E)は有意差が比較的認められた。しかし図3において、HRC60には有意差が認められるが、HRC50には有意差が認められない。このことは、高硬度材のなかでも比較的切削しやすいHRC50程度では、高硬度材切削用エンドミルであればメーカー等の選択は必要ないことを示しており、他方、HRC60程度以上のより難削性の高い高硬度材においては、工具メーカー選定も重要な問題になってくることを示している。また、HRC50の切削においては、比例定

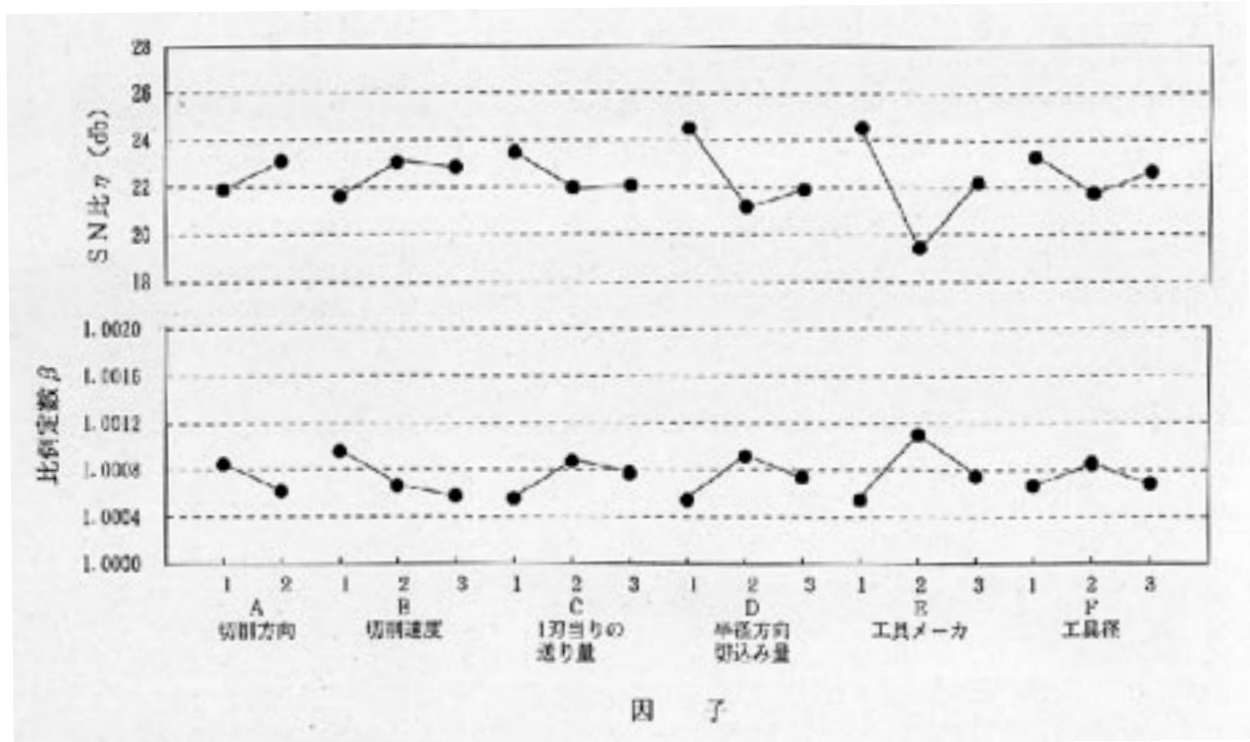


図2 材料硬度を誤差因子としたときの寸法についての要因効果図

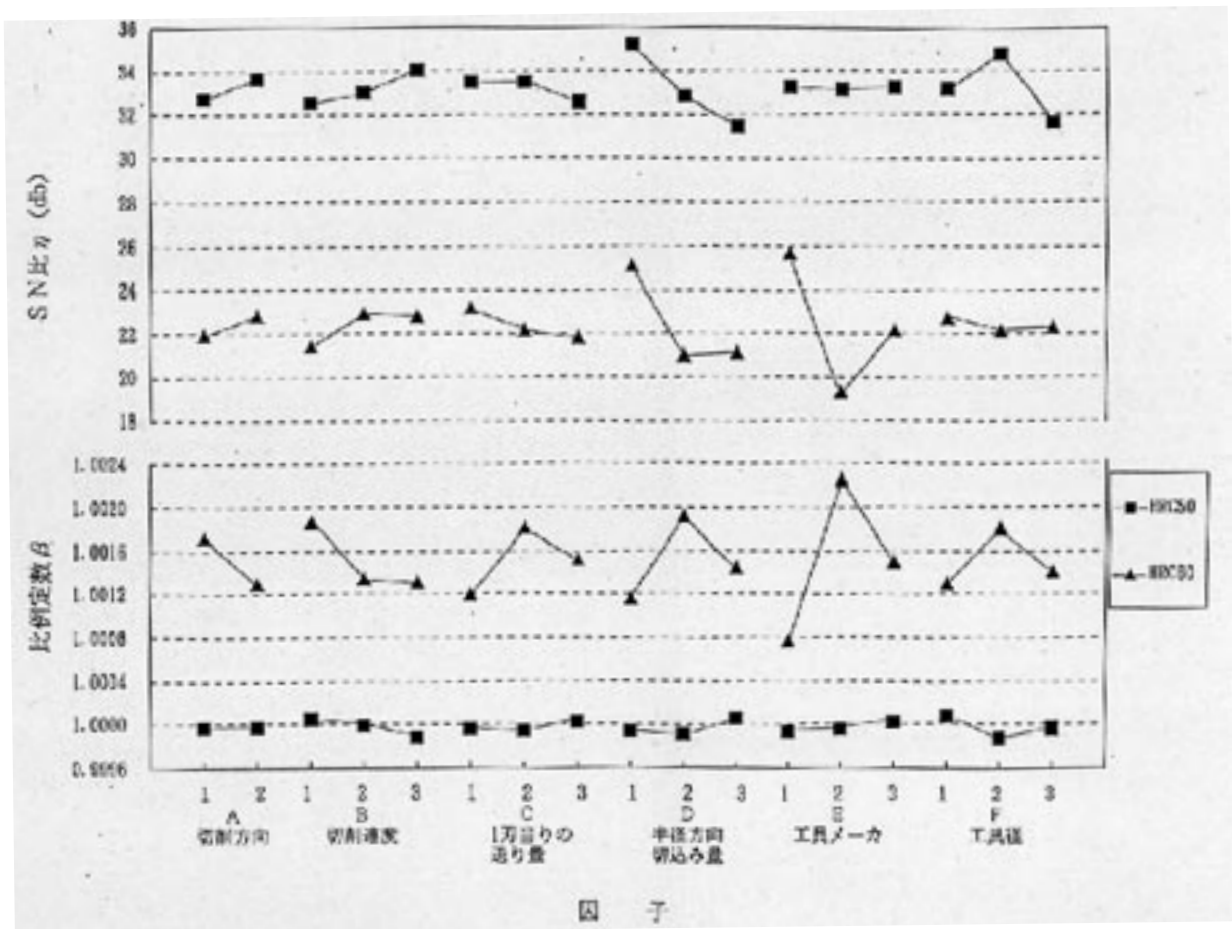


図3 材料硬度を標示因子としたときの寸法についての要因効果図

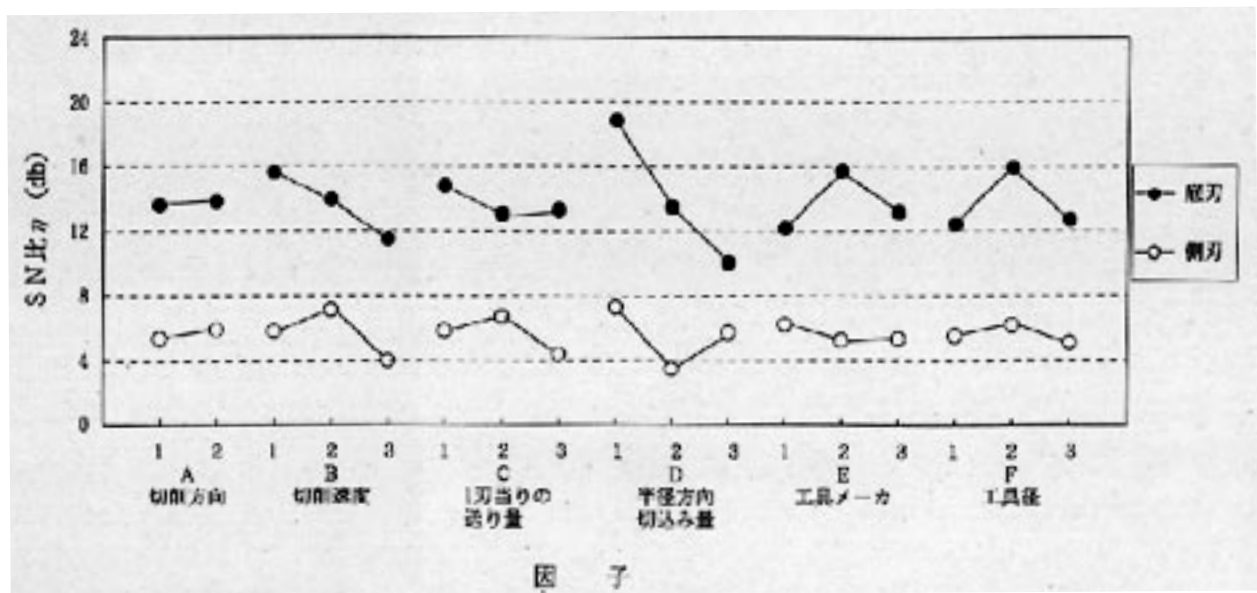


図4 材料硬度を誤差因子としたときの表面粗さについての要因効果図

数が1.0近傍であり、所定の切削寸法が得られていることを示している。

3.2 表面粗さを特性値とした場合

(1) 材料硬度Nを誤差因子とする場合

SN比の要因効果図を図4に示す。

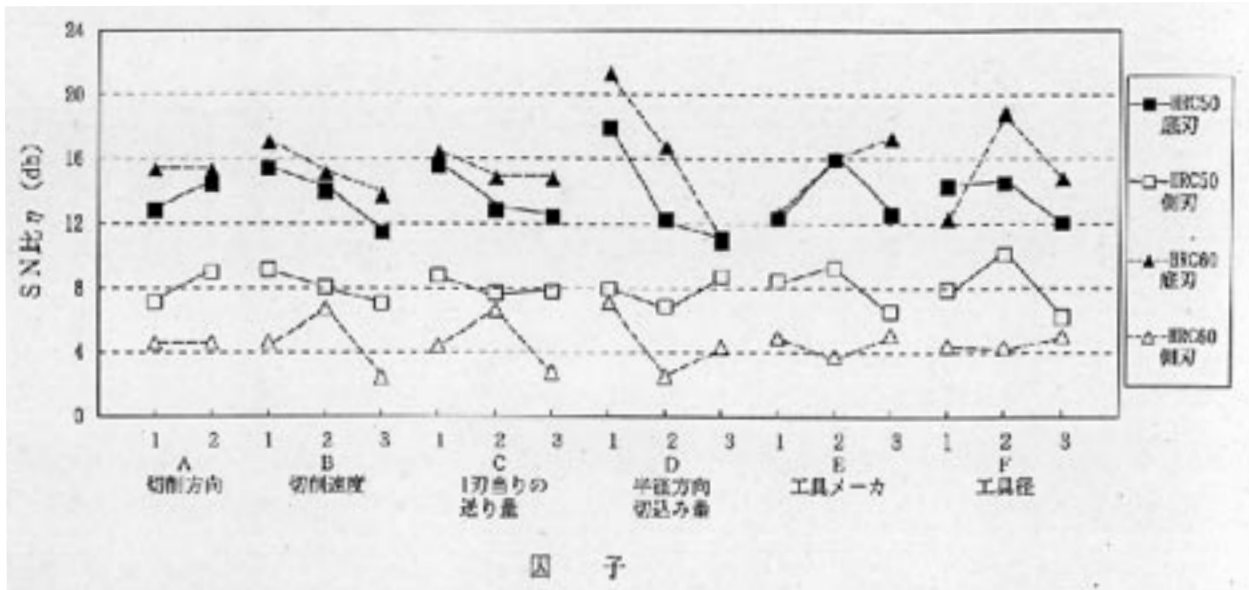


図5 材料硬度を標示因子としたときの表面粗さについての要因効果図

表6 確認実験の結果

材料硬度を誤差因子とした場合

		SN比 (db)		比例定数	
		推定値	確認実験	推定値	確認実験
初期条件	$A_2B_1C_2D_2E_1F_2$	21.88	24.76	1.0010	1.0005
最適条件	$A_2B_3(B_2)C_1D_1E_1F_1$	29.60	31.03	0.9998	1.0001
利 得		7.72	6.27	-	-

材料硬度を標示因子とした場合

		SN比 (db)		比例定数	
		推定値	確認実験	推定値	確認実験
初期条件	(HRC50) $A_2B_1C_2D_2E_1F_2$	34.54	33.24	0.9998	1.0000
	(HRC60) $A_2B_1C_2D_2E_1F_2$	23.27	23.88	1.0019	1.0009
最適条件	(HRC50) $A_2B_3C_2(C_1)D_1E_1F_2$	38.56	36.40	0.9997	0.9998
	(HRC60) $A_2B_3(B_2)C_1D_1E_1F_1$	30.45	31.78	0.9995	1.0004
利 得	(HRC50)	4.02	3.16	-	-
	(HRC60)	7.18	7.90	-	-

()書きは、最適データ。SN比の差が小さいので、切削効率の高い設定とした。

すべての試料の表面粗さRaは、旧JISによる表現で (Ra 1.6 μm以下) 又は、

(Ra 0.2 μm以下)であり、切削による仕上げ面としては、悪くない値である。

エンドミルの側刃と底刃では、表面粗さ性状が異なっており、底刃による切削の方が側刃による切削よりも良好な表面粗さになっている。底刃による切削では、切削速度を遅くし、半径方向切込

みを小さくすると、表面粗さが良くなる。しかし、側刃による切削では、そのようにはならない。

(2) 材料硬度Nを標示因子とする場合

SN比の要因効果図を図5に示す。

材料硬度の違いによる、表面粗さの顕著な相違は認められない。

3.3 確認実験

寸法を特性値とした場合の初期条件($A_2 B_1 C_2 D_2 E_1 F_2$)と最適条件について確認実験を行った。

表6に確認実験の結果を示す。最適条件は、材料硬度を誤差因子とした場合と標示因子とした場合の推定値を求めた。

まず、材料硬度を誤差因子としたときの最適条件($A_2 B_3 C_1 D_1 E_1 F_1$)でHRC50とHRC60を切削した。ただし、制御因子B(切削速度)は、SN比に差が少ないため切削能率の高い第3水準に設定した。

次に、材料硬度を標示因子としたときのHRC50の最適条件($A_2 B_3 C_2 D_1 E_1 F_2$)で切削した。ただし、制御因子C(1刃当りの送り量)は、SN比に差が少ないため切削能率の高い第2水準に設

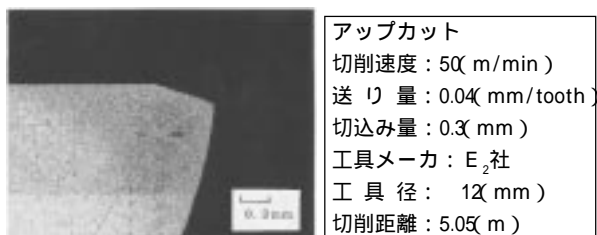
定した。なお、HRC60の最適条件は、材料硬度を誤差因子としたときと同じになった。

表6から、推定値と確認実験の利得は、ほぼ一致する。材料硬度を誤差因子とした場合の確認実験の利得6.3dbは、最適条件で加工すると初期条件に比べ、ばらつきが標準偏差で1/2.1に減少することを意味している。

3.4 工具摩耗の観察

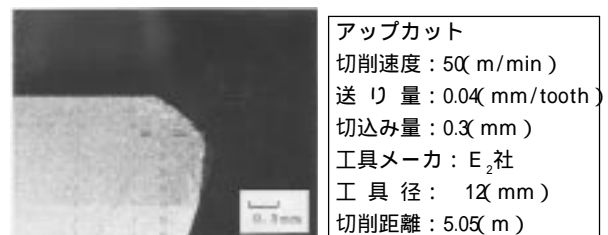
切削後の底刃の形状写真を写真1、写真2に示す。

写真1(材料硬度HRC50)では、切削後もそれほど刃先が摩滅していないことが分かる(ただし、刃先形状は、工具メーカーにより異なっている)。それに対し、写真2(材料硬度HRC60)においては、



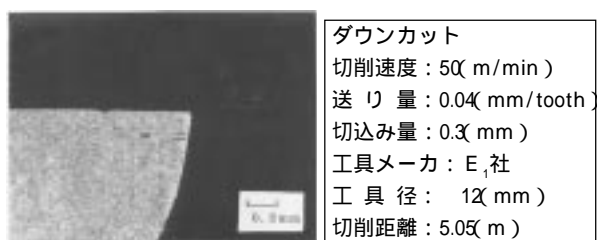
直交表実験No. 2

アップカット
 切削速度：50(m/min)
 送り量：0.04(mm/tooth)
 切込み量：0.3(mm)
 工具メーカー：E₂社
 工具径：12(mm)
 切削距離：5.05(m)



直交表実験No. 2

アップカット
 切削速度：50(m/min)
 送り量：0.04(mm/tooth)
 切込み量：0.3(mm)
 工具メーカー：E₂社
 工具径：12(mm)
 切削距離：5.05(m)



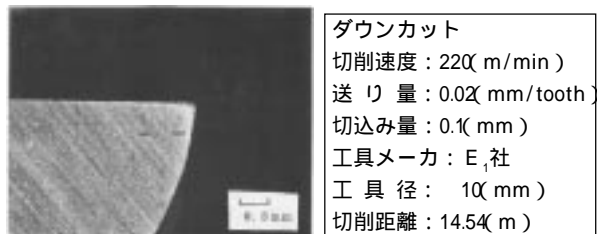
確認実験(初期条件)

ダウンカット
 切削速度：50(m/min)
 送り量：0.04(mm/tooth)
 切込み量：0.3(mm)
 工具メーカー：E₁社
 工具径：12(mm)
 切削距離：5.05(m)



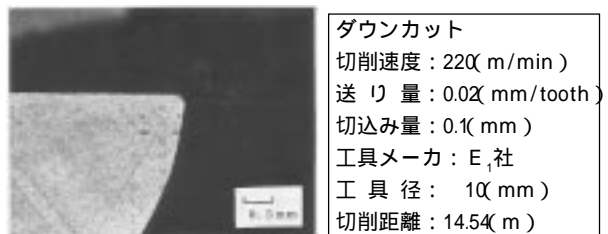
確認実験(初期条件)

ダウンカット
 切削速度：50(m/min)
 送り量：0.04(mm/tooth)
 切込み量：0.3(mm)
 工具メーカー：E₁社
 工具径：12(mm)
 切削距離：5.05(m)



確認実験(最適条件)

ダウンカット
 切削速度：220(m/min)
 送り量：0.02(mm/tooth)
 切込み量：0.1(mm)
 工具メーカー：E₁社
 工具径：10(mm)
 切削距離：14.54(m)



確認実験(最適条件)

ダウンカット
 切削速度：220(m/min)
 送り量：0.02(mm/tooth)
 切込み量：0.1(mm)
 工具メーカー：E₁社
 工具径：10(mm)
 切削距離：14.54(m)

写真1 切削後の底刃 SKD61 (HRC50)

写真2 切削後の底刃 SKD11 (HRC60)

実験 2 のかなり激しい摩滅に比べ、初期条件では摩滅が減り、最適条件では、さらに摩滅が減っていることが分かる。

このように、材料硬度HRC50の被削材では、切削条件に関わらず、さほど刃先の摩滅が進行しないのに対し、材料硬度HRC60の被削材では、切削条件により、刃先の摩滅の進行状態に大きな違いが有ることが分かる。

4 結 言

高硬度材の切削加工について、品質工学の手法を取り入れた実験を行った。

その結果、寸法を特性値とした場合、ダウンカットで切削速度を速く、1刃当たりの送り量を小さく、半径方向切込み量を小さく設定して切削すれば、ばらつきの少ない切削ができることが分かった。これらの条件に、経済的な要因を考慮しながら実際の切削条件を決定する必要がある。また、材料硬度による違いが認められ、HRC60の硬度になると、工具メーカーの違いによる有意差が認められた。

表面粗さを特性値とした場合は、エンドミルの側刃と底刃による切削性状の違いが見られ、底刃による切削では、切削速度を遅くし、半径方向切込み量を小さくするほど表面粗さは良くなった。しかしこの条件は、切削能率がより悪くなる方向であり、実際の切削加工においては、経済的効果

と要求される表面粗さ性状とを考慮して切削条件を設定する必要がある。

材料硬度を誤差因子とした場合の最適条件について確認実験を行ったところ、利得が初期条件に対して6.3db向上した。このことは、ばらつきが約半分に減少し、目標値が指示値に、より近づきやすくなることを示している。

(謝辞)

本研究を行うに当たり、御指導いただきました京都府技術アドバイザー廣瀬省三氏に深く感謝申し上げます。

<参考文献>

- 1) 上原忍ほか：高硬度材の切削加工に関する研究、本誌、25(1997)P.51
- 2) 上野憲三ほか：機能性評価による機械設計、日本規格協会、(1995)P.187
- 3) 矢野宏ほか：加工品質工学、工業調査会、(1994)
- 4) 田口玄一、横山巽子ほか：品質工学講座4(品質設計のための実験計画法)、日本規格協会、(1998)P.258
- 5) 和合健ほか：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、岩手県工業技術センター研究報告、第4号(1997)P.13