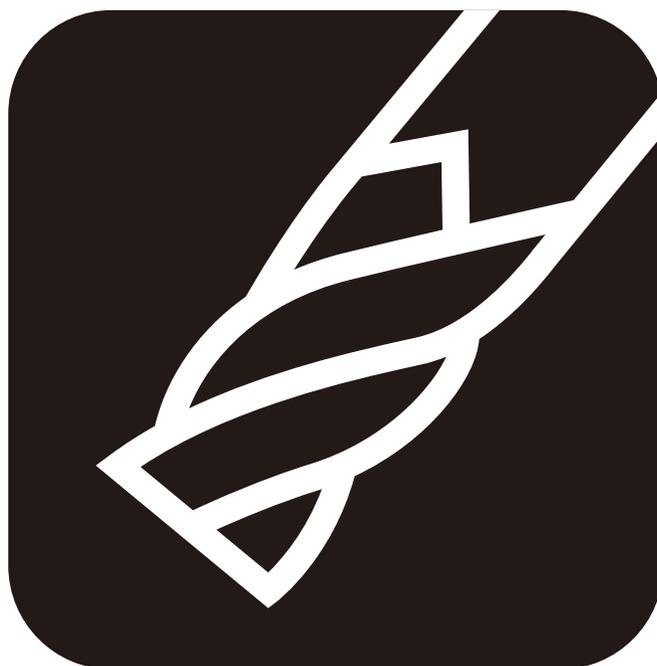


TECHNICAL
DATA

エンドミル加工



オーエスジー株式会社



はじめに

切削加工とは、「刃物を加工物に当てて動かし、その内部に局部的に発生する大きな応力で破断を起こさせることによって、不要な部分を切りくずとして分離し、所望の形状の新表面を持った製品を作ること」と切削加工論では定義がされています。

しかし、こうした切削加工は10万年も前の石器時代からすでに行われてきたと言われていています。火を使うことと同様に、石や貝殻で作った刃物で物を削るという行動は、人類の進化に大きな影響を及ぼしたと言えるでしょう。

その後、鉄の発見や産業革命などを経て、現在の切削加工が誕生するに至っています。なかでもエンドミルの誕生は、切削加工の可能性を大きく広げ、ものづくりの発展に大きな貢献をしてきたと言えます。

近年では、高速回転主軸を持った加工機や制御機能ならびにソフトウェアの開発をはじめ、加工物の保持や工具の保持に至るまでエンドミル加工を取り巻く技術が急速に進歩しており、エンドミル加工の守備範囲はますます広がっています。

ここでは、こうしたエンドミルならびにエンドミルでの切削加工技術、加工事例、エンドミルの再研削などについて紹介します。

なお、執筆にあたりましては、当社での基礎実験結果による判断のみでなく、その分野の文献を参考にさせていただき、なるべく正確な紹介をするよう心がけましたが、一部に筆者の推測や思い込みがあることは否めません。こうした部分につきましては、今後明らかにしながら改訂をしていく所存でございますので、寛大なご理解をいただきますようお願いいたします。

また、使用する用語につきましては、加工現場で慣用的に使われる用語も用いており、必ずしもJIS用語とは合致していないことを、ご了承くださいますようお願いいたします。

今泉英明

目 次

1. エンドミルの基礎	2	3. 各種被削材の切削特性	44
1.1 エンドミルとは	2	3.1 各種被削材の被削性	44
1.2 エンドミル各部の名称	2	3.2 各種被削材のエンドミル加工	45
1.3 エンドミルの種類	3	(1) 鋼 (炭素鋼、焼入れ鋼など)	45
(1) 各種エンドミル	3	(2) 鋳鉄	46
(2) 構造による分類	3	(3) ステンレス鋼	46
(3) 刃数	3	(4) チタン合金	46
(4) 底刃形状	4	(5) インコネル	47
(5) 外周刃形状	4	(6) グラファイト	47
(6) シャンクの種類	4	(7) 銅および銅合金	47
(7) スローアウェイチップの種類	6	(8) アルミニウム、アルミニウム合金	48
1.4 エンドミル刃部の材質	8	(9) マグネシウム合金	48
(1) 高速度工具鋼 (HSS)	8	(10) G-FRP (ガラス繊維強化プラスチック)	48
(2) 超硬合金	8	4. エンドミル加工の関連技術	49
(3) サーメット	9	(1) 関連加工技術	49
(4) セラミックス	9	(2) 保持具 (ツーリングシステム)	50
(5) ダイヤモンド	10	5. エンドミルの再研削	52
(6) cBN (立方晶窒化ホウ素)	10	5.1 再研削方法	52
1.5 エンドミルの表面処理	11	(1) 再研削の時期	52
2. エンドミルによる切削加工	13	(2) 再研削部位	52
2.1 切削機構	13	(3) 外周逃げ面の再研削	52
(1) エンドミル切削の特徴	13	(4) すくい面の再研削	55
(2) 切削抵抗	13	(5) 底刃の再研削	55
(3) 切削による発熱	14	(6) 研削バリの除去方法	55
(4) 切りくず	14	5.2 砥石と研削条件	55
(5) 工具摩耗	16	5.3 再研削の限界	56
(6) 加工変質層と残留応力	17	(1) チップポケット	56
2.2 加工形態	18	(2) 外周すくい角	56
2.3 切削条件	18	(3) 研削量	57
(1) 切削速度	18	(4) ラフィングエンドミルの再研削	57
(2) 送り速度	25	(5) 再研削後の性能	57
(3) 切込深さ	27	6. トラブル対策	58
(4) ピックフィード	30	6.1 トラブルとその対策事例	58
(5) 切削方向	31	(1) 振れに起因するトラブル	58
(6) 切削油剤	34	(2) 突出し長さに起因するトラブル	59
2.4 エンドミルの各部要素と切削特性	35	(3) ねじれ角に起因するトラブル	60
(1) ねじれ刃と切削特性	35	(4) 刃数に起因するトラブル	60
(2) 刃数と切削特性	38	(5) 切削油剤に起因するトラブル	61
(3) 外周刃形状と切削特性	39	(6) 保持具に起因するトラブル	61
(4) 刃長 (L/D) の影響	41	6.2 トラブルシューティング	62
(5) 底刃形状と切削特性	43		
		加工データ	64
		用語解説	92
		参考資料	94
		参考文献	100

1. エンドミルの基礎

1.1 エンドミルとは

フライス盤のことを、英語でmilling machine (ミリングマシン) と言いますが、milling machine (ミリングマシン) に取り付けて使う工具をmill (ミル) と言います。エンドミルは図1.1.1のような形をしており、その外周と端面、つまりend (エンド) にも刃があります。そこで、end (エンド) にも刃があるmill (ミル) より、end mill (エンドミル) とされるようになりました。

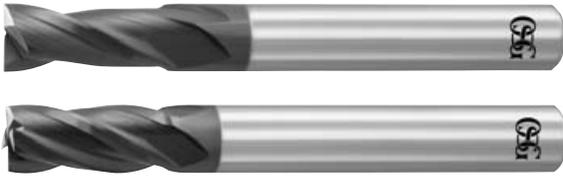


図 1.1.1 エンドミル

エンドミルは、一本の工具で外周削り、肩削り、溝削りをはじめ、曲面削り、穴加工も可能な多機能工具と言えます。(図1.1.2)

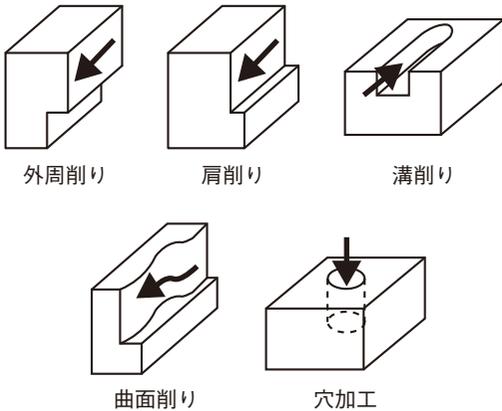


図 1.1.2 エンドミルによる切削加工

1.2 エンドミル各部の名称

エンドミルの各部の名称を図1.2.1、図1.2.2に示します。しかし、慣習として第1逃げ角のことを2番角、第2逃げ角を3番角 (底刃2番角、底刃3番角、外周2番角、外周3番角) と呼んだり、すくい面を刃裏 (はうら) と表現することもあります。

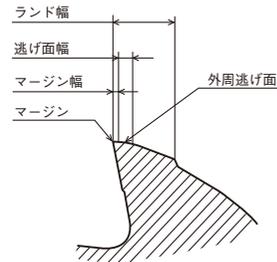
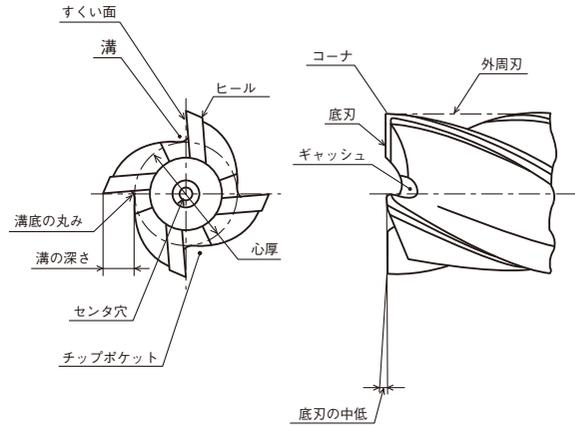
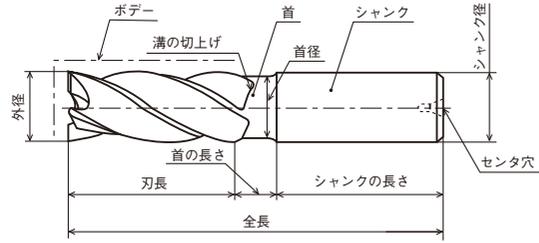


図 1.2.1 各部の名称 (JIS B 0172-1993 抜粋)

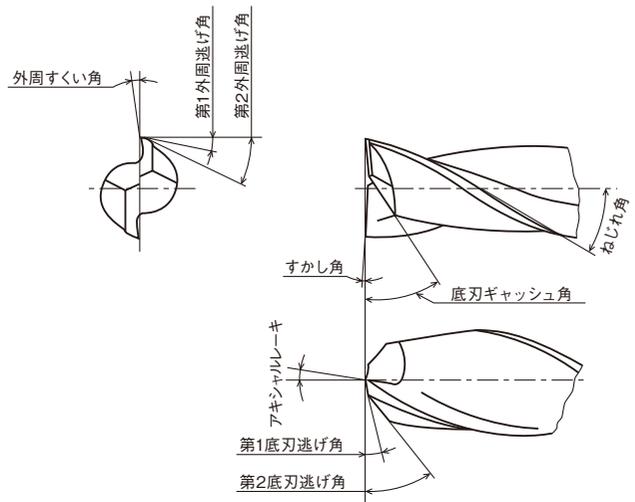


図 1.2.2 エンドミルの角 (JIS B 0172-1993 抜粋)

1.3 エンドミルの種類

(1) 各種エンドミル

エンドミルは、その用途に合わせたさまざまな形状、仕様があります。図1.3.1にその代表的な例を示します。



図 1.3.1 各種エンドミル

(2) 構造による分類

エンドミルは、刃部もシャンク部も一体構造となったソリッドタイプ、刃部材質が本体にろう付けされたろう付けタイプ、刃先交換式のスローアウェイタイプ（インデキサブルタイプ）に大別されます。

図1.3.2に構造による分類の代表例を示します。HSSエンドミルの大径のものでは、シャンク部と刃部を別々の材質とし、摩擦溶接による接合で一体構造としたものもあります。

なお、ろう付けされた刃部材質の部分をチップ、そしてスローアウェイ式刃部の部分をスローアウェイチップ（インデキサブル インサート）と言います。

ソリッドタイプ



ろう付けタイプ



スローアウェイタイプ



図 1.3.2 構造による分類

(3) 刃数

エンドミルの刃数は、1、2、3、4、5、6、7、8・・・とありますが、図1.3.3のように、刃数が多くなると切りくずを収容できる空間が小さくなります。刃数の少ないほうが、切りくずを収容する空間を、大きくすることができます。

この切りくずを収納する空間を、チップポケット（チップルーム）と言います。

チップポケットを大きくすると、切りくずの収容能力が増大し、大きな切込みが可能になりますが、反面、工具断面積は小さくなり、工具剛性は低下してしまいます。

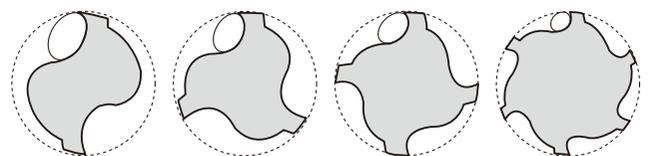


図 1.3.3 エンドミルの刃数

(4) 底刃形状

底刃の形状の基本的なものを図1.3.4に示します。また、スクエアタイプやラジアスタイプなどでは、センタ穴が付いたものもあります。センタ穴が付いていると、再研磨を行う場合に精度の良い再研磨ができるという利点がありますが、垂直方向への突っ込み加工はできなくなります。センタ穴の有無の事例を図1.3.5に示します。

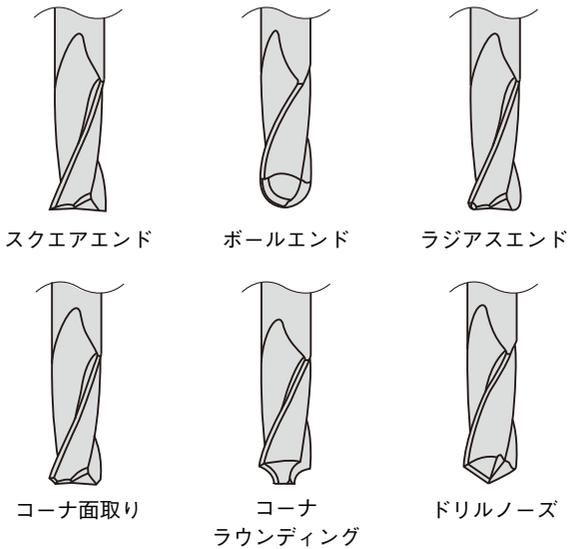


図 1.3.4 底刃の形状

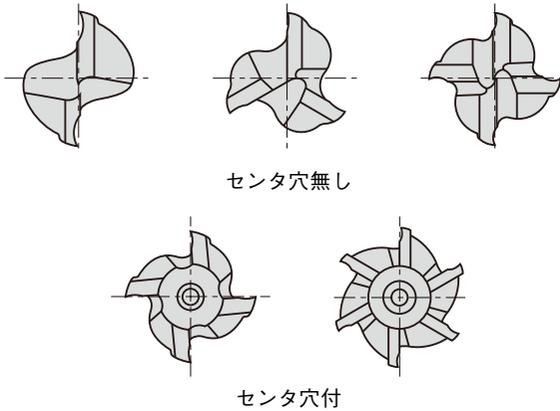


図 1.3.5 センタ穴の有無

(5) 外周刃形状

外周刃形状の代表的なものを図1.3.6に示します。

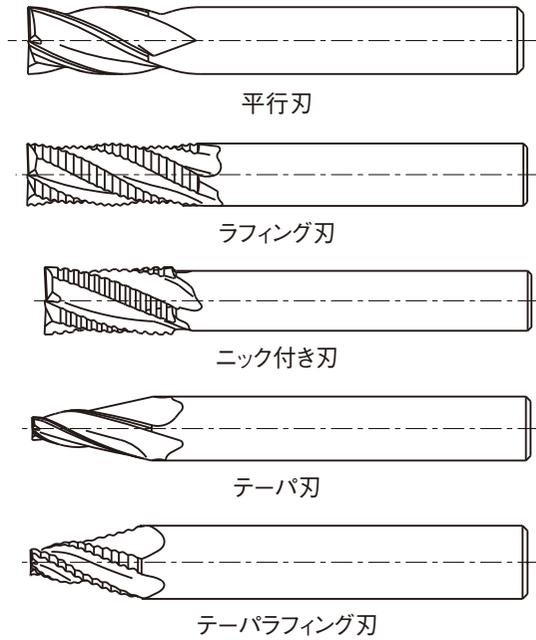


図 1.3.6 外周刃形状

(6) シャンクの種類

表1に代表的なシャンク形状を示します。最も一般的に採用されているのは、ストレートシャンクですが、大きな負荷や振動が発生する場合は、機械に直接取り付けるナショナルテーパシャンクやボトルグリップテーパシャンクなどが用いられることもあります。(図1.3.7)

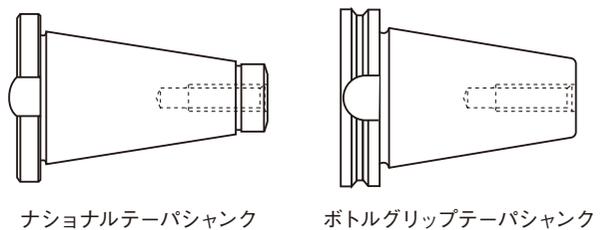


図 1.3.7 7/24 直付けテーパシャンク

表1 シャンク形状とチャッキング方式

エンドミルシャンク		ロ ッ ク 方 式	特 徴
形 状	形 状 図		
ス ト レ ー ト シ ヤ ン ク		ロール ロック	精度優秀
		ダブル コレット	締付力 大 剛 性 大
		シングル コレット	シンプルで 故障が少ない。
		引ねじ	締付力 大
		シングル サイド ロック	取り付け、取りはず しが簡単で確実に ロックできる。
		ダブル サイド ロック	取り付け、取りはず しが簡単で確実に ロックできる。
		ポジティブ ロック	取り付け、取りはず しが簡単で確実に ロックできる。
		コンビ ネーション ロック	取り付け、取りはず しが簡単で確実に ロックできる。
テ ー パ シ ヤ ン ク	プレエンド 		取り扱いが、簡単
	引ねじ付 		締付力 大
	タング付 		取り付け、取りはず しが簡単
	中間ねじ付 		締付力 大

(7) スローアウェイチップの種類

スローアウェイチップ (インデキサブル インサート) には、多くの種類があります。

表2 スローアウェイチップの呼び方 (JIS B 4120-1998 ISO1832/AM1:1998 準拠)

(例) C	N	M	G																																								
(例) A	P	H	W																																								
形状	逃げ角	公差 (mm)	チップブレーカ・穴形状																																								
		 等級記号 (単位: mm) <table border="1"> <thead> <tr> <th>記号 (級)</th> <th>d の許容差</th> <th>m の許容差</th> <th>s の許容差</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>A 注(a)</td> <td>±0.025</td> <td rowspan="2">±0.005</td> <td rowspan="4">±0.025</td> </tr> <tr> <td>F 注(a)</td> <td>±0.013</td> </tr> <tr> <td>C 注(a)</td> <td>±0.025</td> <td rowspan="2">±0.013</td> </tr> <tr> <td>H</td> <td>±0.013</td> </tr> <tr> <td>E</td> <td>±0.025</td> <td>±0.025</td> <td rowspan="2">±0.13</td> </tr> <tr> <td>G</td> <td>±0.025</td> <td>±0.025</td> </tr> <tr> <td>J 注(a)</td> <td rowspan="3">±0.05~±0.15 注(b)</td> <td>±0.005</td> <td rowspan="3">±0.025</td> </tr> <tr> <td>K 注(a)</td> <td>±0.013</td> </tr> <tr> <td>L 注(a)</td> <td>±0.025</td> </tr> <tr> <td>M</td> <td rowspan="2">±0.08~±0.2 注(b)</td> <td>±0.13</td> <td rowspan="2">±0.13</td> </tr> <tr> <td>N</td> <td>±0.025</td> </tr> <tr> <td>U</td> <td>±0.08~±0.25 注(b)</td> <td>±0.13~±0.38 注(b)</td> <td>±0.13</td> </tr> </tbody> </table> 注(a) 主としてさらい刃付きチップに適用する。 注(b) 許容差の範囲は基準内接円直径によって異なる。	記号 (級)	d の許容差	m の許容差	s の許容差	A 注(a)	±0.025	±0.005	±0.025	F 注(a)	±0.013	C 注(a)	±0.025	±0.013	H	±0.013	E	±0.025	±0.025	±0.13	G	±0.025	±0.025	J 注(a)	±0.05~±0.15 注(b)	±0.005	±0.025	K 注(a)	±0.013	L 注(a)	±0.025	M	±0.08~±0.2 注(b)	±0.13	±0.13	N	±0.025	U	±0.08~±0.25 注(b)	±0.13~±0.38 注(b)	±0.13	
記号 (級)	d の許容差	m の許容差	s の許容差																																								
A 注(a)	±0.025	±0.005	±0.025																																								
F 注(a)	±0.013																																										
C 注(a)	±0.025	±0.013																																									
H	±0.013																																										
E	±0.025	±0.025	±0.13																																								
G	±0.025	±0.025																																									
J 注(a)	±0.05~±0.15 注(b)	±0.005	±0.025																																								
K 注(a)		±0.013																																									
L 注(a)		±0.025																																									
M	±0.08~±0.2 注(b)	±0.13	±0.13																																								
N		±0.025																																									
U	±0.08~±0.25 注(b)	±0.13~±0.38 注(b)	±0.13																																								

ISOでは、その形状、仕様によって分類をし、呼び記号の付け方を規定しています（JISでも同様の分類をしています）。

表2にスローアウェイチップの呼び記号の付け方を示します。

12	04	08		
20	04	60	T	R
切れ刃の長さ(mm)	厚さ(mm)	コーナ記号	主切れ刃記号	勝手
		02 R = 0.2 04 R = 0.4 08 R = 0.8 12 R = 1.2 16 R = 1.6 24 R = 2.4		
	02 T = 2.38 03 T = 3.18 T3 T = 3.97 04 T = 4.76 05 T = 5.56 06 T = 6.35 07 T = 7.94 09 T = 9.52	チップ円直径が、インチ系の場合には00(ゼロゼロ)を適用する。 メートル系の場合にはM0(エムゼロ)を適用する。		
		①切込み角 A=45° D=60° E=75° F=85° P=90° Z=その他の角度		
		②さらい刃逃げ角 A=3° B=5° C=7° D=15° E=20° F=25° G=30° N=0° P=11° Z=その他の角度		



チップブレーカ無し

チップブレーカ有り

図 1.3.8
チップブレーカの有無と
切りくず形状

1.4 エンドミル刃部の材質

エンドミル刃部材料に望まれる特性としては、耐摩耗性、耐熱性、耐欠損性（じん性）、耐塑性変形性、化学的安定性、熱伝導性などが挙げられます。しかし、これらの特性の中には、相反する性質もあり、すべてを満足し得るような理想の材料は残念ながらありません。

図1.4.1に、各エンドミル刃部材料の特性を表す概念図を示します。

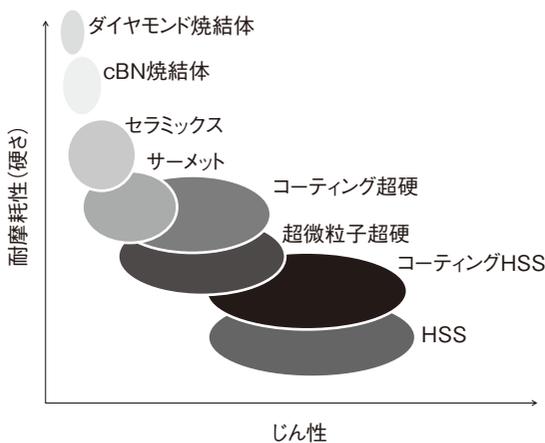


図 1.4.1 各種エンドミル材料の特性

(1) 高速度工具鋼 (HSS)

高速度工具鋼の歴史は古く、1898年にアメリカのF.W.テラーにより開発されました。高速による発熱下でも切削が可能であることから、High Speed Steelと呼ばれます。日本語でも高速度工具鋼 (HSS) と言います。

高速度工具鋼はタングステン(W)、モリブデン(Mo)、クロム(Cr)、バナジウム(V)、コバルト(Co)を含んだ合金鋼ですが(表3)、これらの元素を添加することによって一般に、次のような効果が得られます。

- C : 他の元素と結合し炭化物を生成し、焼入れ性を改善する。
- W : 硬い複炭化物を生成し、耐摩耗性を向上させる。
- Mo : 硬い炭化物の微細化を促進し、じん性を改善する。
- Cr : Wの溶解度を増して組織を安定化させる。

V : 硬い複炭化物を生成し耐摩耗性を向上する。

Co: 高温硬さを向上する。

また、製造過程に粉末冶金法を取り入れることで、炭化物の微細化、均一化を図るとともに、高合金化を実現した粉末HSSもあります。

高速度工具鋼 (HSS) は、一般に1,200℃前後で焼入れを、550℃前後で焼戻しを行うことで64～69HRC程度の硬さを得ることができます。

高合金化された粉末HSSでは、硬さ70HRCを実現するものもあります。

表 3 エンドミル用高速度工具鋼 (HSS)

鋼種	化学成分 (%)					
	C	W	Mo	Cr	V	Co
SKH55	0.8	6.0	5.0	4.0	2.0	5.0
SKH56	0.8	6.0	5.0	4.0	2.0	8.0
SKH57	1.2	10.0	3.5	4.0	3.4	10.0
SKH59	1.1	1.5	9.5	3.8	1.2	8.0
SKH10	1.5	12.3	—	4.0	5.0	5.0

(2) 超硬合金

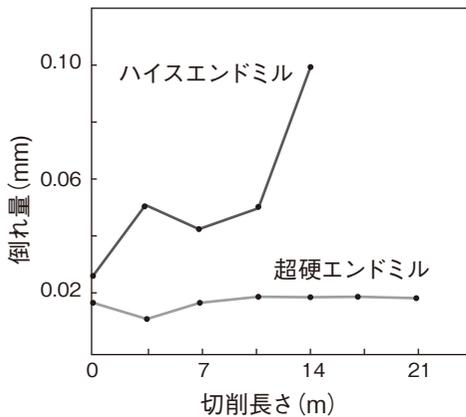
タングステン(W)と炭素(C)からなる化合物(炭化タングステン)(WC)の粒を、結合材(バインダー)にコバルト(Co)を使用して焼き固めたものを、超硬合金と言います。その字のごとく非常に硬く耐摩耗性に優れています。炭化タングステンの粒径やコバルトの含有量により、超硬合金の硬さやじん性などの特性が変わってきます。また、耐クレータ摩耗性を向上させるためなどの目的で、微量の炭化チタン(TiC)や炭化タンタル(TaC)を加えたものもあります。

炭化タングステンの粒径を微細化したものを超微粒子超硬合金と呼んで区別することがあります。さらに、その中で概ね粒径が0.5μm以下のものを「超」を重ね超超微粒子超硬合金と呼ぶこともあります。

超硬合金は高速度工具鋼と比べると、たわみに対して3倍程度の強度があります。したがって、切削加工

中の工具のたわみが生じ難く、極小径ソリッドエンドミルにも多く用いられるようになりました。図1.4.2に超硬エンドミルとHSSエンドミルで側面切削を行った際の加工精度を比較した試験結果を示します。

なお、JISでは超硬合金やサーメットの使用分類(切削用超硬質工具材料の分類)をISOに準じて規定しています。表4にこの規格の抜粋を示します。



被削材質: NAK80 (40HRC)
 エンドミル: φ10 (4枚刃)
 切削速度: 30m/min (955min⁻¹)
 送り: 0.05mm/t (191mm/min)
 切削の向き: アップカット
 切込深さ: a_p=15mm a_e=1mm
 突出し長さ: 35mm
 切削油剤: 不水溶性切削油剤
 機 械: 立形NCフライス盤

図 1.4.2 超硬エンドミルとHSSエンドミルによる加工精度

表 4 切削用超硬質工具材料の分類 (JIS B 4053-1998 抜粋)

大分類	被削材質の大分類	使用分類記号	切削速度	送り量	耐摩耗性	じん性
P	連続形 切りくずの出る 鉄系金属	P01	↑ 高速	↓ 高送り	↑ 高い	↓ 高い
		P10				
		P20				
		P30				
		P40				
		P50				
M	連続形、非連続形 切りくずの出る 鉄系金属又は 非鉄系金属	M10	↑ 高速	↓ 高送り	↑ 高い	↓ 高い
		M20				
		M30				
		M40				
K	非連続形 切りくずの出る 鉄系金属又は 非金属	K01	↑ 高速	↓ 高送り	↑ 高い	↓ 高い
		K10				
		K20				
		K30				
		K40				

(3) サーメット

炭化チタニウム (TiC) や、窒化チタニウム (TiN) をニッケル (Ni) やコバルト (Co) あるいはモリブデン (Mo) で結合したものがサーメットと呼ばれます。

つまり、セラミックスと金属の複合材料ということになります。

サーメットは、cermet = ceramics + metalの造語でセラミックスのように硬く、メタル (金属) のように強いという意味から名付けられたものです。

サーメットは鉄系材料との親和性が低く、切削工具刃部材料として用いると、光沢のある良好な仕上げ面が得られやすいといった性質を有するため、鋼 (硬さ45HRC程度以下) の仕上げ加工に用いられます。

(4) セラミックス

セラミックス (Ceramics) とは、瀬戸物に代表されるような陶磁器全般を指す言葉で、瓦やガラスもセラミックスです。そもそもセラミックスの語源は、「粘土を焼き固めたもの」の意味のギリシャ語「keramos」だと言われています。

近年では、シリコンのような半導体や、炭化物、窒化物、ホウ化物などの無機質の非金属化合物を総称してセラミックスと呼ぶようになりました。なかでも、工業用などに用いられる化学組成や組織を制御して製造されたものをファインセラミックスと呼ぶこともあります。

一般にセラミックスは、金属より軽く、プラスチックより重い、金属に比べ熱に強い、硬いなどの優れた性質を持っていますが、反面脆く衝撃に弱いといった短所もあります。

切削工具としては、アルミナ (Al₂O₃) や窒化ケイ素 (Si₃N₄) が旋削用や正面フライスのスローアウェイチップとして用いられることがありますが、エンドミルでは直接的に刃部材料 (母材) として用いられることはほとんどなく、コーティングの被膜材料として用いられます。

表面に数 μm の厚さでセラミックス被膜をコーティングする方法は、刃部材料(母材)のじん性を低下さ

せることなく、耐摩耗性や耐熱性、耐酸化性を向上できるといった大きな特長があります。(表5)

表5 主なセラミックス(炭化物ならびに窒化物)の性質

分類	組成	結晶構造	マイクロ硬さ (kgf/mm ²)	比重	融点 (°C)	熱伝導率 (cal/cm sec.°C)	熱膨張係数 (10 ⁻⁶ /°C)
炭 化 物	B ₄ C	斜方六方晶	4,900 ~ 5,000	2.5	2,350	0.07 ~ 0.2	4.5
	SiC	六方晶	3,000 ~ 3,340	3.2	2,830	0.1	4.3 ~ 4.5
	TiC	面心立方晶	2,980 ~ 3,800	4.9	3,180	0.041	7.61
	VC	〃	2,800	5.7	2,830	0.093	6.5
	HfC	〃	2,700	12.7	3,890	0.049	6.73
	ZrC	〃	2,600	6.5	3,530	0.049	6.93
	NbC	〃	2,400	7.8	3,480	0.034	6.84
	WC	六方晶	2,000 ~ 2,400	15.8	2,730	0.108	6.2
	TaC	面心立方晶	1,800	14.5	3,780	0.053	6.61
	Mo ₂ C	六方晶	1,800	9.2	2,400	0.053	6.0
	Cv ₃ C ₂	斜方晶	1,300	6.7	1,890	0.045	10.3
窒 化 物	TiN	面心立方晶	2,400	5.4	2,930	0.069	9.4
	VN	〃	1,500	6.1	2,050	0.027	8.1
	HfN	〃	2,000	14.0	2,700	0.027	6.9
	ZrN	〃	1,900	7.3	2,980	0.026	6.0
	NbN	〃	1,400	8.4	2,300	0.009	10.1
	TaN	六方晶	1,300	14.1	3,090	0.023	3.6

(5) ダイヤモンド

ダイヤモンドは、地球上の物質の中で最も硬く、熱伝導性に優れ、化学的にも安定であり、さらに透光性にも優れています。このような優れた特性を兼ね備えるダイヤモンドは装飾品以外にも、さまざまな用途に利用されています。(ちなみに、ダイヤモンドは、4月の誕生石でもあり、石言葉は「永遠の絆・純潔」です。)

切削工具に用いられるものは、単結晶からなるダイヤモンドと、粉末状ダイヤモンドを焼き固めたダイヤモンド焼結体(多結晶)とがあります。

ダイヤモンドの単結晶は、極めて鋭い刃先が得られるため、非鉄系材料の超精密加工に大変有効です。1950年代に米国でダイヤモンドの高圧合成に初めて成功して以来、人工的に合成がされてきましたが、現在では直径数mmの単結晶ダイヤモンドも合成により生産されるようになりました。

ダイヤモンド焼結体は、合成ダイヤモンド粉末をコバルト(Co)などのバインダーを用い、通常は超硬

合金を台金として、その上に高圧高温下(約5万気圧、千数百度)で焼き固めたものです。ダイヤモンド焼結体も、非鉄金属・非金属加工分野においては、大きな効果を発揮します。

(6) cBN(立方晶窒化ホウ素)

ダイヤモンドに次ぐ硬さと熱伝導率を持つ立方晶窒化ホウ素(cubic Boron Nitride ; cBN)は、鉄系材料との反応性が小さく、ダイヤモンドよりも熱的・化学的安定性に優れています。このため、ダイヤモンドでは対応が難しい鉄系金属の加工が可能となります。(表6)

cBNは天然には存在せず、高温かつ高圧の条件下でダイヤモンドと同じようなプロセスを用い、人工的に合成して作ります。その際、用いられるバインダーの種類や添加量によってcBNの機械的・熱的特性が大きく左右されます。

cBN切削工具の初期においては、鋳鉄の加工を中心に使用が広まりつつありましたが、最近ではcBNの粒径の微細化やバインダーの改良、さらには工具形状の工夫により、一般炭素鋼や焼入れ鋼のエンドミル加工においても大きな効果を示すようになってきました。

表6 ダイヤモンドとcBN

材 質		ダイヤモンド	cBN (立方晶窒化ホウ素)
熱的安定性	大気中	600℃より酸化	1,300℃まで安定
	真空または不活性雰囲気	1,400℃まで安定	1,500℃まで安定
金属との反応性		Fe・Ni・Coと共存すると700℃で黒鉛化開始	Fe・Ni・Coとは1,350℃まで反応しない

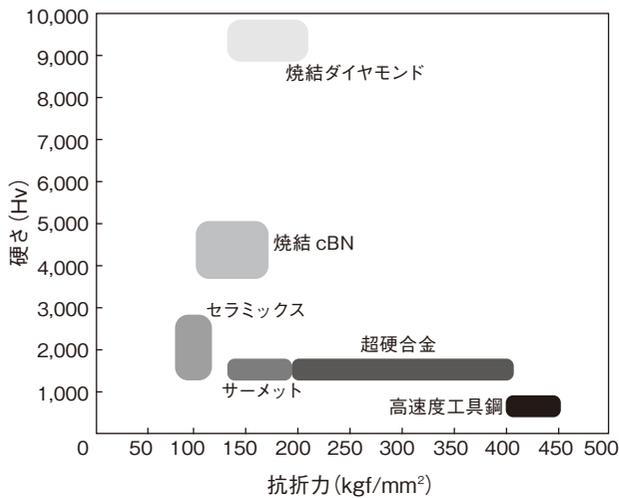


図 1.4.3 各種エンドミル材料の硬さと抗折力

1.5 エンドミルの表面処理

エンドミルに適用される表面処理として、古くは表面に酸化膜や、窒化層を形成する処理が行われましたが、近年では、硬質で耐熱性、潤滑性に優れた被膜をコーティングすることが主流となっています。

コーティングはその方法からCVD (Chemical Vapor Deposition、化学蒸着) 法とPVD (Physical Vapor Deposition、物理蒸着) 法とに大別されます。

CVD法は、熱化学反応によって化合物を合成し、それをコーティングする方法です。複雑な形状のもの

にも容易にコーティングができるというメリットがありますが、処理温度が900～1,100℃と高いため、HSS工具などには適用できないといったデメリットもあります。

PVD法は、真空中で金属を溶融、蒸発させ、それに反応ガスを導入し、硬質化合物として蒸着させる方法です。反応促進にはプラズマが利用され、処理温度は500℃以下と低いため、精密な工具への適応が可能で、さらにHSS工具にも適用できます。

PVD法の中で代表的なのが、HCDイオンプレーティング法と呼ばれる方法です。図1.5.1にそのプロセスの一例を示します。

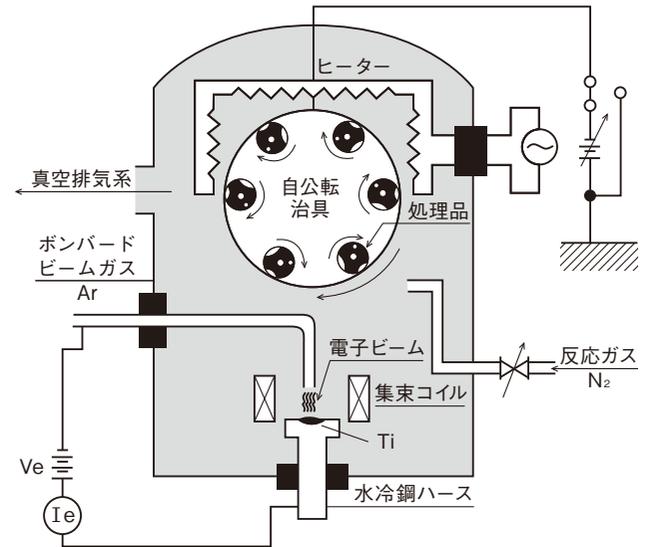


図 1.5.1 HCD イオンプレーティング法の概略図

高真空槽内のルツボに蒸発金属 (たとえばTi) を入れ、これを特殊電子銃からの電子ビームによって溶解蒸発させ、反応ガス (N₂、CH₄など) を導入し反応させます。これにより、予熱した処理品の表面に (TiNあるいはTiCなどの) 被膜がコーティングされます。

近年では、こうしたコーティング被膜を単層で用いるのではなく、複数重ね合わせた多層構造 (図1.5.2) として用いる技術も実用化されています。また、新たな元素 (Al、Si、CrあるいはBなど) を付加することで、酸化開始温度の向上を図ったり、高温下での潤滑性を向上させたりする試みも多く行われており、高性能な

コーティング被膜が次々に開発されています。

さらに、ダイヤモンドコーティング技術も進歩し、エンドミルのような複雑形状を持つ超硬合金製工具にもCVD法によるコーティングが可能になりました。ダイヤモンドコーティング被膜は、ほぼ100%純粋なダイヤモンドからなるため、優れた硬さと非鉄金属などに対する耐溶着性を示します。

もともと、ダイヤモンドコーティングは、母材表面に発生した小さな核から成長したダイヤモンド結晶の集合体であり、表面は凹凸状態になるため、非鉄合金の仕上げ面粗さが要求される加工などには、不向きとされてきました。

しかし最近では、被膜のダイヤモンド結晶を微結晶化する技術が確立されて、平滑なダイヤモンドコーティング被膜が形成できるようになったため、こうした問題も解決され、その用途も広がっています。

(図1.5.3)

同じく炭素原子（通常は水素原子を含む）から成るのですが、結晶構造がダイヤモンド結晶ではなく、

アモルファス構造のものをDLC（ダイヤモンドライクカーボン）と呼びます。このDLCも被膜としてコーティングされます。もちろん、ダイヤモンドのように硬くはありませんが、アモルファス構造であるため方向性が無く、平滑性、潤滑性に大変優れるといった特性があります。

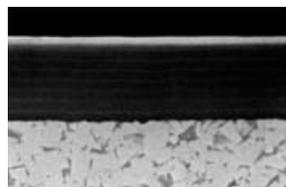
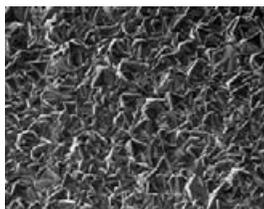
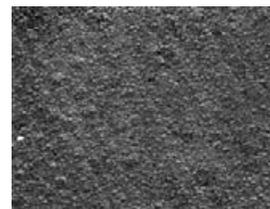


図 1.5.2 多層コーティング膜



従来



微結晶膜

図 1.5.3 微結晶化されたダイヤモンドコーティング膜

表 7 エンドミル刃部材料、表面処理と主な用途

工具材質	主な用途	対応可能な被削材硬度の目安
高速度工具鋼	炭素鋼、合金鋼、非鉄、非鉄合金などの一般切削。 粉末HSSにより工具寿命延長が図れる。	HSS：35HRC程度まで 粉末HSS：40HRC程度まで
セラミックス系コーティング 高速度工具鋼	一般切削での長寿命化、切削速度の向上。ステンレス鋼切削などにおける溶着防止にコーティングの効果は大きい。TiN合金、耐熱合金ではコーティング粉末HSSの対応が効果大。	コーティングHSS：40HRC程度まで コーティング粉末HSS：45HRC程度まで
超硬合金	鋳鉄、非鉄、非鉄合金の一般切削。 炭素鋼、合金鋼にも対応可能であるが、 コーティング超硬の普及に伴い使用頻度は低い。	45HRC程度まで 高硬度な超硬合金では 55HRC程度まで可能
セラミックス系コーティング 超硬合金	一般切削、焼入れ鋼切削、高速切削など幅広い材質、 加工形態に対応。コーティング材質により特性も異なる。	60HRC程度まで 高硬度材対応仕様で70HRCまで対応 可能なものもあるが短寿命となる
サーメット	炭素鋼、ステンレス鋼の仕上げ切削。光沢面が得られやすい。	45HRC程度まで
焼結cBN	鋳鉄、炭素鋼、合金鋼、焼入れ鋼の高速仕上げ切削。	70HRC程度まで
焼結ダイヤモンド	Al、Al合金、Cu、Cu合金、焼結前の超硬合金や セラミックスなどの切削。鉄系材料には不向き。	—————
DLCコーティング超硬合金	Al、Al合金（低Si）、Cu、Cu合金などの切削。 鉄系材料には不向き。	—————
ダイヤモンドコーティング 超硬合金	Al、Al合金、Cu、Cu合金、焼結前の超硬合金やセラミックス、 プラスチックなどの切削。高シリコンアルミ合金鋳物での耐摩耗性 向上に効果大。鉄系材料には不向き。	—————

*工具形状や仕様により用途や対応可能な被削材硬さの範囲は変化しますので、上表は一般的な目安としてとらえてください。

2. エンドミルによる切削加工

2.1 切削機構

(1) エンドミル切削の特徴

切削は、加工物より硬い切れ刃を持った刃物を加工物に押し当てて、刃物または加工物のどちらか、あるいは双方を移動させることで成立する行為です。

エンドミルによる切削加工は、(加工物より硬い)エンドミルを回転させるのと同時に、加工物またはエンドミルを移動させる(送る)ことにより実現されます。

エンドミル加工が旋削加工と大きく異なる点は、工具回転が基本であること、穴加工を除けば図2.1.1に示すような空転を伴う断続切削の連続であることが挙げられます。

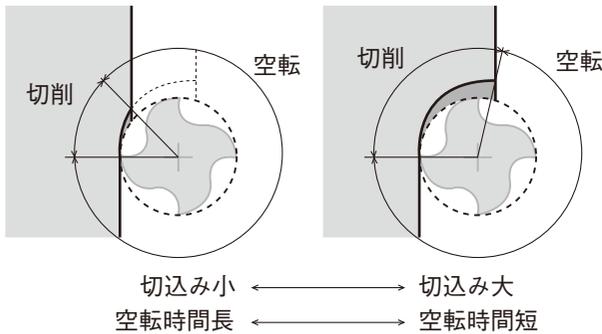


図 2.1.1 エンドミル加工における空転

切削に伴う切りくずの生成は、変動をしながら繰り返されることとなりますが、模擬的に単純モデルで示せば、図2.1.2のようになります。

切れ刃のすくい面により、圧力を受け圧縮された部分からせん断が発生し、切りくずが連続して生成され流出します。

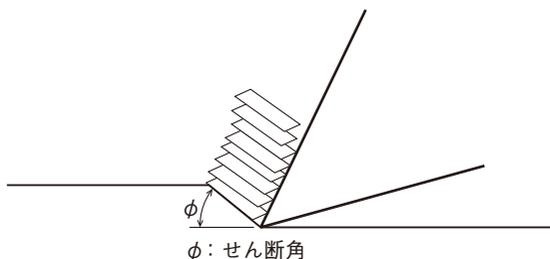


図 2.1.2 切削の単純モデル

このとき、加工物は図2.1.3のような内部応力を受けることとなります。

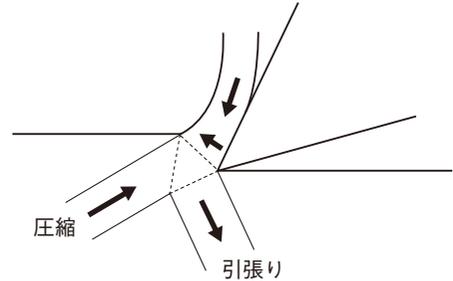


図 2.1.3 内部応力

(2) 切削抵抗

高い内部応力を発生させ、破壊、分離を起こさせる過程においては、大きな力を要するわけですが、こうした力をエンドミルに加えて切削を行おうとすると、これらと反対の力がエンドミルに反作用として働くこととなります。こうした力を切削抵抗と言います。

エンドミル加工における切削抵抗は、図2.1.4に示すように、送り方向に働く水平分力(送り分力)とこれと垂直な方向に働く垂直分力(主分力)、および軸方向分力(背分力)として測定することができます。

切削抵抗は、所要動力を支配するわけですが、エンドミルやそれを保持している保持具(ホルダ)の曲げ変形も誘発するため、加工精度に大きな影響を与えることとなります。

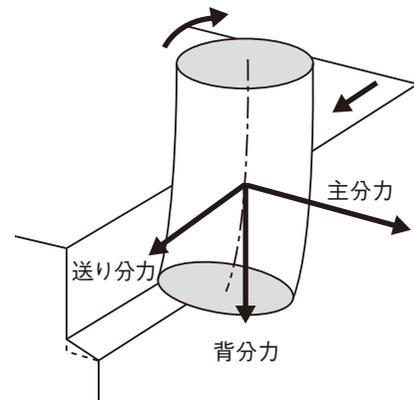


図 2.1.4 切削抵抗の分力

(3) 切削による発熱

図2.1.5のように、切れ刃と加工面及び切りくずとの間に生ずる摩擦エネルギー、ならびに繰り返されるせん断エネルギーは、熱エネルギーに変換され、切削熱を発生させます。

エンドミル加工においては、切れ刃が実際に切削をしているときに、発熱による温度上昇があり、空転時に冷却されることとなり、発熱と冷却が交互に繰り返されることとなります。切込深さを大きくすると、加工物と切れ刃の接触時間が増加し、冷却時間は短くなります。

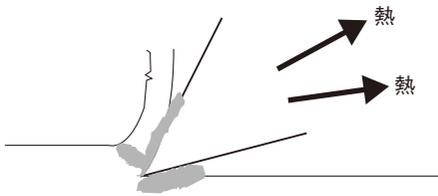


図 2.1.5 切削による熱の発生

(4) 切りくず

切りくずの形状は、切削条件や使用するエンドミルの仕様、被削材質によっても異なってきますが、切りくずの基本的な分類を次に紹介します。

① 流れ形切りくず

切りくずの形が長手方向に変動せず、滑らかなものを言います。実際には完全に滑らかということはありませんが、凹凸の高さが切りくず厚さに対して十分に小さいものを言います。

せん断面での切りくず変形が連続的（非常に小さな間隔）に安定して発生している状況での切りくずです。そのため、切削抵抗の変動もなく、仕上げ面も平滑で工具のチッピングも発生し難くなります。

旋盤加工やドリル加工では、連続した切りくずが工具に絡みつくといった問題を生じますが、切削の状態としては安定した状態の切りくずと言えます。穴加工以外のエンドミル加工では、一般に最も望ましい切りくず形状と言えます。

なお、二次元加工でのボールエンドミルの切りくずは、長手方向に一定ではなく、扇形となりますが、その凹凸が小さければ流れ形切りくずとして判断されます。

② せん断形切りくず

切りくずの、エンドミル切れ刃すくい面側と反対側の面に著しい凹凸があり、くびれや亀裂がある状態のものを言います。

これは、切削中に切りくずが次第に厚くなり、ある限界に達するとクラックが発生して急に薄くなるが、再び切りくずは次第に厚くなるといった過程を周期的に繰り返すことによって生成される切りくずです。

切削抵抗は不安定で、加工面も切りくず生成の周期に同調して荒れた面となります。

脆性材料を切削する際に生成されます。また、熱伝導率の低い材料を切削する時にも生成されやすいと言われています。

③ むしれ形切りくず

大きな裂け目を生じながら生成され、加工面にむしれた痕を残すような切りくず形状を言います。

純アルミニウム、純銅などの延性が高い材料を切削するときに生成される切りくずで、エンドミルのすくい面に溶着を生じやすくなります。一般に切込深さを浅くし、切削速度を上げていくと生成されなくなります。

④ 亀裂形切りくず

連続せずにばらばらに分離した切りくずです。切りくず変形時に起こる破断で生ずる亀裂によって生成され、鋳鉄などの脆い材料を切削する時に発生します。亀裂が加工面より深いところまで及ぶと加工面を著しく悪化させることとなります。

このような場合、切削速度を上げて、1刃当りの送り量を下げることによって加工面状態が改善されます。

以上代表的な切りくず形態の分類について紹介しましたが、切りくずの色も切削条件によって変化します。

切削時に生ずる切削熱によって切りくずは変色をします。その際、切りくずに伝わった温度によって切りくずの色が異なるため、これを観察することで、概ねの温度を推測することができます。図2.1.8は、炭素鋼のエンドミル側面切削時における、切削速度と切りくずの色ならびに切りくずが生成されたときの概略温度を示します。

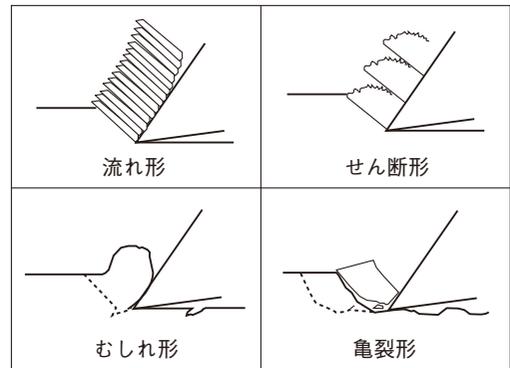


図 2.1.6 切りくず形態の分類



図 2.1.7 エンドミル側面切削での流れ形切りくず

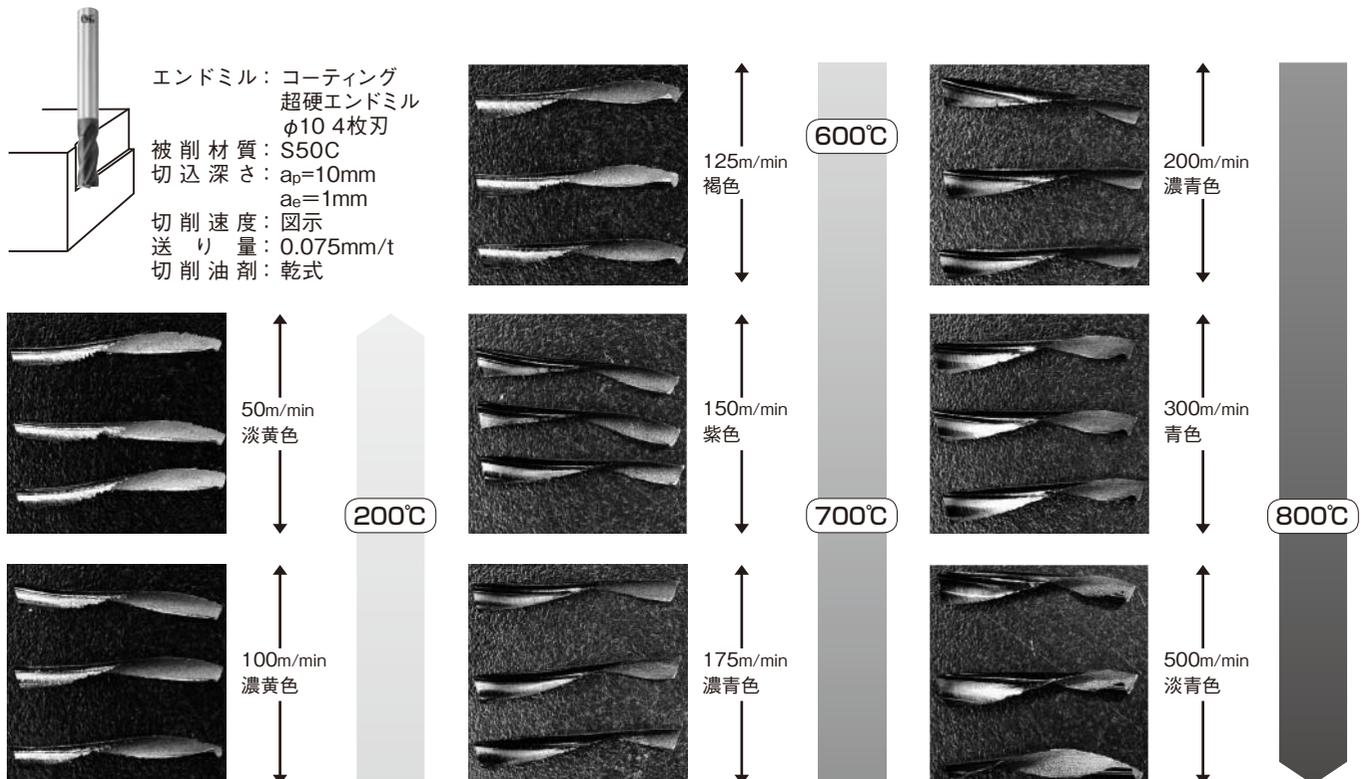


図 2.1.8 切りくずの色で観る切削温度

(5) 工具摩耗

切削を継続して行くとエンドミルの刃先は摩耗（損耗）を生じます。エンドミルの摩耗形態の代表的な事例を図2.1.9に示します。

摩耗の場所により、すくい面摩耗、逃げ面摩耗、境界摩耗、コーナ摩耗と一般には呼ばれます。すくい面摩耗の中で、クレータ状のくぼみとして摩耗が進んだものをクレータ摩耗と呼びます。（図2.1.10）

さらに摩耗の発生要因、損傷の状態などによって次に紹介するような分類がされますが、こうした摩耗や損傷は、それぞれが単独で発生するのではなく、ほとんどの場合、複数が同時に発生をします。

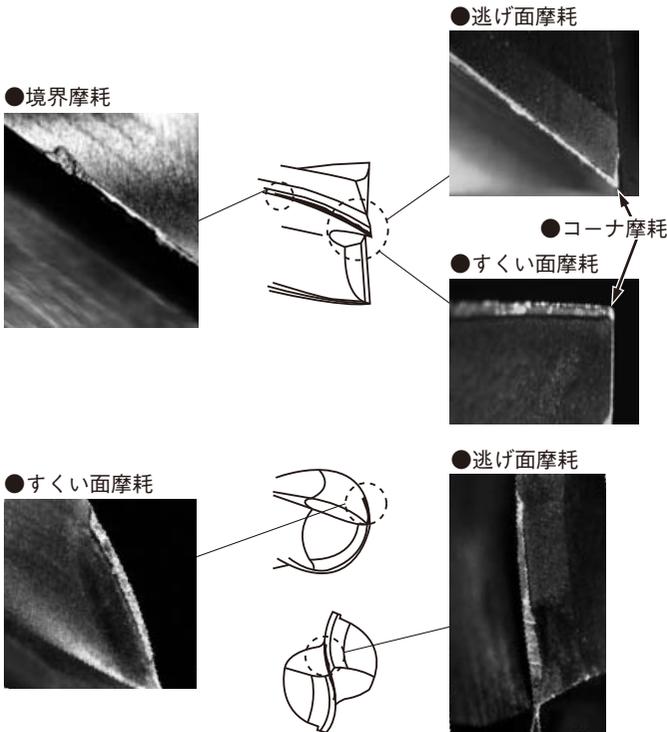


図 2.1.9 エンドミルの摩耗形態

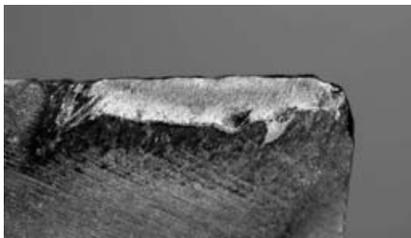


図 2.1.10 クレータ摩耗

① 機械的摩耗

被削材中の硬い粒子などが工具の切れ刃面を引っかいて削り取る摩耗です。この粒子と工具の硬さの違いが影響を及ぼすこととなりますが、実際の切削では、発熱を伴うため、その温度下での硬さが問題となります。アブレッシブ摩耗と表現されることもありますが、概ね同じ意味合いで使われる呼び方です。

超硬合金の場合は、被削材の硬い粒子ならびに超硬合金から欠け落ちた微小粒で引っかかれて、さらに小さい単位での脱落が起こるため、すきとり摩耗と呼ばれることもあります。

② 溶着摩耗

すくい面に被削材が溶着（凝着、圧着も含めて一般には総称して溶着と言います）を起こすことがあります。切りくずは、この溶着面を滑りながらせん断をしていくわけですが、せん断が切りくず内部だけで起こっていれば、構成刃先となり、溶着部とともに工具内部までせん断が及べば工具の一部が持ち去られることとなります。

③ 拡散摩耗

切削点の温度が高くなると切りくずと工具との間で相互拡散が発生し、工具の刃先にその置換によって工具材質より硬くない化合物が生成され、これが早期に摩耗していくといった進行をします。

④ 化学的摩耗

工具材料が他の物質と化合物を作り、それが取りさらられていくような摩耗形態です。空気中の酸素と化合したり、切削油剤の極圧添加物と反応したりするような摩耗を言います。

境界摩耗は、空気中の酸素と化合しやすい状況下にあるため酸化摩耗が発生していると考えられます。

⑤ 熱起電力による摩耗

工具と被削材は異種金属であり、これらの接触点の温度上昇により熱起電力が発生すると考えられます。この時、工具のほうが被削材よりイオン化傾向が高くイオンとなって電流を流せば、摩耗が発生することになります。このような形態の摩耗も発生していると言われています。

イオン化傾向	金属名	元素記号
大 ↑ ↓ 小	アルミニウム	Al
	マンガン	Mn
	亜鉛	Zn
	クロム	Cr
	鉄	Fe
	カドミウム	Cd
	コバルト	Co
	ニッケル	Ni
	すず	Sn
	鉛	Pb
	(水素)	(H)
	銅	Cu
	水銀	Hg
	銀	Ag
	白金	Pt
	金	Au

表 8 イオン化傾向

熱と急冷却が繰り返されることにより熱応力ひずみが生じ熱亀裂（サーマルクラック）が発生することがあります。このサーマルクラックを起点に刃先の摩耗や脱落（チッピング）が進みます。

⑥ チッピング

この他に工具の損傷としては、チッピングと呼ばれる欠けがあります。一般に微細な欠け（先述のすきとり摩耗のような微細な脱落よりは大きなもの）をチッピングと呼び、比較的大きな欠けは、単に欠けと呼ぶこともあります。

また、超硬エンドミルにて中低速域で切削した場合などに見られる極めて小さなチッピング（目視で摩耗との区別が付きにくいようなもの）をマイクロチッピングと呼ぶこともあります。（図2.1.11）

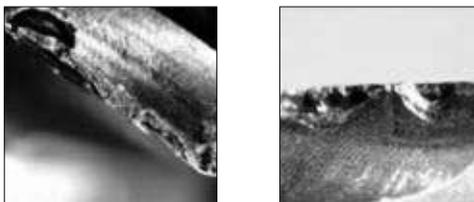


図 2.1.11 チッピング

⑦ 塑性変形

工具は切削中に高い応力を受けることとなります。このとき切削熱により工具が軟化していれば塑性変形も発生することとなります。

⑧ 熱亀裂（サーマルクラック）

超硬エンドミルやcBNエンドミルで高速切削をする際に、冷却効果の大きな切削油剤を使用すると、発

⑨ 構成刃先

溶着が発生したときに、せん断がその上を流れる切りくず内部に留まり溶着部分にまで及ばないと構成刃先が生成されます。

図2.1.12のように、水が流れる中に障害物を置くと、流れは二方向に分かれます。この時、流れが分かれていく部分に渦ができ流れが停滞する部分ができます。構成刃先も、これによく似た状況で、切れ刃のすくい角に関係なく、30～40度の角度で形成されると言われています。

構成刃先は、成長と脱落を繰り返すため、被削面粗さを悪化させたり、脱落時に刃先のチッピングを誘発したりします。

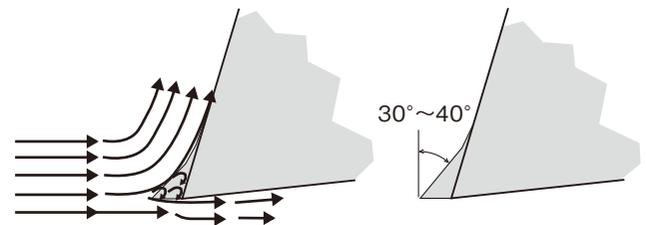


図 2.1.12 構成刃先

(6) 加工変質層と残留応力

切削加工によって得られた加工物の表面には、加工変質層と残留応力に代表されるような表面品位の問題が発生します。

切削は、加工物に局所的な高い応力を加えて破断を発生させるのですが、このとき起こる塑性変形や温度上昇を切りくずの内部だけに留めることは不可能で、ある程度は加工物の表層に広がってしまい、これが加工変質層や残留応力として残ります。

摩耗の進んだ工具を使用し続けることは、加工変質層や残留応力の発生を促すこととなります。また、過大な切込みや送り量もこうした問題につながります。

2.2 加工形態

エンドミルの主な加工形態を図2.2.1に示します。溝切削や側面切削以外に、ラジラスエンドミルやボールエンドミルは自由曲面の3次元加工にも用いられます。

また、所定の形状の切削を行う総形エンドミルやT溝フライスでのT溝切削も加工の形態としてあります。

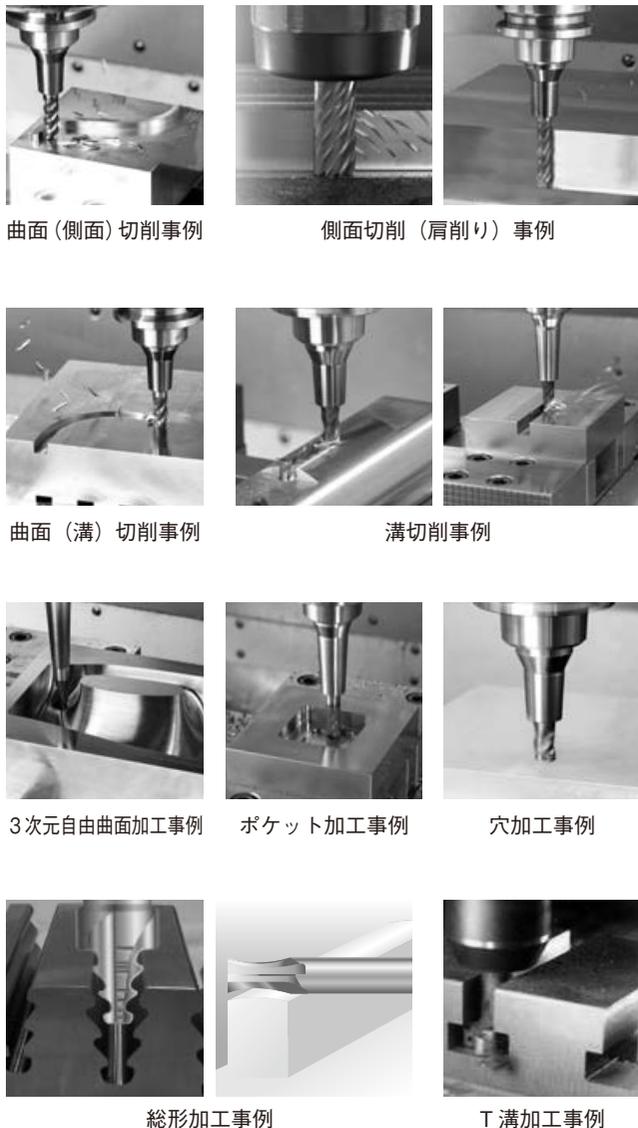


図 2.2.1 エンドミルの主な加工形態

2.3 切削条件

(1) 切削速度

① 切削速度とは

エンドミル加工における切削速度は、エンドミルの回転と加工物またはエンドミルの移動速度(送り速度)により相対的に決定されます。

しかしこの時、回転により得られる速度に比べ、送りによる速度は極めて小さいため、一般にエンドミル加工における切削速度 v_c は、次のようにして求められます。

$$v_c = \pi \cdot D_c \cdot n / 1000 \dots \dots \dots (1)$$

v_c : 切削速度 (m/min)

π : 円周率

D_c : エンドミル外径 (mm)

n : 回転速度 (1分間当たりの回転数) (min^{-1})

前述したように、加工物の内部に高い応力を発生させ、破壊、分離を起こさせるためには、それなりの力が必要であり、その力は、切削速度 v_c により与えられます。力は質量と加速度の積で表されるわけですから、切削速度は切削の原動力と言えます。したがって、ある程度以上の切削速度がないと切削加工は実現されません。

このことは、ちょうど鎌で草を刈るときにある程度の速度で鎌を振らないと上手く草を刈ることができないとか、充電量が足らなく回転が落ちた電気かみそりで髭が上手く剃れないといったことで身近でも経験していることです。

エンドミル加工が草や髭を切るのと少し違っているのは、切りくずの生成過程において、塑性変形(せん断変形)やこれによる大きな発熱を伴う点だと言えるでしょう。

② 切削速度と加工精度

炭素鋼や合金鋼の切削においては、切削速度を増加させると、せん断角が大きくなり、これによって生成される切りくずも薄くなる傾向にあります。(図2.3.1)

図2.3.2には、コーティング超硬エンドミルを用いて、実際に切削速度と切りくず厚さの関係を調査した結果を示します。

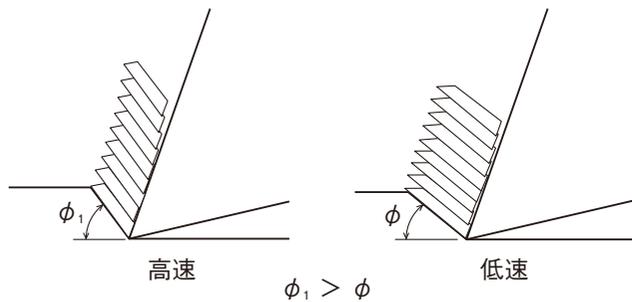


図 2.3.1 切削速度とせん断角

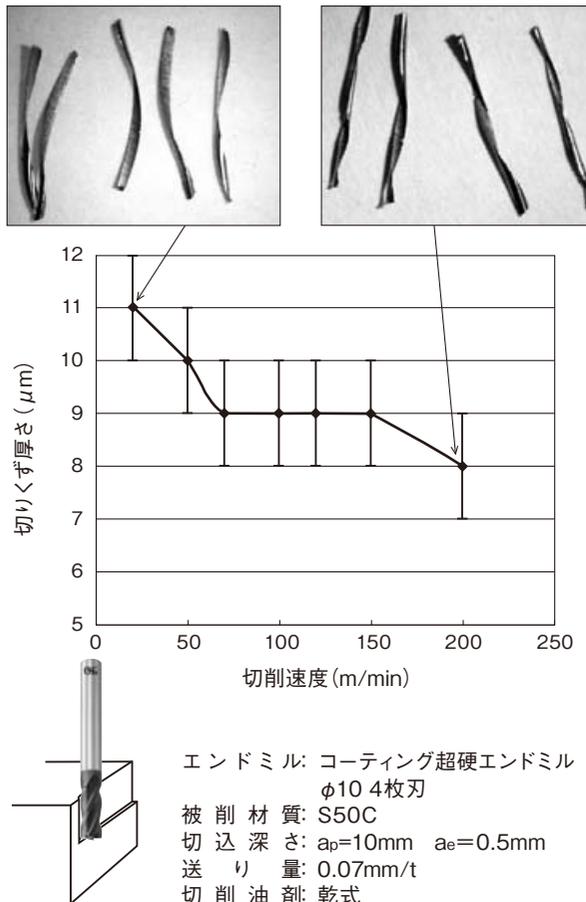
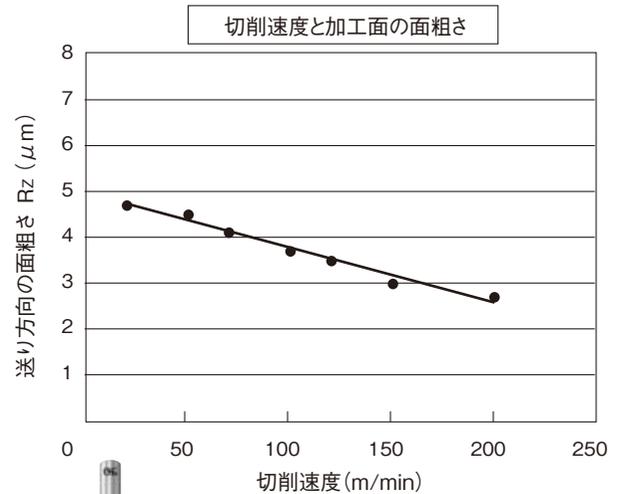
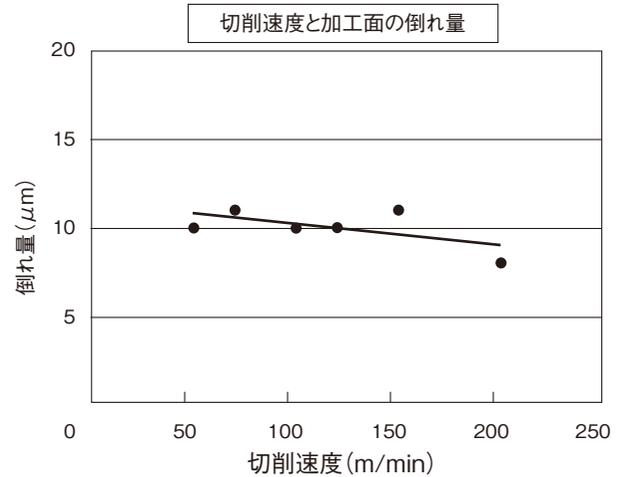


図 2.3.2 切削速度と切りくず厚さ

薄い切りくずの生成は、加工面品位の向上をもたらすと考えられます。

図2.3.3に、コーティング超硬エンドミルを用いた炭素鋼の側面切削における切削速度と加工面精度、加工面粗さの関係を調査した結果を示します。



エンドミル: コーティング超硬エンドミル
 $\phi 10$ 4枚刃
 被削材質: S50C
 切込深さ: $a_p=10\text{mm}$ $a_e=0.5\text{mm}$
 送り量: 0.07mm/t
 切削油剤: 乾式

図 2.3.3 切削速度と加工面精度

加工面の倒れ量は切削速度の影響をあまり受けることはありませんが、切削速度の上昇に伴い加工面粗さが向上していることがわかります。

さらに、図2.3.4に、ダイス鋼をコーティング超硬エンドミルで、切削速度20m/minと150m/minのそれぞれで切削したときの被削面の写真を示しますが、あきらかに切削速度150m/minのほうが光沢面となっていることがわかります。

SKD11 (40HRC)

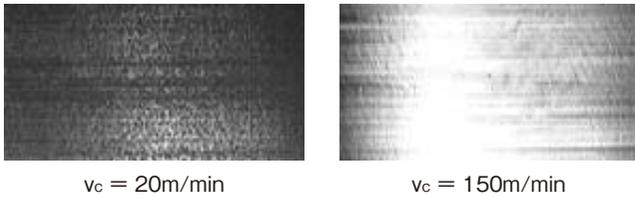
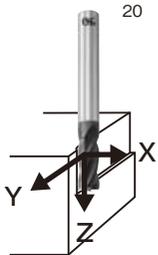
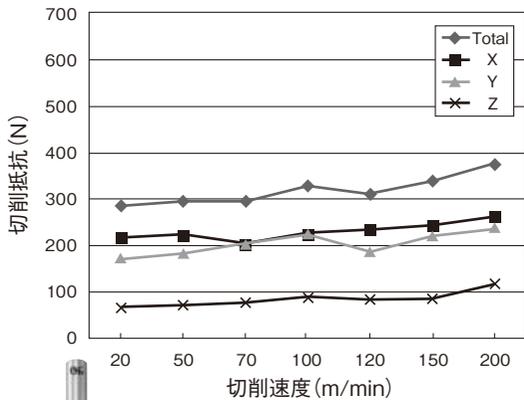


図 2.3.4 切削速度と加工面品位

図2.3.5には、切削速度と切削抵抗の関係を調査した結果を示します。切削速度の上昇により切削抵抗も多少上昇する傾向にはありますが、切削速度の変化量に比べ切削抵抗の変化量が明らかに少ないことがわかります。

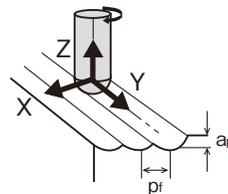
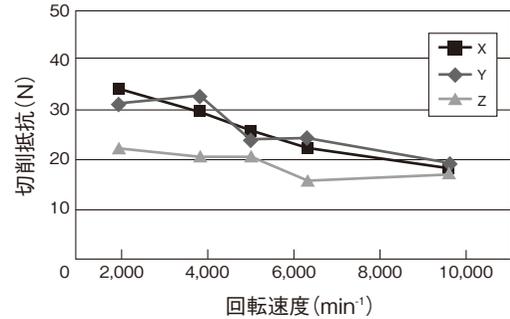


エンドミル：コーティング超硬エンドミル
φ10 4枚刃
被削材質：S50C
切込深さ： $a_p=10\text{mm}$ $a_e=0.5\text{mm}$
送り量：0.07mm/t
切削油剤：乾式

図 2.3.5 切削速度と切削抵抗

これは、切削速度の増加がせん断角の増大を促し、結果として切削抵抗の増加を抑制しているからと考えられます。

図2.3.6は、ボールエンドミルでの各切削速度における切削抵抗3分力の測定結果を示します。この結果においては、切削速度の上昇に伴い切削抵抗が軽減する現象が観察されます。



エンドミル：コーティング超硬
ボールエンドミル R5
被削材質：S50C
回転速度：1,900min⁻¹~9,600min⁻¹
(最大径部での実切削速度17m/min~85m/min)
送り量：0.1mm/t
切込深さ： $a_p=0.2\text{mm}$ $p_r=0.1\text{mm}$

図 2.3.6 ボールエンドミルにおける切削抵抗

ボールエンドミルのこのような加工では、切削速度を上昇させることで、せん断角が増加し、切りくず厚さが薄くなるのと同時に、切削速度ゼロとなるボール中心部付近の切削性が改善されることも大きな要因となり切削抵抗の軽減につながっていると言えます。

③ 切削速度と工具寿命

切削速度が大きくなれば、摩擦やせん断変形による発熱量も多くなり工具の摩耗の進行は早まると考えられます。

従来より、切削速度と工具寿命の関係については、次のような工具寿命方程式 (F.W.テラー) が良く知られています。

$$v_c \cdot T^m = C \dots \dots \dots (2)$$

- v_c : 切削速度 (m/min)
- T : 寿命時間
- m : 定数
- C : 定数

この式は、切削速度を変化させ2種類以上（実際にはばらつきを考慮した数種の条件における数回）の切削試験を行えば、任意の切削条件での工具寿命の予測ができるというものです。

この工具寿命方程式では、切削速度が大きくなればなるほど、（係数の値によってその変化の度合いが異なるが）工具寿命時間は短くなることとなります。

エンドミル加工においても、比較的大きな切込みでの加工（空転による冷却時間が少ない加工）では、こうした傾向がよく見られます。図2.3.7に、その事例を示します。

さらに、ここでは刃先の温度が1,000℃近くまで上昇しても切削が可能である超硬エンドミルに対し、550℃程度までしか耐えられないHSSエンドミルのほうが、切削速度には敏感に反応する結果となっていることもわかります。

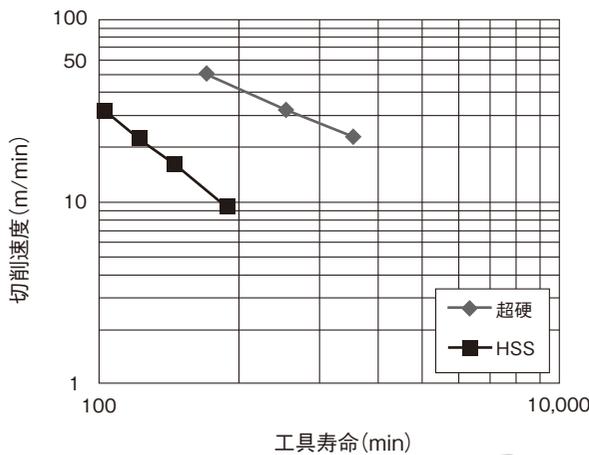
つまり、工具の耐熱性が切削速度を決定する上でのひとつの制約条件になるわけです。

しかし、耐熱性が改善されたコーティング超硬エンドミルなどにおいては、このような寿命方程式で表さ

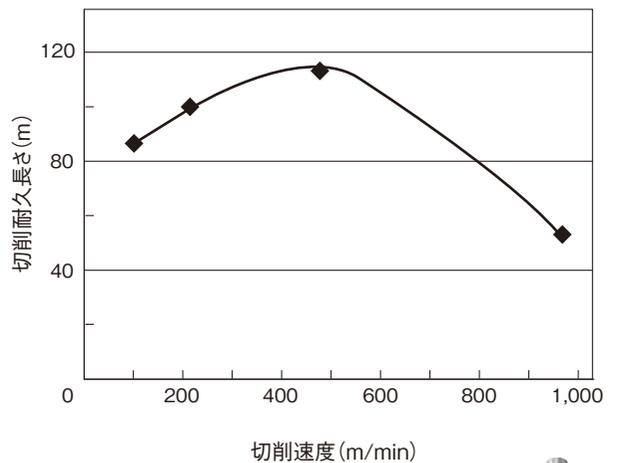
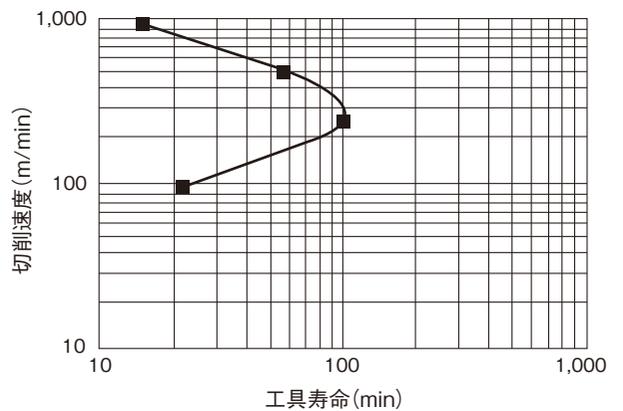
れる傾向とは異なる結果が得られることがあります。

例えば図2.3.8に見られるような切削速度と工具寿命の関係の調査結果では、切削速度を上げていくと、むしろ工具寿命が延長する領域があることがわかります。

これは、このような軽切込み切削でのエンドミル加工では、切れ刃の空転による冷却時間が長いことに加え、回転速度を上げることで切れ刃が加工物や切りくずに接触している時間が極端に短くなり、切削熱が切れ刃に伝わり難くなっているためと考えられます。



エンドミル：超硬エンドミル φ6 2枚刃
HSSエンドミル φ6 2枚刃
被削材質：S45C
切込深さ： $a_p=6\text{mm}$ 溝切削
送り量：0.03mm/t
切削油剤：不水溶性切削油剤
機械：NC立形フライス盤
寿命判定：外周逃げ面摩耗幅0.4mm



エンドミル：コーティング超硬エンドミル φ15 4枚刃
被削材質：S50C
切削速度：94~942m/min
送り：0.05mm/t
切削の向き：ダウンカット
切込深さ： $a_p=15\text{mm}$ $a_e=0.15\text{mm}$
機械：横形マシニングセンタ
切削油剤：エアブロー

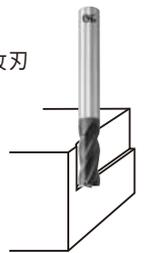


図 2.3.7 溝切削における切削速度と工具寿命

図 2.3.8 切削速度と工具寿命

工具に伝わらなくなった切削熱は、切りくずにほとんどが流入するようになります。こうした切削熱の研究報告では、高速回転にすることで切削熱の80%以上が切りくずに流入するとの報告もあります。

前述した切削速度の増加がもたらすせん断角の変化による切削性の改善（おそらく機械的こすり摩耗や凝着摩耗の低減）に加え、こうした切れ刃への切削熱の流入低減が、工具摩耗の進行を緩やかにし、このような高速域での工具寿命延長につながったと推測できます。

図2.3.9は、旋削加工での切削温度と摩耗形態の変化を示したのですが、断続切削のエンドミル加工でも同様な摩耗形態の変化が起きているものと考えられます。図2.3.8での高速域でも、こうした摩耗形態の変化の中で、工具への熱の流入が少くなり、拡散摩耗が抑制されたと言えます。

このような軽切込み高速域の工具に対する負荷が軽減する領域で、高精度加工を高効率で行おうとするのが、高速ミーリングの考え方です。高速ミーリングの研究は日本では1980年代の後半から盛んに行われるようになりました。その後、高速マシニングセンターや高速仕様のCNC、CAM、ツーリング、工具なども登場し、高速ミーリングは高効率高精度加工を実現する極めて有効な手法として、急速に普及が進んできました。

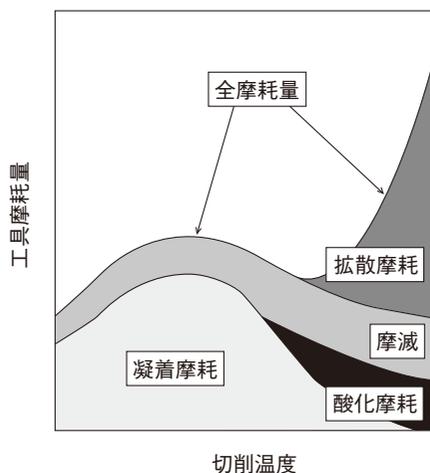


図 2.3.9 切削温度と工具摩耗形態

(松岡甫董、安齋正博：高速ミーリングの基礎と実践 日刊工業新聞社より)

④ 切削速度と振動

エンドミル加工は断続切削であり、切削抵抗は周期的な変動をしています。もちろん、先述した切りくず生成過程における不連続なせん断や、この後で述べる加工物に接触している切れ刃長さの周期的な変化も切削抵抗の変動を助長することとなります。この周期的な切削抵抗の変動の振幅が大きくなれば、加工中のエンドミルに振動を発生させる要因となると考えられます。

さらに工具のアスペクト比 (L/D)が大きくなると、加工中の工具はわずかな力でたわみやすくなり、これによって振れ回り現象が起きるため、前述の状況に加えてさらに振動が発生しやすくなります。

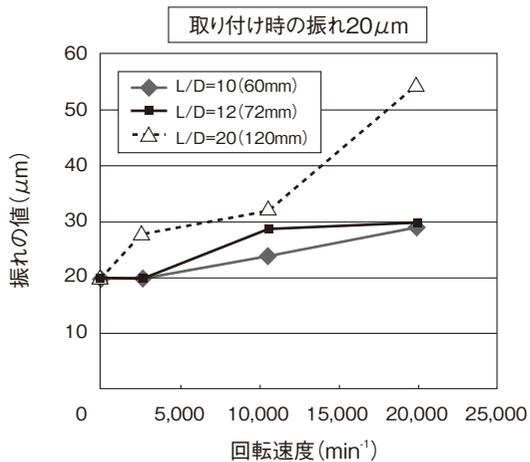
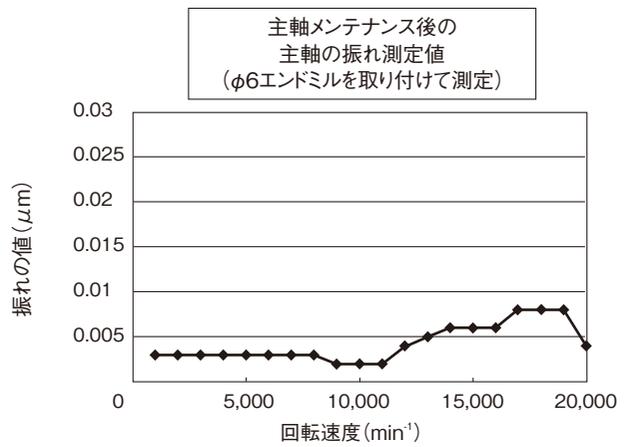
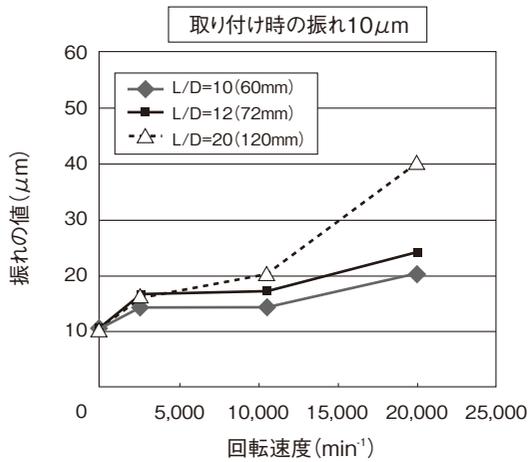
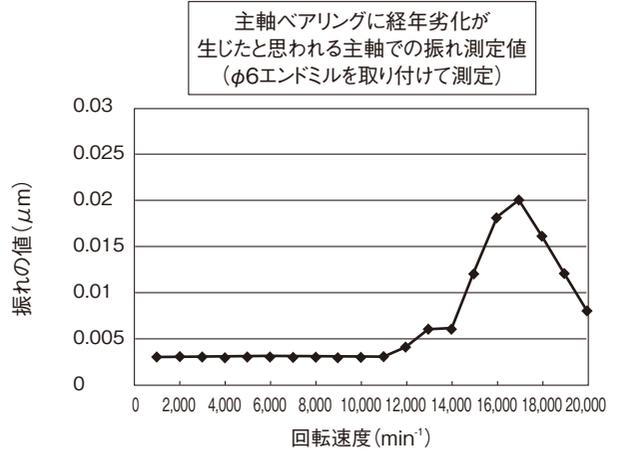
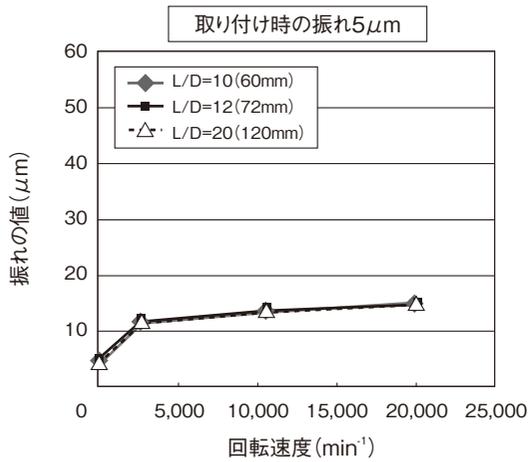
実際には、切削抵抗による工具のたわみ以外にも、主軸、ツーリング（ホルダ）および工具の累積による振れが、高速回転によって増幅し、振動の発生を助長することになります。

図2.3.10に回転速度が振れに及ぼす影響について調査を行った結果を示します。この結果から分かるように、L/Dが大きくなれば振れの増幅傾向は顕著であり、これが短い周期で発生することは切削時のびびり振動の発生要因となります。

L/Dに関係なく、回転速度を上げていくと突然振動が発生する領域が存在することがありますが、これは固有振動数に起因するものです。固有振動数の高い領域は避けて切削を行うようにすることで回避ができます。(図2.3.11)

また、切込深さが大きくなれば、切削抵抗が増大し工具の逃げによる振れ回りやたわみを増加させます。こうした状況で回転速度を増加させると、振動周期は短くなり、激しいびびり振動となって表れることとなります。

加工物が薄肉である場合は、回転速度の増加による短い周期での切削抵抗の変動は、加工物の振動を誘発することとなります。もちろんこの場合は、加工物の固有振動の影響も受けることとなります。



主軸の経年変化による精度劣化が、固有振動特性による共振域での振れの増大を誘発することもあるので注意が必要である。

図 2.3.11 回転速度と振れ

⑤ 切削速度の決め方

以上に説明してきましたように、切削速度は、加工能率や加工品位の観点からできるだけ速くすることが望まれますが、発熱や振動によって制約を受けることとなります。そして、こうした制約要因を左右する切込深さや、アスペクト比 (L/D)、加工物の剛性、共振領域さらには、工具自体の耐久性 (工具材質) を配慮して切削速度を決定することが必要となります。

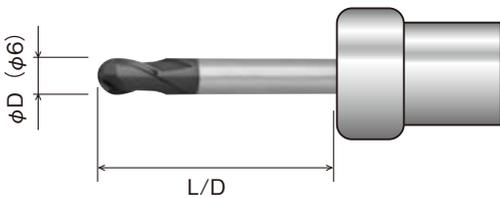


図 2.3.10 高速回転による振れ量の増加



表9 エンドミル加工における一般的な切削速度

被削材質		切削速度 (m/min)							
		HSS	コーティングHSS	微粒子超硬	超硬	コーティング超硬			cBN
		一般加工	一般加工	ソリッド工具での一般加工	ソリッド、ろう付け工具での一般加工	ソリッド工具での一般加工	スローアウェイ工具での荒加工	ソリッド工具での高速ミーリング	cBN工具での高速ミーリング
鋳鉄	FC250	20 ~ 25	25 ~ 30	30 ~ 35	40 ~ 80	40 ~ 150	100 ~ 300	~ 320	~2,000
	FCD500	20 ~ 25	20 ~ 30	25 ~ 35	40 ~ 70	40 ~ 150	70 ~ 150	~ 300	~2,000
一般構造圧延鋼	SS400	25 ~ 40	25 ~ 40	35 ~ 40	60 ~ 80	60 ~ 150	80 ~ 250	~ 300	
炭素鋼	S45C S55C	20 ~ 30	25 ~ 35	30 ~ 35	60 ~ 80	60 ~ 150	80 ~ 220	~ 300	
合金鋼	SCM440 SNCM415	20 ~ 30	25 ~ 35	30 ~ 35	60 ~ 80	60 ~ 150	80 ~ 220	~ 300	
プリハードン鋼	NAK55 HPM1 HPM2	15 ~ 20	18 ~ 25	25 ~ 30	50 ~ 70	50 ~ 150	60 ~ 120	~ 300	
	NAK80 HPM50	12 ~ 18	15 ~ 20	20 ~ 25	40 ~ 60	40 ~ 150	50 ~ 120	~ 300	~1,000
合金工具鋼	SKD11	8 ~ 12	12 ~ 18	20 ~ 25	40 ~ 70	40 ~ 150	100 ~ 180	~ 300	
	SKD61	12 ~ 18	12 ~ 25	20 ~ 30	50 ~ 70	50 ~ 150	100 ~ 200	~ 300	
ステンレス鋼	SUS304 SUS316	15 ~ 20	20 ~ 30			30 ~ 70	60 ~ 250	~ 200	
焼入れ鋼	38~45HRC		12 ~ 18	20 ~ 25	40 ~ 60	40 ~ 130	50 ~ 80	~ 300	~1,000
	45~55HRC					25 ~ 100		~ 250	~1,000
	55~60HRC					20 ~ 80		~ 160	~1,000
非鉄合金	Cu合金	25 ~ 60	30 ~ 70	35 ~ 80	60 ~ 90	60 ~ 300		~ 500	
	Al合金	50 ~ 100	50 ~ 120	50 ~ 150	60 ~ 300	60 ~ 300	200 ~ 1,100	~ 2,000	
Ti合金	Ti-6Al-4V	10 ~ 15	10 ~ 18	15 ~ 20	18 ~ 35	18 ~ 60	40 ~ 80	~ 100	
Ni合金	Inconel® Nimonic	4 ~ 6	5 ~ 8		12 ~ 18	12 ~ 30	20 ~ 40	~ 80	

(注) 上表は、概ねの目安を示すものであり、加工可能な切削速度を補償するものではありません。

(2) 送り速度

① 送り量とは

エンドミル加工における送りとは、エンドミルと加工物との相対的な移動を言います。

一般には、機械のテーブルと主軸の1分間当たりの移動量 v_f (mm/min) で示されます。

この時、エンドミルの1回転当たりの送り量 f 、ならびに1刃当たりの送り量 f_z は、

$$f = v_f / n \dots \dots \dots (3)$$

$$f_z = f / z = v_f / (z \cdot n) \dots \dots \dots (4)$$

f : 1回転当たりの送り量 (mm/rev)

f_z : 1刃当たりの送り量 (mm/t)

v_f : 送り速度 (mm/min)

z : エンドミルの刃数

n : 回転速度 (1分間当たりの回転数) (min^{-1})

となります。この1刃当たりの送り量は、生成される切りくずの厚さに影響を与えます。

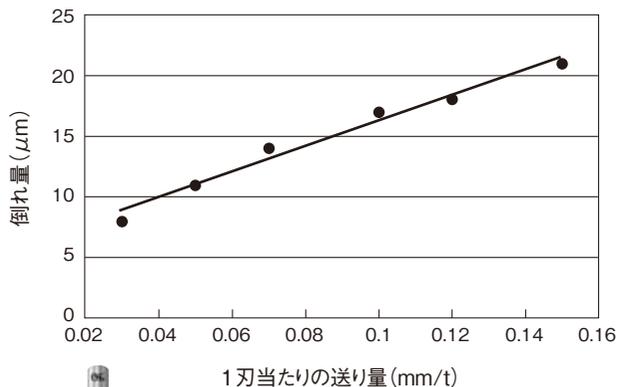
送り速度を1刃当たりの送り量にて表現することで、その送り量が過大であったり過少であったりしないかといった相対的な判断がしやすくなります。

② 1刃当たりの送り量と加工精度

図2.3.12に、1刃当たりの送り量と加工精度（加工面の倒れ量）の関係を調査した基礎実験結果を示します。1刃当たりの送り量の増加にともない加工面の倒れ量は増加するのがわかります。

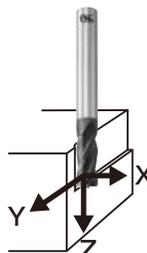
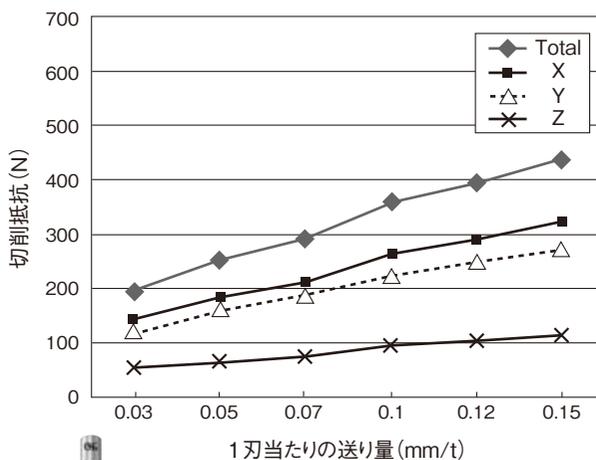
1刃当たりの送り量の増加は、図2.3.13に示すように切削抵抗の増加を招きます。これによって工具のたわみや振れ回りが誘発され加工精度を悪化させていると考えられます。

したがって、厳しい加工精度が要求される仕上げ加工においては、1刃当たりの送り量の制約が要求加工精度にあることになります。



エンドミル：コーティング超硬エンドミル
 $\phi 10$ 4枚刃
 被削材質：S50C
 切込深さ： $a_p=10\text{mm}$ $a_e=0.5\text{mm}$
 切削速度：70m/min
 切削油剤：乾式

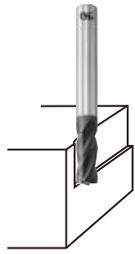
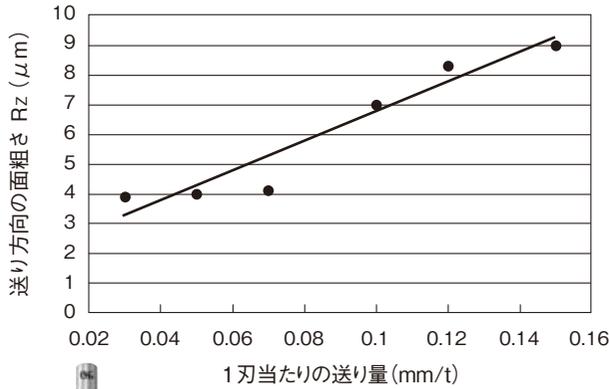
図 2.3.12 1刃当たりの送り量と加工面の倒れ量



エンドミル：コーティング超硬エンドミル
 $\phi 10$ 4枚刃
 被削材質：S50C
 切込深さ： $a_p=10\text{mm}$ $a_e=0.5\text{mm}$
 切削速度：70m/min
 切削油剤：乾式

図 2.3.13 1刃当たりの送り量と切削抵抗

次に、加工面粗さと1刃当たりの送り量との関係を図2.3.14に示します。これは幾何学的に説明できるわけですが、1刃当たりの送り量の増加に伴い加工面粗さも悪くなっていくことが分かります。



エンドミル：コーティング超硬エンドミル
 $\phi 10$ 4枚刃
 被削材質：S50C
 切込深さ： $a_p=10\text{mm}$ $a_e=0.5\text{mm}$
 切削速度：70m/min
 切削油剤：乾式

図 2.3.14 1刃当たりの送り量と加工面の粗さ

③ 1刃当たりの送り量と工具寿命

図2.3.15には、1刃当たりの送り量と工具摩耗の推移を比較した実験結果を示します。

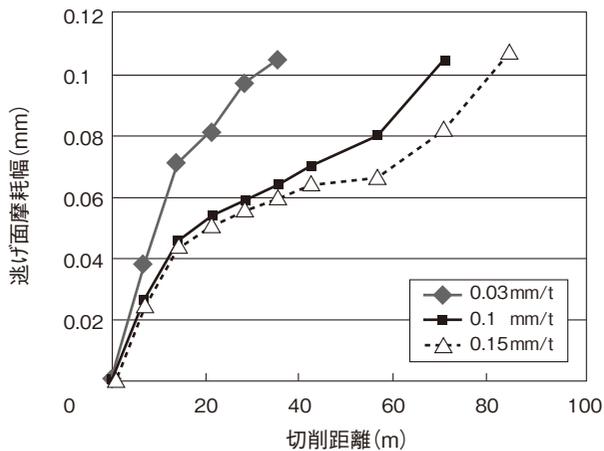


図 2.3.15 1刃当たりの送り量と摩耗の推移

1刃当たりの送り量を上げることで、同一切削距離での工具摩耗量が減少していることが分かります。簡単に言えば、1刃当たりの送り量を高めたほうが工具寿命の延長につながるということです。

これは、同一距離を切削する間にどれだけ加工面と切れ刃が接触を繰り返したかということが要因となります。しかし、過剰な1刃当たりの送り量は、切削抵抗を増大させ切れ刃のチッピングを誘発することになるので注意が必要です。

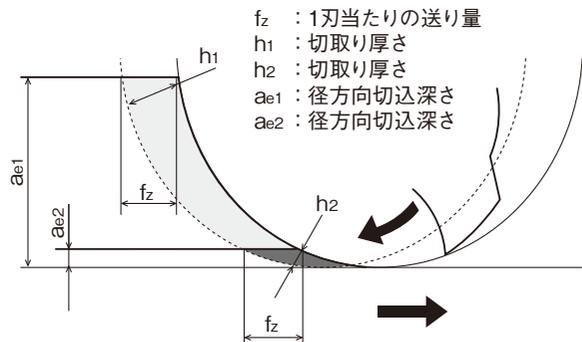
④ 1刃当たりの送り量の決め方

1刃当たりの送り量は、機械剛性と工具剛性（材質特性を含む）、要求される加工精度で概ね決定されると言えますが、過大な送り速度は、加工精度の悪化だけではなく、被削加工面に引っ張りの残留応力や加工変質層を発生させるので、こうした配慮も必要となります。

反面、過少な送り量は、加工能率を下げるばかりか工具寿命を低下させたり、切れ刃が被削面に上手く食い込まず上すべりを引き起こし、加工硬化やびびり振動を誘発するようなこともあるので注意が必要です。

図2.3.16には1刃当りの送り量が同じ時の切取り厚さと径方向の切込深さの関係を示します。径方向の切込深さが大きくなると切取り厚さは厚くなるのが分かります。

したがって、切込深さが大きくなると1刃当たりの送り量も小さくする必要があります。



同じ1刃当たりの送り量であっても切込深さが大きくなると切取り厚さ(h)は厚くなる。

図 2.3.16 径方向の切込深さと切取り厚さ

(3) 切込深さ

① 切込深さの変化とその影響

加工能率は単位時間当たりの除去体積で決定されます。エンドミル加工では、切込深さと送り速度の積が単位時間当たりの除去体積となります。

エンドミルの切込深さは、通常軸方向の切込深さ (a_p) と径方向の切込深さ (a_e) によって表されます。(図2.3.17)

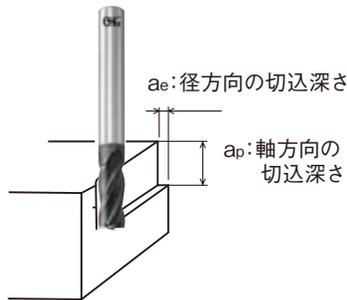


図 2.3.17 切込深さ

径方向の切込深さが増加すると、図2.3.18のように空転による冷却時間が短くなるとともに、切り厚さの増加により生成される切りくずが厚くなります。

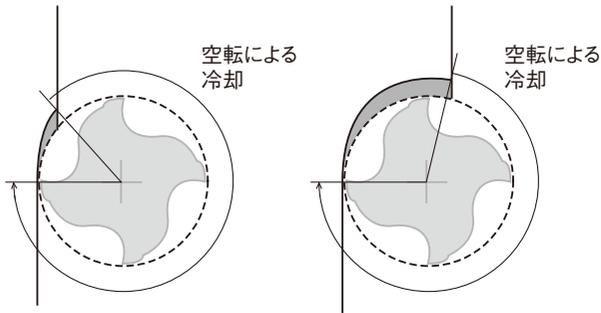
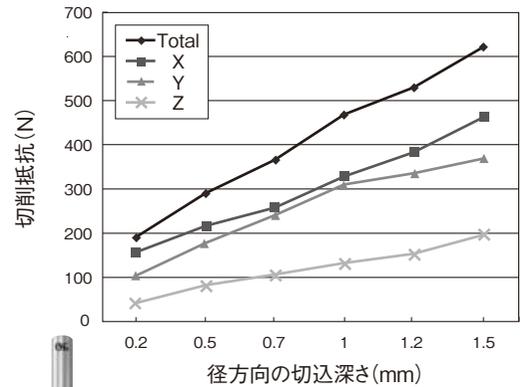


図 2.3.18 切込深さと空転時間

厚い切りくずは、単位体積当たりの表面積が小さくなるため、切りくずへの熱の流入効率は下がり、エンドミルの刃先への熱の流入が増加すると考えられます。

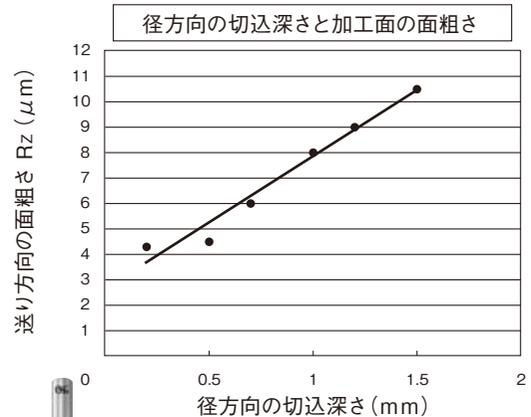
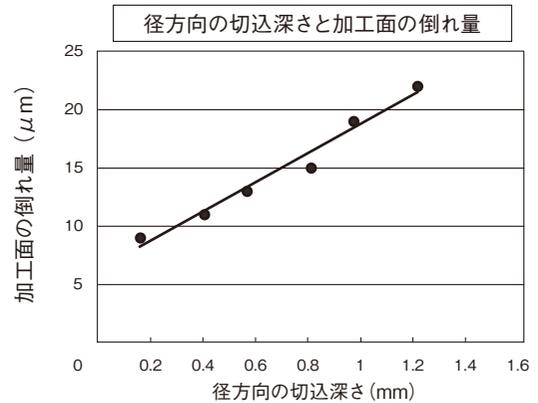
切削抵抗は、図2.3.19のように切込深さの増加に伴い顕著に増加をしていきます。

切削抵抗の増加に伴い、加工面の倒れ量も大きくなり、加工面粗さも悪化します。この関係を調査した結果を図2.3.20に示します。



エンドミル：コーティング超硬エンドミル
 $\phi 10$ 4枚刃
 被削材質：S50C
 切削速度：70m/min
 送り量：0.07mm/t
 切込深さ： $a_p=10$ mm
 切削油剤：乾式

図 2.3.19 径方向の切込深さと切削抵抗



エンドミル：コーティング超硬エンドミル
 $\phi 10$ 4枚刃
 被削材質：S50C
 切削速度：70m/min
 送り量：0.07mm/t
 切込深さ： $a_p=10$ mm
 切削油剤：乾式

図 2.3.20 径方向の切込深さと加工面精度

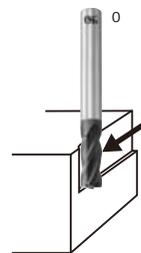
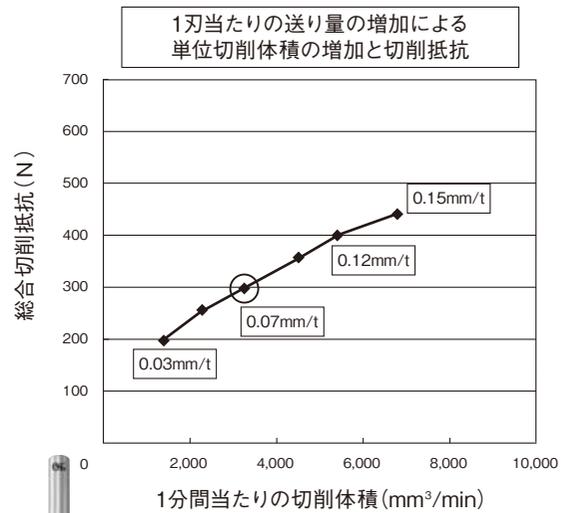
エンドミル加工において、径方向の切込深さが最大となるのは溝切削です。溝切削においては、半周分の外周切れ刃が常時切削を行っており、底刃コーナは切削をしていないときも常に加工面に接触していることとなります。このため、空転による冷却効果が少なくなり、工具に切削熱が流入しやすくなります。したがって、切削速度はあまり高くすることができなくなってしまいます。

さらに溝切削では、切削熱の問題の他にも、拘束された中で切削を行うため、切りくずを噛み込んだり、切りくずの再切削をするなどの問題が生じやすくなります。

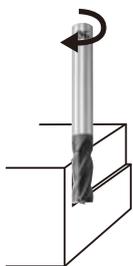
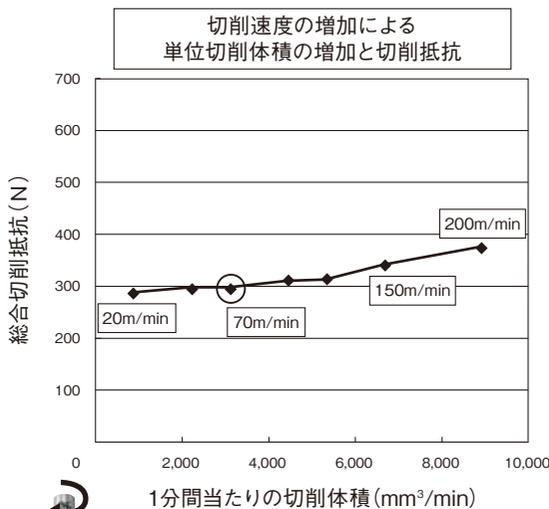
また、切込深さを大きくすることによる切削抵抗の増加や切削熱発散の減少は、加工変質層の発生や加工面での引っ張り残留応力の増加につながることもあります。

② 切込深さと切削速度、送り量

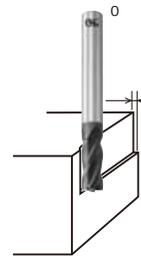
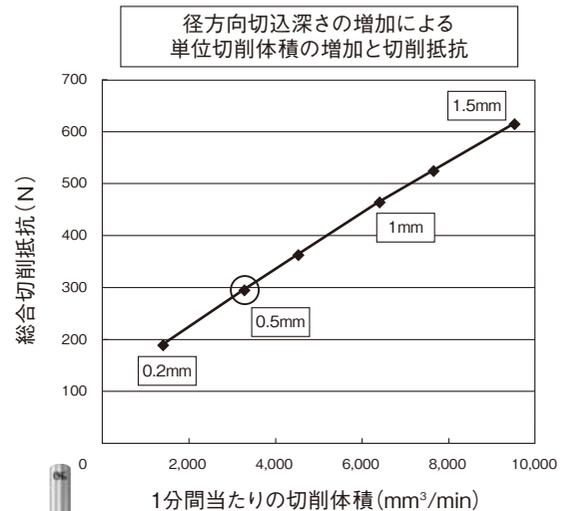
ここまで切削条件の切削速度、送り量、切込深さについて説明してきましたが、これらを変化させた時の影響を、加工能率と切削抵抗という観点で比較してみました。その結果を、図2.3.21に示します。



エンドミル：コーティング超硬エンドミル
φ10 4枚刃
被削材質：S50C
切削速度：70m/min
送り量：0.03~0.15mm/t
切込深さ： $a_p=10\text{mm}$ $a_e=0.5\text{mm}$
切削油剤：乾式



エンドミル：コーティング超硬エンドミル
φ10 4枚刃
被削材質：S50C
切削速度：20~200m/min
送り量：0.07mm/t
切込深さ： $a_p=10\text{mm}$ $a_e=0.5\text{mm}$
切削油剤：乾式



エンドミル：コーティング超硬エンドミル
φ10 4枚刃
被削材質：S50C
切削速度：70m/min
送り量：0.07mm/t
切込深さ： $a_p=10\text{mm}$ $a_e=0.2\text{mm} \sim 1.5\text{mm}$
切削油剤：乾式

図 2.3.21 1分間当たりの切削体積と切削抵抗

切削速度70m/min、1刃当たりの送り量0.07mm/t、切込深さ $a_p = 10\text{mm}$ 、 $a_e = 0.5\text{mm}$ を基準として、切削速度、送り量、径方向切込深さのそれぞれを変化させた時の、1分間当たりの切削体積と切削抵抗の比較を行いました。

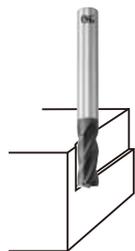
切削速度が低速領域(20m/min～50m/min)では、1分間当たりの切削体積に対する切削抵抗(切削抵抗/1分間当たりの切削抵抗)は大きくなりますが、切削速度を上げて加工能率を向上させていっても、切削抵抗の増加は少ないことが分かります。

一方、切込深さの増加で加工能率を向上させようとすると切削抵抗が顕著に増加していきます。1刃当たりの送り量の増加も同様な結果を招くため、切込深さを大きくすると1刃当たりの送り量は小さくする必要

が生じます。

図2.3.22には、切削速度、切込深さ、送り量を変化させた時の刃先における切削熱の変化をシミュレーションした結果を示します。

いずれを増加させても、切削熱は上昇しますが、切削速度を上昇させると切削熱は最も顕著に増加することがわかります。



エンドミル：コーティング超硬エンドミル
 $\phi 10$ 4枚刃
 被削材質：SKD61 (48HRC)
 切削方向：ダウンカット
 切込深さ： $a_p=10\text{mm}$
 切削油剤：乾式

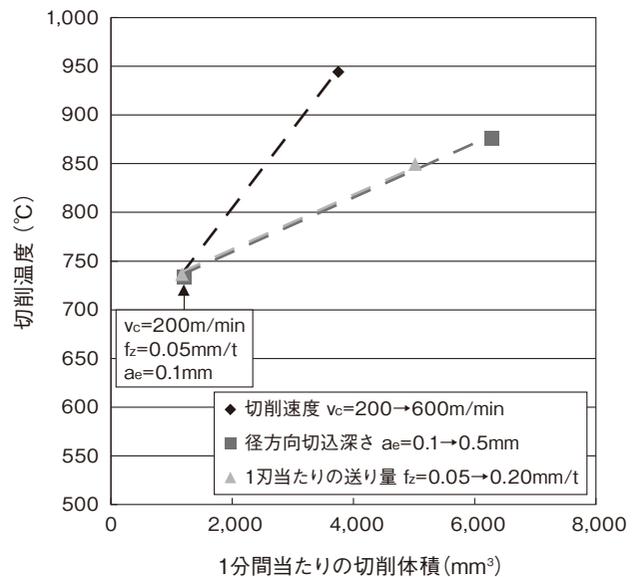
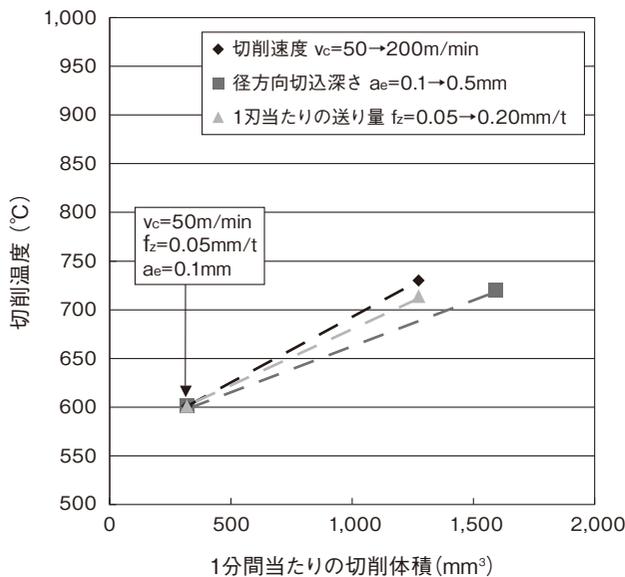
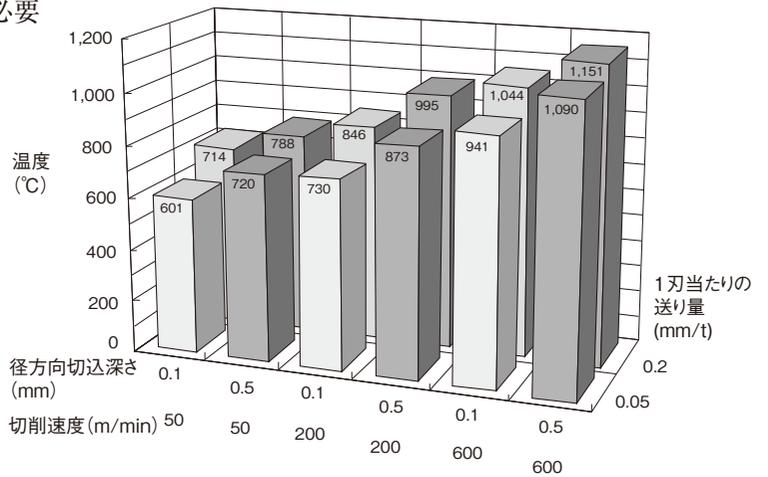


図 2.3.22 各切削条件における切削熱のシミュレーション結果

但し、これらの熱がすべて工具に伝わるか否かについては先述したように加工物や切りくずと工具の接触時間によって決まるため、切込深さが大きい時は、切削熱の工具への流入が増加すると考えられます。以上をまとめると次のようなことが言えます。

切込深さを大きくすると切削抵抗が増大するため、これを軽減するためには1刃当たりの送り量を小さくする必要があります。切込深さを大きくすると切削熱の発生は増加するばかりか、エンドミル刃先への熱の伝達を助長することとなるため、切削速度を小さくして発熱量を軽減する必要があります。

(4) ピックフィード

金型の自由曲面加工などをする際のエンドミルの送り方向に対して直角方向のずらし量をピックフィードと言います。(図2.3.23)

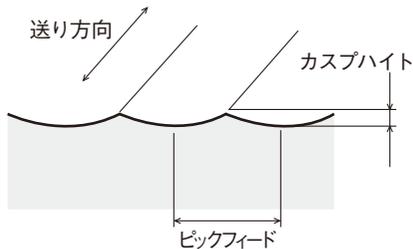


図 2.3.23 ピックフィードとカスプハイト

そして、このピックフィードとボールエンドミルのRによって決まる山の高さをカスプハイトと呼びます。送り方向に対して直角方向の幾何学的な面粗さは、このカスプハイトで決まります。(図2.3.24)

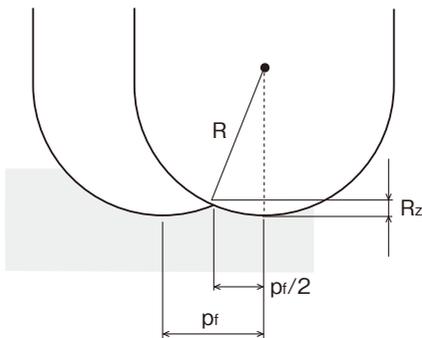


図 2.3.24 ボールエンドミル加工での理論面粗さ

$$R_z = R - \sqrt{R^2 - (pf/2)^2} \dots \dots \dots (5)$$

- R_z : 理論粗さ
- R : ボール半径
- pf : ピックフィード

この時、近似的に

$$R_z = pf^2/8R \dots \dots \dots (6)$$

で表すこともあります。

一方、送り方向の面粗さは、1刃当たりの送り量で決定されることとなりますが、現実には主軸、ホルダ、工具それぞれの振れはゼロではないため、これらの振れを累積した工具軌跡として一回転当たりの送りが面粗さを決定することとなります。

したがって、回転当たりの送り量に対して必要以上にピックフィードを小さくしても、送り方向の面粗さは改善されず、逆にピックフィードを大きくすれば、仕上げ面粗さを改善しようと回転当たりの送り量をいくら小さくしても意味の無いことになってしまいます。

図2.3.25には、回転当たりの送り量とピックフィードの値を同じにしたときの加工面の状態を示します。この場合は、面粗さに方向性のない切削面を得ることができます。

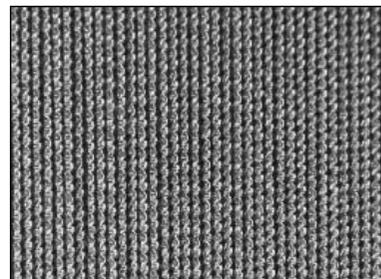
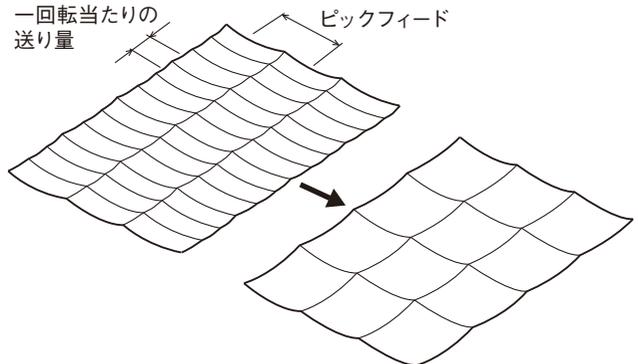


図 2.3.25 送り量とピックフィード

(5) 切削方向

図2.3.26にアップカット（上向き削り）とダウンカット（下向き削り）を示します。

エンドミルの回転に対する送り方向によってアップカットかダウンカットかが決まります。ただし、溝切削においては、アップカットから切削が始まり、途中からダウンカットに変わることになります。（図2.3.27）

溝切削でなくても、径方向切込みがエンドミル半径を越える場合や、切削する領域が工具中心の両側にまたがる場合は、アップカットとダウンカットが混在する加工となります。（図2.3.28）

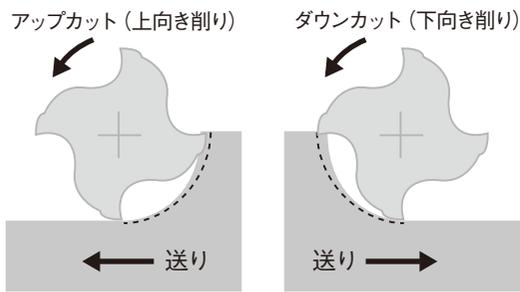


図 2.3.26 アップカット(上向き削り)とダウンカット(下向き削り)

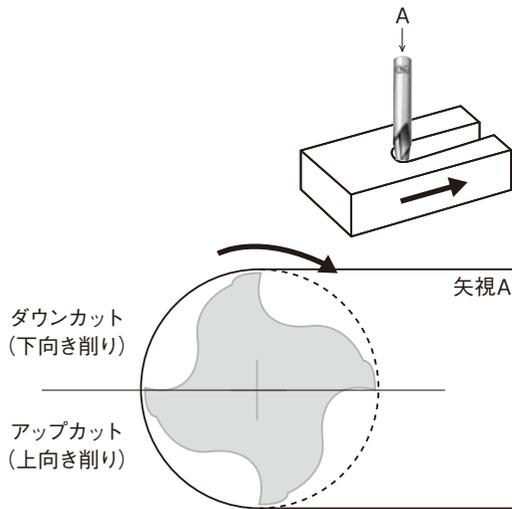


図2.3.27 溝切削時の切削方向(アップカットとダウンカット)

アップカットでは、加工物への刃先の切込みがゼロから始まり次第に厚くなります。ダウンカットでは、逆に切込みが次第に小さくなる方向で切削が進みます。

一般に、微小切込みの仕上げ削りでは、アップカットの方が良好な仕上げ面が得られやすくなります。

一方、ダウンカットは、逃げ面の機械的こすり摩擦の進行が緩やかになる傾向にあり、工具寿命がアップカットに比べ長くなります。

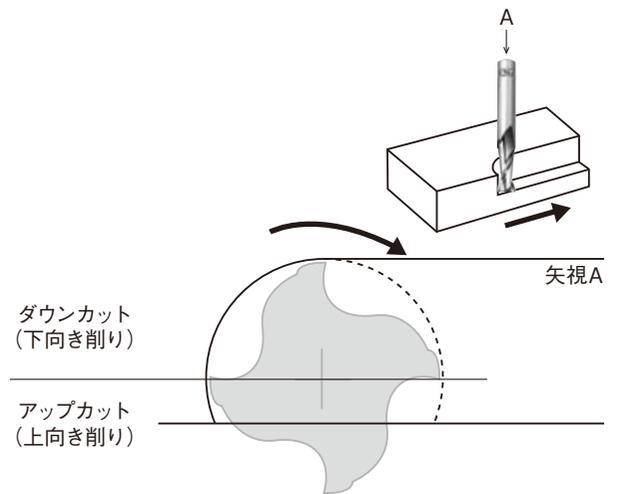
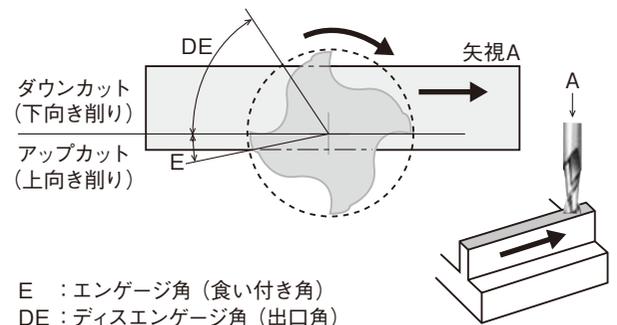


図 2.3.28 アップカットとダウンカットの混在(径方向切込み>工具半径)



	小	大
エンゲージ角	—————	上滑り現象発生。 こすり摩擦大。
ディスエンゲージ角	チップング発生。(0°) バリやこぼ欠けを発生。(負)	—————

図 2.3.29 アップカットとダウンカットの混在

図2.3.30に、実際にアップカットとダウンカットで摩耗の推移を比較した試験結果を示します。

エンドミル：コーティング超硬エンドミルφ10 6枚刃
 被削材質：S50C
 回転速度：3,200min⁻¹(100m/min)
 送り速度：1,300mm/min(0.068mm/t)
 切込深さ： $a_p=10\text{mm}$ $a_e=0.5\text{mm}$
 切削油剤：水溶性切削油剤

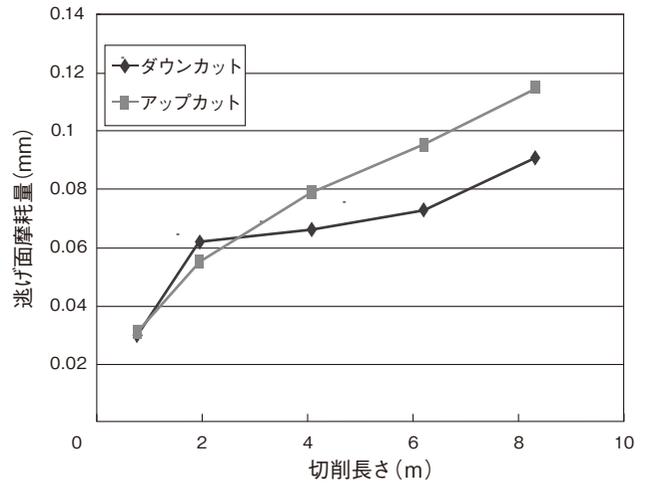


図 2.3.30 アップカットとダウンカットでの摩耗推移の違い

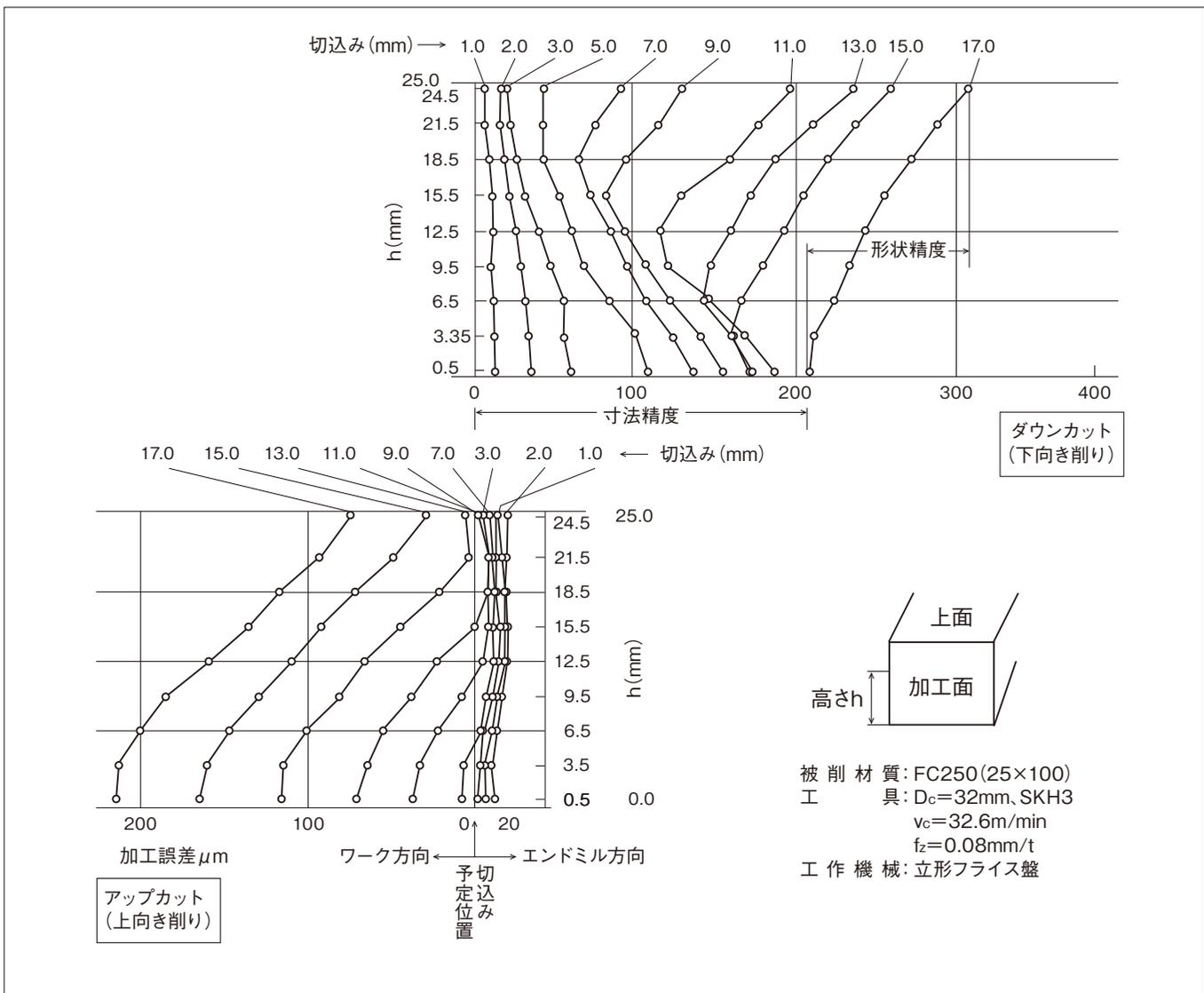


図 2.3.31 切削方向と形状精度 (切削油技術研究会 フライス加工ハンドブック 1988 引用)

表10、表11には、アップカットとダウンカットの特徴の比較を示します。

表 10 切削方向の違いによる逃げ角とすくい角の変化 (切削油技術研究会 フライス加工ハンドブック 1988 引用)

	アップカット (上向き削り)	ダウンカット (下向き削り)
切削状態		
逃げ角 α	切削中の逃げ角は減少	
すくい角 γ	切削中のすくい角は増加	
逃げ角 α	<ul style="list-style-type: none"> ・切削始めにおいて最大 ・切削終りににおいて最小 	<ul style="list-style-type: none"> ・切削始めにおいて最小 ・切削終りににおいて最大
すくい角 γ	<ul style="list-style-type: none"> ・切削始めにおいて最小 ・切削終りににおいて最大 	<ul style="list-style-type: none"> ・切削始めにおいて最大 ・切削終りににおいて最小

表 11 アップカットとダウンカットの比較 (切削油技術研究会 フライス加工ハンドブック 1988 引用)

項目	アップカット (上向き削り)	ダウンカット (下向き削り)
加工面の理論粗さ	$R_z = \frac{f_z^2}{8(D_c/2 + (f_z \cdot z) / \pi)}$	$R_z = \frac{f_z^2}{8(D_c/2 - (f_z \cdot z) / \pi)}$
	f_z : 1 刃当りの送り量	D_c : エンドミル刃部外径 z : 刃数
切削抵抗	<ul style="list-style-type: none"> ●送り方向 (送り分力): ダウンカットに比べ大きい。 ●直角方向 (主分力): ダウンカットに比べ小さい。 	<ul style="list-style-type: none"> ●送り方向 (送り分力): アップカットに比べ小さい。 ●直角方向 (主分力): アップカットに比べ大きい。
工具寿命	●切取り厚さゼロから始まるので切れ刃が加工物に食い込むまでは表面をすべるため、逃げ面摩耗の進行が早くなる。	<ul style="list-style-type: none"> ●すべり現象を起こさずに切削が開始されるのでアップカットに比べ逃げ面摩耗の進行が遅くなる。 ●切削が工作物の表面から始まるので、鋳鉄などの表面の硬い加工物を加工する場合は、切れ刃の摩耗が大きくなる。
テーブル送りとバックラッシュ	<ul style="list-style-type: none"> ●テーブル送りの消費動力が大きい。 ●バックラッシュは自然に除去される。 	<ul style="list-style-type: none"> ●テーブル送りの消費動力が小さい。 ●バックラッシュの除去を要する。
衝撃および振動	●切取り厚さはゼロから次第に厚くなり最後は急にゼロになるため、この時に衝撃力が働く。	<ul style="list-style-type: none"> ●最大切取り厚さから切削が始まり次第に減じていくため、切れ刃が加工物に食い込む時に衝撃が働く。 ●アップカットに比べ振動を生じやすいため、機械剛性を必要とする。
加工面の形状精度	図 2.3.31 による。	

(6) 切削油剤

切削油剤の主な効果としては、潤滑効果、冷却効果、切りくずの強制排出効果などが挙げられます。

潤滑効果の作用としては、切りくずと切れ刃すくい面、あるいは新生加工面と切れ刃逃げ面の間に生ずる摩擦を軽減し、工具摩耗を減少させるとともに、切削抵抗や発熱量を減少させます。また、せん断角を増加させ切りくず厚さを減少させたり、切りくずの連続性を高めることで振動の軽減を図ります。そして、こうした作用の結果として仕上げ面粗さの向上が図られます。

さらに、切削中のエンドミル切れ刃すくい面を摩擦する切りくずの表面は新生面で、酸化物やその他の汚れがほとんどなく、化学的に活性な状態にあります。もちろん、切りくずに摩擦されるエンドミルのすくい面も清浄になっていると考えられます。したがって切りくずとすくい面とは凝着を起こしやすい状態にいつも置かれていると言えます。

切削油剤は、こうした切りくずとすくい面の間に介在して、凝着を防止する効果もあります。

冷却効果は、熱膨張を減らして寸法精度の低下を防止したり、エンドミルの刃先温度を下げて刃先の軟化を防ぎ、工具寿命の延長をもたらします。

しかし、発熱と急冷却を繰り返すことで大きな熱応力が生じ、サーマルクラック（熱亀裂）を発生させたり、刃先温度を下げるために構成刃先を発生させ、かえって加工面粗さを悪化させてしまうこともあるため注意が必要です。

こうした問題への対応としては、冷却効果を伴わず潤滑効果だけを高めるMQL（Minimum Quantity Lubrication）と呼ばれる超微量の切削油剤をエアに混合しミスト状にして供給する方法があります。

また、清浄面での化学的な反応を防止するために不活性ガスである窒素を充填する窒素切削などの方法もあります。

さらに、過冷却の状態をもたらさず切りくずの強制排出を行う上では、エアブローでの対応も大変効果的です。

2.4 エンドミルの各部要素と切削特性

(1) ねじれ刃と切削特性

シャンク側より見て、切れ刃が右側にあるものを右刃、左側にあるものを左刃と言います。右刃は右回転、左刃は左回転で使用することになります。

また、ねじれの向きも右ねじれと左ねじれがあります。このねじれの向きと切れ刃の向きの組み合わせで、4通りがあるわけですが、通常は右刃右ねじれが使用されます。(図2.4.1)

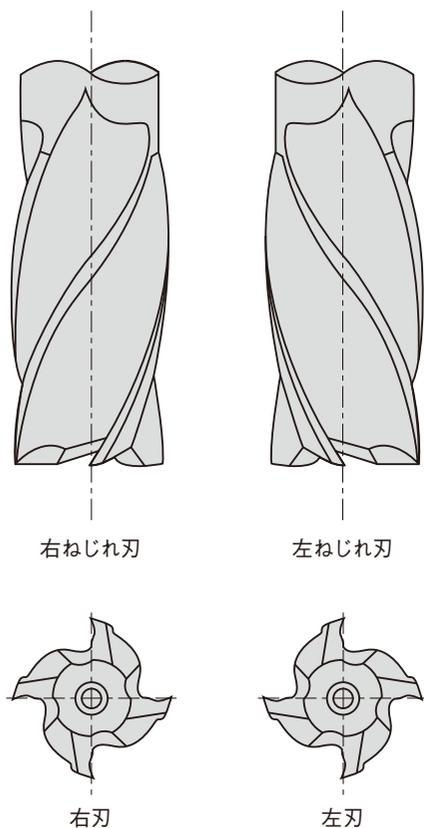


図 2.4.1 ねじれの向きと切れ刃の向き

右刃右ねじれや左刃左ねじれの場合は、切りくずは底刃側からシャンク側に向かって流れることとなります。このとき切削抵抗は、ねじの原理により、エンドミルを加工物の方向へ引き抜くように作用します。

逆に左刃右ねじれや右刃左ねじれの場合は、切りくずが底刃側に向かって流れることとなります。このとき、切削抵抗はエンドミルをシャンク側に向かって、加工物から押し出す方向に作用します。

図2.4.2の切削状況でわかるように底刃を使用する場合は、右刃左ねじれや左刃右ねじれのエンドミルでは、アキシャル方向(軸方向)のすくい角がネガティブ(負の角度)となり、切りくず厚さは厚くなり、切りくずは折り曲げられるように不連続に生成されるため、良好な切削ができません。

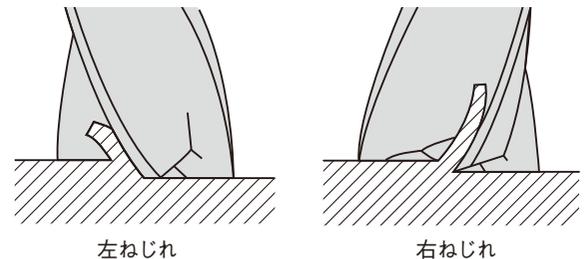


図 2.4.2 右刃の左ねじれと右ねじれの切削

しかし、底刃を使用しない加工の場合は、エンドミルに抜け勝手の力が働かないとか、バリが加工物の上面に出ないなどの理由で、こうした切れ刃とねじれの向きのエンドミルを使用することがあります。

ここでは、最も一般的な右刃右ねじれ溝について説明します。

図2.4.3に、溝がねじれていない直刃のエンドミルと、ねじれ溝のエンドミルのそれぞれで切削を行った場合の、切削抵抗の変動を示します。ねじれのない直刃のエンドミルでは、切削が極端な断続切削となり、切削抵抗の変動が大きくなります。ねじれ溝の場合は、この変動が小さく滑らかになります。

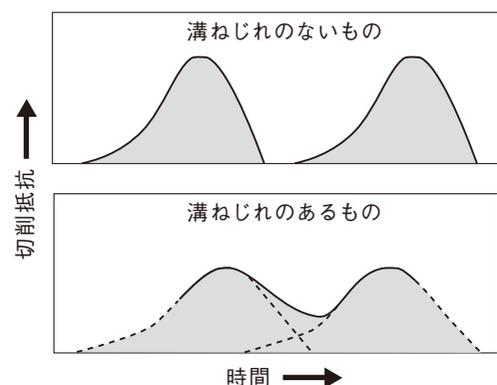


図 2.4.3 切削抵抗の変動

また図2.4.4のように、ねじれ溝エンドミルでは、切削抵抗がエンドミルの軸方向と送り方向の分力に分けられます。その結果、送り方向の切削抵抗が直刃の場合より小さくなり、その分、送り速度が上げられるようになります。

ねじれ溝により形成される切れ刃は、ねじれのない直刃の場合と比べると、同一の切削を長い切れ刃で行うこととなり、さらには実際に切削しているポイントは、時間の経過とともに移動することとなります。このため切削の負荷が分散され、重切削（送り速度や切込深さの増加）を可能とします。

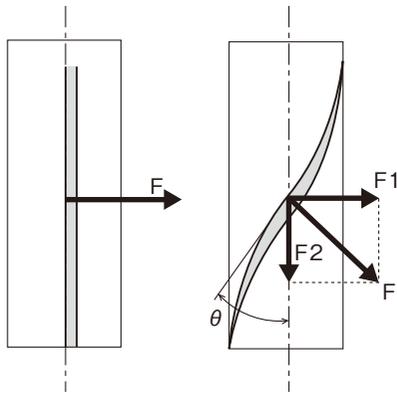


図 2.4.4 切削抵抗と分力

また、ねじれ溝の切れ刃による切削では、生成される切りくずの厚さが、直刃の場合より薄くなります。

これは、カンナをかける時に、少し斜めに構えて引いたほうが、上手く削れるのと同じような現象がねじれ溝によって発生していると考えればわかりやすいかと思います。（図2.4.5）

右ねじれ溝はアキシヤル方向（軸方向）に大きなポジティブ（正の角度）のすくい角を形成します。

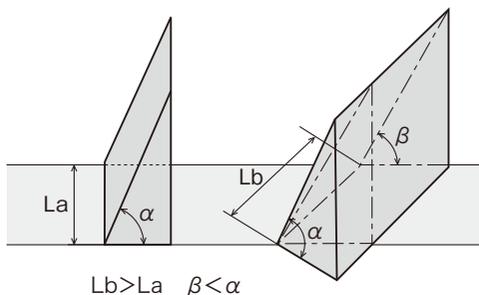


図 2.4.5 傾斜の効果

さらに、ねじの原理により切りくずは、ねじれ溝に沿って流れ出るため、切りくずの排出においても有効な作用をします。

しかし、その反面、ねじれ角が大きくなればなるほど、軸方向分力は大きくなり、エンドミルがホルダから抜けやすくなったり、薄肉加工物の切削では、加工物を上方に持ち上げる力が働いて、びびり振動を誘発する原因となったりします。

あるいは、ねじれ角が大きくなればなるほど、コーナ部分は鋭利になり強度は低下することとなります。このため、ねじれ角が大きいほど、コーナ部分の欠損を招きやすくなります。（図2.4.6）

また、鋭利なコーナ部分は、切削加工時に加工物に食い込みやすくなり、加工内容によっては、被削面のうねり現象を発生させる原因となることもあります。

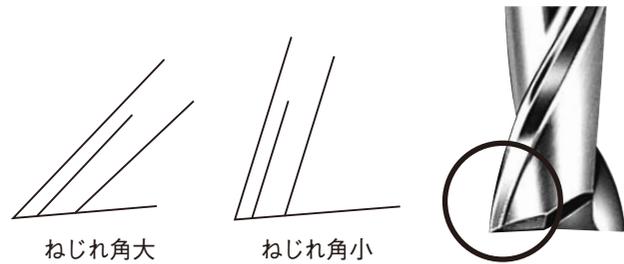
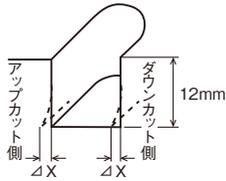
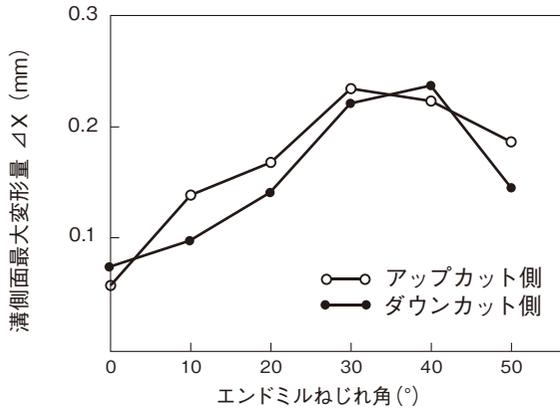


図 2.4.6 ねじれ角とコーナ形状

図2.4.7に、ねじれ角の異なるエンドミルで溝加工を行ったときの変位量（たおれ量）を比較した試験結果を示します。



エンドミル：HSS φ12 2枚刃
 被削材質：SNC28 (HB269)
 切削速度：29m/min
 送り速度：50mm/min
 切込深さ： $a_p=12\text{mm}$
 切削油剤：不水溶性切削油剤

図 2.4.7 ねじれ角と溝加工における倒れ量
 (切削油技術研究会 フライス加工ハンドブック 1988)

ねじれ刃のエンドミルで溝切削を行う場合には、切削開始時はアップカット側において、エンドミルコーナ部分が加工物に対して、食込み勝手に働き、時間の経過とともに切削位置がコーナ部からシャンク側へと移って行きます。そして切削位置がシャンク側に移るに従い、たわみ量も減少します。

このアップカット側でのコーナの食い込み現象は、エンドミルのねじれ刃と加工溝の深さの関係が図2.4.8のようになった時に最も顕著に現れます。

この時、

$$(\pi \cdot D_c / 4) / h = \tan \beta \dots\dots\dots (7)$$

- π : 円周率
- D_c : エンドミル直径
- h : 加工溝の深さ
- β : エンドミルのねじれ角

となります。

つまり、アップカット側のコーナが切削を開始する時に、溝深さ全域にわたってダウンカットが行われており、アップカット側にはコーナ部以外は切れ刃が無いいため、エンドミルを最も大きくアップカット側にたわませる状況にあります。

この状態よりねじれ角が小さければ、たわみ量は減少することになるし、ねじれ角が大きい場合も、切削開始時にダウンカットに加えてアップカットも行われる位置に切れ刃があり、多少たわみが緩和される傾向にあります。

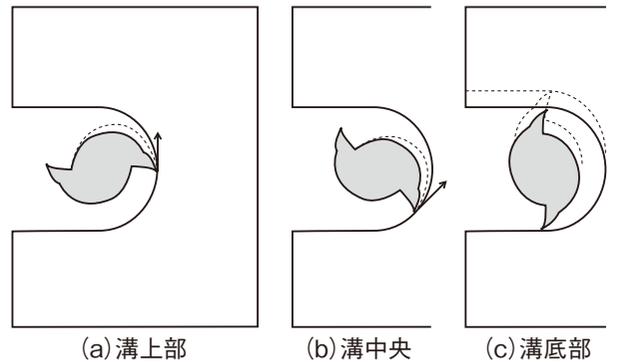
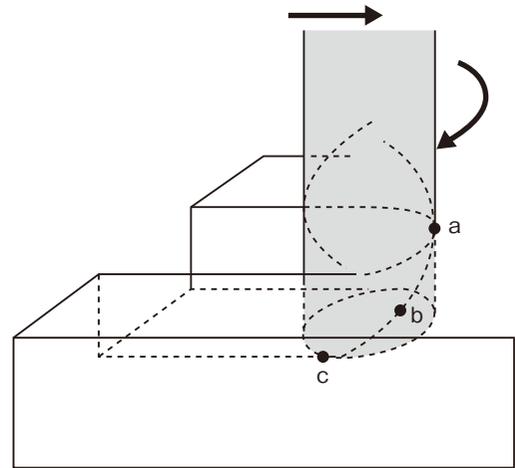


図 2.4.8 溝の倒れ

図2.4.9は、側面切削におけるエンドミルのねじれ角と加工面精度の関係を示したものです。

ねじれ角の変化により、切れ刃の加工物への接触長さも変わります。ここでは、接触長さの計算値と、実際の試験による加工面の倒れ量の値を示します。

切れ刃の接触長さと加工面の倒れ量との間には、相関関係が見られます。

エンドミルのねじれ刃による切削のメカニズムはなかなか難しく、このすべてを簡潔明瞭に説明することは困難ですが、ここでは一般的な現象についてのみ簡単に説明をしました。

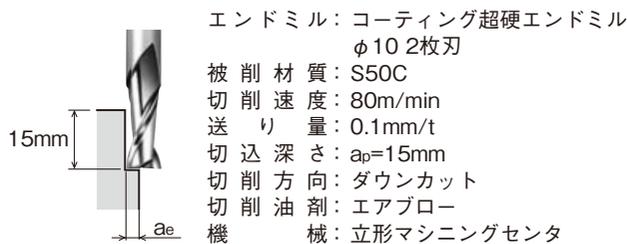
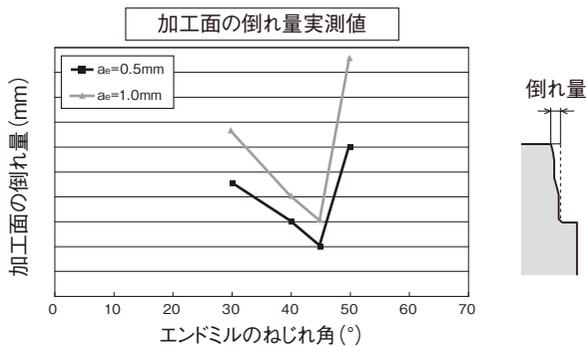
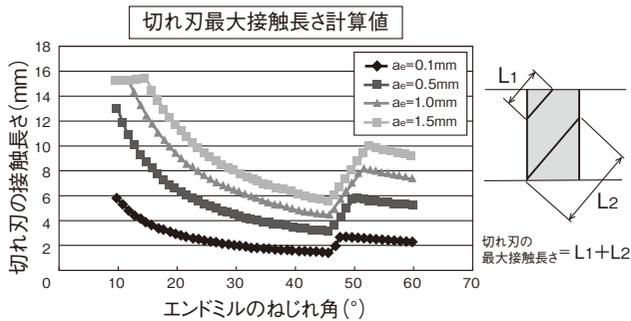


図 2.4.9 ねじれ角と加工精度

(2) 刃数と切削特性

刃数とチップポケットの関係については、既に説明をしましたが、刃数の違いによる切削特性としては、次のようなことも忘れてはなりません。

刃数が多くなれば、図2.4.10のように、切れ刃の加工面への同時接触点が増加することになります。

図2.4.11には、刃数とねじれ角が変化した時の、加工物への最大接触切れ刃長さの関係を示します。接触切れ刃長さの増加による切削抵抗の増加傾向は、前項の図2.4.9で説明したとおりです。

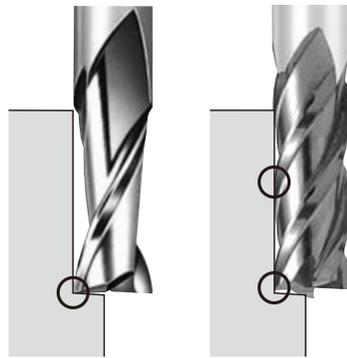


図 2.4.10 刃数の増加による切れ刃接触点の増加

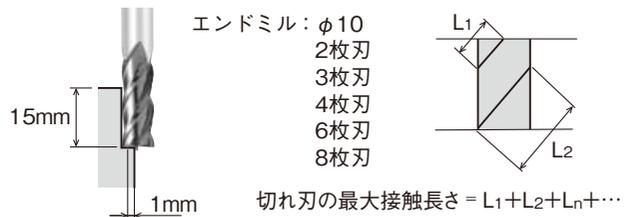
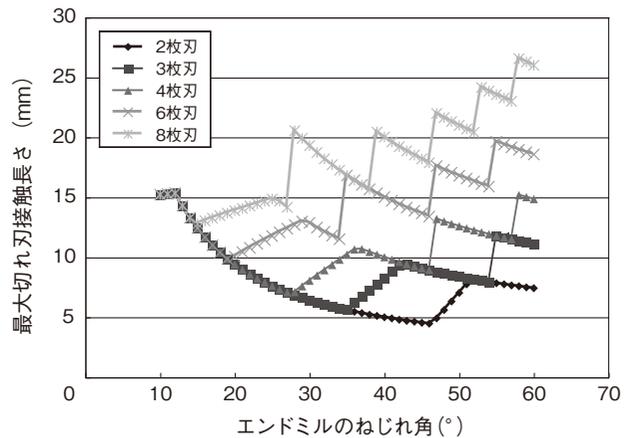


図 2.4.11 刃数とねじれ角と最大接触切れ刃長さ

(3) 外周刃形状と切削特性

エンドミルの中には、図2.4.12に示すような外周刃が波状になったラフィングエンドミルがあります。これは、その名前の通り荒削り専用のエンドミルです。

ラフィング刃（波状の外周刃）では、切削がその山頂部分で行われるため、切りくずが細かく分断されるとともに、緻密となるため、切りくずの排出性が改善されます。また、通常エンドミルに比べて波状形状のため、被削材への食い付きがよく、刃先のこすり現象が少なくなるとともに、同時に被削材に接触する刃長が短くなるため、びびり振動が生じにくくなります。さらに、波状の形状は、表面積を大きくするため、切削熱の発散効率を高めるとともに、その谷部が切削油剤の浸透性を助け、切削時の冷却、潤滑の作用を高めます。

以上のような理由により、ラフィングエンドミルは切削抵抗を軽減する効果があり、その分、大きな切込みによる重切削を可能とします。



図 2.4.12 ラフィングエンドミル

図2.4.13は、通常エンドミルとラフィングエンドミルとで切削動力を比較測定した結果です。ラフィングエンドミルの切削動力は、通常エンドミルの15～30%減となっていることがわかります。

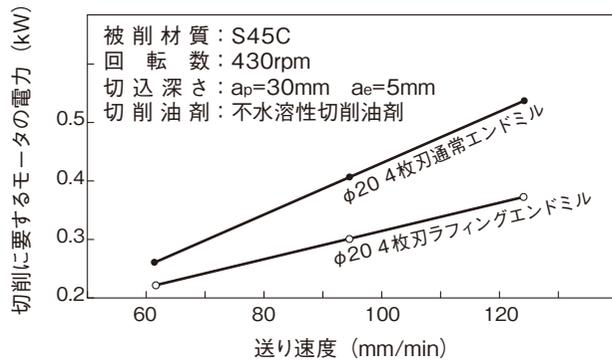


図 2.4.13 ラフィングエンドミルによる切削動力の低減

図2.4.14には、外周刃にニックと呼ばれる細い溝を設けたエンドミルを紹介します。このニックも波状の外周刃と同じような作用があり、切りくずを細かく分断するとともに、びびり振動の防止や、切削抵抗軽減の効果があります。

波状の外周刃では、その形状から分かるように、加工面の粗さは、概ね $100\mu\text{mRz}$ 程度となってしまいますが、図2.4.14のような外周刃形状であれば、 $20\sim 50\mu\text{mRz}$ 程度とすることも可能となります。

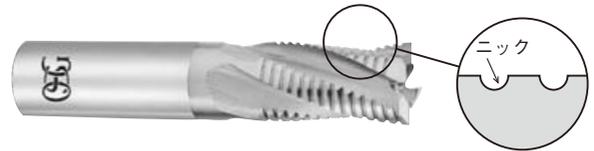


図 2.4.14 ニック付きエンドミル

図2.4.15は、スローアウェイチップを取り付けるタイプの荒加工用エンドミルです。チップの配列が、ニック付きの外周刃と同じような効果を生むよう（階段状に）に設定されています。



図 2.4.15 スローアウェイラフィングエンドミル

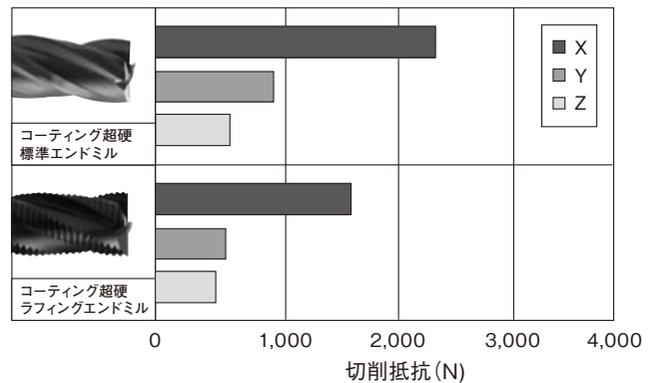
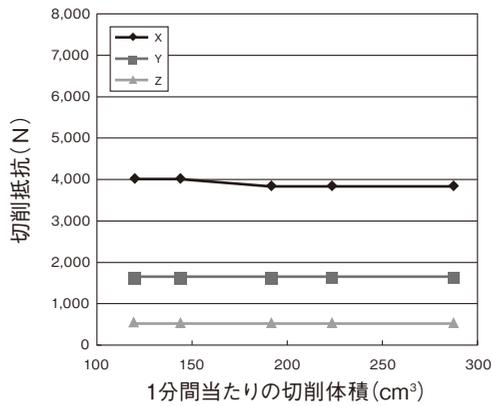
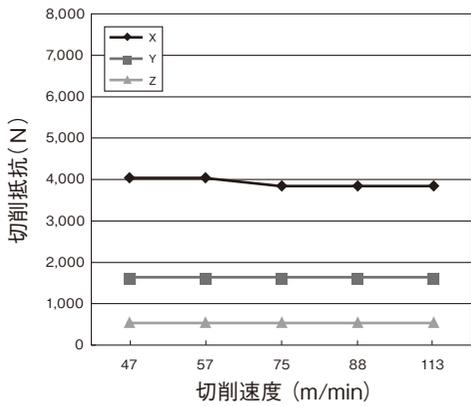
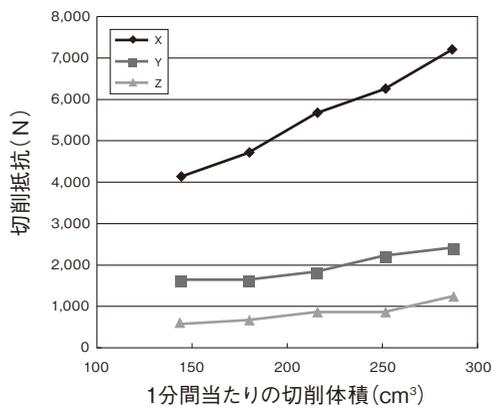
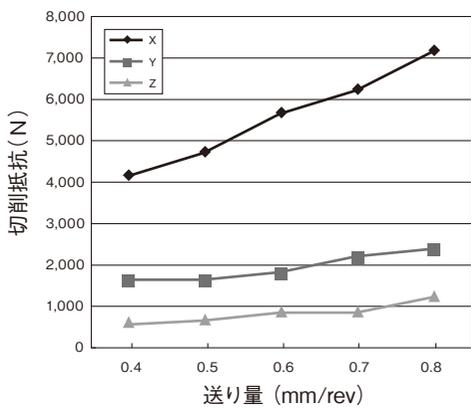


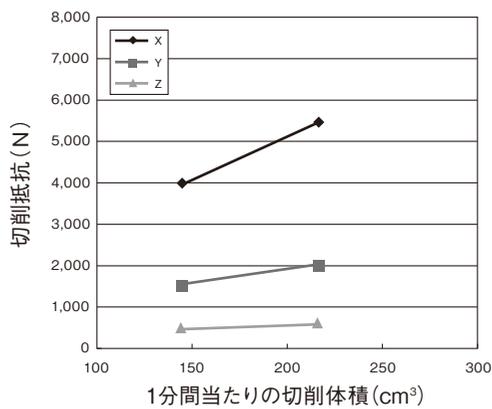
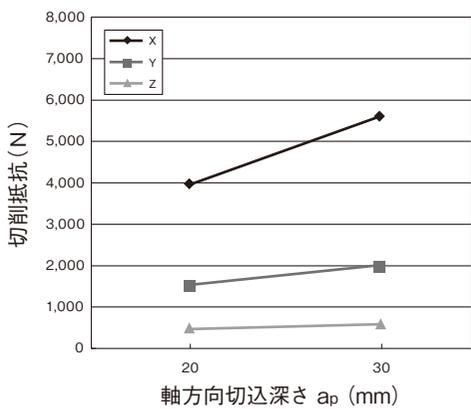
図 2.4.16 ラフィングエンドミルの切削抵抗



エンドミル：コーティング粉末HSS
ラフィングエンドミル
φ20 4枚刃
被削材質：S50C
切削方法：溝切削
切削速度：47~113m/min
送り量：0.4mm/rev
切込深さ： $a_p=20\text{mm}$
切削油剤：エアブロー



エンドミル：コーティング粉末HSS
ラフィングエンドミル
φ20 4枚刃
被削材質：S50C
切削方法：溝切削
切削速度：57m/min
送り量：0.4~0.8mm/rev
切込深さ： $a_p=20\text{mm}$
切削油剤：エアブロー



エンドミル：コーティング粉末HSS
ラフィングエンドミル
φ20 4枚刃
被削材質：S50C
切削方法：溝切削
切削速度：57m/min
送り量：0.4mm/rev
切込深さ： $a_p=20\text{mm}$ 、 30mm
切削油剤：エアブロー

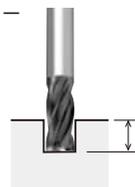


図 2.4.17 ラフィングエンドミルの切削量と切削抵抗

(4) 刃長 (L/D) の影響

図2.4.18のように上端を固定した丸棒において、一般に次のような関係が成り立ちます。

$$\delta = (F \cdot L^3) / (3 \cdot E \cdot I) \dots\dots\dots (8)$$

- δ : たわみ量
- F : 曲げ方向に加えた力 (F₁、F₂、F₃)
- L : 丸棒の長さ
- E : 縦弾性係数
- I : 断面2次モーメント

ここで、

$$I = \pi \cdot D^4 / 64 \dots\dots\dots (9)$$

D : 丸棒の直径

このとき、(8)、(9)式より、FはDの4乗に比例し、Lの3乗に反比例するため

$$F_2 = 1/2^3 F_1 = 1/8 F_1 \dots\dots\dots (10)$$

$$F_3 = 2^4 F_1 = 16 F_1 \dots\dots\dots (11)$$

となります。

つまり、長さが2倍(2L)の丸棒は、長さLの丸棒のわずか1/8の力で、δのたわみを生じてしまうということです。したがってエンドミルの刃長(突出し長さ)が2倍になると剛性は1/8に低下してしまいます。

また、丸棒の直径Dが2倍の2Dになると、剛性は16倍となります。

つまり、エンドミルの外径が2倍になると、剛性は16倍になるということです。

この刃長(突出し長さ)と外径の比率のことを、アスペクト比やL/D(エルバイディ)と表現します。

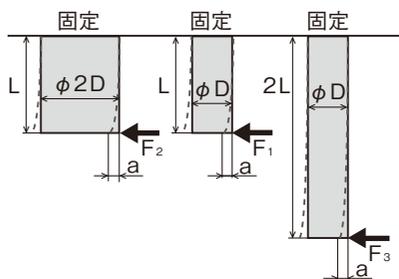


図 2.4.18 丸棒の曲げ強さ

図2.4.19には、刃長と加工精度(加工面のたおれ量)を調査した結果を示します。刃長が長くなれば、エンドミルのたわみ量も大きくなり、加工精度も悪くなります。さらに、図2.4.20のように、刃長が長くなると、工具寿命も短くなってしまいます。

エンドミル：超硬エンドミル φ10 2枚刃
刃長 22mm、28mm、34mm
被削材質：SKD61(40HRC)
切削速度：30m/min
送り量：0.02mm/t
切込深さ：a_p=10mm a_e=0.5mm
切削方向：アップカット
切削油剤：不水溶性切削油剤
機 械：立形マシニングセンタ

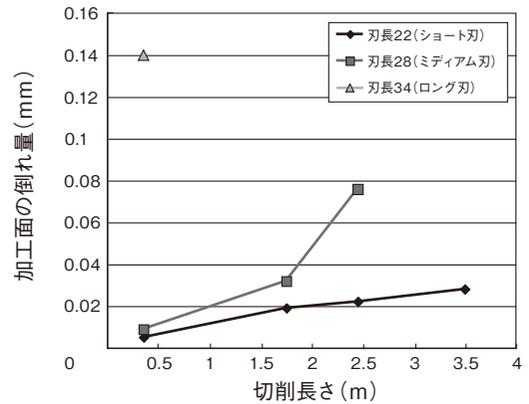


図 2.4.19 刃長と加工精度

エンドミル：超硬エンドミル φ10 2枚刃
刃長 22mm、28mm、34mm
被削材質：SKD61(40HRC)
切削速度：30m/min
送り量：0.02mm/t
切込深さ：a_p=10mm a_e=0.5mm
切削方向：アップカット
切削油剤：不水溶性切削油剤
機 械：立形マシニングセンタ

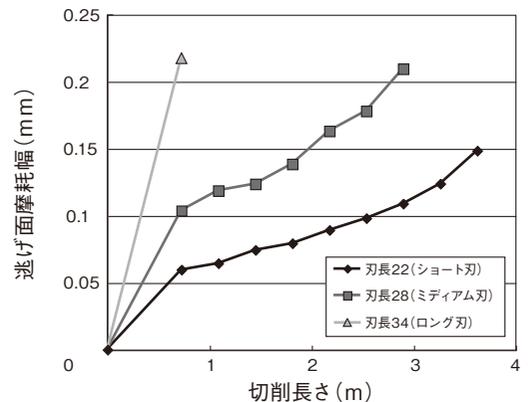


図 2.4.20 刃長と逃げ面摩耗の推移

図2.4.21の試験では、刃長が2倍になると、工具寿命は1/10以下になっています。

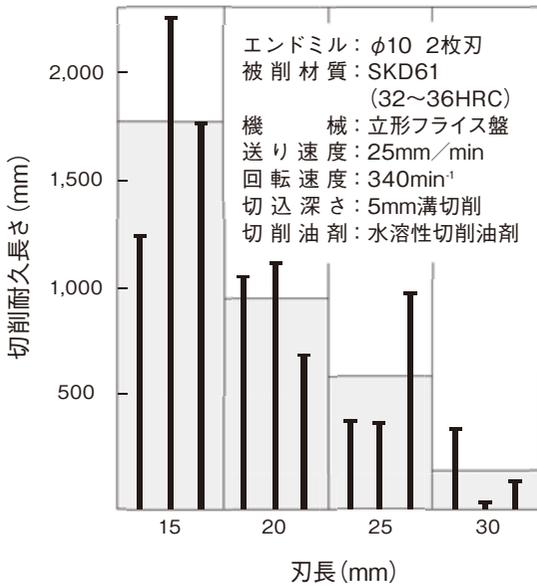


図 2.4.21 刃長と工具寿命

図2.4.22には超硬ソリッドボールエンドミルを用いた工具突出し長さと切削適応領域を調査した結果を示します。

突出し長さが大きくなれば、切削時に生ずる曲げモーメントは増大します。これが、びびり振動の発生領域を拡大させることとなります。

ここでは、単純モデルで説明をしましたが、実際の加工においては、主軸端面からのホルダも含めた突出し量を考慮することが必要となります。

エンドミル：コーティング超硬エンドミル φ10 2枚刃
突出し長さ (L/D) 40mm, 60mm, 80mm
被削材質：NAK55(40HRC)
回転速度：3,350, 7,000min⁻¹
送り量：0.025~0.2mm/t
切込深さ： $a_p=1\sim3$ mm
切削油剤：エアブロー
機 械：立形マシニングセンタ (BT40)

L/D=4 における切削領域



切削速度	軸方向 切込深さ	切 削 状 況							
		○:切削音小 △:切削音中 ×:切削音大、びびり発生							
105m/min (3,350min ⁻¹)	3mm (0.3D)	○	○	○	○	○	○	○	○
	2mm (0.2D)	○	○	○	○	○	○	○	○
	1mm (0.1D)	○	○	○	○	○	○	○	○
220m/min (7,000min ⁻¹)	3mm (0.3D)	○	○	○	△	△	△	△	△
	2mm (0.2D)	○	○	○	○	○	○	○	○
	1mm (0.1D)	○	○	○	○	○	○	○	○
1刃当たり送り量 (mm/t)		0.025	0.05	0.075	0.1	0.125	0.15	0.175	0.2

L/D=6 における切削領域



切削速度	軸方向 切込深さ	切 削 状 況							
		○:切削音小 △:切削音中 ×:切削音大、びびり発生							
105m/min (3,350min ⁻¹)	3mm (0.3D)	○	○	○	○	○	○	○	○
	2mm (0.2D)	○	○	○	○	○	○	○	○
	1mm (0.1D)	○	○	○	○	○	○	○	○
220m/min (7,000min ⁻¹)	3mm (0.3D)	×	×	○	△	△	△	△	△
	2mm (0.2D)	×	×	○	○	○	○	○	○
	1mm (0.1D)	×	○	○	○	○	○	○	○
1刃当たり送り量 (mm/t)		0.025	0.05	0.075	0.1	0.125	0.15	0.175	0.2

L/D=8 における切削領域



切削速度	軸方向 切込深さ	切 削 状 況							
		○:切削音小 △:切削音中 ×:切削音大、びびり発生							
105m/min (3,350min ⁻¹)	3mm (0.3D)	×	×	×	×	×	×	×	×
	2mm (0.2D)	×	○	○	○	○	○	○	○
	1mm (0.1D)	○	○	○	○	○	○	○	○
220m/min (7,000min ⁻¹)	3mm (0.3D)	×	×	×	×	×	×	×	×
	2mm (0.2D)	×	×	△	折損				
	1mm (0.1D)	×	×	△	○	○	△	△	△
1刃当たり送り量 (mm/t)		0.025	0.05	0.075	0.1	0.125	0.15	0.175	0.2

図 2.4.22 突出し長さと切削領域

(5) 底刃形状と切削特性

スクエアタイプとラジアスタイプとでは、図2.4.23のような同一切込深さ、同一送り量での切削を行った場合、切取り厚さが異なり、ラジアスタイプのほうが切取り厚さが薄くなることがわかります。

さらにこのラジアスタイプのR部にアキシャル方向（軸方向）のすくい角が設定されていたり、ねじれ刃仕様となっていれば、ねじれ刃の作用によりさらに薄い切りくずが生成されるとともに切削抵抗も分散（分力への分解ならびに時間的なずれ）がなされ、その分、1刃当たりの送り量が高められることとなります。

しかし、こうした切れ刃は、ねじれ刃の切削特性の項で説明したように、被削面への接触長さが長くなるため、これが前述の切削抵抗分散による軽減効果を上回る場合は、かえってびびり振動を誘発することもあるので注意が必要となります。

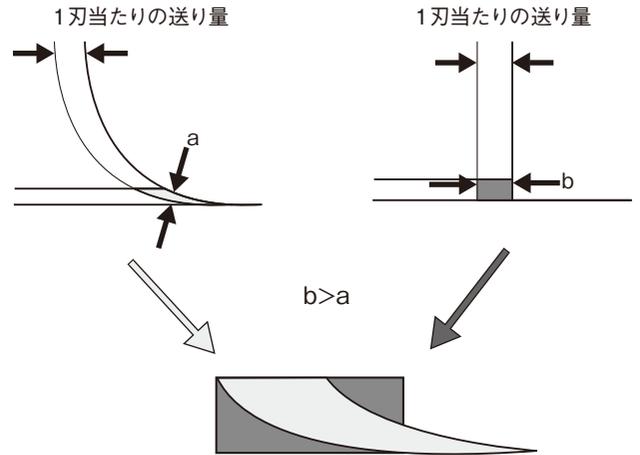


図 2.4.23 スクエアタイプとラジアスタイプの切取り厚さ



図 2.4.24 ラジアスタイプの事例

3. 各種被削材の切削特性

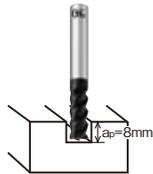
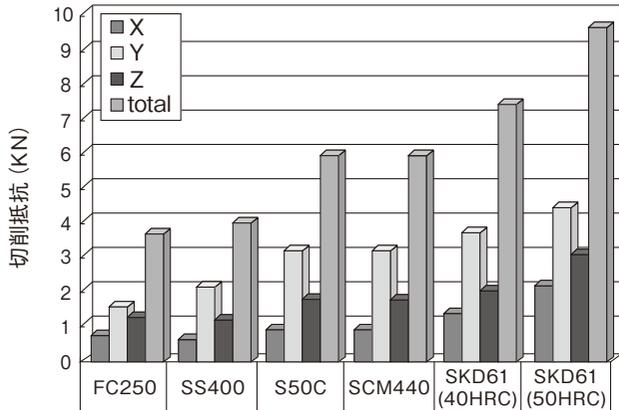
3.1 各種被削材の被削性

エンドミル加工における各種被削材の被削性を明確に示すような指標は残念ながらありません。工具摩耗の進行が遅く削りやすいと思っても、加工面粗さがなかなか得られないというようなことも多くあります。このような場合、工具摩耗という観点から見れば、削りやすいということになりますが、加工面粗さから見れば削り難いということになってしまいます。しかし、被削性を示す一つの尺度として切削抵抗の測定を行うことがあります。

図3.1.1に各種被削材質とそれぞれを切削したときの切削抵抗を調査した結果を示します。また、図3.1.2には、被削材の硬さと切削抵抗の関係を示します。

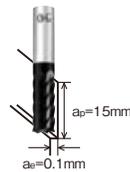
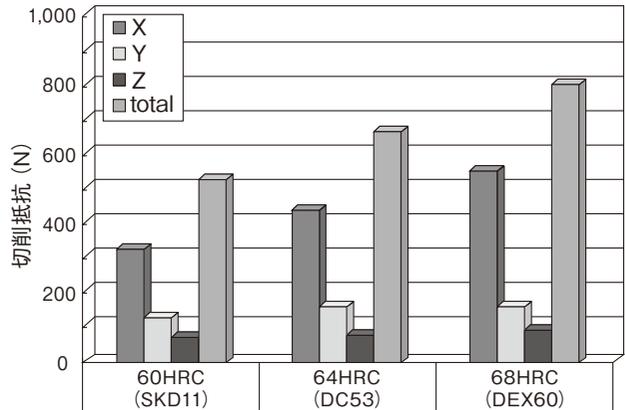
また、熱伝導率を被削性の判断材料として用いることもあります。熱伝導率が悪く比熱が大きければ、切削時に発生する熱は、エンドミルの刃先に流入しやすくなると考えられます。図3.1.3に各種被削材質の熱伝導率と比熱を示します。

その他、被削性の指標としては、旋削加工における被削性指数MR値も参考とされることがあります。被削性指数MR (Machinability Ratio) とは、一定の条件下で各種被削材質を旋削加工し、工具寿命が60分になる切削速度を求め、快削鋼の値を100として比較した数値のことです。(表12)



エンドミル：コーティング超硬強ねじれエンドミル φ16 4枚刃
 切削速度：1,000min⁻¹ (50m/min)
 送り量：500mm/min (0.125mm/t)
 切込深さ： $a_p=8\text{mm}$ (溝切削)
 切削油剤：エアプロー
 機 械：立形マシニングセンタ (BT40)

図 3.1.1 各種被削材質と切削抵抗



エンドミル：コーティング超硬エンドミル φ10 6枚刃
 回転速度：3,140min⁻¹ (100m/min)
 送り速度：942mm/min (0.3mm/rev)
 切込深さ： $a_p=15\text{mm}$ $a_e=0.1\text{mm}$
 切削方向：ダウンカット
 切削油剤：エアプロー
 機 械：立形マシニングセンタ (BT40)

図 3.1.2 被削材質の硬さと切削抵抗

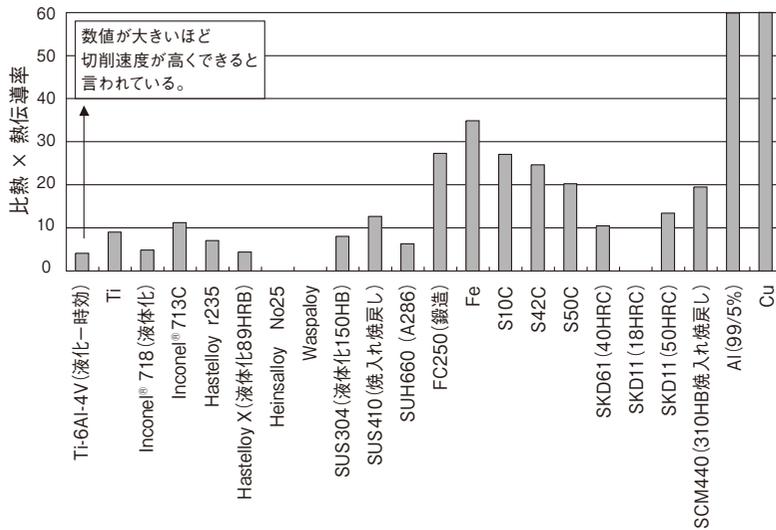


図 3.1.3 各種被削材質の比熱 × 熱伝導率

表 12 被削性指数 MR (Machinability Ratio)

MR	材 種
51 ~ 62	低合金鋼 SCM, SNCM
55	ステンレス鋼 SUS321, 403, 410など
45 ~ 61	低合金鋼 SNCM220, 240
50	ステンレス鋼 SUS304, 310など耐熱鋼 SUH
45	高C高Cr冷間用工具鋼SKD1, 11
40	Mo系高速度工具鋼
40	ステンレス鋼 SUS440
36 ~ 38	低合金鋼 Si-Mn鋼
37	熱間用工具鋼SKD4, 6, 61
26 ~ 46	低合金鋼 Cr-V鋼
34	W系高速度工具鋼
31	高合金形オーステナイト系耐熱鋼 16-25-6
29	チタン合金 Ti-5Al 2.5Sn
27	高合金形オーステナイト系耐熱鋼 A286
26	チタン合金 Ti-6Al-4V
15	Co基オーステナイト鋼 Multimet N155
15	Ni基耐熱合金 Inconel [®] X
13	チタン合金 Ti-3Al 5Cr, Ti-8Mnなど
12	Co基耐熱合金 HS-25
8	Ni基耐熱合金 Inconel [®] 700
6	Co基耐熱合金 (ステライト) HS-21, 31, X-40

3.2 各種被削材のエンドミル加工

(1) 鋼 (炭素鋼、焼入れ鋼など)

一般構造用鋼SS400や低炭素鋼S15C材などは、HSSエンドミルでも十分切削が可能であり、工具摩耗の進行も比較的穏やかですが、切りくずが溶着しやすいため仕上げ面にむしれが発生しやすくなります。

コーティング超硬エンドミルでは、低速で (切削速度 30m/min以下) 切削するよりも中高速域 (切削速度 70 ~ 150m/min程度) で切削するほうが、摩耗の進行が緩やかとなり工具寿命の延長が図られる傾向にあります。

また、仕上げ面の向上を目的として溶着や構成刃先の発生を防ぐために鉄系材料との親和性の低いサーメットエンドミルを用いることもあります。

S45CやSCM材もHSSエンドミルで対応は可能ですが、こすり摩耗の進行を抑制し工具寿命の延長を図るために粉末HSSやコーティングHSSの使用も有効となります。もちろんコーティング超硬エンドミルも多く使用されます。大径エンドミルでは、超硬スローアウェイエンドミルが積極的に使われます。

S50C、S55C、SKD61、SKD11、プリハードン鋼などの金型材は、HSSあるいは、粉末HSSエンドミル、コーティングHSSエンドミルでも硬さが40HRC以下程度であれば、切削は可能ですが、現在では、荒加工から仕上げ加工までほとんどがソリッドタイプまたはスローアウェイタイプのコーティング超硬エンドミルで行われるようになりました。

硬さが45HRCを超える焼入れ鋼の切削はHSS工具では、極端に摩耗の進行が早くなり対応が難しくなります。

こうした加工には、一般にソリッドのコーティング超硬エンドミルが使用されます。

最近では、60HRCを超えるような硬さの焼入れ鋼切削も行われるようになり、こうした焼入れ鋼切削には、cBNエンドミルも使われるようになってきました。

(2) 鋳鉄

FC材（ねずみ鋳鉄）は、黒鉛（グラファイト）が針状組織となっており、これ自体が、潤滑剤の作用をされると言われています。また、非常に脆いという性質も手伝って大変削りやすくHSSエンドミルでも切削できます。しかし、組織内に非常に硬いセメンタイトが点在しており、これがこすり摩耗を早めます。こうしたことから超硬エンドミルでの対応が一般的となっています。仕上げ加工にはcBNエンドミルが使われることもあります。

FCD材は、黒鉛（グラファイト）が球状になっており、FC材より粘りが多少ありますが、FC材同様超硬エンドミルでの加工が主流で、一般に加工物が大きいいため、荒加工にはスローアウェイタイプの大径工具がよく使われます。

(3) ステンレス鋼

ステンレス鋼には、オーステナイト系、フェライト系、マルテンサイト系および析出硬化系があります。磁石が張り付かないのがオーステナイト系ですが、SUS304（18cr-8Ni）に代表されるこのオーステナイト系は、被削性が悪く難削材の代表としてよく挙げられます。

加工硬化しやすくチッピングを誘発したり、溶着を起こしやすいといった特性があります。また熱伝導率も低く、切削熱がエンドミルの刃先に集中しやすくなります。さらに、高温でのせん断強さが高く、切削抵抗も大きいため、切削中にびびり振動を生じやすくなります。また、粘さがあるため、バリの発生もよく問題となります。

切削抵抗を軽減するためには、エンドミルのすくい角を大きくとったり、ねじれ角を大きくし主分力、送り分力の軽減を図ることが有効です。

加工硬化を軽減するために逃げ角を大きくとる場合もありますが、刃先強度が小さくなると、びびり振動を誘発することがあるので注意が必要です。

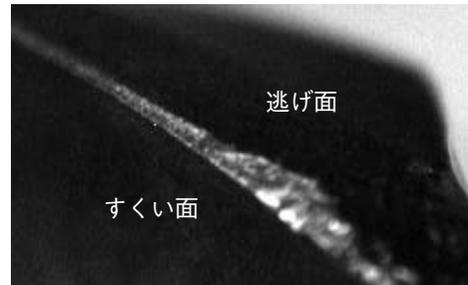
工具寿命の延長には、エンドミル刃先の潤滑性を向上させるコーティングが大変有効となります。また、溶着防止には切削油剤の使用やMQL加工が効果的です。

(4) チタン合金

チタン合金の被削特性はオーステナイト系ステンレスによく似ていますが、工具寿命は、さらに短くなります。

熱伝導率は悪く、刃先に熱がこもりやすくなります。チタンは高温で化学的に活性となり、急速に酸素や工具中の成分と反応しやすくなり、これが摩耗や溶着を促進すると言われています。また、切りくずは強固にカールし、すくい面のクレータ摩耗を発生させます。（図3.2.1）

チタン合金の加工には、粉末HSSや超硬エンドミルが使用されます。切削油剤使用により冷却性と耐溶着性を得ることが重要です。また、細かい切りくずは引火の心配もあるため、湿式加工を推奨します。



カールした強固な切りくずがすくい面を激しくこすり摩耗を進行させる。

図3.2.1 すくい面のクレータ摩耗の進行から発生するチッピング

(5) インコネル

インコネルは、耐熱、耐食性に優れたニッケルの合金で、被削性は極めて悪く、切削時に大きな音（こすれてきしむような音）が発生することがあります。また、切りくず離れが悪いために、切りくずのかみ込みを生じやすくなります。

エンドミルの逃げ面のこすり摩耗が激しく発生し、超硬エンドミルでは、摩耗が進行すると大きなチップングを誘発します。（図3.2.2）

またコーナ部のチップングが発生しやすいため、チップング防止のためのコーナRが施された（ラジアスタイプ）エンドミルを使用することが望まれます。

エンドミル材質としては、粉末HSS、超微粒子超硬合金が適しています。切削速度は高すぎると工具寿命を著しく低下させてしまいます。切削油剤は不溶性の使用が最も有効です。

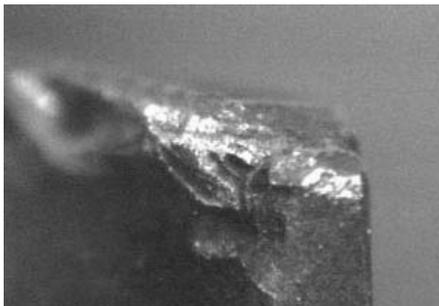


図 3.2.2 コーナ部のチップング

(6) グラファイト

グラファイトは、放電加工電極などに用いられ、脆いため削りやすく振動やびびりは発生し難いのですが、エンドミル逃げ面のこすり摩耗が極めて激しいため、大型の電極加工などではダイヤモンドコーティングエンドミルが使用されます。荒加工もダイヤモンドコーティングチップを装着したスローアウエイトタイプのエンドミルが用いられます。

グラファイト加工では、ダイヤモンドコーティングにより、工具寿命は無処理品の超硬に対し飛躍的に改善されます。（通常10倍以上程度）

グラファイトの加工のポイントとしては、加工物（グラファイト）自体のこば欠けの発生を防ぐことが重要です。1刃当たりの送り量を小さくすることが、こば欠け防止の基本ですが、あまり小さくし過ぎると工具の摩耗を早めてしまうので注意が必要です。

切削方向はアップカットよりダウンカットのほうが、エンドミルの抜け際でのこば欠けの発生が少なくなります。また、溝ねじれ角の強いエンドミルを使用すると加工物上面にこば欠けが発生しやすくなるのでねじれ角は通常20度～30度程度が適していると言えます。

切りくずは細かい粉塵状となるため、十分な吸引を行ったり専用機での加工が望まれます。

(7) 銅および銅合金

銅や銅合金は柔らかくHSSエンドミルでも十分加工はできますが、工具の摩耗は意外に早く、摩耗が進むとすくい面に切りくずが溶着するようになります。また、わずかな工具摩耗でもバリやむしれが発生しやすくなります。

エンドミルの仕様としては、切りくずがスムーズに流れる溝形状を設定することが大切で、潤滑性に優れる平滑な被膜をコーティングすることが有効です。

(8) アルミニウム、アルミニウム合金

アルミニウム、アルミニウム合金は極めて被削性が良く、HSSエンドミルでも切削速度100m/min程度の高速高送り加工が可能です。

しかし、シリコンの含有量が多い(10wt%以上)アルミニウム鋳物になると、被削性は多少悪くなる程度にもかかわらず、工具摩耗の進行がかなり早まります。そこで、対応としては、超硬エンドミルが用いられます。

アルミニウム、アルミニウム合金の切削において、切りくずは、伸びる傾向にあるため、すくい角は大きめでチップポケットを大きく取ったエンドミルが有効となります。

切削中にわずかな溶着を生ずると、瞬時に溶着が溝部全体につまるように進行してしまいます。(図3.2.3)溶着の防止には水溶性の切削油剤を切削ポイントめがけて多量にかけることが有効です。

工具としての溶着防止策としては、すくい面粗さや逃げ面粗さを向上させることが有効ですが、アルミニウムとの親和性が低く、潤滑効果が得られる平滑なDLCコーティング処理を行うことが大変効果的です。さらに、DLCコーティングは薄い被膜構造(0.1 μ m程度)が可能のため、エンドミルの刃先をコーティング後も鋭利に保てるといった利点もあります。

シリコン含有量の多いアルミ合金鋳物などの高速仕上げ切削では、ダイヤモンドコーティングが使用されることもあります。高速加工時の溶着防止と、こすり摩耗の急激な進行による加工精度の劣化を防止します。



図 3.2.3 溝部全体への溶着

(9) マグネシウム合金

マグネシウムは活性が高く、水で湿った粉体(スラッジなど)は水素ガスを発生し、空気との混合により爆発的に燃えます。ある程度の容積があるものは簡単には(融点以上に加熱しなければ)燃焼しませんが、体積当たりの比熱が小さいため、切りくずのように細かく薄くなったものは燃焼しやすくなります。

このため、マグネシウム合金の切削は難しいと考えられがちですが、熱伝導率も良く被削性自体は大変良好です。HSSエンドミルでも十分に切削ができます。

切りくずの扱いや切削油剤に十分注意を払えば、決して加工が難しいわけではありません。

専用の切削油剤(基本的には鉍物油)を使用し、切りくずは、こまめに作業面から排除することが大切です。切りくずは通気性のある蓋付きの容器に入れ、火気のない換気の良い場所に保管することが必要です。

(10) G-FRP

G-FRP(ガラス繊維強化プラスチック)は、軽量、絶縁性、耐食性などの優れた特性から用途が広がっています。

エンドミル加工においては、ガラス繊維が工具逃げ面をひっかくように激しいアブレッシブ摩耗(こすり摩耗)が進行します。また、1刃の送り量をあまり高くするとガラス繊維を切らずに引っ張り出すような状況となるので注意が必要です。

超硬エンドミルでも摩耗の進行が早いため、工具寿命の延長においては、ダイヤモンドコーティングエンドミルが有効となります。

4. エンドミル加工の関連技術

(1) 関連加工技術

エンドミル加工は、工具そのものだけではなく、図4.1.1に示すような様々な技術のもとに成り立っているとと言えます。

工作機械における、高速回転主軸やリニア駆動、振動レス、熱変位制御や補正、繰り返し位置決め精度の向上などの技術進歩には著しいものがあります。

高速回転主軸は、エンドミルによる高速ミーリング加工を可能としたり、リニア駆動や振動レスの技術とともに、極小径エンドミル（刃部外径φ0.1以下）での微細精密加工をも実現しています。

5軸加工機では(必ずしも同時5軸制御でなくても)、ボールエンドミルの切削速度がゼロとなる中心部での加工を避けたり、工具姿勢を変えることで工具突出し長さを最小限にできるため、エンドミルにとって負荷の少ない加工を可能とします。

また、こうした高性能工作機械を制御しているのが、CNC (Computerized Numerically Controlled) 装置であり、CNCによって制御される切削加工をCNC切削加工と言います。

CAD (Computer Aided Design) からのデータを

受け取り、CNC装置に入力するためのNCデータ (Gコード) を出力するのがCAM (Computer Aided Manufacturing) です。

CAMは、CADから読み込んだ形状に合わせて、工具経路 (Cutter Location : CL) を計算するメインプロセッサと、このCLを実際の工作機械を動かすためGコードによる指令に変換をするポストプロセッサから成り立っています。

なお、CADデータそのままでは、与えられた形状を切削加工するのに邪魔な穴などが存在していたりするため、これを埋めてCLの作成を助けるのがモデリングと呼ばれる作業です。

また、実際の工作機械での加工前に、画面上で加工シミュレーション (加工の干渉や加工パスの確認) をすることもでき、こうしたバーチャル加工の一連の技術は急速な進化を遂げています。

その他、前述の切削油剤を始めとして加工物の保持技術や、工作機械とエンドミルを接合する保持具などの技術が相乗効果となってエンドミル加工の可能性を大きく広げていると言えます。

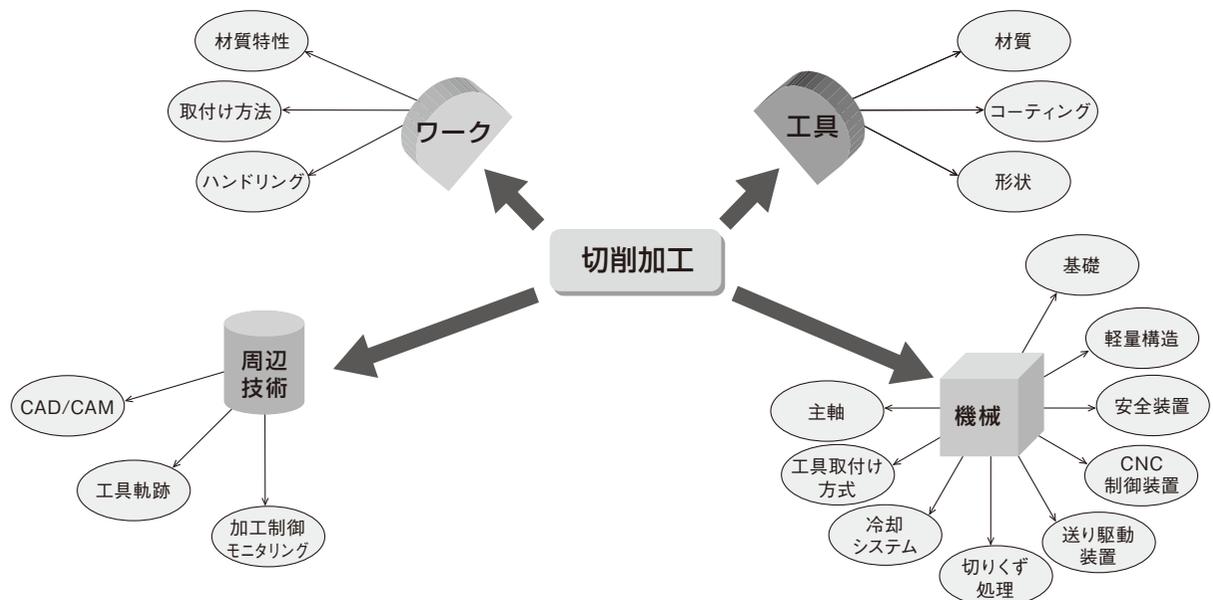


図 4.1.1 エンドミル加工の関連技術

(2) 保持具（ツーリングシステム）

工作機械の主軸にエンドミルを接合するのが保持具（ツーリングシステム）です。

保持具に求められる特性としては、優れた把持力、振れ精度に加え動的バランスが良好であることなどが挙げられます。

保持具の機械側の接合方式としては、BTテーパ

（7/24テーパ）方式が、従来より使用されていますが、2面拘束方式のHSKと呼ばれる方式も多く採用されるようになりました。（図4.1.2）

工具側の接合方法としては、コレットチャック方式が普及していますが、最近では焼きばめ方式も多く使用されるようになりました。

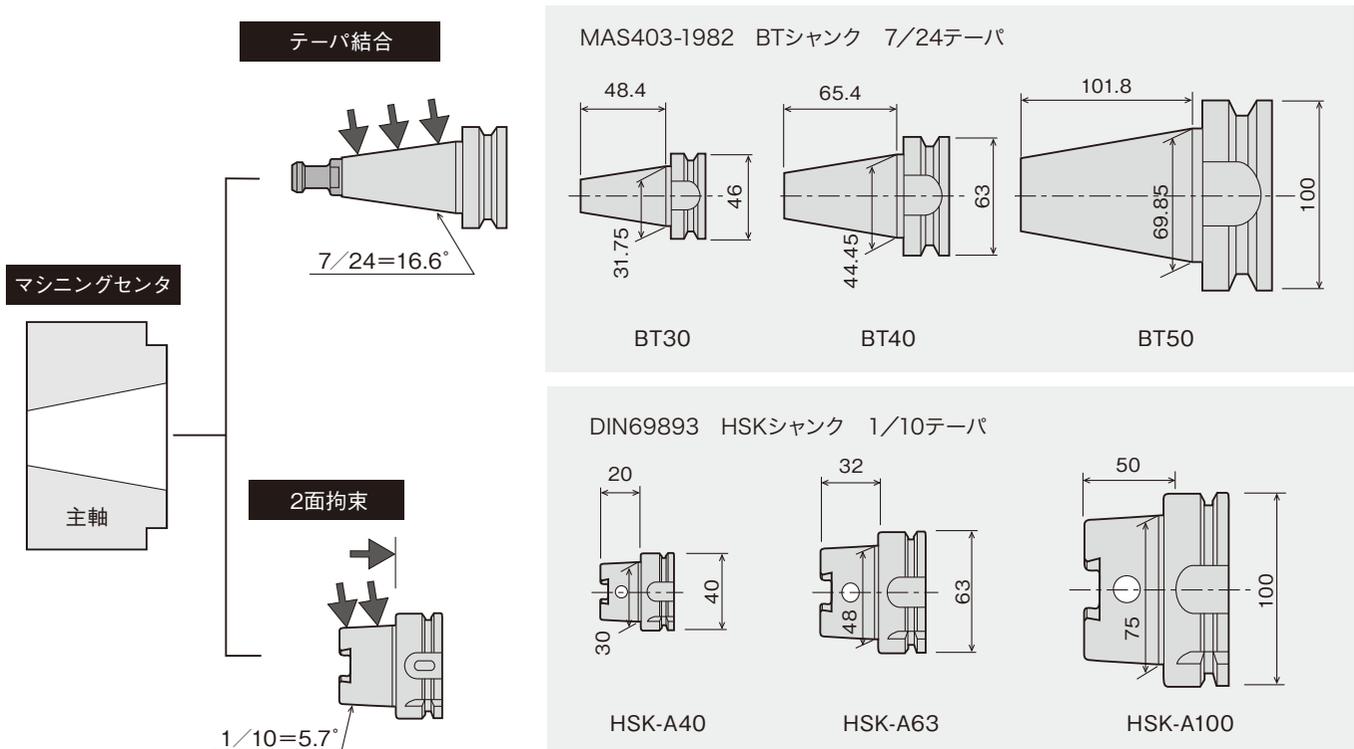


図 4.1.2 接合方式（株式会社 MST コーポレーション技術資料抜粋）

図4.1.3に各種ホルダとその構造の概略を示します。
 焼きばめ方式は、締め付けのためのナットが無く、
 シンプルな形状で加工物への干渉が生じ難く、動的バ
 ランスにも優れ、高い把持精度も得られやすいといっ
 た特長があります。

図4.1.4に焼きばめホルダとその原理について紹介
 します。

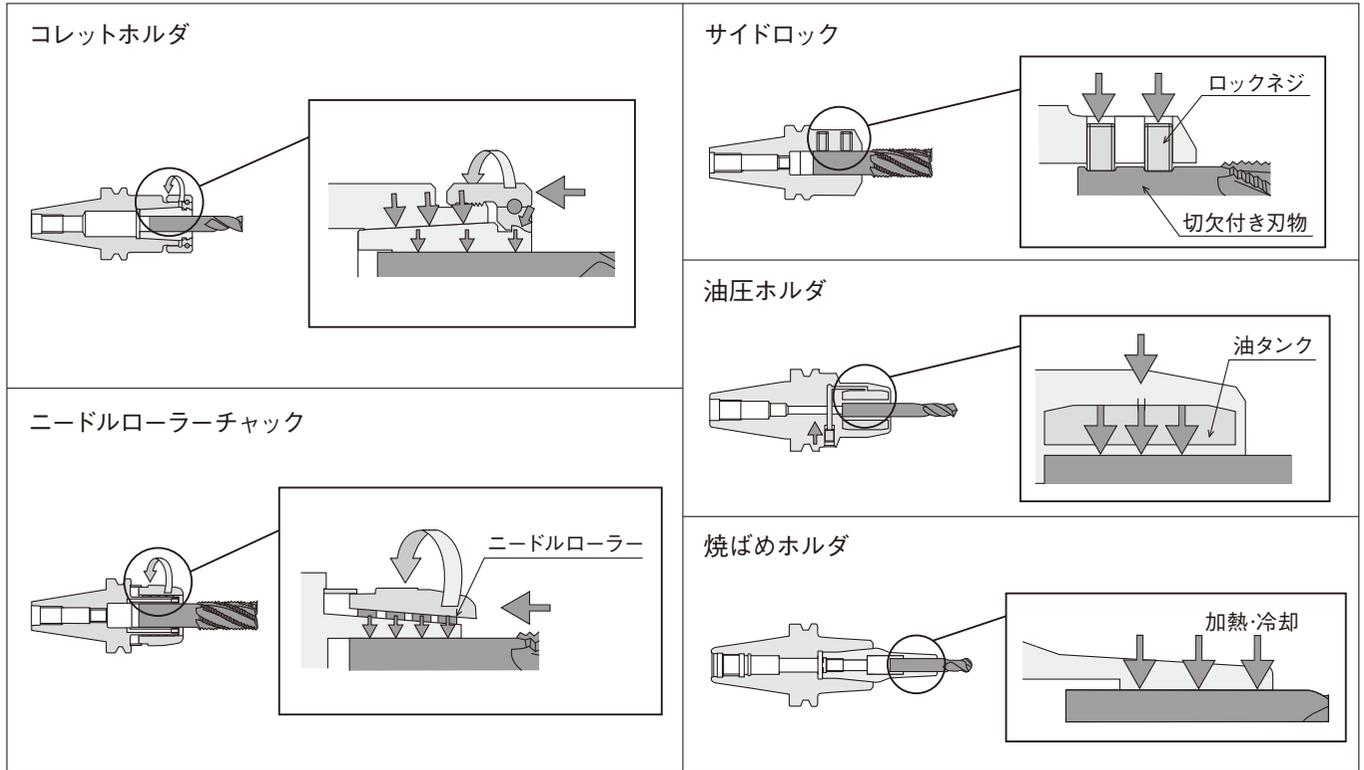


図 4.1.3 代表的なホルダの種類 (株式会社 MST コーポレーション技術資料抜粋)

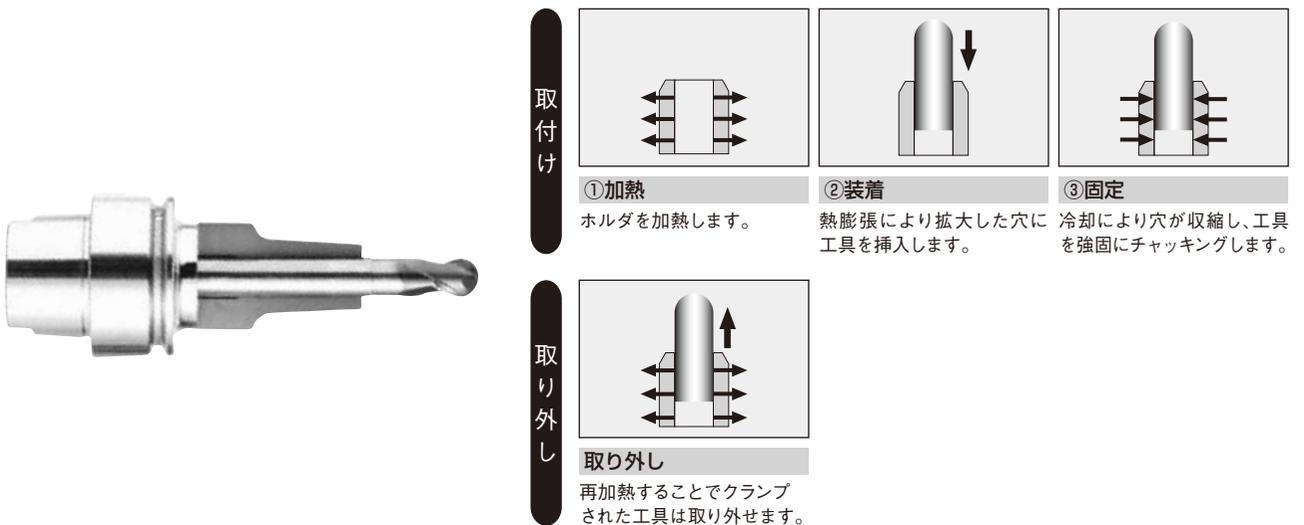


図 4.1.4 焼きばめホルダとその原理

5. エンドミルの再研削

エンドミルの性能を十分に発揮させるためには、適当な時期に正しい方法で再研削をすることが必要です。一般的な再研削の要点を以下に説明します。

5.1 再研削方法

(1) 再研削の時期

刃先の摩耗が進んでくると、切削音、振動、切りくずの変色、加工面状態、精度の悪化などの現象が生じてきます。このときの刃先を見ると先述したような摩耗が観察されます。

この摩耗の進み方は一般に図5.1.1に示すように、初期摩耗が生ずると、安定した進行を示す定常摩耗が続き、やがて進行速度が加速する加速摩耗の領域へと進んでいきます。

再研削の時期としては、加速摩耗になる前に実施すべきということになります。概ねの再研削の時期を外周逃げ面摩耗の量で示すと表13のようになります。

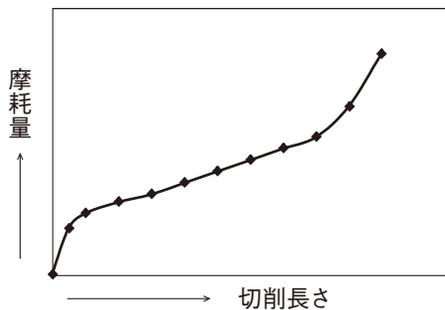


図 5.1.1 一般的な摩耗の進み方

(単位 /mm)			
加工の種類	エンドミル直径	逃げ面摩耗幅	被削材質
荒加工	10 以下	0.1 ~ 0.2	鋼、鋳鉄
	11~30	0.2 ~ 0.4	
	30 以上	0.3 ~ 0.5	
仕上加工	10 以下	0.1 ~ 0.15	鋼、鋳鉄
	11~30	0.15 ~ 0.25	
	30 以上	0.2 ~ 0.3	

逃げ面摩耗
コーナの鈍化

逃げ面摩耗幅

表 13 外周逃げ面摩耗量による再研削時期

(2) 再研削部位

一般にエンドミルの再研削は、外周逃げ面を主体に行いますが、キー溝加工用のエンドミルのように刃長をつめて底刃の刃付けを行う方法もあります。ボールエンドミルも、刃長をつめてボール部の再刃付けを行います。総形エンドミルやラフィングエンドミルは溝すくい面を再研削します。

(3) 外周逃げ面の再研削

外周逃げ面の研削では、一般に刃受けを使って溝リードに沿った研削を行います。NC研削盤での強制リード方式で研削する方法もあります。

研削方法としては、図5.1.2に示すような3種類の方法があります。

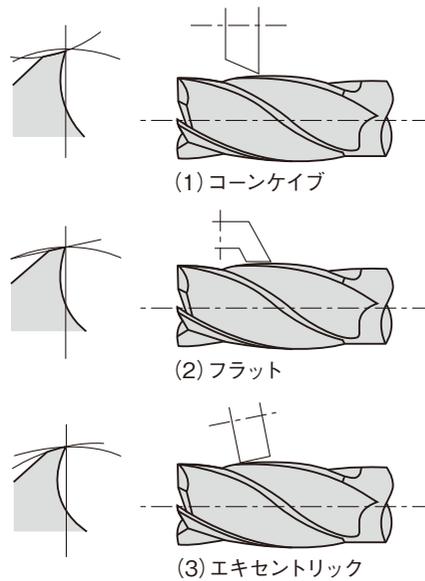


図 5.1.2 外周逃げ面の形状と研削方法

コーンケイブ法は、砥石の外周で研削し、エンドミル中心と砥石中心のずれによって逃げ角を得る方法です。逃げ面は凹形状となり刃先強度は弱くなります。

フラット法では、カップ砥石を使用して、エンドミル中心と刃先位置(刃受け高さ)をずらすことで逃げ角を設定します。逃げ面は直線となります。

これに対しエキセントリック法では逃げ面が偏心R形状となっており、刃先強度を保ちながら大きな逃げ量を確保できます。一般に新品のエンドミルはこの方法で研削されています。

① エキセントリック加工原理

砥石とエンドミルの中心と外周刃先の高さを同じとし、図5.1.3のように砥石を α °傾けた状態で研削を行ったとします。

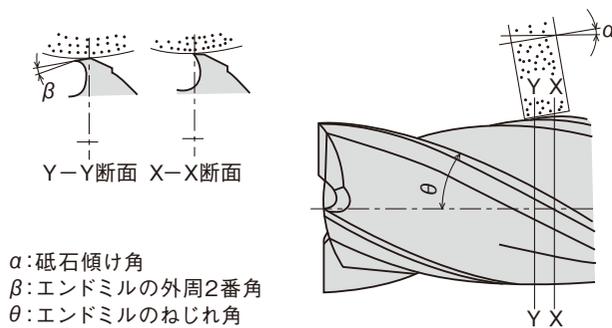


図 5.1.3 エキセントリックリリーブの原理

もし、この時エンドミルが軸方向に移動することなく同じ位置で回転をしている状態で、砥石を押し当てていけば、円錐研削となります。

しかし、砥石の切込み量を一定にした状態で、外周ねじれ溝に沿ってエンドミルを回転させながら軸方向に移動をすれば、円錐研削を形成していた線分が、刻々とエンドミルの外周刃上を移動することとなります。その結果、エキセントリックと呼ばれる外周刃形状の研削が実現されます。

② エキセントリック法の研削作業手順

手動の工具研削盤を用いた時のエキセントリック研削について、その作業手順を以下に示します。

手順1

エンドミルを研削盤のワークヘッドに取り付けたときに、エンドミルの中心と砥石の中心が同じ高さに

なるようにセットします。(図5.1.4)

センタ穴のある場合は両センタで支持すると良いでしょう。

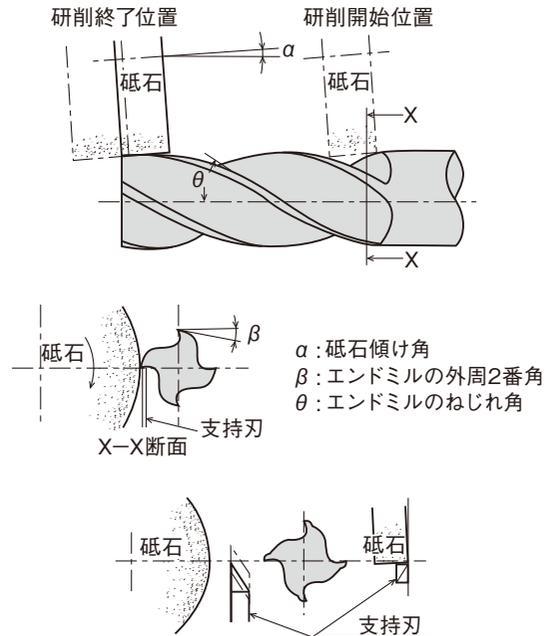


図 5.1.4 エンドミルと砥石の位置関係

手順2

使用する砥石は、HSSエンドミルの場合、cBN砥石が形くずれがしないので望ましいでしょう。WA砥石を使用するときは、砥石幅を図5.1.5のように4mm程度に成形してください。次に単石ダイヤモンドドレッサを用いて、砥石の当たり面をていねいにドレッシングします。

超硬エンドミルの場合は、ダイヤモンド砥石を使用してください。

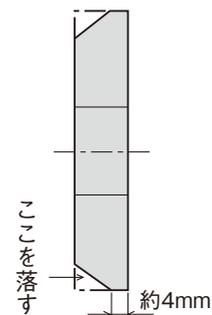


図 5.1.5 砥石の成形

手順3

成形された砥石の軸を下記の計算式によって求められた値に傾けます。

なお、一般エンドミルは溝ねじれ角が30度なので、傾け角は、表14のようになります。

$$\tan \alpha = \tan \beta \times \tan \theta \cdots \cdots (12)$$

α : 砥石傾け角

β : エンドミルの外周2番角

θ : エンドミルのねじれ角

表 14 エンドミル径に対する外周2番角と砥石傾け角
(ねじれ30°の場合)

エンドミル径	外周2番角	砥石軸傾け角
φ 2以下	18°~25°	12° 49'
φ 3	15°~21°	10° 37'
φ 4	13°~19°	9° 24'
φ 5	11°~17°	8° 11'
φ 6~φ 10	10°~15°	7° 17'
φ 11~φ 15	9°~14°	6° 42'
φ 16~φ 22	8°~13°	6° 07'
φ 23~φ 31	7°~12°	5° 31'
φ 32~φ 50	6°~11°	4° 56'
φ 50以上	5°~10°	4° 21'

手順4

次に支持刃(刃受け)の調整を行います。支持刃(刃受け)は砥石とエンドミルの中心を結ぶ線上の高さで、シャンク側の砥石端面位置にセットします。このとき、支持刃(刃受け)は、砥石の切込みおよびエンドミルの軸方向送り(テーブル送り)によって位置が移動しないようなところに取り付ける必要があります。

エンドミルを支持刃(刃受け)に乗せ、砥石とエンドミルの隙間が0.5mm程度になるように砥石を前進させます。

この時、研削に使用する砥石面とエンドミル研削面との隙間(0.5mm程度)が均一になっていることを確認します。すなわち、エンドミルの外周逃げ面に砥石が均一に当たる状態にします。

再研削前の外周2番角と再研削で設定した外周2番角が同じであれば、必ずこのような状態になるはずですが。

なお、支持刃(刃受け)が支持する位置は、厳密には、刃先位置よりわずかにエンドミルの軸心方向にずれているので、研削点でのエンドミルの刃先の位置が、砥石とエンドミルの中心を結んだ線上にくるように、支持刃(刃受け)の高さを微調整する必要があります。

手順5

支持刃(刃受け)高さの調整が終わったら、一旦、砥石を逃がし、支持刃(刃受け)の上にエンドミルを乗せて外周刃をシャンク側から底刃側に向かって研削するイメージで移動させます。右ねじれの溝が支持刃(刃受け)の上を移動することで、自然にエンドミルがリード送りされます。途中で止まったりひっかかりがなく、スムーズに動くことを確認します。

手順6

最後に、再研削する刃長を決定します。エキセントリック法では、砥石を切込むプランジ研削の部分では、砥石の形状が転写する研削面となり、送りをかけたトラバース研削の状態です。初めてエキセントリック研削が実現できるため、研削はシャンク側(溝の切りあがり側)から底刃側に向けて行います。

また、シャンク側から底刃側に送ることで、常に切れ刃を支持刃(刃受け)に押し付ける方向に力が働くため、ねじれ溝に沿った滑らかなリード送りが簡単に得られます。

砥石の回転方向は必ず、エンドミル刃先を支持刃(刃受け)に押さえつける方向(ダウンカット)としてください。こうすることで、エンドミルは自然に支持刃(刃受け)に押し付けられることとなります。

また、研削代は、荒研削では、0.02mm程度、仕上げ研削では、0.01mm以下を目安としてください。また、エンドミルの研削送りは、一定の速度で滑らかにゆっくりに行ってください。送りを途中で止めると、その部分の研削面が異常な状態(面が折れたような筋の発生)となりますので、注意が必要です。

超硬エンドミルは乾式で研削すると刃先にチップが発生しやすくなるため、できる限り湿式での研削が望まれます。

手順7

1枚の刃が研削できたら、砥石を逃がし、次の刃を支持刃(刃受け)の上に乗せ変えて、同じようにシャンク側から底刃側に向かって研削をします。

手順8

研削後、エンドミルに光を当て、外周2番面上の光線を観察したときに、軸に平行に見えれば、正しいエキセントリック面となっています。光線が屈折して見える時は、支持刃（刃受け）高さの調整が必要です。（図5.1.6）

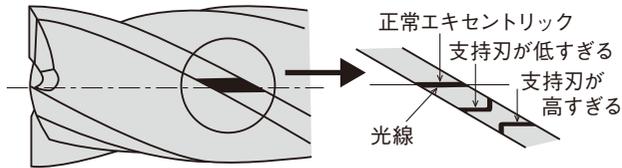


図 5.1.6 反射光輝線によるエキセントリックリリースの確認

(4) すくい面の再研削

ラフィングエンドミルや総形エンドミルは、すくい面を再研削することになりますが、すくい面の再研削は、CNC研削盤にて溝リードを合わせて湿式で行うことを推奨します。

手動の万能研削盤にて、溝に砥石を沿わせてすくい面のみ舐めるような方法で再研削を行うこともできますが、熟練した技能が必要で、研削焼けやチッピングも発生しやすくなります。

すくい面の再研削を行う場合は、図5.1.7のように、溝のねじれに対し2度程度余分に砥石を振って砥石の全面当たりを防ぐと研削抵抗も小さくなり、良好な仕上げ面が得られやすくなります。

なお、研削時のすくい角は図5.1.8のように砥石とエンドミルの位置関係（オフセット）によって決定されます。

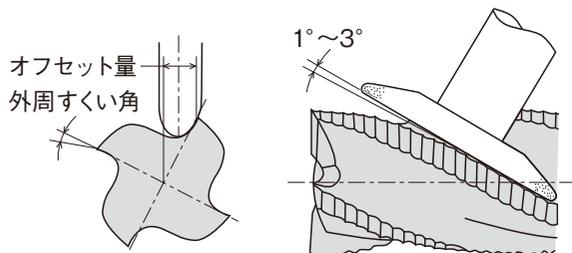


図 5.1.7 溝すくい面研削時のエンドミルと砥石の位置関係

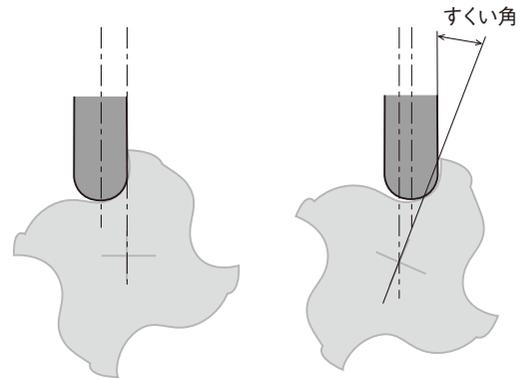


図 5.1.8 砥石位置とすくい角

(5) 底刃の再研削

底刃の再研削は、ギャッシュ、底刃2番面、底刃3番面の順番で研削します。底刃2番面を研削するときは、通常 2° ~ 3° のすかし角（中低）がつくようにします。

また、エンドミルのコーナの損傷を防止するためには、ギャッシュ部を研削する際に、図5.1.9のように刃先に砥石がわずかに（0.05mm~0.2mm程度）当たるように研削します。

ボールエンドミルやラジアスエンドミルの再研削は、専用のアタッチメントを使用するか、CNC研削盤での再研削が必要となります。

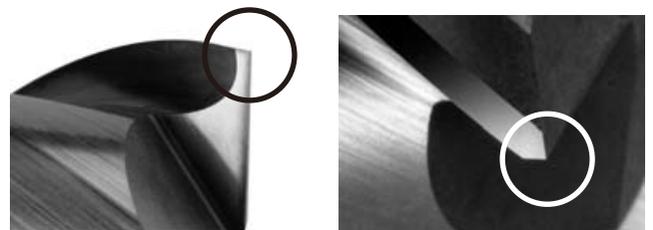


図 5.1.9 コーナ部の強度向上

(6) 研削バリの除去方法

HSSエンドミルを研削した場合には、切れ刃部に微小なバリが生じます。このバリは加工面粗さを悪化させる原因となるため、除去することが必要です。

アクリル板や柔らかいアルミ板などで刃先の稜線にそって軽くこすると、簡単にバリの除去ができます。

5.2 砥石と研削条件

HSSならびに超硬エンドミルの再研削における砥石選定、研削条件の目安を表15に示します。ダイヤモンド

モンド砥石は、熱に弱く600℃程度で酸化が始まるので注意が必要です。

表 15 再研削における砥石と研削条件

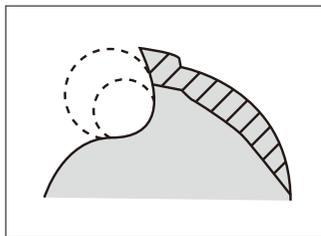
エンドミル	研削部位	砥石		研削速度 m/min	送り速度 mm/min	切込み量 mm	
		砥粒	粒度			荒	仕上げ
HSS	外周2番面 すくい面底刃	WA	# 60 ~ 80	1,000 ~ 1,200	50 ~ 200	0.010 ~ 0.10	0.005 ~ 0.010
	外周2番面 すくい面底刃	cBN	# 140 ~ 400	1,400 ~ 1,800			
超硬	外周2番面 すくい面底刃	ダイヤモンド	# 150 ~ 400	1,000 ~ 1,500			

5.3 再研削の限界

エンドミル再研削の明確な限界は、決められない場合がほとんどですが、次に紹介するようなことを参考に再研削をどこまで行うかの判断をされるとよいでしょう。

(1) チップポケット

外周逃げ面を再研削する場合は、再研削を繰り返していくと、チップポケットは次第に小さくなっていきます。チップポケットが小さくなると切りくずの収容能力がなくなり、十分な切削ができなくなります。

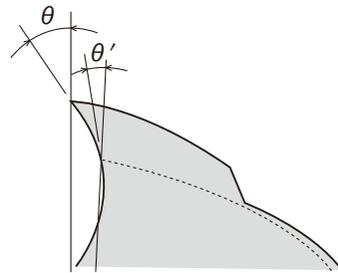


(図5.3.1)

図 5.3.1 チップポケット

(2) 外周すくい角

ねじれ刃のすくい面は、通常凹曲面となっています。したがって外周逃げ面を再研削していきますと、外周すくい角は次第に小さくなっていきます。したがって外周逃げ面の再研削を繰り返すとすくい面の再研削も必要となります。(図5.3.2)



2枚刃ショート形 (標準 HSS エンドミルの例)

刃径	刃径のマイナス量									
	0	-0.2	-0.4	-0.6	-0.8	-1.0	-1.2	-2.0	-2.5	-4.4
φ 6	13°30'	12°	10°30'	6°30'						
φ10	14°30'	14°	12°30'	10°30'	9°30'	7°				
φ12	14°30'	14°30'	12°	12°	11°	9°				
φ20	17°30'	17°30'	17°30'	17°	16°	15°	14°	11°		
φ25	16°	16°	16°	15°30'	15°	15°	12°30'	11°30'	10°	
φ40	17°	17°	17°	16°	16°	15°30'	15°	14°	13°30'	10°30'

4枚刃ショート形 (標準 HSS エンドミルの例)

刃径	刃径のマイナス量									
	0	-0.2	-0.4	-0.6	-0.8	-1.0	-1.2	-1.4	-1.6	-1.8
φ 6	13°	9°30'	2°30'							
φ10	13°	11°30'	10°30'	9°	6°					
φ12	14°	13°30'	12°30'	10°	8°					
φ16	17°30'	16°30'	15°30'	14°30'	13°	10°	9°	7°		
φ20	17°	16°30'	15°30'	15°	13°	10°	9°	8°		
φ25	16°	15°	14°	15°30'	12°	11°30'	11°	10°30'	10°	9°

図 5.3.2 外周すくい角

(3) 研削量

一般のエンドミルは、新品時に外周逃げ面と背の間に図5.3.3のような段差（クリアランス）が設定されています。再研削がこの範囲内で収まる場合は、研削量は少なくても問題にはなりません。背の部分まで研削が必要な場合は、研削量が増え再研削時間も長くなるようになってしまいます。

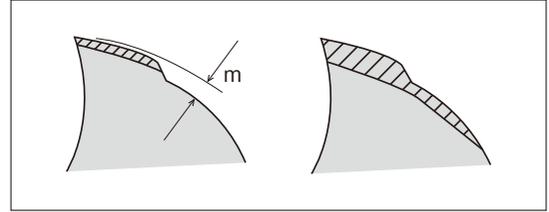


図 5.3.3 再研削量

(4) ラフィングエンドミルの再研削

ラフィングエンドミルのように、外周すくい面を再研削する場合は、刃厚が新品時の概ね1/2～1/3程度になったら再研削の限界と考えるのが良いでしょう。（図5.3.4）

刃厚が薄くなれば工具剛性はその分低下しますので、加工内容や切削条件によってはこの限りではありません。

また摩耗した部分は、研削により除去できますが、切削時の繰り返しの応力により生じた金属疲労は取り去ることができません。疲労が蓄積した状態での切削は、突発的なエンドミルの折損につながります。

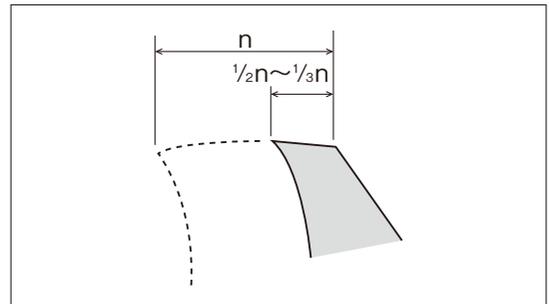


図 5.3.4 すくい面再研削と刃厚

(5) 再研削後の性能

再研削により新品時と同じ性能、精度にエンドミルを復元することはなかなか難しく、通常は新品時の70%程度に工具寿命が落ちるのが一般的です。

コーティングエンドミルで再コーティングをしない場合に、すくい面も逃げ面も完全にコーティングがなくなってしまうと、さらに性能が低下することになります。

6. トラブル対策

エンドミル加工を行っているとき、いろいろなトラブルに遭遇します。ここでは、こうしたトラブルとその対策について紹介をします。

6.1 トラブルとその対策事例

(1) 振れに起因するトラブル

① 振れと工具寿命

エンドミルを保持具（ツーリングホルダ）を介して機械主軸に取り付けた時に振れが大きいと、加工精度が悪化するばかりか工具寿命も縮めてしまうこととなります。

例えば、キー溝加工時に溝幅の寸法が安定しなかったり、早期にバリが発生するような場合、加工後のエンドミルの摩耗状態を観察すると図6.1.2のようになっていることがあります。2枚刃のうちの1枚の摩耗が極端に大きく発生しています。これは、加工時のエンドミルの振れが大きく、2枚の刃が均等な切削をしていないためです。

こうした場合は、エンドミルをホルダに取り付けた際に、ダイヤルゲージを使って振れの確認を行い、振れが収まらない場合は、コレットを交換するなどの対応が必要となります。

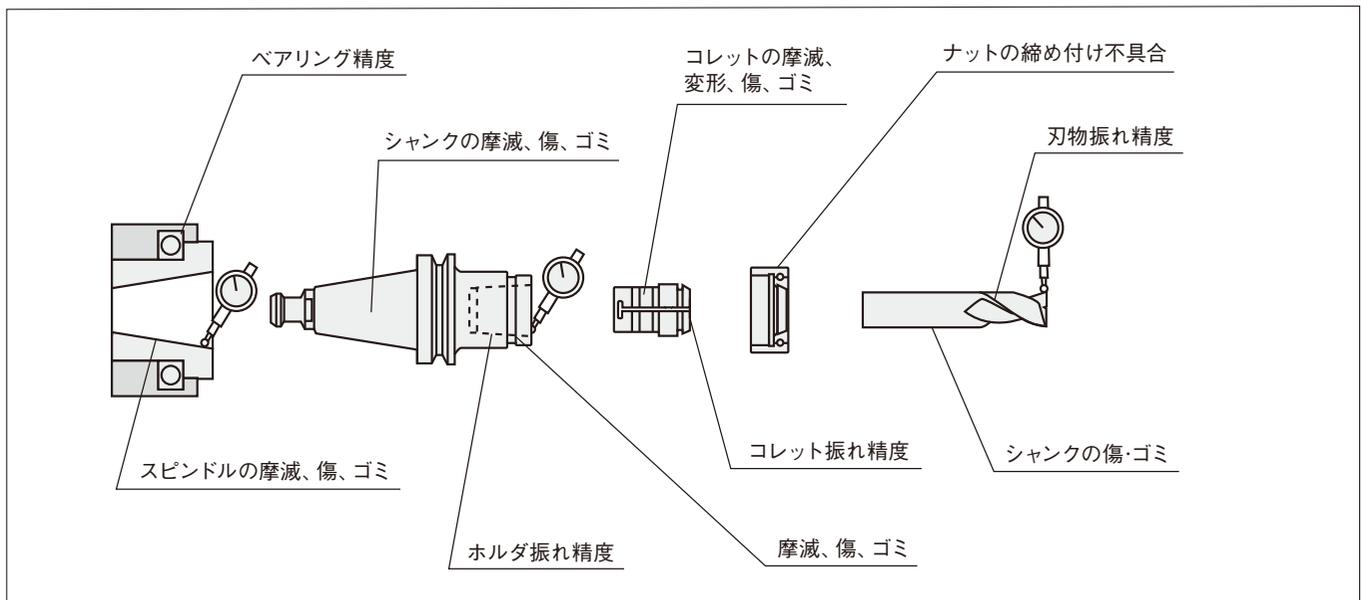


図 6.1.1 エンドミル取り付け時の振れの発生要因 (株式会社 MST コーポレーション技術資料より抜粋)

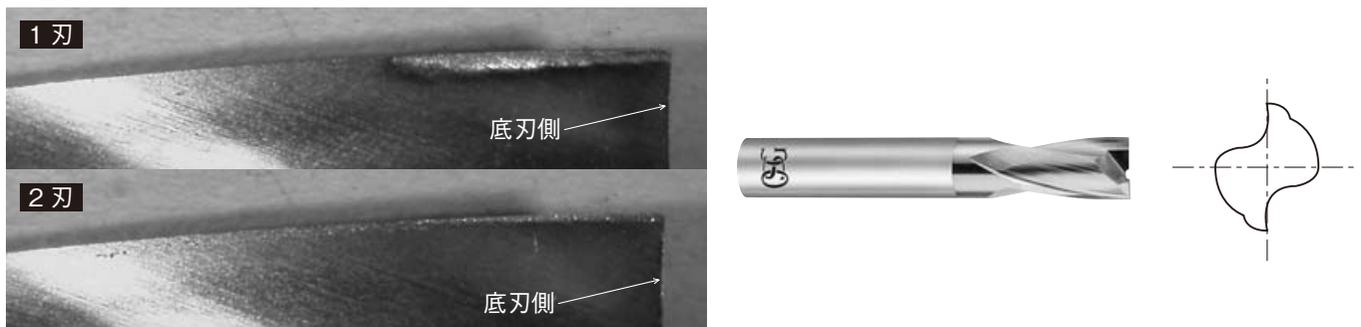
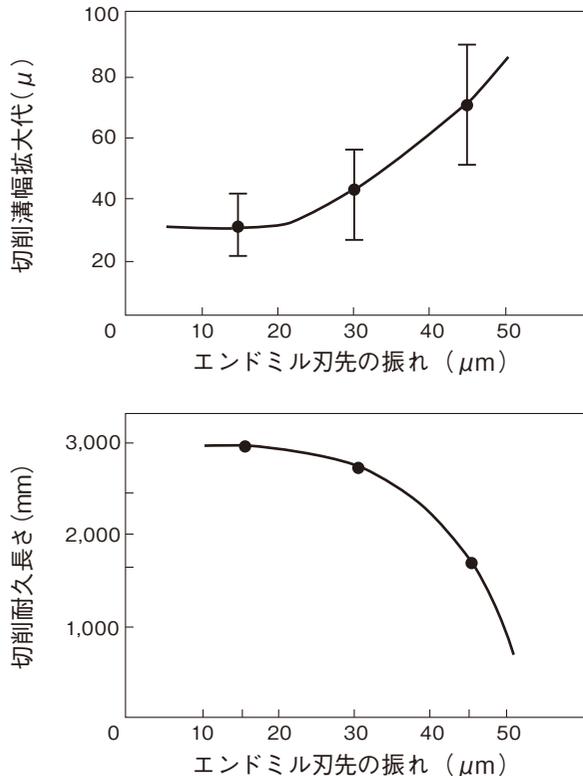


図 6.1.2 2枚刃エンドミルの摩耗状態

振れと加工精度、工具寿命を調査した実験結果を
図6.1.3ならびに図6.1.4に示します。



エンドミル：HSSエンドミル φ16 2枚刃
被削材質：S45C (HRB94~96)
回転速度：680min⁻¹
送り速度：56mm/min
切込深さ： $a_p=10$ mm(溝切削)
切削油剤：不水溶性切削油剤
機械：立形フライス盤
寿命判定：2枚の刃のうちどちらか一方の刃の外周2番摩耗幅が0.2mmに達したときを限度とした。

図 6.1.3 振れと加工精度および工具寿命

外周刃の振れ(mm)	切削長さ(m)			
	2	4	6	8
0.005	100%			
0.014	39%			
0.023	24%			

エンドミル：コーティング超硬エンドミルφ4 2刃
被削材質：SKD61 (40HRC)
切削速度：36m/min(2,866mm/min)
送り量：0.008mm/t(46mm/min)
溝切削： $a_p=2$ mm(溝切削)
切削油剤：不水溶性切削油剤
寿命判定：逃げ面摩耗0.1mm

図 6.1.4 超硬エンドミルの振れと工具寿命

② 共振による振れの増幅

主轴回転数を上げていくと固有振動数の影響により、振動が大きくなる領域があります。工作機械の主轴が経年変化により精度劣化を起こしているような場合は、こうした領域で振れ回りも増幅されることがあります。

このような領域で切削を行うと加工精度、粗さの劣化ならびにエンドミルのチッピングなどを誘発することになります。回転速度を変えてこうした領域を避け加工を行う必要があります。

(2) 突出し長さに起因するトラブル

工具突出し量が大きくなれば、わずかな力で工具はたわみやすくなり、びびり振動を誘発したり、加工精度を悪化する原因となります。そうした問題の対応事例を図6.1.5に紹介します。

エンドミル：コーティング超硬ボールエンドミル R0.2 (有効長3mm)
被削材質：NAK80(40HRC)
回転速度：20,000min⁻¹
送り速度：200mm/min
切込深さ： $a_p=0.01$ mm
切削油剤：水溶性切削油剤

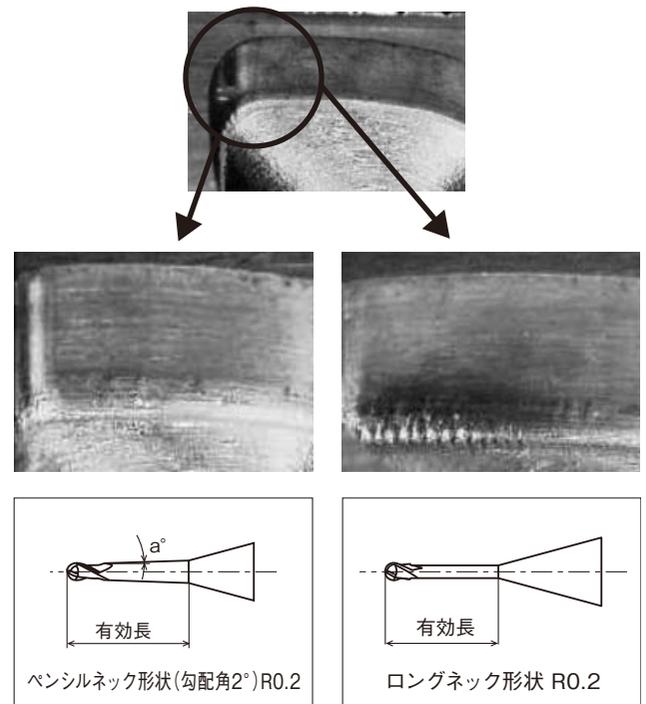
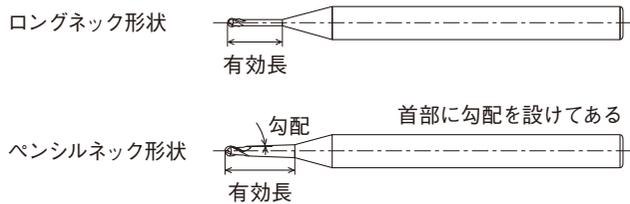


図 6.1.5 ロングネック形状でのびびり対策事例

事例では、加工コーナ部での著しいびびり面が、首部をテーパ形状にしたエンドミルに交換することで改善されています。

エンドミルの首部にテーパを設ける方法は極めて単純ですが、非常に大きな効果が得られます。

図6.1.6には、小径ロングネックコーティング超硬ボールエンドミルで、首部にテーパを設けたことによる折損強度の向上を検証した試験結果を示します。



エンドミル：コーティング超硬ボールエンドミル R0.5×有効長
 被削材質：S50C
 回転速度：20,000min⁻¹ (62m/min)
 切込深さ：a_p=0.4mm
 切削油剤：エアブロー
 機械：立形マシニングセンタ (BT30)
 判定：折損発生時の送り速度

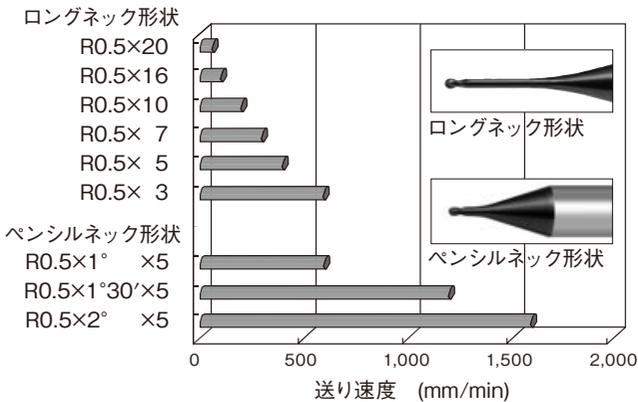


図 6.1.6 折損強度比較

(3) ねじれ角に起因するトラブル

図6.1.7のような薄板部分の加工を右刃右ねじれのエンドミルで行った場合、切削時に加工物を上に持ち上げる力が働き、びびり振動を誘発します。

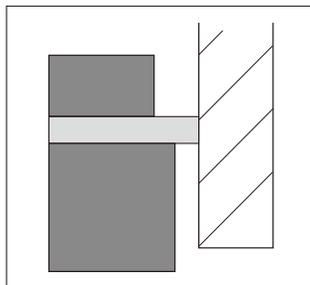
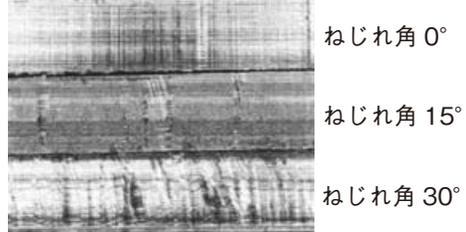


図 6.1.7 薄板加工

こうした時は、ねじれ角の弱いエンドミルや直刃のエンドミルを用いることで改善が図れることがあります。図6.1.8にはその事例を示します。



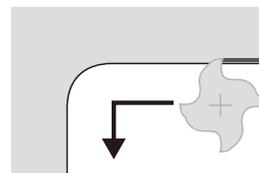
エンドミル：HSSエンドミル 2枚刃 φ4
 (ねじれ角0°, 15°, 30°)
 被削材質：黄銅板(厚さ2mm)
 回転速度：3,600min⁻¹
 送り速度：52mm/min
 切削油剤：乾式切削

図 6.1.8 薄板加工での改善事例

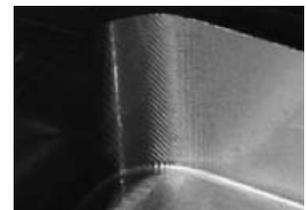
(4) 刃数に起因するトラブル

加工コーナ部では、エンドミルの切れ刃の接触長さが増加し、切削抵抗も増大することになります。使用するエンドミルの刃数をあまり欲張ると切削抵抗が工具剛性を上まわり、びびり振動を誘発することがあります。

図6.1.9のような直角曲がりの工具経路をとることは、本来望ましくないのですが、やむを得ずこうした加工をしなければならない場合は、刃数の少ないエンドミル(2枚刃または3枚刃)を選択することが、びびり振動防止につながります。



刃数を減らし、接触切れ刃長さを減少することでびびりが防止される。



刃数の多い場合は、切れ刃の接触長さの増加によりびびり発生。

図 6.1.9 直角曲がりでのびびり改善事例

(5) 切削油剤に起因するトラブル

図6.1.10に、金型材（プリハードン鋼）をコーティング超硬ソリッドボールエンドミルで切削した場合の事例を示します。ここでは同一切削条件のもとで、水溶性切削油剤（エマルジョン）、エアブロー、オイルミスト（MQL）のそれぞれにおいて加工を行い、その時の加工面状態の比較を行いました。

水溶性切削油剤を使用した場合は、ボールエンドミルの中心部付近の摩耗の早期進行が見られ、加工面の状態も悪くなっています。

むしろエアブローの方が、良好な加工面となっています。これに対し、オイルミスト（MQL）使用の場合は、加工面に光沢が見られ、規則正しい工具軌跡が観察されます。

これは、細かい切りくずの強制排出が上手く行われ、切りくずの再切削のような現象が生じていないことと、潤滑効果によるものと考えられます。

このように、切削油剤を替えることによってトラブルが解消することもあります。



エンドミル：コーティング超硬ボールエンドミル
R1（有効長5mm）

被削材質：HPM38(52HRC)

回転速度：32,000min⁻¹

送り速度：2,880mm/min (0.045mm/t)

切込深さ： $a_p=0.75\text{mm}$ （ポケット切削）

切削油剤：水溶性切削油剤、
エアブロー、MQL

機 械：立形マシニングセンタ（BT30）

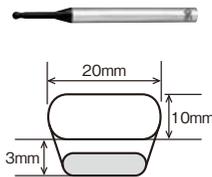


図 6.1.10 切削油剤と加工面品位

(6) 保持具に起因するトラブル

図6.1.11には、切削中に折損をしてしまったラフィングエンドミルを示します。折損は、シャンクの中央（コレット内部）で起きています。さらにシャンクにはスリップのような跡が見られます。

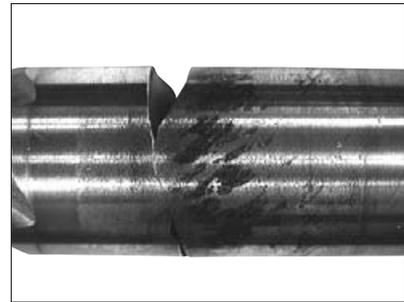


図 6.1.11 シャンク部での折損トラブル

このようなトラブルが発生した場合は、ホルダの締め付け不足やコレットの精度劣化などが考えられます。

例えば図6.1.12のように、切削時に繰り返しの力をコレットが受けることにより、口元がラップ状に広がるような塑性変形を起こすことがあります。このような場合は、本事例のようにエンドミルがコレットの内部で折損を起こす可能性が高まります。コレットの交換が必要です。

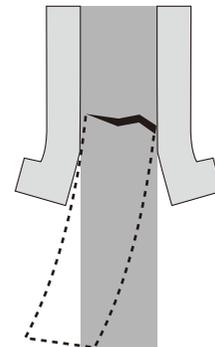


図 6.1.12 コレットの塑性変形

6.2 トラブルシューティング

一般的なトラブルとその対策をトラブルシューティングとして表16にまとめました。複数の要因が重なっているような場合もあり、必ずしも対策はこの限りではありませんが、一般的な判断基準としてください。

表 16 トラブルシューティング

トラブル	原因	対策
刃欠け	送り速度が速い	送り速度を下げる。
	切込み時の送り速度が速い	加工物に食いつく際の送り速度を下げる。
	切込深さが大きすぎる	切込深さを小さくする。
	切削速度が速い	回転速度を下げる。
	切削速度が遅い	回転速度を上げる。
	機械、チャックの剛性不足	回転速度、送り速度を下げる。切込深さを小さくする。刃数を減らす。アップカットにする。
	機械の動力不足	回転速度、送り速度を下げる。切込深さを小さくする。刃数を減らす。工具外径を小さいものにする。
	加工物の取り付け剛性不足	回転速度、送り速度を下げる。切込深さを小さくする。刃数を減らす。工具外径を小さいものにする。アップカットにする。
	ダウンカット	アップカットにし食いつき時の衝撃を少なくする。
	アップカット	ダウンカットにし切りくず離れをよくする。
	切りくずのかみ込み	ダウンカットにする。エアブローや切削油剤を使用して切りくずを強制排出する。
	切削油剤の使用	エアブローまたはMQLとし、過冷却によるサーマルクラックを防止する。
	チップの締め付け不足	チップを締め直す。トルクレンチでチップの締め付けトルクを確認する。
	振れが大きい	ホルダの締め直しにより振れを除く。チップの締め直しにより振れを除く。ホルダを替える。焼きばめホルダを使用する。主軸の振れを確認する。
	すくい角が大きすぎる	工具を替える。プレーカ無しのチップを使用する。すくい角を修正する。
	刃先コーナの強度不足	コーナ部分の刃殺しを行う。微小C面を追加加工する。コーナR付き工具に替える。
	工具材質が不適當	適切な工具選定を行う。
工具突出し長さが大きい	回転速度、送り速度を下げる。切込深さを小さくする。焼きばめホルダを使用する。	
摩耗	切削速度が速い	回転速度を下げる。
	切削速度が遅い	回転速度を上げる。不水溶性切削油剤を使用する。
	送り速度が遅い	1刃当たりの送り量を上げる。
	アップカット	ダウンカットにする。
	水溶性切削油剤の使用	エアブローまたはMQLとする。不水溶性切削油剤を使用する。
	切りくずの再切削	ダウンカットにする。エアブローや切削油剤を使用して切りくずを強制排出する。1刃当たりの送り量を上げる。
折損	切込深さが大きい	切込深さを小さくする。ラフィングエンドミルを用いる。回転速度、送り速度を小さくする。
	送り速度が速い	回転速度を下げる。
	工具突出し長さが大きい	焼きばめホルダを使用する。回転速度、送り速度を下げる。切込深さを小さくする。
	コレットの摩滅	コレットを交換する。
	工具の損耗が大きい	再研削を行う。再研削時期を早める。
粗さ不良	切削速度が遅い	回転速度を上げる。
	送り速度が速い	回転速度を上げる。1刃当たりの送り量を小さくする。
	切込深さが大きい	切込深さを小さくする。
	切りくずの再切削	エアブローや切削油剤を使用して切りくずを強制排出する。
	切削方向	アップカットにする。
	潤滑不足	MQLを行う。潤滑効果の大きな切削油剤を使用する。コーティング工具を使う。
	振れが大きい	ホルダの締め直しにより振れを除く。チップの締め直しにより振れを除く。ホルダを替える。焼きばめホルダを使用する。主軸の振れを確認する。
	工具の損耗が大きい	工具を交換する。工具の交換時期を早める。
うねり、たおれ	送り速度が速い	1刃当たりの送り量を下げる。刃数の多い工具を使う。
	切込みが大きい	切込深さを小さくする。軸方向の切込深さを小さくしてステップ加工する。
	チャックの剛性不足	剛性のあるものに交換する。
	工具の剛性不足	超硬ソリッド工具にする。工具外径を太くする。シャンク径を太くする。刃長を短くする。突出し長さを小さくする。

トラブル	原因	対策
うねり、たおれ	工具突出し長さが大きい	工具外径を太くする。焼きばめホルダを使用する。
	すくい角が小さすぎる	すくい角の大きな工具を選定する。プレーカ付きチップを使用する。
	前加工の影響	前加工でのうねり、たおれを小さくする。荒、中仕上げ、仕上げ加工の工程とする。
	切削方向	仕上げをアップカットで行う。荒加工をダウンカットとし、仕上げ加工をアップカットとする。
	潤滑不足	切削油剤を使用する。
	工具の摩耗が大きい	工具を交換する。工具の交換時期を早める。
加工寸法不具合	機械、チャックの剛性不足	切込深さを小さくする。1刃当たりの送り量を小さくする。
	工具の剛性不足	超硬ソリッド工具にする。工具外径を太くする。シャンク径を太くする。刃長を短くする。突出し長さを小さくする。
	チップの締め付け不足	チップを締め直す。トルクレンチでチップの締め付けトルクを確認する。
	振れが大きい	ホルダの締め直しにより振れを除く。チップの締め直しにより振れを除く。ホルダを替える。焼きばめホルダを使用する。主軸の振れを確認する。
	工具突出し長さが大きい	工具外径を太くする。焼きばめホルダを使用する。
びびり、振動	切削速度が速い	回転速度を下げる。
	共振	回転数を変えて共振しない領域で加工する。
	送り速度が遅い	1刃当たりの送り量を大きくする。
	切込深さが大きい	切込深さを小さくする。
	機械、チャックの剛性不足	切込みを小さくする。刃数の少ない工具を使う。
	工具の剛性不足	超硬ソリッド工具にする。工具外径を太くする。シャンク径を太くする。刃長を短くする。突出し長さを小さくする。
	工具の刃数が多い	刃数の少ない工具を使う。
	工具突出し長さが大きい	工具外径を太くする。焼きばめホルダを活用する。回転速度を下げる。切込深さを小さくする。
	切削抵抗が大きい	切込深さを小さくする。ラフィングエンドミルを使用する。刃数の少ない工具を使用する。プレーカ付きチップを使用する。
	すくい角が大きい	すくい角を修正する。
	逃げ角が大きい	逃げ角を修正する。
バリ（かえり）	切削速度が遅い	回転速度を上げる。
	送り速度が速い	1刃当たりの送り量を小さくする。
	切込深さが大きい	切込深さを小さくする。荒、仕上げの2工程で加工する。
	工具の摩耗が大きい	工具を交換する。再研削時期を早める。
	すくい角が小さい	すくい角の大きな工具を使う。プレーカの角度を変える。
	切削方向	ダウンカットにする。エンゲージ角を小さくディスエンゲージ角を大きくする。
溶着	切削速度が遅い	回転速度を上げる。
	ドライ加工	切削油剤を使用する。
	被削材との親和性	コーティング工具を使用する。工具材質を替える。
	すくい角が小さい	すくい角の大きな工具を使う。プレーカの角度を変える。
こぼれ	送り速度が速い	1刃当たりの送り量を小さくする。
	アップカット	工具の抜け際でこぼれが発生するので、工具経路を工夫する。抜け際での送り速度を下げる。
	ダウンカット	工具の入り際でこぼれが発生するので、工具経路を工夫する。入り際での送り速度を下げる。
切りくずの絡みつき（ドリリング時）	切削速度が遅い	回転速度を上げる。（遠心力を高める）
	送り速度が遅い	回転当たりの送り量を大きくし、切りくず厚さを増加させ切りくずの分断性を上げる。
	送り速度が速い	粘性の高い材料では、回転当たりの送りを下げて切りくずが分断されやすい領域を探す。
	ノンステップ送り	ステップ送りを行う。
	ドリルの下穴がある	ドリル加工を後にする。ステップ送りで加工する。
	チッププレーカの不適	適切なチッププレーカを選択する。

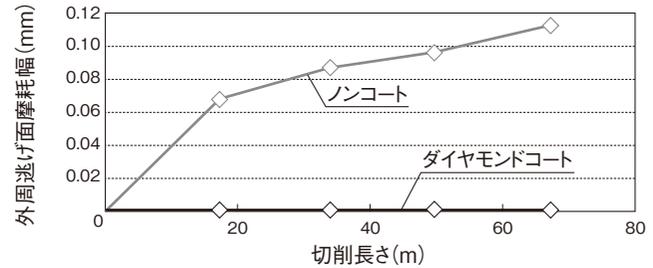
加工データ

アルミニウム合金のドライ加工

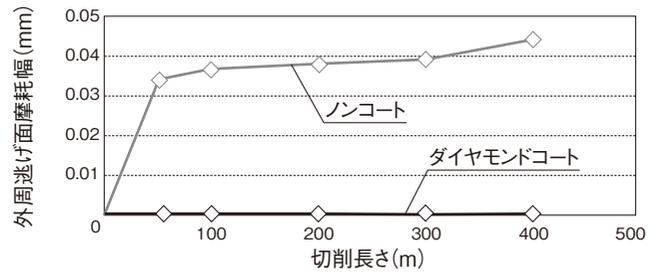
コメント	アルミニウム合金は溶着が発生しやすく、ドライ切削が困難であるが、ダイヤモンドコーティングを施すことにより、エアブローによる高速ドライ加工が可能となる。 また、ダイヤモンドコーティングは耐摩耗性にも優れるため、ハイシリコンアルミニウム合金ダイキャスト(ADC12)の切削においても、工具寿命が飛躍的に向上する。
使用工具	ダイヤモンドコーティング超硬エンドミル(2枚刃)
サイズ	φ10
被削材質	ADC12、A7075
切削速度	400m/min(12,800min ⁻¹)
送り速度	1,280mm/min(0.05mm/t)
切削方法	側面切削(ダウンカット)
切込深さ	a _p =15mm a _e =1mm
切削油剤	エアブロー
使用機械	横形マシニングセンタ(BT40)



■ADC12



■A7075

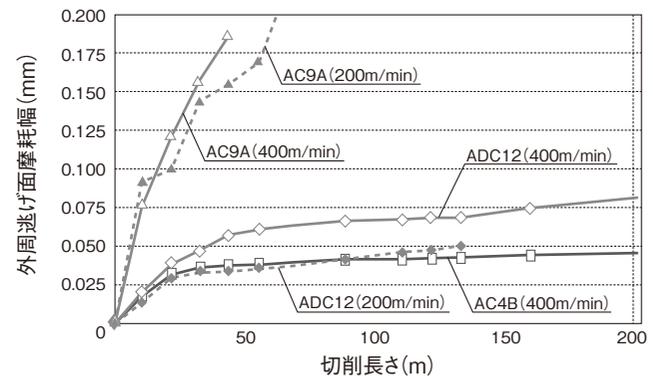


各種アルミニウム合金の被削性

コメント	アルミニウム合金と言えどもSiの含有量が多くなると、工具のアブレッシブ摩耗の進行が極めて早くなる。
使用工具	コーティング超硬エンドミル(2枚刃)
サイズ	φ10
被削材質	AC9A、ADC12、AC4B
切削速度	200m/min(6,400min ⁻¹) 400m/min(12,800min ⁻¹)
送り速度	0.05mm/t
切削方法	側面切削(ダウンカット)
切込深さ	a _p =10mm a _e =1mm
切削油剤	水溶性切削油剤(20倍)
使用機械	横形マシニングセンタ(BT40)



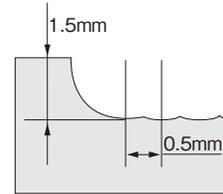
■Si含有量による被削性



被削材質	AC4B	AC9A	ADC12
Si含有量 (%)	8.5	23	11

グラファイトの切削

コメント	電極に用いられるグラファイトをダイヤモンドコーティングを施したボールエンドで切削した。 グラファイトの切削において、ダイヤモンドコーティングはアブレッシブ摩耗の抑制効果が極めて大きい。
使用工具	ダイヤモンドコーティングボールエンドミル
サイズ	R5×10
被削材質	グラファイト
切削速度	251m/min (8,000min ⁻¹)
送り速度	2,000mm/min (0.125mm/t)
切込深さ	a _p =1.5mm p _r =0.5mm
切削油剤	ドライ
使用機械	立形マシニングセンタ(BT40)

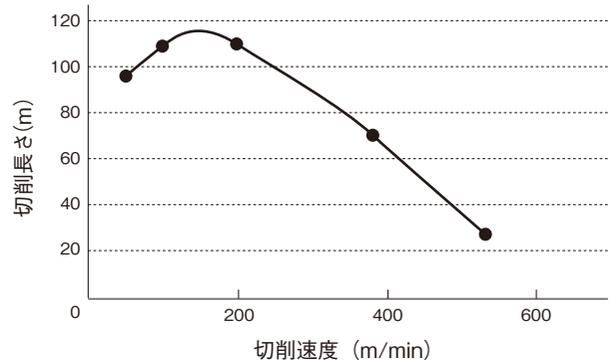
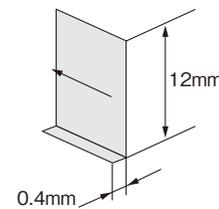


エンドミル	切削長さ(m)				比
	250	500	750	1,000	
無処理	56.5m				100%
ダイヤモンドコート			1,100m		1,945%

※寿命判断=ボール部逃げ面摩耗量0.1mm

鋳鉄切削における切削速度と工具寿命

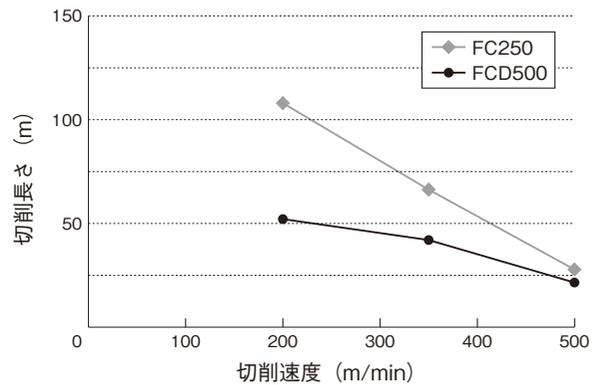
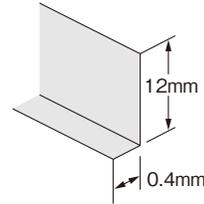
コメント	FC250にて、ドライ切削時の工具寿命を切削速度を変えて調査した。切込深さa _p =12mm, a _e =0.4mmのもとでは、切削速度200m/min程度での切削が良好な結果を示した。
使用工具	コーティング超硬エンドミル(2枚刃)
サイズ	φ8
被削材質	FC250
切削速度	50~500m/min (1,990~19,900min ⁻¹)
送り速度	0.1mm/t
切削方法	側面切削(ダウンカット)
切込深さ	a _p =12mm a _e =0.4mm
切削油剤	ドライ
使用機械	立形マシニングセンタ(BT30)



※寿命判定=外周逃げ面摩耗量0.1mm

FC250とFCD500の被削性

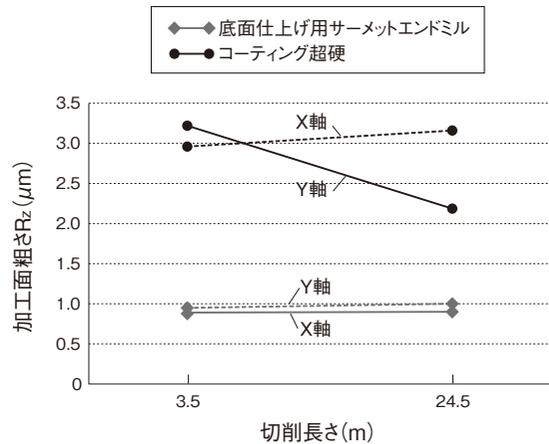
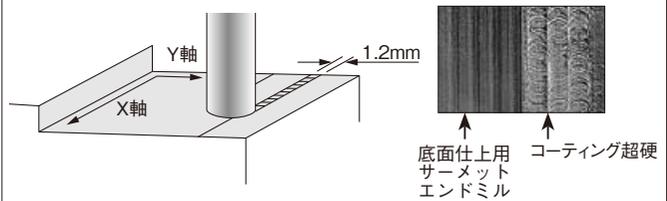
コメント	コーティング超硬エンドミルを使用し、FC250、FCD500の各切削速度で加工した、エンドミルの摩耗状況を調査した。
使用工具	コーティング超硬2枚刃エンドミル
サイズ	φ8
被削材質	FC250、FCD500
切削速度	200、350、500m/min
送り速度	0.1mm/t
切削方法	側面切削(ダウンカット)
切込深さ	$a_p=12\text{mm}$ $a_e=0.4\text{mm}$
切削油剤	ドライ
使用機械	立形マシニングセンタ(BT30)



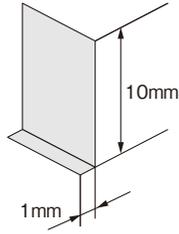
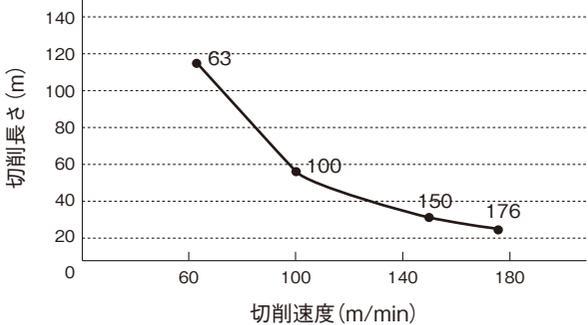
※寿命判定=外周逃げ面摩耗量0.1mm

S50C底面仕上げでのサーメットの効果

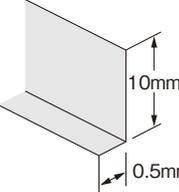
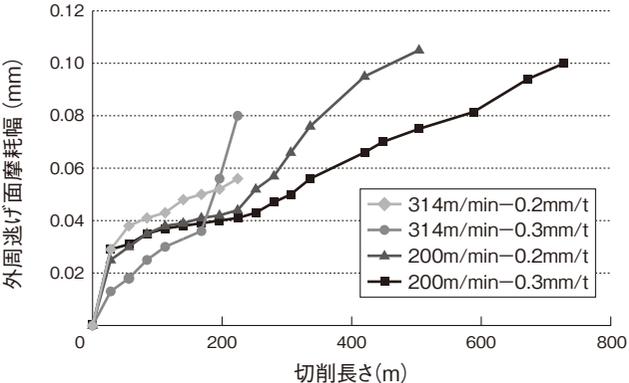
コメント	S50Cの底面仕上げ加工においてサーメットエンドミルと、コーティング超硬エンドミルとで加工面粗さの推移を調査した。サーメットエンドミルは切削長が増しても加工面粗さが安定している。
使用工具	底面仕上げ用サーメットエンドミル
サイズ	φ6
被削材質	S50C
切削速度	300m/min(15,900min ⁻¹)
送り速度	1,910m/min(0.03mm/t)
切削方法	正面仕上げ
切込深さ	$a_p=0.3\text{mm}$ $a_e=4.8\text{mm}$
切削油剤	エアブロー
使用機械	立形マシニングセンタ(BT40)



S50C切削における切削速度と工具寿命

コメント	S50C側面乾式切削においてコーティング粉末HSSエンドミルは、切削速度100m/minを超える切削速度でも切削が可能であった。但し、切削速度150m/minでは寿命の低下が大きいので、切削速度100m/min以下を常用範囲とするのが良いと言える。	
使用工具	コーティング粉末HSSエンドミル(4枚刃)	
サイズ	φ16	 <p>※寿命判定:外周逃げ面摩耗量0.1mm</p>
被削材質	S50C	
切削速度	63, 100, 150, 176m/min (1,250~3,500min ⁻¹)	
送り速度	0.09mm/t	
切削方法	側面切削(ダウンカット)	
切込深さ	a _p =10mm a _e =1mm	
切削油剤	エアブロー	
使用機械	立形マシニングセンタ(BT50)	

S50C切削における切削条件と工具寿命

コメント	S50C材のコーティング超硬エンドミル切削において、切削速度ならびに1刃当たりの送り量が、工具寿命に及ぼす影響を確認した。 切削速度を314m/minから200m/minと抑え、1刃当たりの送り量を、0.3mm/tとした条件が最も安定した加工が可能であった。	
使用工具	コーティング超硬エンドミル	
サイズ	φ10	
被削材質	S50C	
切削速度	200m/min, 314m/min	
送り速度	0.2mm/t, 0.3mm/t	
切削方法	側面切削(ダウンカット)	
切込深さ	a _p =10mm a _e =0.5mm	
切削油剤	エアブロー	
使用機械	横形マシニングセンタ(BT40)	

ステンレス鋼の高速切削

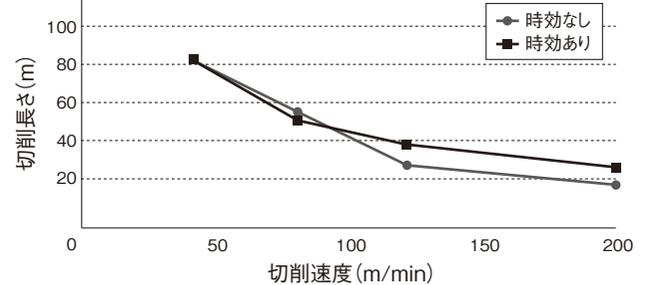
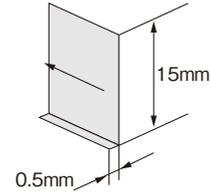
コメント	難削材の代表であるオーステナイト系ステンレスSUS304の高速切削を試みた。切削速度100m/minの条件において、切削長400m以上(加工時間10時間以上)の加工が可能であった。ステンレス材の切削には切れ味の良い仕様のエンドミルが良く、高速切削では強ねじれエンドミルが適しており、水溶性切削油剤を供給する必要がある。																																
使用工具	コーティング超硬強ねじれエンドミル	<table border="1"> <thead> <tr> <th rowspan="2">条件</th> <th colspan="3">切削長さ (m)</th> </tr> <tr> <th>150</th> <th>300</th> <th>450</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>3,200min⁻¹ (100m/min) 640mm/min</td> <td colspan="3">431.8m (100%)</td> </tr> <tr> <td>6,400min⁻¹ (200m/min) 1,280mm/min</td> <td colspan="3">190.6m (44%)</td> </tr> <tr> <td>8,000min⁻¹ (250m/min) 1,600mm/min</td> <td colspan="3">203.8m (47%)</td> </tr> <tr> <td>9,600min⁻¹ (300m/min) 1,920mm/min</td> <td colspan="3">113.5m (26%)</td> </tr> <tr> <td>12,800min⁻¹ (400m/min) 2,560mm/min</td> <td colspan="3">44.5m (10%)</td> </tr> <tr> <td>14,300min⁻¹ (450m/min) 2,860mm/min</td> <td colspan="3">13.6m (3%)</td> </tr> </tbody> </table> <p>※寿命判定=外周逃げ面摩耗量0.1mm</p>	条件	切削長さ (m)			150	300	450	3,200min ⁻¹ (100m/min) 640mm/min	431.8m (100%)			6,400min ⁻¹ (200m/min) 1,280mm/min	190.6m (44%)			8,000min ⁻¹ (250m/min) 1,600mm/min	203.8m (47%)			9,600min ⁻¹ (300m/min) 1,920mm/min	113.5m (26%)			12,800min ⁻¹ (400m/min) 2,560mm/min	44.5m (10%)			14,300min ⁻¹ (450m/min) 2,860mm/min	13.6m (3%)		
条件	切削長さ (m)																																
	150		300	450																													
3,200min ⁻¹ (100m/min) 640mm/min	431.8m (100%)																																
6,400min ⁻¹ (200m/min) 1,280mm/min	190.6m (44%)																																
8,000min ⁻¹ (250m/min) 1,600mm/min	203.8m (47%)																																
9,600min ⁻¹ (300m/min) 1,920mm/min	113.5m (26%)																																
12,800min ⁻¹ (400m/min) 2,560mm/min	44.5m (10%)																																
14,300min ⁻¹ (450m/min) 2,860mm/min	13.6m (3%)																																
サイズ	φ10×4F																																
被削材質	SUS304																																
切削速度	100~450m/min (3,200~14,300min ⁻¹)																																
送り速度	0.05mm/t																																
切削方法	側面切削(ダウンカット)																																
切込深さ	a _p =15mm a _e =0.5mm																																
切削油剤	水溶性切削油剤																																
使用機械	横形マシニングセンタ(BT40)																																

各種ステンレス鋼の被削性

コメント	各種ステンレス鋼の高速側面切削において、エンドミルの摩耗の進行状況を調査した。その結果、SUS304、SUS316に対しSUS630(17-4PH)、SUH660の摩耗進行が早いことが判る。																																																													
使用工具	コーティング超硬強ねじれエンドミル	<table border="1"> <caption>外周逃げ面摩耗量 (mm) vs. 切削長さ (m)</caption> <thead> <tr> <th>切削長さ (m)</th> <th>SUS304 (mm)</th> <th>SUS316 (mm)</th> <th>SUS630(17-4PH) (mm)</th> <th>SUH660 (mm)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>0</td><td>0.025</td><td>0.025</td><td>0.025</td><td>0.025</td></tr> <tr><td>25</td><td>0.03</td><td>0.03</td><td>0.04</td><td>0.10</td></tr> <tr><td>50</td><td>0.035</td><td>0.035</td><td>0.06</td><td>0.15</td></tr> <tr><td>75</td><td>0.04</td><td>0.04</td><td>0.08</td><td>0.18</td></tr> <tr><td>100</td><td>0.045</td><td>0.045</td><td>0.09</td><td>0.20</td></tr> <tr><td>125</td><td>0.05</td><td>0.05</td><td>0.10</td><td>-</td></tr> <tr><td>150</td><td>0.055</td><td>0.055</td><td>-</td><td>-</td></tr> <tr><td>175</td><td>0.06</td><td>0.06</td><td>-</td><td>-</td></tr> <tr><td>200</td><td>0.065</td><td>0.065</td><td>-</td><td>-</td></tr> <tr><td>225</td><td>0.07</td><td>0.07</td><td>-</td><td>-</td></tr> <tr><td>250</td><td>0.075</td><td>0.075</td><td>-</td><td>-</td></tr> </tbody> </table>	切削長さ (m)	SUS304 (mm)	SUS316 (mm)	SUS630(17-4PH) (mm)	SUH660 (mm)	0	0.025	0.025	0.025	0.025	25	0.03	0.03	0.04	0.10	50	0.035	0.035	0.06	0.15	75	0.04	0.04	0.08	0.18	100	0.045	0.045	0.09	0.20	125	0.05	0.05	0.10	-	150	0.055	0.055	-	-	175	0.06	0.06	-	-	200	0.065	0.065	-	-	225	0.07	0.07	-	-	250	0.075	0.075	-	-
切削長さ (m)	SUS304 (mm)		SUS316 (mm)	SUS630(17-4PH) (mm)	SUH660 (mm)																																																									
0	0.025		0.025	0.025	0.025																																																									
25	0.03		0.03	0.04	0.10																																																									
50	0.035		0.035	0.06	0.15																																																									
75	0.04		0.04	0.08	0.18																																																									
100	0.045		0.045	0.09	0.20																																																									
125	0.05		0.05	0.10	-																																																									
150	0.055		0.055	-	-																																																									
175	0.06	0.06	-	-																																																										
200	0.065	0.065	-	-																																																										
225	0.07	0.07	-	-																																																										
250	0.075	0.075	-	-																																																										
サイズ	φ10																																																													
被削材質	SUS304, SUS316, SUS630(17-4PH), SUH660																																																													
切削速度	200m/min(6,400min ⁻¹)																																																													
送り速度	0.05mm/t(1,280m/min)																																																													
切削方法	側面切削(ダウンカット)																																																													
切込深さ	a _p =10mm a _e =0.5mm																																																													
切削油剤	水溶性切削油剤																																																													
使用機械	立形マシニングセンタ(BT40)																																																													

耐熱合金 チタン合金の切削

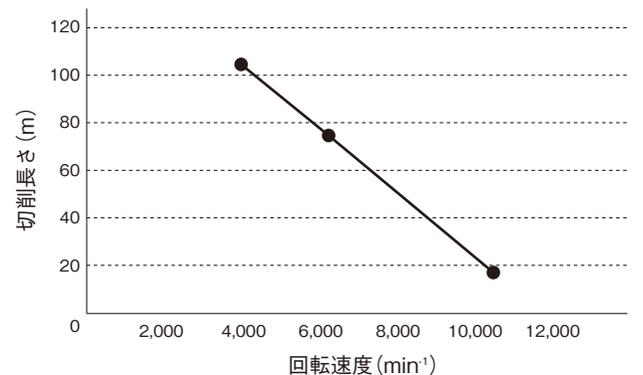
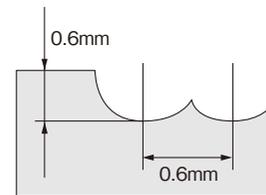
コメント	Ti-6Al-4V材で時効処理の有無にて切削速度と工具寿命の関係を調査した。
使用工具	コーティング超硬強ねじれエンドミル
サイズ	φ10×4F
被削材質	Ti-6Al-4V(時効処理前後)
切削速度	40~200m/min(1,280~6,370min ⁻¹)
送り速度	256~1,274mm/min(0.05mm/t)
切削方法	側面切削(ダウンカット)
切込深さ	a _p =15mm a _e =0.5mm
切削油剤	水溶性切削油剤
使用機械	横形マシニングセンタ(BT40)



※寿命判定=外周逃げ面摩耗幅0.1mm

耐熱合金 チタン合金(時効処理後)の切削

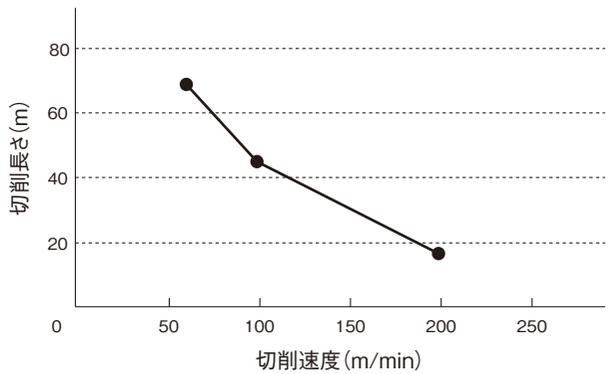
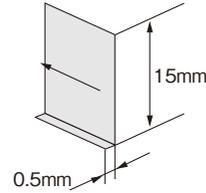
コメント	時効処理後のTi-6Al-4Vをコーティング超硬ボールエンドミルを使用し、切削速度を変え加工を行い、その時の工具寿命を調査した。
使用工具	コーティング超硬ボールエンドミル
サイズ	R3×6
被削材質	Ti-6Al-4V(時効処理後 42HRC)
回転速度	4,250, 6,370, 10,610min ⁻¹
送り速度	425, 637, 1,061mm/min(0.05mm/t)
切込深さ	a _p =0.6mm p _r =0.6mm
切削油剤	水溶性切削油剤
使用機械	横形マシニングセンタ(BT40)



※寿命判定=ボール部逃げ面摩耗量0.1mm

耐熱合金 チタン合金の切削

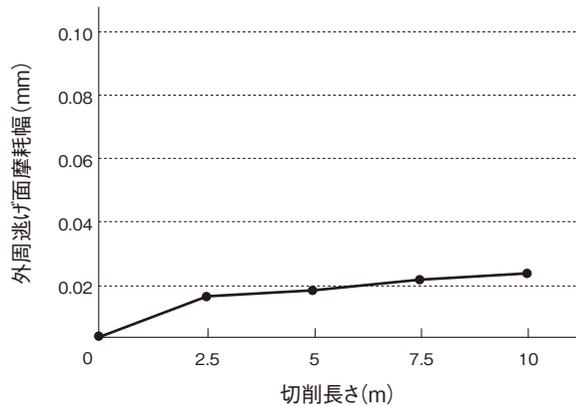
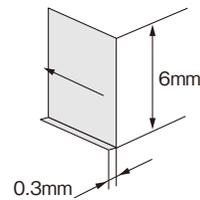
コメント	Ti-6Al-4Vにて、コーティング超硬2枚刃エンドミルでの各切削速度における工具寿命を調査した。
使用工具	コーティング超硬エンドミル(2枚刃)
サイズ	φ10
被削材質	Ti-6Al-4V(時効処理前)
切削速度	60, 120, 200m/min(1,910, 3,820, 6,370min ⁻¹)
送り速度	191, 382, 637mm/min(0.05mm/t)
切削方法	側面切削(ダウンカット)
切込深さ	a _p =15mm a _e =0.5mm
切削油剤	水溶性切削油剤
使用機械	横形マシニングセンタ(BT40)



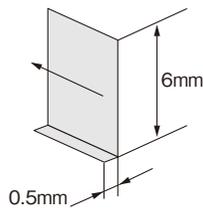
※寿命判定=外周逃げ面摩耗幅0.1mm

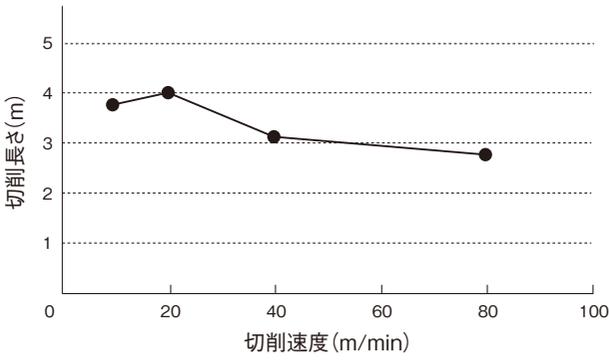
耐熱合金 ハステロイの切削

コメント	10m切削後の外周逃げ面摩耗量はわずか0.023mmであり、この時の被削面粗さは1.9μmRyであった。
使用工具	コーティング超硬強ねじれエンドミル
サイズ	φ6×3F
被削材質	ハステロイ
切削速度	40m/min (2,120min ⁻¹)
送り速度	170mm/min (0.027mm/t)
切削方法	側面切削(ダウンカット)
切込深さ	a _p =6mm a _e =0.3mm
切削油剤	不水溶性切削油剤
使用機械	立形NCフライス盤(NT30)



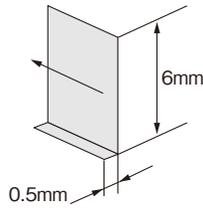
耐熱合金 ワスパロイの切削	
コメント	ワスパロイをコーティング超硬強ねじれエンドミルで切削速度を変えて加工し、各々の工具寿命を調査した。
使用工具	コーティング超硬強ねじれエンドミル
サイズ	φ10×4F
被削材質	ワスパロイ (45HRC)
切削速度	10~80m/min (320~2,550min ⁻¹)
送り速度	64~255mm/min (0.05mm/t)
切削方法	側面切削 (ダウンカット)
切込深さ	a _p =6mm a _e =0.5mm
切削油剤	水溶性切削油剤
使用機械	横形マシニングセンタ (BT40)

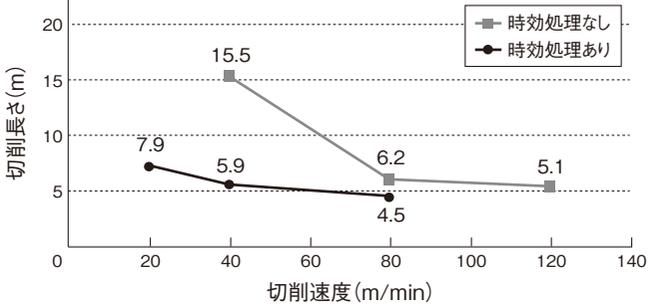





※寿命判定=外周逃げ面摩耗幅0.2mm

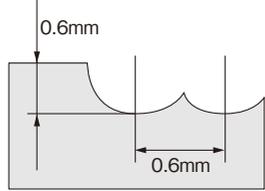
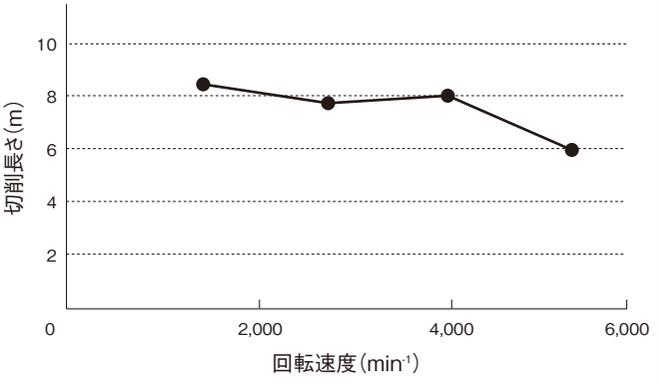
耐熱合金 インコネル718の切削	
コメント	コーティング超硬強ねじれエンドミルを使用し、インコネル718を切削速度を変えて加工し、工具寿命を調査した。
使用工具	コーティング超硬強ねじれエンドミル
サイズ	φ10×4F
被削材質	インコネル718 (42HRC) (時効処理前後)
切削速度	20~120m/min (640~3,820min ⁻¹)
送り速度	128~764mm/min (0.05mm/t)
切削方法	側面切削 (ダウンカット)
切込深さ	a _p =6mm a _e =0.5mm
切削油剤	水溶性切削油剤
使用機械	横形マシニングセンタ (BT40)

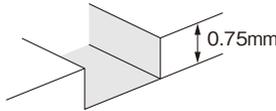
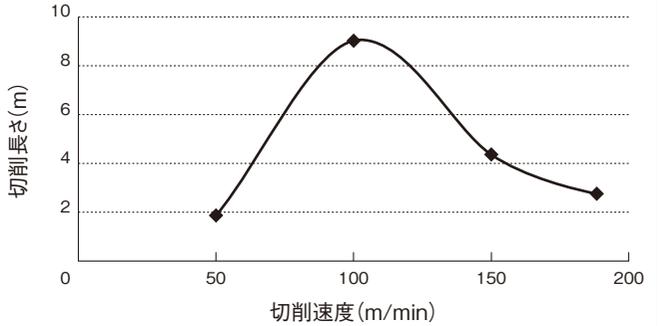


※寿命判定=外周逃げ面摩耗幅0.1mm

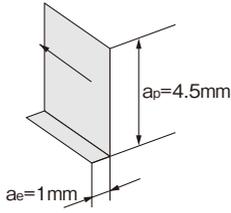
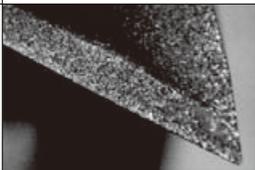
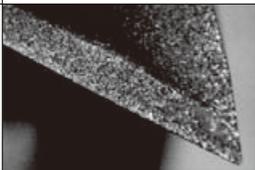
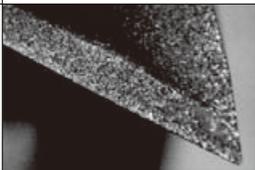
耐熱合金 インコネル718の切削

コメント	コーティング超硬ボールエンドミルを用い、切削速度を変化させインコネル718の切削を行い、工具寿命の調査を行った。	 
使用工具	コーティング超硬ボールエンドミル	 <p>※寿命判定＝ボール部逃げ面摩耗幅0.1mm</p>
サイズ	R3×6	
被削材質	インコネル718(時効処理前後)	
切削速度	25~100m/min (1,330~5,310min ⁻¹)	
送り速度	133~531mm/min (0.05mm/t)	
切込深さ	a _p =0.6mm pr=0.6mm	
切削油剤	水溶性切削油剤	
使用機械	横形マシニングセンタ(BT40)	

コパール材切削における切削速度の影響

コメント	コーティング超硬2枚刃エンドミルを用いて、切削速度を変化させ、バリが発生するまでの工具寿命を調査した。その結果、切削速度100m/minで安定した加工が可能であった。	 
使用工具	コーティング超硬エンドミル(2枚刃)	
サイズ	φ1.5	
被削材質	コパール	
切削速度	50~188m/min	
送り速度	212mm/min (0.005mm/t)	
切削方法	溝切削	
切込深さ	a _p =0.5D (0.75mm)	
切削油剤	水溶性切削油剤	
使用機械	立形マシニングセンタ(BT30)	

G-FRP材の切削

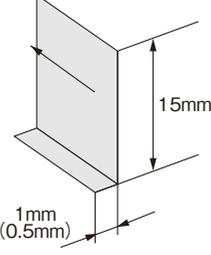
コメント	繊維強化プラスチック(G-FRP)の切削において、ダイヤモンドコーティング2枚刃エンドミルは11.4m加工時点での摩耗進行は見られず継続切削が可能である。										
使用工具	ダイヤモンドコーティング超硬エンドミル(2枚刃)										
サイズ	φ10										
被削材質	G-FRP(ガラス繊維20%)	<table border="1"> <tr> <td>使用工具</td> <td>ダイヤモンドコーティング超硬(2枚刃)</td> <td>ノンコート HSS(2枚刃)</td> </tr> <tr> <td>切削長さ</td> <td>11.4m</td> <td>3.8m</td> </tr> <tr> <td>外周逃げ面摩耗幅</td> <td>0mm(進行なし)</td> <td>0.33mm</td> </tr> </table>	使用工具	ダイヤモンドコーティング超硬(2枚刃)	ノンコート HSS(2枚刃)	切削長さ	11.4m	3.8m	外周逃げ面摩耗幅	0mm(進行なし)	0.33mm
使用工具	ダイヤモンドコーティング超硬(2枚刃)	ノンコート HSS(2枚刃)									
切削長さ	11.4m	3.8m									
外周逃げ面摩耗幅	0mm(進行なし)	0.33mm									
切削方法	側面切削(ダウンカット)	<table border="1"> <tr> <td>損耗写真</td> <td></td> <td></td> </tr> </table>	損耗写真								
損耗写真											
切削速度	110m/min(3,500min ⁻¹)										
送り速度	460mm/min(0.065mm/t)										
切込深さ	ap=4.5mm ae=1mm										
切削油剤	エアブロー										
使用機械	立形マシニングセンタ(BT40)										

MMC(Metal Matrix Composite)の切削

コメント	MMCにおけるボールエンドミルの加工では、ダイヤモンドコーティングボールエンドミルを用いることにより、超硬コーティングエンドミルに対し大幅な寿命延長が可能であった。																								
使用工具	ダイヤモンドコーティング超硬ボールエンドミル	<table border="1"> <tr> <td rowspan="2">エンドミル</td> <td colspan="5">切削長さ (m)</td> </tr> <tr> <td>50</td> <td>100</td> <td>150</td> <td>200</td> <td>250</td> </tr> <tr> <td>ダイヤモンドコーティングボールエンドミル</td> <td colspan="5"></td> </tr> <tr> <td>TiAlN系コーティング超硬ボールエンドミル</td> <td colspan="5"></td> </tr> </table>	エンドミル	切削長さ (m)					50	100	150	200	250	ダイヤモンドコーティングボールエンドミル						TiAlN系コーティング超硬ボールエンドミル					
エンドミル	切削長さ (m)																								
	50	100	150	200	250																				
ダイヤモンドコーティングボールエンドミル																									
TiAlN系コーティング超硬ボールエンドミル																									
サイズ	R5×10	220m																							
被削材質	MMC(SiC 含有量 30%)	22m																							
回転速度	8,000min ⁻¹	VB=0.14mm																							
送り速度	2,000mm/min																								
切込深さ	ap=1mm pr=0.5mm																								
切削油剤	ドライ																								
使用機械	立形マシニングセンタ(BT30)																								

※寿命判定=ボール部逃げ面摩耗幅 0.14mm

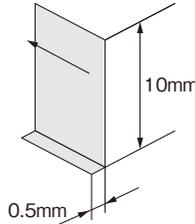
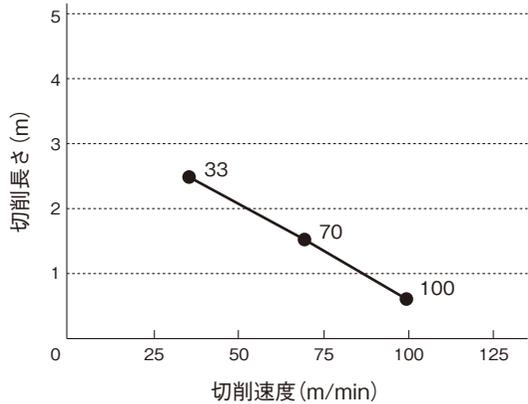
被削材硬さと工具寿命

コメント	被削材硬さが上がる程コーナ部の摩耗が大きくなる。特に50HRCでは摩耗の進行が早いため、切削音が大きくなる。50HRCで回転速度、送り、切込みを半分に下げると、約2倍程寿命は上がるものの、50HRCの切削は摩耗が早く、超硬を使用した方が良いと思われる。コーティング粉末HSSエンドミルの被削材硬さは45HRCまで切削可能であるといえる。	
使用工具	コーティング粉末HSSエンドミル	 
サイズ	φ10	
被削材質	SKD61 (40HRC, 45HRC, 50HRC)	
切削速度	33m/min (1,050min ⁻¹)	
送り速度	170mm/min (0.04mm/t)	
切削方法	側面切削 (ダウンカット)	
切込深さ	a _p =15mm a _e =1mm (0.5mm)	
切削油剤	不水溶性切削油剤	
使用機械	立形NCフライス盤 (NT30)	

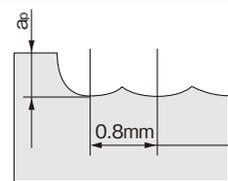
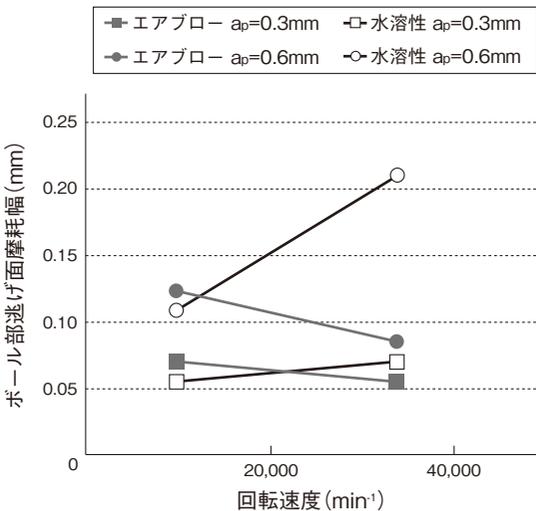
■7m切削後の摩耗状況を比較

硬さ	切削長さ (m)			中止時の 外周逃げ面摩耗幅	中止時の コーナ摩耗幅
	3	6	9		
40HRC	7m			0.07 mm	0.186mm
45HRC	7m			0.087mm	0.406mm
50HRC	■ 中断 1.05mで中断 (切削音大)			0.056mm	1.650mm
	■ 中断 2.1mで中断 (切削音大)			0.126mm	0.829mm

SKD61 (40HRC)切削における切削速度と工具寿命

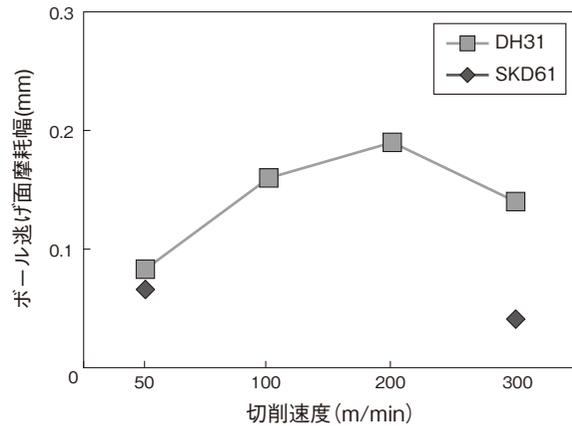
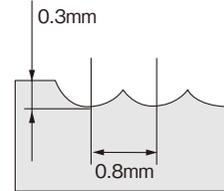
コメント	SKD61 (40HRC) 側面乾式切削に対するコーティング粉末HSSエンドミルの切削速度と工具寿命の関係を調査したが、切削速度は35m/min以下が常用範囲と言える。	 
使用工具	コーティング粉末HSSエンドミル	 <p>※寿命判定:外周逃げ面摩耗量0.1mm</p>
サイズ	φ10	
被削材質	SKD61 (40HRC)	
切削速度	33, 70, 100m/min (1,060 2,250 3,180min ⁻¹)	
送り速度	0.065mm/t	
切削方法	側面切削(ダウンカット)	
切込深さ	a _p =10mm a _e =0.5mm	
切削油剤	エアブロー	
使用機械	立形マシニングセンタ(BT50)	

SKD61 (50HRC)切削における切削油剤の影響

コメント	切込みが大きな場合、水溶性切削油剤を使用すると高速回転域で急激に工具摩耗が大きくなる。	 
使用工具	コーティング超硬ボールエンドミル	
サイズ	R4×8	
被削材質	SKD61 (50HRC)	
切削速度	263m/min, 789m/min (10,500min ⁻¹ , 31,400min ⁻¹)	
送り速度	0.15mm/t	
切込深さ	a _p =0.3mm, 0.6mm pr=0.8mm	
切削油剤	エアブロー、水溶性切削油剤	
使用機械	立形マシニングセンタ(BT30)	

DH31 切削における切削速度の影響

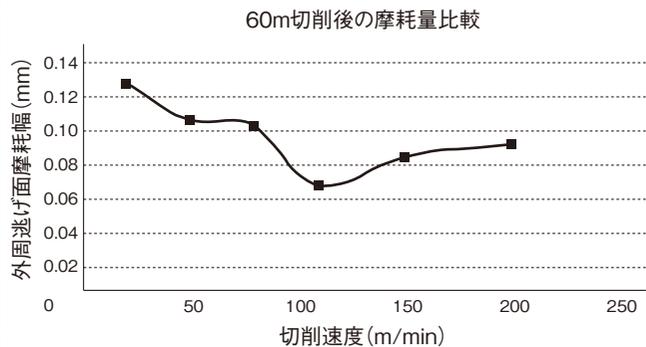
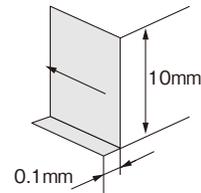
コメント	熱間金型鋼種SKD61の高性能材DH31の切削速度の影響を確認した結果、切削速度を50m/minと低く抑えた領域に摩耗進行が緩やかな領域が見られた。
使用工具	コーティング超硬ボールエンドミル
サイズ	R4×8
被削材質	DH31 (50HRC)、SKD61 (50HRC)
切削速度	50~300m/min
送り速度	0.05mm/t
切削方法	直線ピック加工
切込深さ	$a_p=0.3\text{mm}$ $p_r=0.8\text{mm}$
切削油剤	エアブロー
使用機械	立形マシニングセンタ (BT30)



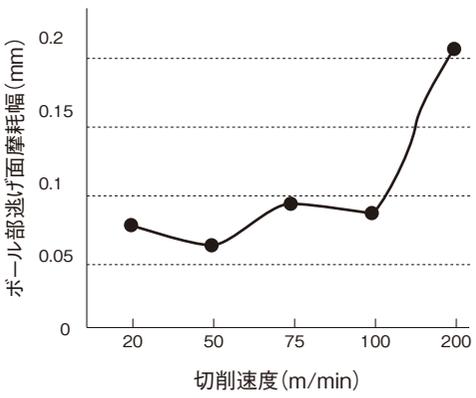
判定：42m加工時点のボール逃げ面摩耗

SKD11 (60HRC) 切削における切削速度と工具寿命

コメント	SKD11(60HRC)を各切削速度で切削しエンドミルの摩耗状況を調査した。(各々の切削速度で60m切削後の摩耗量を調査)その結果、高速域に工具摩耗の進行が遅くなる領域のあることが確認された。
使用工具	コーティング超硬エンドミル
サイズ	φ10
被削材質	SKD11 (60HRC)
切削速度	20~200m/min (640~6,370min ⁻¹)
送り速度	384~3,822mm/min (0.1mm/t)
切削方法	側面切削 (ダウンカット)
切込深さ	$a_p=10\text{mm}$ $a_e=0.1\text{mm}$
切削油剤	エアブロー
使用機械	立形マシニングセンタ (BT40)

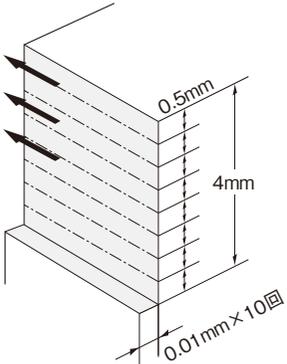


DC53(64HRC)切削における切削速度と工具寿命

コメント	各切削速度で20m切削後、摩耗量を比較した。切削速度を100m/minまで上げてても摩耗量の増加はなく、高硬度材の高速加工に期待が持てる。	
使用工具	コーティング超硬ボールエンドミル	<p>20m切削後の摩耗量比較</p> 
サイズ	R5×10	
被削材質	DC53(64HRC)	
切削速度	20~200m/min (1,866~18,660min ⁻¹)	
送り速度	0.05mm/t	
切込深さ	a _p =0.3mm p=1mm	
切削油剤	エアブロー	
使用機械	立形マシニングセンタ(BT40)	

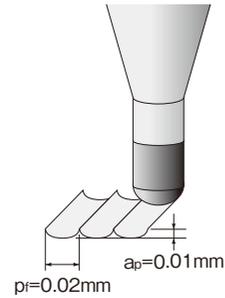
※切削速度は実切削最大径部における最大切削速度。

プリハードン鋼の立ち壁加工

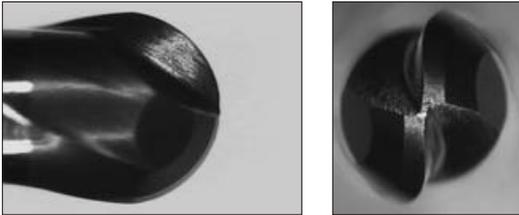
コメント	壁面のステップの切込み加工を行うことで、倒れ1μm以下、面粗さRz0.5μm以下を実現できた。													
														
使用工具	cBNエンドミル	<table border="1"> <tr> <td>たおれ</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>たおれ量(μm)</td> <td>1</td> <td></td> </tr> <tr> <td>軸方向面粗さRz(μm)</td> <td>0.5</td> <td></td> </tr> <tr> <td>ステップ回数</td> <td>8</td> <td></td> </tr> </table>	たおれ			たおれ量(μm)	1		軸方向面粗さRz(μm)	0.5		ステップ回数	8	
たおれ														
たおれ量(μm)	1													
軸方向面粗さRz(μm)	0.5													
ステップ回数	8													
サイズ	4×R0.5													
被削材質	プリハードン鋼(30HRC)													
回転速度	600m/min(48,000min ⁻¹)													
送り速度	1,920mm/min													
突出し長さ	28mm													
切込深さ	a _p =0.5mm a _e =0.01mm													
切削油剤	エアブロー													
使用機械	横形マシニングセンタ(BT30)													

SKD61 (53HRC)のcBNエンドミル加工

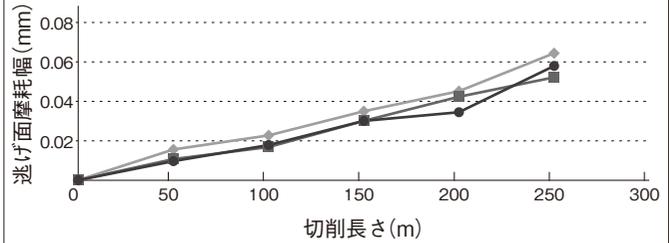
コメント	cBNボールエンドミル(ボール部ねじれ刃仕様)で焼入れ鋼の切削試験を行ったが、安定した切削ができ150m切削後も摩耗量はわずかであった。
使用工具	cBNボールエンドミル
サイズ	R0.5×2.5
被削材質	SKD61 (53HRC)
切削速度	140m/min (45,000min ⁻¹)
送り速度	2,000mm/min (0.022mm/t)
切込深さ	a _p =0.01mm p _f =0.02mm
切削油剤	エアブロー
使用機械	立形マシニングセンタ



150m加工後の刃先摩耗状態

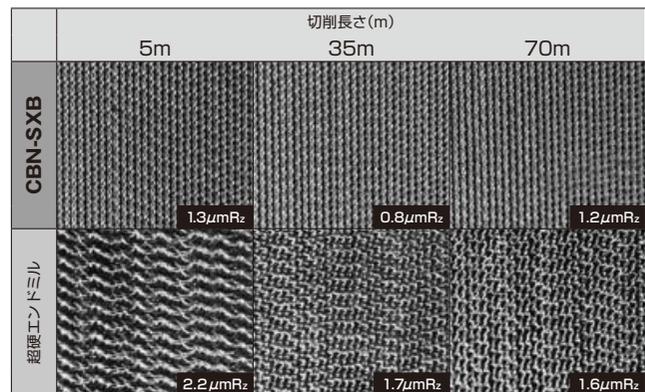
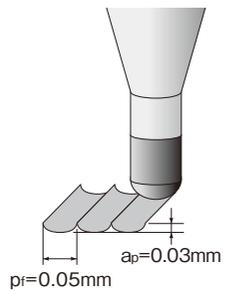


ボール部逃げ面摩耗量 0.03mm



SKH51 (65HRC)のcBNエンドミル加工

コメント	cBNボールエンドミル(ボール部ねじれ刃仕様)で焼入れ鋼の切削試験を行ったが、安定した高速切削が可能であった。良好な加工面を長時間持続することが可能である。
使用工具	cBNボールエンドミル
サイズ	R1×5
被削材質	SKH51 (65HRC)
切削速度	250m/min (40,000min ⁻¹)
送り速度	6,000mm/min (0.075mm/t)
切込深さ	a _p =0.03mm p _f =0.05mm
切削油剤	エアブロー
使用機械	立形マシニングセンタ



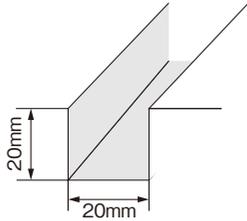
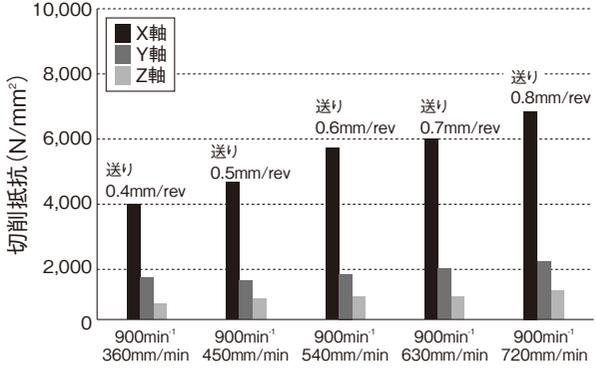
各種被削材の切削抵抗

コメント	コーティング超硬強ねじれエンドミルを用いて、各種被削材の溝切削での切削抵抗を比較した。 FC250に対し、SKD61 (50HRC) では2.5倍程度の切削抵抗の上昇が見られる。																																				
使用工具	コーティング超硬強ねじれエンドミル																																				
サイズ	φ16	<table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>FC250</th> <th>SS400</th> <th>S50C</th> <th>SCM440</th> <th>SKD61 (40HRC)</th> <th>SKD61 (50HRC)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>X</td> <td>0.8</td> <td>0.64</td> <td>0.96</td> <td>0.92</td> <td>1.44</td> <td>2.24</td> </tr> <tr> <td>Y</td> <td>1.6</td> <td>2.1</td> <td>3.2</td> <td>3.2</td> <td>3.8</td> <td>4.4</td> </tr> <tr> <td>Z</td> <td>1.26</td> <td>1.18</td> <td>1.72</td> <td>1.74</td> <td>2.04</td> <td>3</td> </tr> <tr> <td>合計</td> <td>3.66</td> <td>3.92</td> <td>5.88</td> <td>5.86</td> <td>7.38</td> <td>9.64</td> </tr> </tbody> </table>		FC250	SS400	S50C	SCM440	SKD61 (40HRC)	SKD61 (50HRC)	X	0.8	0.64	0.96	0.92	1.44	2.24	Y	1.6	2.1	3.2	3.2	3.8	4.4	Z	1.26	1.18	1.72	1.74	2.04	3	合計	3.66	3.92	5.88	5.86	7.38	9.64
	FC250		SS400	S50C	SCM440	SKD61 (40HRC)	SKD61 (50HRC)																														
X	0.8		0.64	0.96	0.92	1.44	2.24																														
Y	1.6		2.1	3.2	3.2	3.8	4.4																														
Z	1.26		1.18	1.72	1.74	2.04	3																														
合計	3.66		3.92	5.88	5.86	7.38	9.64																														
被削材質	FC250, SS400, S50C, SCM440, SKD61 (40HRC), SKD61 (50HRC)																																				
切削速度	50m/min (1,000min ⁻¹)																																				
送り速度	500mm/min (0.5mm/rev)																																				
切削方法	溝切削																																				
切込深さ	a _p =8mm																																				
切削油剤	不水溶性切削油剤																																				
使用機械	立形マシニングセンタ(BT50)																																				

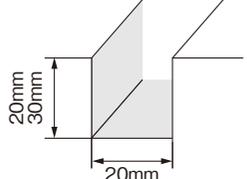
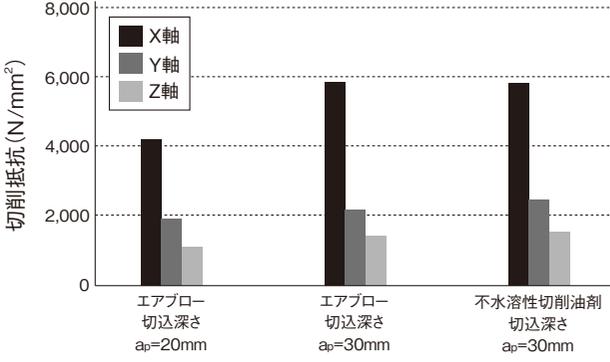
ボールエンドミル加工での各種被削材の切削抵抗

コメント	コーティング超硬ボールエンドミルを用いて各種被削材の抵抗を比較した。 FC250に対してSKD61 (50HRC) では2.5倍程度の切削抵抗の上昇が見られた。																										
使用工具	コーティング超硬ボールエンドミル																										
サイズ	R5×10	<table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>FC250</th> <th>S50C</th> <th>SKD61 (40HRC)</th> <th>SKD61 (50HRC)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>X 軸</td> <td>~100</td> <td>~250</td> <td>~300</td> <td>~350</td> </tr> <tr> <td>Y 軸</td> <td>~150</td> <td>~300</td> <td>~400</td> <td>~450</td> </tr> <tr> <td>Z 軸</td> <td>~100</td> <td>~200</td> <td>~250</td> <td>~300</td> </tr> <tr> <td>合力</td> <td>~250</td> <td>~450</td> <td>~600</td> <td>~750</td> </tr> </tbody> </table>		FC250	S50C	SKD61 (40HRC)	SKD61 (50HRC)	X 軸	~100	~250	~300	~350	Y 軸	~150	~300	~400	~450	Z 軸	~100	~200	~250	~300	合力	~250	~450	~600	~750
	FC250		S50C	SKD61 (40HRC)	SKD61 (50HRC)																						
X 軸	~100		~250	~300	~350																						
Y 軸	~150		~300	~400	~450																						
Z 軸	~100		~200	~250	~300																						
合力	~250		~450	~600	~750																						
被削材質	FC250, S50C, SKD61 (40HRC, 50HRC)																										
切削方法	直線ピック加工																										
切削速度	120m/min																										
送り速度	1,273mm/min (0.1mm/t)																										
切込深さ	a _p =1mm pi=3mm																										
切削油剤	エアブロー																										
使用機械	立形マシニングセンタ(BT50)																										

ラフィングエンドミルにおける送り速度と切削抵抗

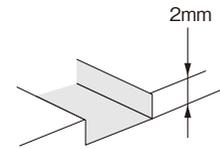
コメント	コーティング粉末HSSラフィングエンドミルφ20にて回転速度を 900min^{-1} ($57\text{m}/\text{min}$)で一定のもと、回転当りの送り量を $0.4\text{mm}/\text{rev}$ から $0.8\text{mm}/\text{rev}$ へと上げて行き切削抵抗3分力の測定を行った。回転当りの送り量を上げるにつれて、切削抵抗も増加していく。	 
使用工具	コーティング粉末HSSラフィングエンドミル	
サイズ	φ20	
被削材質	S50C	
切削速度	$57\text{m}/\text{min}$ (900min^{-1})	
送り速度	$0.4\text{mm}/\text{rev} \sim 0.8\text{mm}/\text{rev}$	
切削方法	溝切削	
切込深さ	$a_p=20\text{mm}$	
切削油剤	エアブロー	
使用機械	立形マシニングセンタ (BT50)	

ラフィングにおける切込深さと切削抵抗

コメント	コーティング粉末HSSラフィングエンドミルφ20にて切込深さを変えて切削抵抗の3分力を測定したが、切込深さを大きくすると切削抵抗も増大する。不水溶性切削油剤使用時に対しエアブローの方が切削抵抗がわずかに小さいのは、この実験においては、エアブローの方が切りくずの強制排出性に優れていたためと考えられる。	 
使用工具	コーティング粉末HSSラフィングエンドミル	
サイズ	φ20	
被削材質	S50C	
切削速度	$57\text{m}/\text{min}$ (900min^{-1})	
送り速度	$360\text{mm}/\text{min}$ ($0.4\text{mm}/\text{rev}$)	
切削方法	溝切削	
切込深さ	$a_p=20\text{mm}, 30\text{mm}$	
切削油剤	エアブロー、不水溶性切削油剤	
使用機械	立形マシニングセンタ (BT50)	

エンドミル刃先の振れが工具寿命に及ぼす影響

コメント	エンドミル外周刃の振れが大きくなるほど工具寿命も短くなる。エンドミル自体の振れ精度も重要であるが、機械に取り付けるときの振れの管理も大変重要と言える。	
使用工具	コーティング超硬エンドミル(2枚刃)	
サイズ	φ4	
被削材質	SKD61 (40HRC)	
切削速度	36m/min (2,866min ⁻¹)	
送り速度	46mm/min (0.008mm/t)	
切削方法	溝切削	
切込深さ	a _p =2mm	
切削油剤	不水溶性切削油剤	
使用機械	立形NCフライス盤 (NT30)	



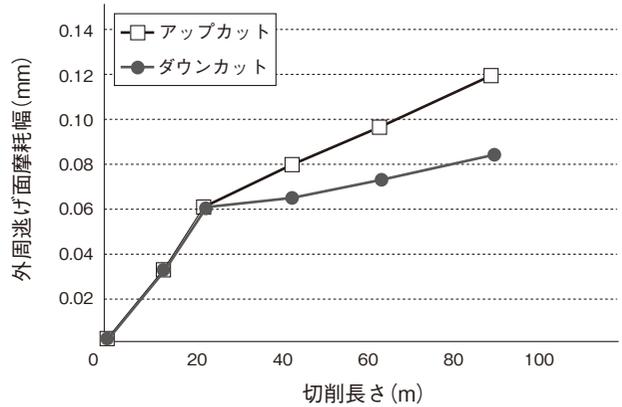
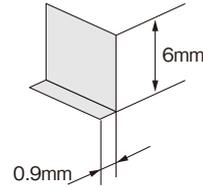
外周刃の振れ(mm)	取り付け時振れ(mm)	切削長さ(m)				判定
		0	2	4	6	
0.006	0.005				7m	摩耗 VB=0.103mm
0.006	0.015			5.6m		コーナ刃欠け(0.106mm)
0.014	0.008				7m	摩耗 VB=0.134mm
0.014	0.012		2.8m			コーナ刃欠け(0.082mm)
0.018	0.008				7m	摩耗 VB=0.124mm
0.018	0.014			4.2m		コーナ刃欠け(0.093mm)
0.023	0.008			4.2m		コーナ刃欠け大(0.315mm)
0.023	0.022		1.4m			コーナ刃欠け大

切込み量と加工精度(切込み誤差、たおれ)との関係

コメント	SKD11 (60HRC)の径方向切込み量と送り速度の変化による、加工ワークの精度変化(切込み誤差、たおれ)を調査した。 送り量の増加より、径方向切込み量の増加の方が基準面からの切込み誤差、たおれ量の変化に大きく影響することがわかる。	
使用工具	コーティング超硬エンドミル	
サイズ	φ10	
被削材質	SKD11 (60HRC)	
切削速度	100m/min (3,200min ⁻¹)	
送り速度	0.3mm/rev, 0.6mm/rev	
切削方法	側面切削(ダウンカット)	
切込深さ	a _p =15mm a _e =0.01mm~0.2mm	
切削油剤	エアブロー	
使用機械	立形マシニングセンタ(BT40)	

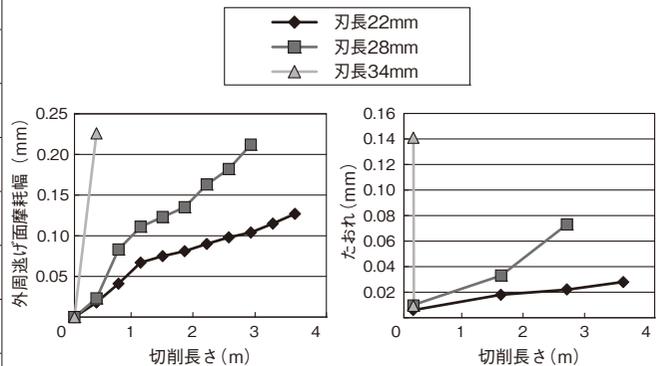
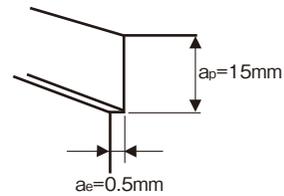
アップカットとダウンカット

コメント	アップカットとダウンカットでの工具寿命をS50C切削で比較した。ダウンカットの方がアップカットより工具摩耗においては有利である。
使用工具	コーティング超硬エンドミル
サイズ	φ10
被削材質	S50C (92HRB)
切削速度	100m/min (3,200min ⁻¹)
送り速度	1,300mm/min(0.068mm/t)
切削方法	側面切削
切込深さ	a _p =6mm a _e =0.9mm
切削油剤	水溶性切削油剤
使用機械	立形マシニングセンタ(BT40)



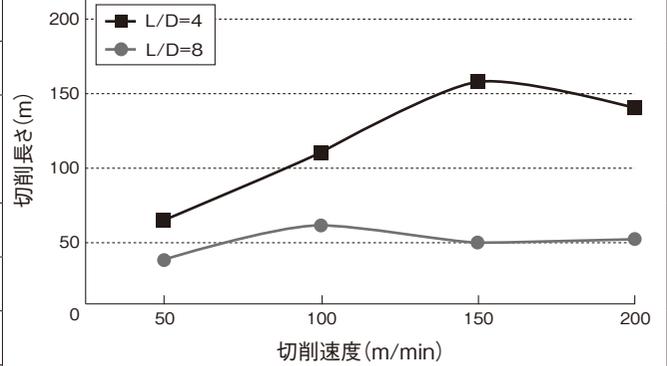
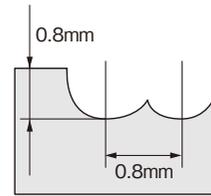
刃長の違いによる寿命、たおれ量の比較

コメント	できるだけ刃長の短いエンドミルを使うことが寿命延長とたおれの少ない精度の高い加工を実現する。
使用工具	超硬エンドミル(2枚刃):刃長22mm、28mm、34mm
サイズ	φ10
被削材質	SKD61 (40HRC)
切削速度	950min ⁻¹ (30m/min)
送り速度	38mm/min(0.02mm/t)
切込深さ	a _p =15mm a _e =0.5mm
切削方法	側面切削(アップカット)
切削油剤	不水溶性切削油剤
使用機械	立形マシニングセンタ(BT40)



工具突出し長さと切削性能

コメント	ホルダ端面からの工具突出し長さ(L/D)を変えて、各切削速度における工具寿命を調査した。L/D=8ではL/D=4のような高速域での優位性が顕著ではないものの、切削速度250m/minでの切削も充分可能であった。
使用工具	コーティング超硬ロングシャンクボールエンドミル
サイズ	R4×8
被削材質	SKD61 (50HRC)
切削速度	50、100、150、200m/min 1,990、3,980、5,970、7,960min ⁻¹
送り速度	300、600、900、1,200mm/min (0.075mm/t)
切込深さ	a _p =0.8mm p _r =0.8mm
切削油剤	エアブロー
使用機械	立形マシニングセンタ(BT40)



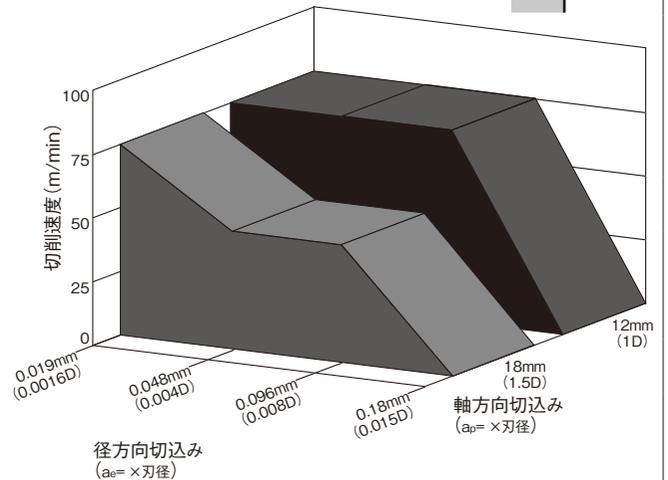
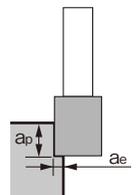
※寿命判定=ボール部逃げ面摩擦幅0.1mm

工具突出し量と切削領域

コメント	コーティング超硬ロングシャンクエンドミルを使用し、突出し量L/D=7での切削適応領域を調査した。軸方向切込深さ(a _p)を1.5Dから1Dにすることで切削適応領域が広がった。
使用工具	コーティング超硬ロングシャンクエンドミル
サイズ	φ12×R1
被削材質	SKD61 (40HRC)
切削速度	25~100m/min (670~2,660min ⁻¹)
送り速度	201~798mm/min (0.075mm/t)
切削方法	側面切削(ダウンカット)
切込深さ	右記グラフ参照
切削油剤	エアブロー
使用機械	横形マシニングセンタ(BT40)

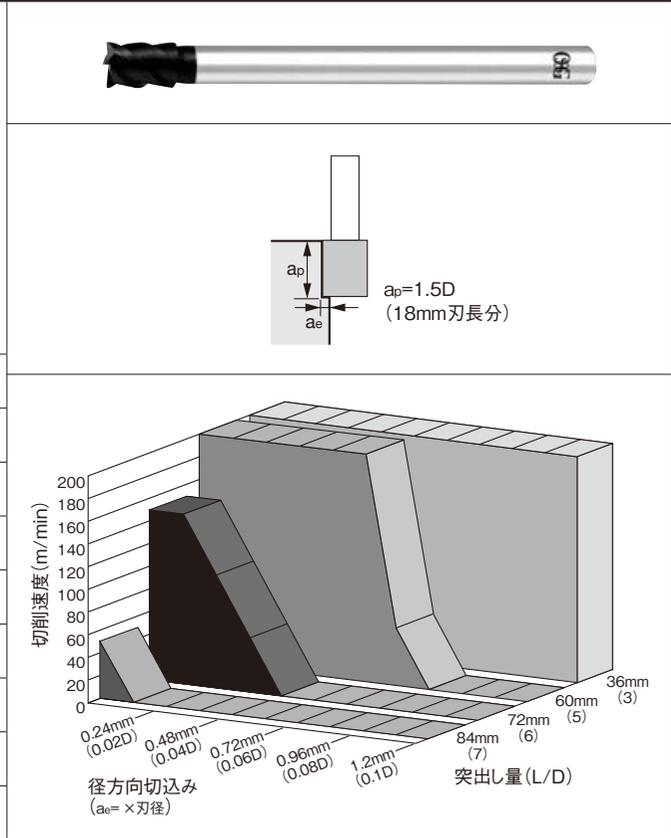


工具突出し量 L/D=7



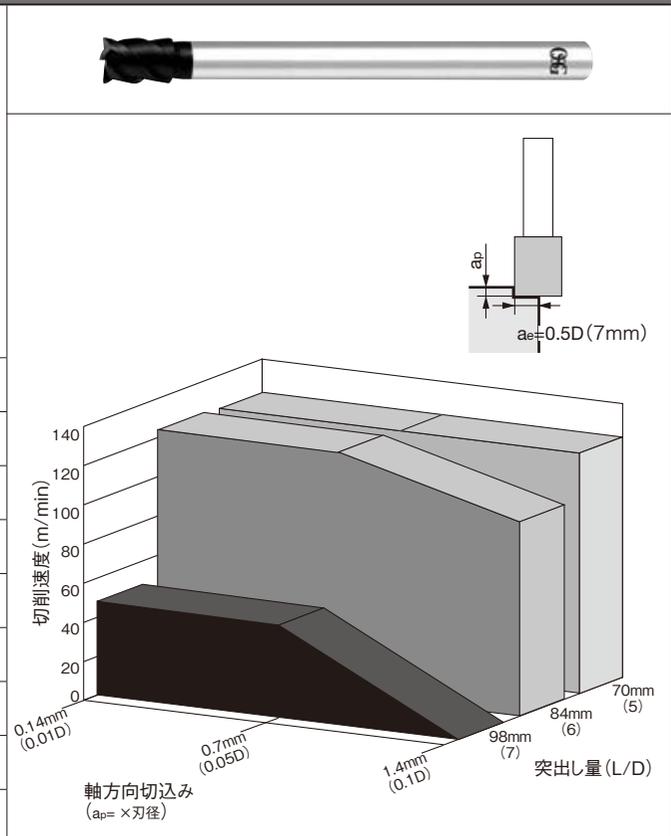
工具突出し長さで切削領域

コメント	コーティング超硬ロングシャンクエンドミルを使用し、側面切削における各突出し量(L/D)での切削適応領域を調査した。L/D=7になると切削適応領域が急激に狭くなる。この場合、切込深さを少なくする必要がある。
使用工具	コーティング超硬ロングシャンクエンドミル
サイズ	φ12×R1
被削材質	SKD61 (40HRC)
切削速度	50~200m/min (1,330~5,310min ⁻¹)
送り速度	399~1,593mm/min (0.075mm/t)
切削方法	側面切削 (ダウンカット)
切込深さ	a _p =1.5D (18mm) a _e =グラフに示す
切削油剤	エアブロー
使用機械	横形マシニングセンタ (BT40)



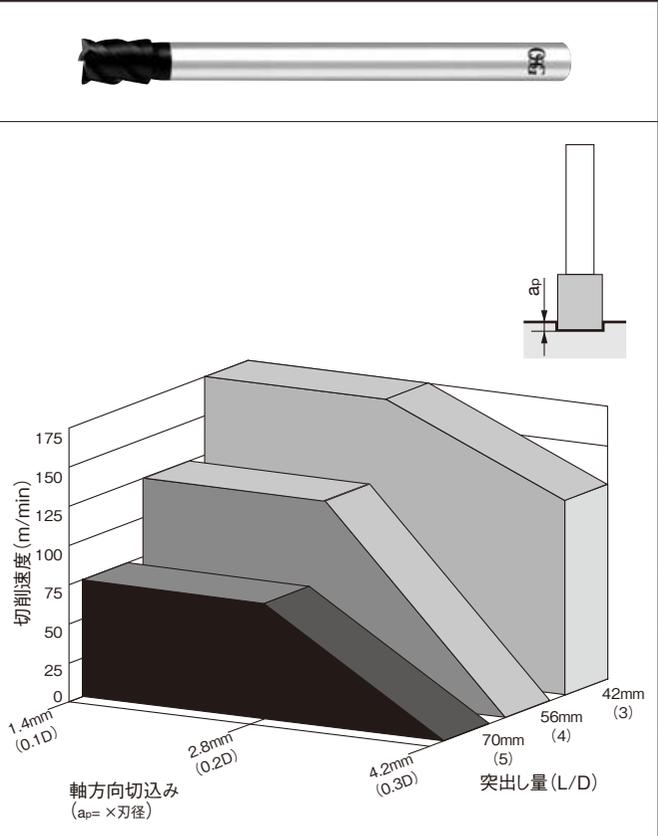
工具突出し長さで性能

コメント	コーティング超硬ロングシャンクエンドミルを使用し、L/Dを変えて切削適応領域を調査した。L/Dが7でも切削速度、切込深さを控えることで対応が可能であった。
使用工具	コーティング超硬ロングシャンクエンドミル
サイズ	φ14×R1
被削材質	SKD61 (40HRC)
切削速度	20~140m/min (460~3,190min ⁻¹)
送り速度	138~957mm/min (0.075mm/t)
切削方法	端面切削
切込深さ	a _p =グラフに示す
切削油剤	エアブロー
使用機械	横形マシニングセンタ (BT40)



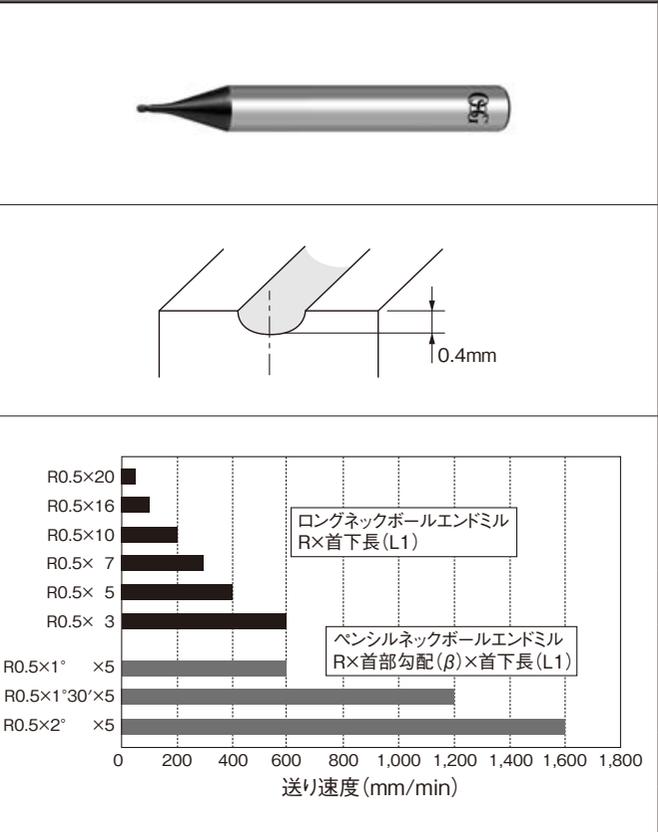
工具突出し長さと性能

コメント	コーティング超硬ロングシャンクエンドミルでの正面切削における切削適応領域を突出し量(L/D)を変えて調査した。L/Dの増加にともない切削速度を下げることが望まれる。また切込深さも少なくすることで良好な加工が可能となる。
使用工具	コーティング超硬ロングシャンクエンドミル
サイズ	φ14×R1
被削材質	SKD61 (40HRC)
切削速度	25~175m/min (570~3,980min ⁻¹)
送り速度	171~1,194mm/min (0.075mm/t)
切削方法	端面切削(溝)
切込深さ	右記グラフ参照
切削油剤	エアブロー
使用機械	横形マシニングセンタ(BT40)

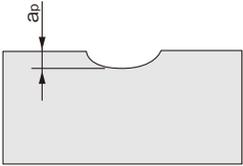


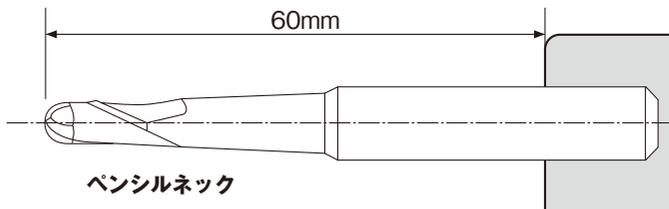
首部勾配による折損強度の向上

コメント	各々のエンドミルで、送り速度を徐々に上げて行き、折損が発生する送り速度を調査した。その結果、ロングネック(首部勾配無し)ボールエンドミルに対し、ペンシルネック(首部勾配有り)ボールエンドミルは、折損強度が大きく向上していることがわかる。	
使用工具	コーティング超硬ボールエンドミル ペンシルショートネック	コーティング超硬ボールエンドミル
サイズ	R0.5	R0.5
被削材質	S50C (92HRB)	
切削速度	64m/min (20,000min ⁻¹)	
送り速度	右図参照	
切削方法	直線切削	
切込深さ	a _p = 0.4mm	
切削油剤	エアブロー	
使用機械	立形マシニングセンタ(BT30)	



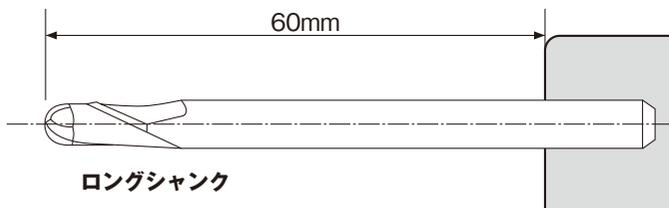
工具突出し量が大きいの加工

コメント	首がテーパ状になっているコーティング超硬ペンシルネックボールエンドミルは工具剛性が高く、突出し量を10Dと大きくしても広い範囲の切削条件域で加工が可能である。	
使用工具	コーティング超硬ペンシルネックボールエンドミル	
サイズ	R3×6×90	
被削材質	NAK55(40HRC)	
回転速度	3,350min ⁻¹ (7,000min ⁻¹)	
送り速度	0.025~0.2mm/t	
切削方法	溝切削	
切込深さ	a _p =0.6mm, 1.2mm, 1.8mm	
切削油剤	エアブロー	
使用機械	立形マシニングセンタ(BT40)	



a _p の切込み(mm)	回転速度 (min ⁻¹)	刃当たり送り速度(mm/t)							
		0.025	0.05	0.075	0.1	0.125	0.15	0.175	0.2
0.6	3,350	○	○	○	○	○	○	○	○
	7,000	○	○	○	○	○	○	○	○
1.2	3,350	○	○	○	○	○	○	○	○
	7,000	○	○	○	○	○	○	○	○
1.8	3,350	○	○	○	○	○	○	○	△
	7,000	×	○	○	○	○	○	△	△

判定:切削音 小:○ 中:△ 大:×

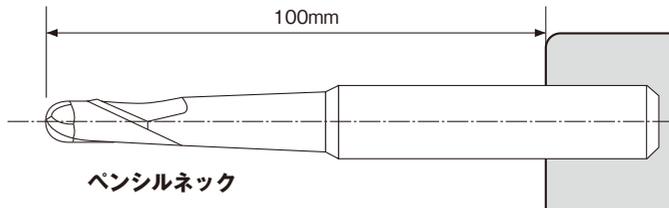


a _p の切込み(mm)	回転速度 (min ⁻¹)	刃当たり送り速度(mm/t)							
		0.025	0.05	0.075	0.1	0.125	0.15	0.175	0.2
0.6	3,350	○	○	○	○	○	○	○	△
	7,000	△	△	△	○	○	○	○	△
1.2	3,350	○	○	○	○	○	△	△	△
	7,000	×	×	△	△	×	×	×	×
1.8	3,350	○	○	○	○	△	△	×	×
	7,000	×	×	×	×	×	×	×	×

判定:切削音 小:○ 中:△ 大:×

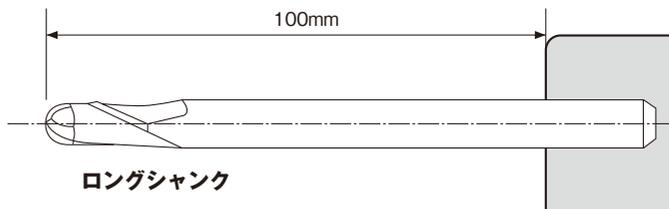
工具突出し量が多い時の加工

コメント	首がテーパ状になっているコーティング超硬ペンシルネックボールエンドミルは工具剛性が高く、突出し量が100mmと大きくしても広い範囲の切削条件域で加工が可能である。	
使用工具	コーティング超硬ペンシルネックボールエンドミル	
サイズ	R5×10×130	
被削材質	S50C	
切削速度	94~220m/min (3,000~7,000min ⁻¹)	
送り速度	0.025~0.1mm/t	
切削方法	溝切削	
切込深さ	a _p =0.5mm, 1mm	
切削油剤	エアブロー	
使用機械	立形マシニングセンタ(BT40)	



a _p の切込み (mm)	回転速度 (min ⁻¹)	切削速度 (m/min)	刃当たり送り速度 (mm/t)			
			0.025	0.05	0.075	0.1
0.5	4,000	(45)	○	○	○	○
	5,000	(56)	○	○	○	○
	6,000	(68)	×	△	○	○
	7,000	(79)	××	△	○	○
1	3,000	(56)	○	○	○	○
	4,000	(75)	×	×	○	○
	5,000	(94)	××	×	△	○
	6,000	(113)	×××	××	×	△

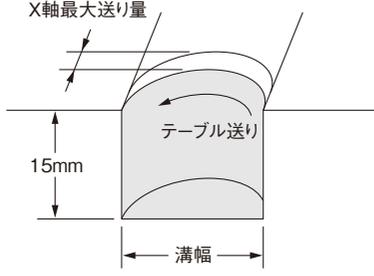
判定: 切削音 小:○ 中:△ 大:× 非常に大:×× 極めて大:×××



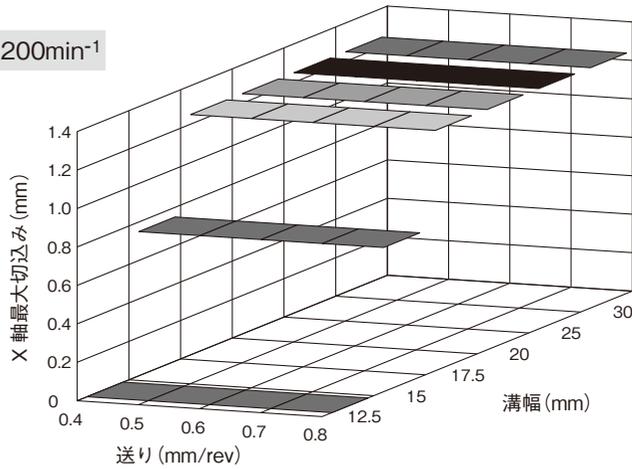
a _p の切込み (mm)	回転速度 (min ⁻¹)	切削速度 (m/min)	刃当たり送り速度 (mm/t)			
			0.025	0.05	0.075	0.1
0.5	4,000	(45)	△	△	○	○
	5,000	(56)	×	△	△	○
	6,000	(68)	××	××	×	△
	7,000	(79)				
1	3,000	(56)	×	×	△	○
	4,000	(75)	××	×	×	△
	5,000	(94)	×××	××	×	×
	6,000	(113)				

判定: 切削音 小:○ 中:△ 大:× 非常に大:×× 極めて大:×××

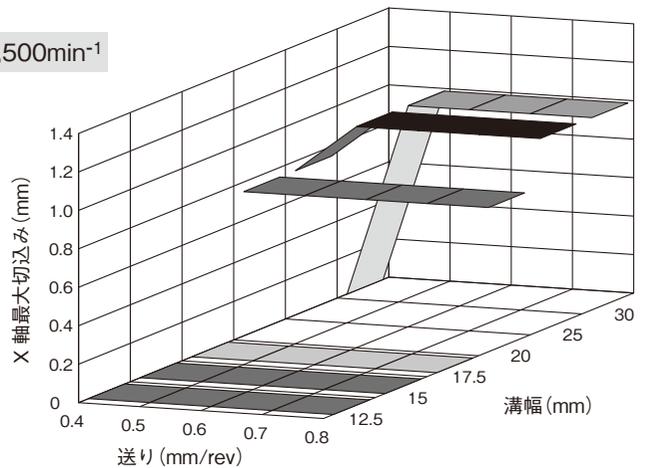
トロコイド加工での切削領域

コメント	コーティング超硬エンドミルを用いて、回転速度、送り速度、加工溝幅の条件を変えて、トロコイド加工の切削可能領域を確認した。回転速度 $3,200\text{min}^{-1}$ では、加工溝幅 15mm 以上で大きな切込みの加工ができるが、 $9,500\text{min}^{-1}$ では加工溝幅が 20mm を超えないと加工が難しくなる。	
使用工具	コーティング超硬エンドミル	
サイズ	$\phi 10$	
被削材質	S50C	
回転速度	$3,200\text{min}^{-1}$ 、 $9,500\text{min}^{-1}$	
送り速度	$0.4\sim 0.8\text{mm/t}$	
切削方法	トロコイド	
切込深さ	$a_p=15\text{mm}$	
X軸切込	グラフ参照	
溝幅	グラフ参照	
使用機械	横形マシニングセンタ(BT40)	

回転速度 $3,200\text{min}^{-1}$

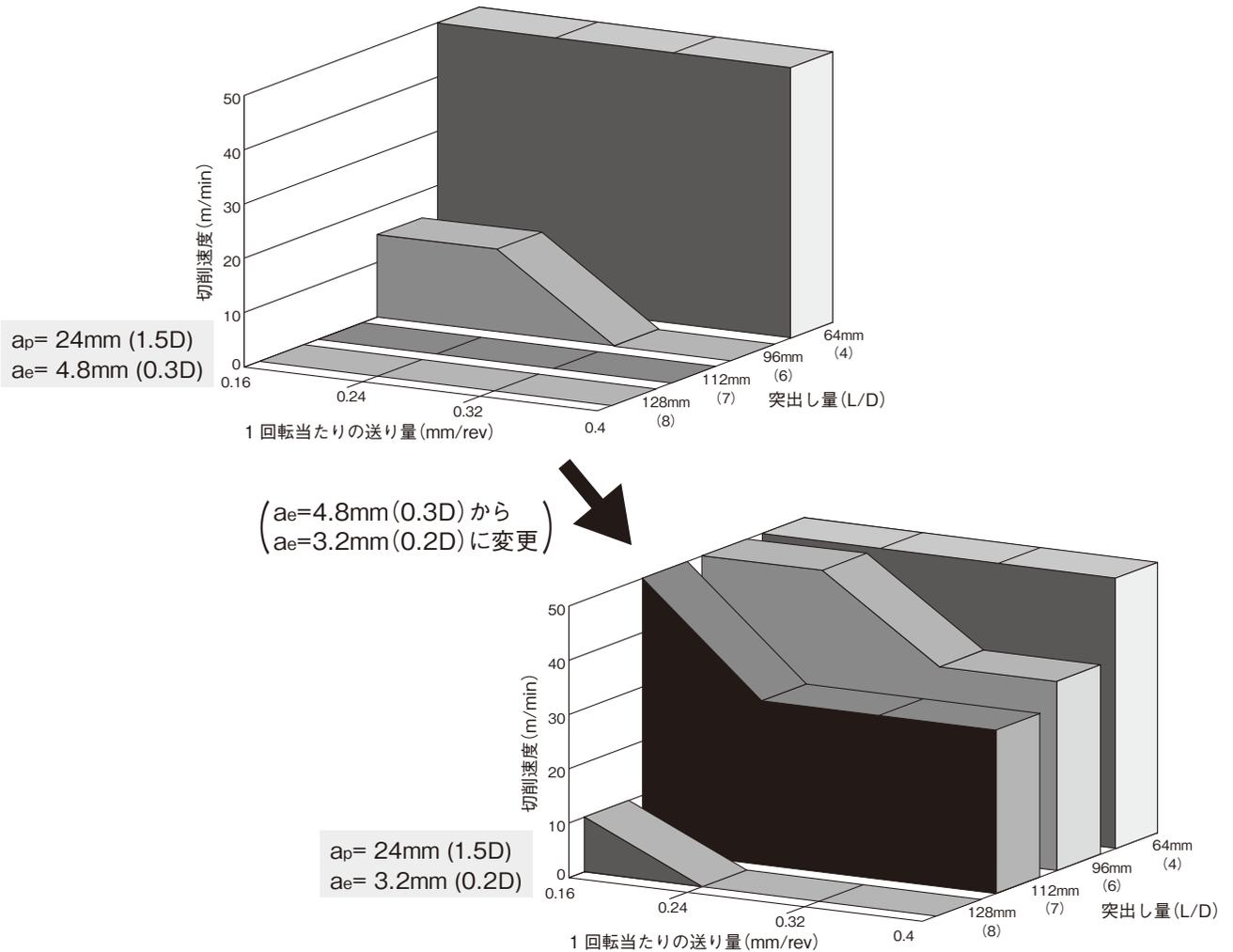


回転速度 $9,500\text{min}^{-1}$



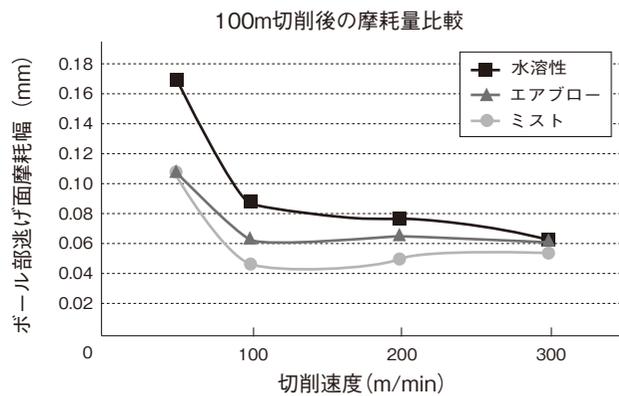
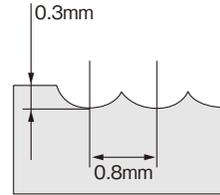
ラフィングエンドミルにおける工具突出し量の変化による切削領域

コメント	突出し長さの違いによる切削適応領域の変化を調べた結果、L/Dが6以上となると領域は急激に狭くなった。この場合切込深さ(a_e)を下げることで、切削適応領域を広げることができる。	
使用工具	コーティング粉末HSSラフィングエンドミル	
サイズ	$\phi 16$	
被削材質	SKD61(40HRC)	
切削速度	15, 30, 50, 70m/min (298, 597, 994, 1,393min ⁻¹)	
1回転当たりの送り量	0.16, 0.24, 0.32, 0.4mm/rev	
切削方法	側面切削(ダウンカット)	
切込深さ	$a_p=24\text{mm}$ $a_e=4.8\text{mm}(3.2\text{mm})$	
切削油剤	不水溶性切削油剤	
使用機械	立形マシニングセンタ(BT50)	



切削油剤の影響

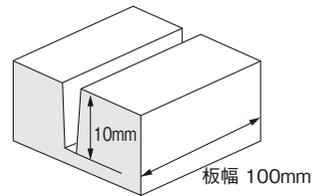
コメント	SKD61 (50HRC) のボールエンドミルによる加工において、切削油剤の工具寿命に及ぼす影響を調べた。オイルミストが最も耐久が良く、続いてエアブロー、水溶性という順であった。また、切削速度50m/minよりも高速の100m/min以上の方が耐久が良く、更に300m/minまで上げてても耐久に大きな違いは見られないという興味深い結果であった。
使用工具	コーティング超硬ボールエンドミル
サイズ	R4×8
被削材質	SKD61 (50HRC)
切削速度	50~300m/min (5,240~31,420min ⁻¹)
送り速度	0.05mm/t
切込深さ	a _p =0.3mm pr=0.8mm
切削油剤	エアブロー、ミスト、水溶性切削油剤
使用機械	立形マシニングセンタ (BT30)



※切削速度は実切削最大径部における最大切削速度。

リブ溝加工におけるオイルミストの効果

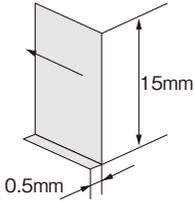
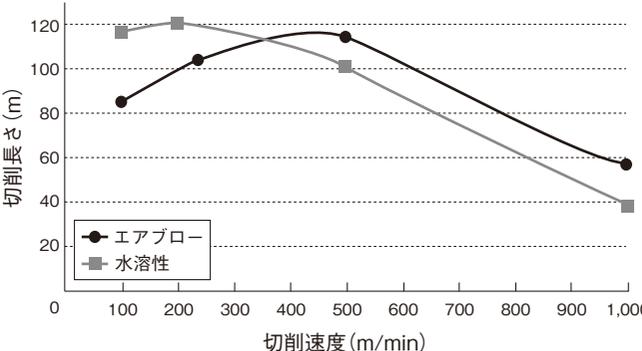
コメント	リブ溝加工における各種クーラントの性能を確認したところ、オイルミスト(MQL)が良好な結果を示し、水溶性切削油剤と比較して大幅な寿命向上が得られた。
使用工具	コーティング超硬小径ターバエンドミル
サイズ	1×1°×12
被削材質	プリハードン鋼 NAK80 (40HRC)
切削速度	49m/min (15,500min ⁻¹)
送り速度	445mm/min (0.019mm/rev)
切削方法	リブ溝切削 (直線切削)
切込深さ	a _p =0.02mm 深さ10mm
切削油剤	水溶性切削油剤、エアブロー、MQL (オイルミスト)
使用機械	立形マシニングセンタ (BT40)



切削油剤	切削長さ (m)	
	250	500
水溶性	254.2m	
エアブロー	294.9m	
オイルミスト	479.9m	

※寿命判定=折損

切削速度、切削油剤の工具寿命に及ぼす影響

コメント	<p>S50Cの高速切削において、切削油剤(エアブローと水溶性切削油剤)の工具寿命に及ぼす影響を調べた。切削速度300m/min以下では、水溶性の方が寿命が得られたが、400m/min以上では、逆にエアブローの方が寿命が得られた。また上記のような切削において、エアブローでは切削速度94m/minよりも高速の471m/minの方が切削長さが長いという興味深い結果が得られた。</p>	
使用工具	コーティング超硬エンドミル	
サイズ	φ15	 <p>※寿命判定=外周刃摩耗量0.1mm</p>
被削材質	S50C	
切削速度	94~942m/min (2,000~20,000min ⁻¹)	
送り速度	0.05mm/t	
切削方法	側面切削(ダウンカット)	
切込深さ	ap=15mm ae=0.5mm	
切削油剤	エアブロー、水溶性切削油剤	
使用機械	横形マシニングセンタ (BT40)	

用語解説

エンドミル用語

外径	エンドミルの刃部の直径。
全長	刃部、首部、シャンク部を含めたエンドミル全体の長さ。
刃長	エンドミルの刃部の長さ。
シャンク径	エンドミルのシャンクの直径。
シャンク	エンドミルの柄。
テーパシャンク	テーパ形状のシャンク。
ストレートシャンク	円筒状のシャンク。
フラット	シャンクの円筒部に設けた平たん部。
首	エンドミルの刃部とシャンク部をつなぐ部分。首部が明確に分かれていない場合もある。
首径	エンドミルの首部の直径。
切れ刃	エンドミルのすくい面と逃げ面の稜線によって作られる部分。
主切れ刃	主たる切削をおこなう切れ刃の部分。
副切れ刃	切れ刃のうち主切れ刃を除く部分。
外周刃	エンドミルの外周にある切れ刃。
底刃	エンドミルのシャンクと反対側の端面にある切れ刃。
等底刃	切れ刃の長さがすべて等しいエンドミルの底刃。
不等底刃	切れ刃の長さが異なるエンドミルの底刃。
テーパ刃	テーパ状になったエンドミルの外周刃。
ストレート刃	円筒状のエンドミルの外周刃。
センタ穴付き刃	センタ穴を持ったエンドミルの底刃。
センタカット刃	中心まで切れ刃を持ったエンドミルの底刃。
スクエア刃	コーナ部がR状になっていない角形のエンドミル底刃。
ボール刃	ボール状のエンドミル底刃。
ラジアス刃	コーナ部がR状になったエンドミル底刃。
面取り刃	面取りコーナを持ったエンドミル底刃。
ニック	切りくずを分断する目的で切れ刃に設けた狭い溝。
ニック切れ刃	ニックを持つ切れ刃。
ラフィング切れ刃	波状になった切れ刃。
直刃	ねじれの無い軸線に平行なエンドミルの外周切れ刃。
ねじれ刃	ねじれを持ったエンドミルの外周切れ刃。
右ねじれ刃	シャンク側から見て時計回り（進み勝手）の方向にねじれた切れ刃。
左ねじれ刃	シャンク側から見て半時計回り（戻勝手）の方向にねじれた切れ刃。
千鳥刃	ねじれ方向が互い違いになっている切れ刃。
リード	ねじれた切れ刃に沿って、軸の周りを1回転したときに進む距離。
右刃	エンドミルのシャンク側から見たときに切れ刃が右側にある場合の呼び方。
左刃	エンドミルのシャンク側から見たときに切れ刃が左側にある場合の呼び方。
刃数	エンドミルの刃の数。
チップ	エンドミルの本体にろう付け、ねじ止めなどで取り付けて使用する刃部材量の部分。
スローアウェイチップ	ねじ止めなどによる着脱可能なチップ。工具寿命に達すると、再研削することなく使い捨てにすることによりこう呼ばれる。インデキサブル・インサートとも言う。
すくい面	切削の際に切りくずが流れていく側の面。逃げ面側でない面。
逃げ面	切削の際に不必要な接触を避けるために逃がした面。
マージン	逃げ面上で逃げ角を持たない丸ランドの部分。
溝底	エンドミルの溝の最もへこんだ部分。
溝の深さ	切れ刃から溝底までの深さ。
チップポケット	切削中の切りくずを収容し排出させるために設けられた空間。
心厚	溝底の直径。
ギャッシュ	底刃を形成する溝。
底刃のすかし	エンドミル底刃の外周側から中心に向けてへこむように設けられた中凹形状。
ラジアルレーキ	半径方向のすくい角。
アキシャルレーキ	軸方向のすくい角。
いんろう	凹凸のしっくりしたはめあいを言う。印籠のようなしっくりしたはめあいからきた言葉とも言われている。

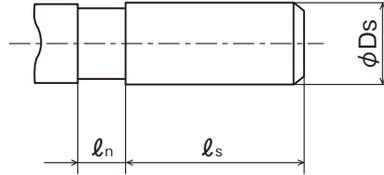
エンドミル加工用語

回転速度	1分間当たりの回転数。	min ⁻¹
切削速度	切れ刃と工作物の相対速度。切削速度 v_c は次のように求める。 $v_c = \pi \cdot D_c \cdot n / 1000$ π ：円周率 D_c ：エンドミルの外径 (mm) n ：回転速度 (min ⁻¹)	m/min
送り速度	工具と工作物の相対的移動速度。	mm/min
1回転当たりの送り量	エンドミルの1回転当たりの送り量 f は次のように求める。 $f = v_f / n$ v_f ：送り速度 (mm/min) n ：回転速度 (min ⁻¹)	mm
1刃当たりの送り量	エンドミルの1刃当たりの送り量 f_z は次のように求める。 $f_z = v_f / z \cdot n$ v_f ：送り速度 (mm/min) z ：エンドミルの刃数 n ：回転速度 (min ⁻¹)	mm/t
軸方向切込深さ	エンドミルの軸方向におけるエンドミルが切込んでいる深さ。	mm
半径方向切込深さ	エンドミルの半径方向におけるエンドミルが切込んでいる深さ。	mm
切取り厚さ	エンドミルの切れ刃が工作物中を切削するときの工作物が切り取られる厚さ。	mm
ピックフィード	金型の自由曲面加工などをする際のエンドミルの送り方向に対して直角方向のずらし量。	mm
MQL	微量の切削油剤を圧縮空気に混合して供給するセミドライ加工方法。 (Minimum Quantity Lubrication)	
アップカット	エンドミルの回転方向と工作物の送り方向が逆の削り方。上向き削り。	
ダウンカット	エンドミルの回転方向と工作物の送り方向が同じ向きの削り方。下向き削り。	
エンゲージ角	正面切削において工具(エンドミル)中心と切れ刃の食い付き点を結んだ線と送り方向の成す角度。	
比切削抵抗	単位切削断面積(1mm ²)の切削に要する切削抵抗。	N/mm ²
切削抵抗	切削時に刃先が受ける抵抗力。主分力、送り分力、背分力の3分力で測定される。	N
ドライ加工	切削油剤を使用しない加工。	
ウェット加工	切削油剤を使用した加工。	
セミドライ加工	ミスト状の切削油剤を混合した圧縮空気を使用した加工。特に極めて微量の切削油剤を圧縮空気に混合して供給するセミドライ加工方法をMQL(Minimum Quantity Lubrication)と言う。	
トレランス	実際との間に生ずる近似誤差。分解能。例えば自由曲線の工具径路において、これを微小直線の連続した近似経路とした場合、実際との間に誤差が生ずる。この近似誤差をトレランスと言う。	
補間	任意の2点を連続して結ぶ場合に、関数を選ぶことでその2点間の途中の点を表すこと。自由曲線の工具経路を微小直線の連続した近似経路で代用した場合、トレランスを小さくするとNCデータが肥大化する。そこで、円弧補間、スプライン補間などが用いられる。	
工具寿命方程式	F.W.テラーの工具寿命方程式。 $v_c \cdot T^m = C$ v_c ：切削速度 (m/min) T ：寿命時間 (min) m, C ：定数 これは実験式であり、理論式ではない。数種の条件で試験を行い、この式が成り立つ範囲であれば寿命を予測することができる。	
ツーリング	切削工具をマシニングセンタなどに取り付ける際の保持方法を言う。 保持具そのものや保持作業を指して言うこともある。	
塑性変形	固体が弾性限度を越えて変形をし、外力をなくしても変形したままとなっている状態の変形を言う。 切削における切りくずの生成過程においても塑性変形が起こっている。	
高速ミーリング	浅切込み、高送りを前提とし、できるだけ工具にかかる負荷を抑えた高速回転による連続切削方法を言う。高速に回転した小径ボールエンドミルを用いて、少ない種類の工具で高精度な形状加工をおこなえば、CAMの軽減も図れる。また、高速ミーリングではF.W.テラーの工具寿命方程式 $v_c \cdot T^m = C$ に反して高速域で工具摩耗の進行が遅くなる領域があることも確認されている。	
せん断	任意の平面に、同時に反対方向の力を作用させ変形させること。 はさみで紙を切る時のような力の加えかたによる変形。	
せん断角	切りくずがせん断を生じ生成される際のせん断面の傾き。 せん断とは、弾性体が体積を変えずに形状だけを変えるような変形を言う。	
工具寿命	実験室では、刃先の損傷や摩耗を観察し、あらかじめ設定した一定量の摩耗に到達した時点を工具寿命と判断をしている。実加工においては、加工物被削面の粗さや、加工寸法、精度の変化によって寿命を判断するのが一般的であり、量産加工などではあらかじめ調査をした結果により定数加工後を工具寿命と判断することもある。	
剛性	外力による変形のしにくさ。しなったり、ねじれたりしない強さの特性。硬いとか柔らかいとは別の特性。	
応力	物体に外から力(荷重)が作用したときに、そのものの内部に生じる力(ストレス)のこと。	
ヤング率	弾性限界内の応力とひずみの関係は σ (応力) = $E \cdot \varepsilon$ (ひずみ)で表される。 このときのEの値がヤング率。たわみ剛性などと言われることもある。	
びびり振動	工具と加工物の間で継続的に起こる振動のこと。 びびり振動が発生すると被削面は悪化し、工具の破損を招くことになる。	

参考資料

■ フライス用ストレートシャンク部の形状寸法

プレインストレートシャンク部の形状及び寸法 (JIS B 4005-1998 引用)

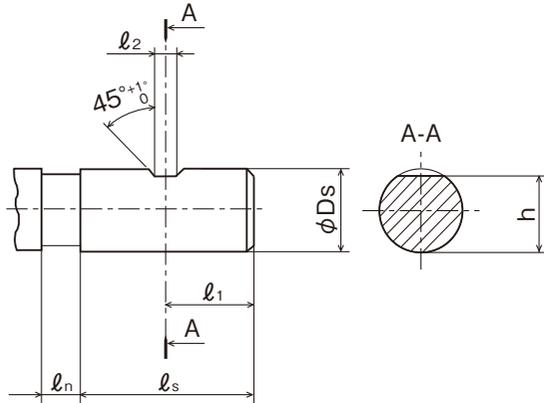


単位 (mm)

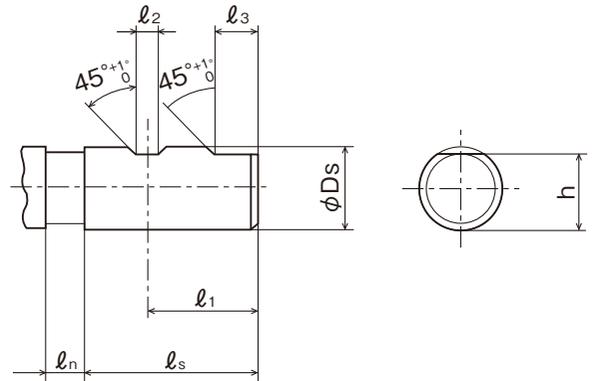
シャンク径 Ds		シャンクの長さ ls						参考	
基準寸法	許容差 h8	基準寸法						許容差	首の長さ ln
		R形	M形	L形	E形	F形	G形		
3	0 -0.014	28	—	36	45	56	70	+2 0	4
4	0 -0.018			40	50	60	80		6
5		36	45	56	70	90	8		
6	0 -0.022	36	40	50	60	80	100		10
8			45	56	70	90	110		12
10	0 -0.027	40	50	60	80	100	125		16
12		45	56	70	90	110	140		
14	0 -0.033	48	60	80	100	125	160		20
16									
18	0 -0.039	56	80	100	125	160	200		22
20		60	90	110	140	180	225		
25	0 -0.046	70	100	125	160	200	250		280
32		80	110	140	180	225	280		
40(42)	0 -0.046	90	125	160	200	250	315		
50		90	125	160	200	250	315		
63	0 -0.046	90	125	160	200	250	315		

フラット付きストレートシャンク部の形状及び寸法 (JIS B 4005-1998 引用)

シングルフラット付き
(シャンク径 D_s が 6mm 以上、20mm 以下)



ダブルフラット付き
(シャンク径 D_s が 25mm 以上、63mm 以下)



単位 (mm)

シャンク径 D_s		シャンクの長さ l_s		l_1		フラットの幅				h		参考
基準寸法	許容差 h6	基準寸法	許容差	基準寸法	許容差	l_2		l_3		基準寸法	許容差	首の長さ l_n
						基準寸法	許容差	基準寸法	許容差			
6	0 -0.008	36	+2 0	18	0 -1	4.2	+0.2 0	—	—	4.8	0 -0.4	8
8	0					5.5		6.6				
10	-0.009	40		20		7						10
12	0	45		22.5		8						12
16	-0.011	48		24		10						
20	0	50		25		11						16
25	-0.013	56		32		12		17	+1 0	23		20
32	0	60		36		14		19		30		
40	-0.016	70		40						38		22
50		80		45		18		23		47.8		
63	0 -0.019	90		50						60.8		



冷間金型用鋼のブランド対照

分類	JIS 他	会社名													使用硬さ (HRC)		
		大同特殊鋼	愛知製鋼	関東特殊製鋼	神戸製鋼所	山陽特殊製鋼	日立金属	NKK	日本高周波鋼業	不二越	三菱製鋼	理研製鋼	ポラスチール	ウッデホルム		ティッセン日本	
炭素工具鋼	SK3	YK3	SK3			SK3	YC3	SK3	K3		SK3		K990	UHB20	THYRO-DUR 1615	58 ~ 61	
合金工具鋼	SKS93	YK30	SK301			QK3M	YCS3	NKG93	K3M	SK3M	SKS93					55 ~ 60	
	SKS3	GOA	SKS3			QKS3	SGT	NKE3	KS3	SKS3	SKS3		K460	ARNE	THYRO-DUR 2419	55 ~ 62	
	SKS31	GO31	SKS31						KS31	SKS31			K465		THYRO-2510	55 ~ 62	
	SKD1	DC1	SKD1	RFB		QC1	CRD		KD1	CDS1	R32		K100	SVERKER3	THYRO-DUR-2080 THYRO-DUR-2136	55 ~ 62	
	SKD11	DC11	SKD11	RFE		QC11	SLD		KD11	CDS11	R31	RD11	K105	SVERKER21		55 ~ 62	
	SKD12	DC12	SKD12			QC12	SCD		KD12	CDS12			K305	RIGOR	THYRO-DUR 2363	55 ~ 62	
	AISI D2	DC3				QCD2	SLD2		KD11V				K110		THYRO-DUR-2379	55 ~ 62	
	プリハードン	40HRC	NAK55			KTSM40EF	HPM1		KAP								40
			GO40F				HPM2T							IMPAX			40
		33HRC	PX5			KTSM3M	HPM2		KPM25					HOLDAX	THYRO-PLAST 2311.2312.2738	33	
		50HRC	CX1														
	火炎焼入鋼	GO5	SX105V SX4			QF3	HMD5 HMD1		FH5								55 ~ 62
	高温焼戻し用	DC53 DCX	AUD15			QCM8	SLD8	NKD101	KD21	MCR12							62 ~ 64
	低温高焼入鋼	GO4	AKS3				ACD37										58 ~ 62
	耐衝撃用鋼	GS5				QF1	YSM			SRS6			K630	COMPAX	THYRO-DUR 2550	55 ~ 60	
その他						ARK										55 ~ 62	
		AUD11 SX5 SX44 TCD			KAD181 (粉末)	QCM10	ACD6 ACD8 ACD9 SLD10		KDQ KDQ1 KDQ2 KD22 KD23	ICS22			PREGA VIKING FERMO VANADIS4 (粉末)	THYRO-DUR2210 THYRO-DUR2510 THYRO-DUR2812 THYRO-DUR2833	—		
高速度工具鋼	SKH51	MH51			KM1	QH51	YXM1		H51	SKH9		RHM1	S600	KM2	THYRAPID3313	55 ~ 65	
	SKH55	MH55			KMC3		YXM4		HM35	HM35		RHM5	S705	KM35	THYRAPID3243	57 ~ 66	
	SKH57	MH57		SKH57			XVC5		MV10	HS93R		RHM7	S700	WKE4	THYRAPID3207	55 ~ 68	
	SKH57(改)	MH8			KHV4					HS98M						57 ~ 68	
	マトリックス系	MH85 MH88				QHS	YXR3 YXR33 YXR4 YXR7		KDMV KDW2 HM9TL	MCR1 SKH9D						55 ~ 64	
	その他	MH7V1 MH64 MH69								HSU2C						—	
	粉末高速度工具鋼	DEX20 DEX40 DEX60 DEX70 DEX80 DEX81 DEX-M1 DEX-M3		KT1 KT2 KT3	KHA32 KHA30 KHA50 KHA60 KHA33N KHA77 KHA5NH	SPM23 SPM30 SPM60	HAP5R HAP10 HAP40 HAP50 HAP72			FAX31 FAX18 FAX38 FAX40 FAX55 FAX90			S390PM S690PM	ASP23 ASP30 ASP60		58 ~ 70	



熱間鍛造金型用鋼のブランド対照

分類	JIS 他	会社名														使用硬さ (HRC)	
		大同特殊鋼	愛知製鋼	関東特殊製鋼	神戸製鋼所	山陽特殊製鋼	日立金属	NKK	日本高周波鋼業	不二越	三菱製鋼	理研製鋼	ポラスチール	ウツデホルム	ティッセン日本		
金型 工具鋼	SKD4	DH4	SKD4			QD4	YDC		KD4	HIDS4			W105		THYRO-THERM2567	40 ~ 50	
	SKD5	DH5	SKD5	DK50			HDC		KD5	HDS5			W100		THYRO-THERM2581	45 ~ 50	
	SKD6	DH6		DK60	KTD1				KD6		HD21A		W300		THYRO-THERM2343EFS	40 ~ 52	
	SKD61	DHA DHA1	SKD61	DK61	KTD2	QD61 QDA61	DAC	NKD61	KDA	HDS61	HD21AX	RD61	W302	DIEVAR ORVAR	THYRO-THERM2344EFS	40 ~ 52	
	SKD62	DH62	SKD62	DK62	KTD3	QD62	DBC		KDB	HDS62	HD21B				THYRO-THERM2106	40 ~ 52	
	SKD7	DH72	AUD7	DK70		QD10	YEM		KDH1	HDS7			W320		THYRO-THERM2365	40 ~ 50	
	SKD8	DH41	SKD8	DK80			MDC		KDF	HD58	HD27					40 ~ 50	
	SKT4	GFA GF78	SKT4A	DK2	KTH3	QT41	DM		KTV		HD13			W500		THYRO-THERM2713 THYRO-THERM2714	38 ~ 45
	その他	DH2F DHA2 DH21 DH31-S DH32 DH42 DH71 DH73 DH76	AUD60 AUD61 AUD71 AUD91	DK4 DK30 DK63 DK90 DK91 DK100 DK101	KTH2 KTH4	QDT QDR1 QDH	YHD3 YHD28 YHD50 DAC3 DAC40 DAC45 MDC-K YEM-K		KTV2 KD2 TD3 KDA1 KDA2 KDA3 KDW KDW1 KDHM KDF2	HDN1 MCR7	HD14 HD17 HD18 HD20B HD20C HD22B HD28		W335 W303 W321	QRO90 HOTVAR	THYRO-THERM2367 THYRO-THERM2885		
高速度 工具鋼	SKH51	MH51			KM1	QH51	YXM1		H51	SKH9			RHM1	S600	THY-RAPID3343	55 ~ 63	
	SKH55	MH55			KMC3		YXM4		HM35	HM35			RHM5	S705	THY-RAPID3243	57 ~ 65	
	マトリックス系	MH85				QHS	YXR3		KDW2	MCR1						57 ~ 62	
						YXR33		HM9TL	MDS1							53 ~ 58	

ダイキャスト金型用鋼のブランド対照

分類	JIS 他	会社名														使用硬さ (HRC)
		大同特殊鋼	愛知製鋼	関東特殊製鋼	神戸製鋼所	山陽特殊製鋼	日立金属	NKK	日本高周波鋼業	不二越	理研製鋼	ポラスチール	ウツデホルム	ティッセン日本		
一般用	快削プリハードン	DH2F				QD6F	FDAC									38 ~ 42
	その他							MFA-H								—
大物用	SKD61(改)	DH31-S	AUD61	DK63		QDA61M	DAC4		MFA-H							44 ~ 48
	その他	DHA2						MFA-K1								—
精密用	SKD7(改)					QDH	DAC10		KDW				W321		THYRO-THERM2885	44 ~ 51
	その他	DH21 DH33					DAC55		MFA-K	HDN1				QRO90		48 ~ 53
高融点用	SKD8(改)	DH42					DAC45									47 ~ 51
特殊用	マルエージング鋼	MASIC	AMAR		KMS.CF19	QM300	YAG						W720		THYRO-THERM2799	50 ~ 57
	マトリックス系	MH85		DK101			YXR33									52 ~ 58
	SCM系	PX5			KTKSM3M		HPM2 HPM7							IMPAX HOLDAX	THYRO-PLAST2312	30 ~ 33
	その他	PX7					E-DAC		KDF2							30 ~ 40



■プラスチック金型用鋼のブランド対照

分類	JIS 他	会社名															使用硬さ (HRC)			
		大同特殊鋼	愛知製鋼	川崎製鋼	関東特殊鋼	神戸製鋼所	山陽特殊製鋼	新日本製鐵	住友金属工業	日立金属	中部鋼板	トピー工業	NKK	日本高周波鋼業	三菱製鋼	ポラスチール		ウツデホルム	ティッセン日本	
アス・ロール鋼	SC系			RMS		S50C S55C					S50C	S50C	S45C S55C (厚板) Thick Plate					THYRO-DUR1730	13	
	SCM系			SCM435 SCM440		SCM435 SCM440					SCM440		SCM415 SCM435 SCM440					THYRO-PLAST2341	13	
プリハードン鋼	SC系	PXZ	AUK1	RMS53CN RMS55CN		KTSM2A KTSM21 U2000	PC55	N-PUK30	SD17 SD30	HIT81				KPM1			UHB11		13	
	SCM系 (AISI P20系)	PDS3	AUK11	RMS-P28 RMS-30PH		KTSM3A KTSM31 U3000		N-PUK40	SD61 SD80 90・200	HIT82				KPM2			618		28	
	SCM(改)				DP40	KTSM3M			SD70 SD100	HPM2				NKE301	KPM25	MU-M		HOLDAX	THYRO-PLAST 2738.2311.2312	33
		PX5 PX7								HPM7						MU-P	M201	IMPAX		
	SUS系	S-STAR				KTSM60	QPD1			HPM38					KSP1		M300	STAVAX	THYRO-PLAST2316	35
	SUS系(快削)	G-STAR					QPD5			HPM77						M310ESR M314	RAMAXS			
	SUS系	NAK101						QS630		PSL								CORRAX		35
SKD61(改)	DH2F			DK63		GD6F			FDAC					KDA		W302	ORVAR		40	
AISI P21	NAK55 NAK80				KTSM40EF KTSM40E				HPM1 HPM50 CENA1					KAP KAP2	MEX41			THYRO-PLAST2711		
焼入れ 焼戻し鋼	SKD11(改)	PD613	AUD11		DP60	KAD181 (粉末)	QCM8			HPM31									60	
	SUS系				DP55	KAS440 (粉末)				ZDP282							M390PM (粉末)	ELMAX (粉末)		
	SUS系	S-STAR			DP50	KTSM60	QPD1 QPD5			HPM38 HPM77					KSP1		M310ESR	STAVAX	THYRO-PLAST2083	52
時効処理鋼	マルエージング鋼	MASIC		HT210		KMS-CF19	QM300		SMA200	YAG									53	
	非磁性鋼					KTSM-UM1			SMA245											
																			43	



鋼のロックウェルC硬さに対する近似的換算

(HRC) ロックウェル Cスケール 硬さ ^{注1)}	(HV) ビッカース 硬さ	ブリネル硬さ (HB) 10mm球・荷重29.42kN			ロックウェル硬さ ^{注1)}			ロックウェルスーパーフィシャル硬さ ダイヤモンド円錐圧子			(Hs) シヨア硬さ	引張強さ N/mm ²	(HRC) ロック ウェル Cスケール 硬さ ^{注1)}
		標準球	Hultgren球	タングステン カーバイト球	(HRA) Aスケール 荷重588.4N ダイヤモンド 円錐圧子	(HRB) Bスケール 荷重980.7N 径1/16in球	(HRD) Dスケール 荷重980.7N ダイヤモンド 円錐圧子	15N スケール 荷重147.1N	30N スケール 荷重294.2N	45N スケール 荷重441.3N			
68	940	—	—	—	85.6	—	76.9	93.2	84.4	75.4	97	—	68
67	900	—	—	—	85.0	—	76.1	92.9	83.6	74.2	95	—	67
66	865	—	—	—	84.5	—	75.4	92.5	82.8	73.3	92	—	66
65	832	—	—	739	83.9	—	74.5	92.2	81.9	72.0	91	—	65
64	800	—	—	722	83.4	—	73.8	91.8	81.1	71.0	88	—	64
63	772	—	—	705	82.8	—	73.0	91.4	80.1	69.9	87	—	63
62	746	—	—	688	82.3	—	72.2	91.1	79.3	68.8	85	—	62
61	720	—	—	670	81.8	—	71.5	90.7	78.4	67.7	83	—	61
60	697	—	613	654	81.2	—	70.7	90.2	77.5	66.6	81	—	60
59	674	—	599	634	80.7	—	69.9	89.8	76.6	65.5	80	—	59
58	653	—	587	615	80.1	—	69.2	89.3	75.7	64.3	78	—	58
57	633	—	575	595	79.6	—	68.5	88.9	74.8	63.2	76	—	57
56	613	—	561	577	79.0	—	67.7	88.3	73.9	62.0	75	—	56
55	595	—	546	560	78.5	—	66.9	87.9	73.0	60.9	74	2,079	55
54	577	—	534	543	78.0	—	66.1	87.4	72.0	59.8	72	2,010	54
53	560	—	519	525	77.4	—	65.4	86.9	71.2	58.6	71	1,952	53
52	544	500	508	512	76.8	—	64.6	86.4	70.2	57.4	69	1,883	52
51	528	487	494	496	76.3	—	63.8	85.9	69.4	56.1	68	1,824	51
50	513	475	481	481	75.9	—	63.1	85.5	68.5	55.0	67	1,755	50
49	498	464	469	469	75.2	—	62.1	85.0	67.6	53.8	66	1,687	49
48	484	451	455	455	74.7	—	61.4	84.5	66.7	52.5	64	1,638	48
47	471	442	443	443	74.1	—	60.8	83.9	65.8	51.4	63	1,579	47
46	458	432	432	432	73.6	—	60.0	83.5	64.8	50.3	62	1,530	46
45	446	421	421	421	73.1	—	59.2	83.0	64.0	49.0	60	1,481	45
44	434	409	409	409	72.5	—	58.5	82.5	63.1	47.8	58	1,432	44
43	423	400	400	400	72.0	—	57.7	82.0	62.2	46.7	57	1,383	43
42	412	390	390	390	71.5	—	56.9	81.5	61.3	45.5	56	1,334	42
41	402	381	381	381	70.9	—	56.2	80.9	60.4	44.3	55	1,294	41
40	392	371	371	371	70.4	—	55.4	80.4	59.5	43.1	54	1,245	40
39	382	362	362	362	69.9	—	54.6	79.9	58.6	41.9	52	1,216	39
38	372	353	353	353	69.4	—	53.8	79.4	57.7	40.8	51	1,177	38
37	363	344	344	344	68.9	—	53.1	78.8	56.8	39.6	50	1,157	37
36	354	336	336	336	68.4	(109.0)	52.3	78.3	55.9	38.4	49	1,118	36
35	345	327	327	327	67.9	(108.5)	51.5	77.7	55.0	37.2	48	1,079	35
34	336	319	319	319	67.4	(108.0)	50.8	77.2	54.2	36.1	47	1,059	34
33	327	311	311	311	66.8	(107.5)	50.0	76.6	53.3	34.9	46	1,030	33
32	318	301	301	301	66.3	(107.0)	49.2	76.1	52.1	33.7	44	1,000	32
31	310	294	294	294	65.8	(106.0)	48.4	75.6	51.3	32.5	43	981	31
30	302	286	286	286	65.3	(105.5)	47.7	75.0	50.4	31.3	42	951	30
29	294	279	279	279	64.7	(104.5)	47.0	74.5	49.5	30.1	41	932	29
28	286	271	271	271	64.3	(104.0)	46.1	73.9	48.6	28.9	41	912	28
27	279	264	264	264	63.8	(103.0)	45.2	73.3	47.7	27.8	40	883	27
26	272	258	258	258	63.3	(102.5)	44.6	72.8	46.8	26.7	38	863	26
25	266	253	253	253	62.8	(101.5)	43.8	72.2	45.9	25.5	38	843	25
24	260	247	247	247	62.4	(101.0)	43.1	71.6	45.0	24.3	37	824	24
23	254	243	243	243	62.0	100.0	42.1	71.0	44.0	23.1	36	804	23
22	248	237	237	237	61.5	99.0	41.6	70.5	43.2	22.0	35	785	22
21	243	231	231	231	61.0	98.5	40.9	69.9	42.3	20.7	35	775	21
20	238	226	226	226	60.5	97.8	40.1	69.4	41.5	19.6	34	755	20
(18)	230	219	219	219	—	96.7	—	—	—	—	33	736	(18)
(16)	222	212	212	212	—	95.5	—	—	—	—	32	706	(16)
(14)	213	203	203	203	—	93.9	—	—	—	—	31	677	(14)
(12)	204	194	194	194	—	92.3	—	—	—	—	29	647	(12)
(10)	196	187	187	187	—	90.7	—	—	—	—	28	618	(10)
(8)	188	179	179	179	—	89.5	—	—	—	—	27	598	(8)
(6)	180	171	171	171	—	87.1	—	—	—	—	26	579	(6)
(4)	173	165	165	165	—	85.5	—	—	—	—	25	549	(4)
(2)	166	158	158	158	—	83.5	—	—	—	—	24	530	(2)
(0)	160	152	152	152	—	81.7	—	—	—	—	24	520	(0)

注1)表中括弧()内の数字はあまり用いられない範囲のものです。

参考文献

- 1) 日刊工業新聞社 型技術 1998年8月
「コーティング超硬エンドミルによる焼き入れ鋼の高速切削」 今泉英明 齊藤益生 岡田一公
- 2) 型技術者会議論文集 2000年6月
「コーティング超硬エンドミルによる高能率加工」 今泉英明 齊藤益生 岡田一公
- 3) 新樹社 月刊トライボロジー 2007年3月 No235
「金型加工におけるエンドミルの技術動向」 今泉英明
- 4) シンポジウム 高速切削の現状と課題 2000年3月 講演資料
「エンドミルの高速切削」 今泉英明
- 5) インターモールド・テクニカル・セミナー
多軸切削技術と高速切削による金型加工技術と切削工具の最先端情報 2006年3月 講演資料
「高能率、高精度加工を実現する最新工具情報」 今泉英明
- 6) 大河出版 エンドミルのすべて
例えば「波状外周切れ刃と切削特性」 今泉英明 他
- 7) 工業調査会 はじめての切削加工 松岡甫篁 安斎正博 高橋一郎
- 8) 日刊工業新聞社 高速ミーリングの基礎と実践 松岡甫篁 安斎正博
- 9) コロナ社 切削加工論 中山一雄
- 10) 工業調査会 機械と工具 2003年7月
「超微結晶ダイヤモンドコーティング工具の特長と加工の実際」 羽生博之 村上良彦 福井康雄
- 11) 切削油技術研究会 フライス加工ハンドブック 1988年
- 12) 株式会社MSTコーポレーション 技術資料
「ツールホルダ基礎知識」



エンドミルを安全にお使いいただくために

加工前の注意

- ・鋭利な切れ刃を素手で触るとけがの危険があります。切れ刃を素手で触らないで下さい。保護手袋等の保護具を使用して下さい。
- ・重量の重い工具を扱う時は、落下によるけがの危険があります。適切な運搬機具やチェンブロック等を使用し、安全靴を着用して下さい。
- ・工具に傷、割れ等があると使用中に破損し飛び散ることがあります。使用前に傷、割れ等のないことを確認して下さい。
- ・使用前に工具および加工物の寸法を確認して下さい。
- ・回転方向を誤ると工具が破損、飛散しけがをする危険があります。使用前に回転方向を確認して下さい。
- ・工作機械保持具を含めた回転部のバランスが悪いと振れ、振動により工具が破損しけがをする危険があります。試運転を必ず実施しバランスの確認をして下さい。
- ・インデキサブル(スローアウェイ)工具ではチップや部品が確実にクランプされていないと切削中に脱落、飛散しけがをする危険があります。必ず取付座面や固定用部品を清掃してからチップを取付けて下さい。取付けは、付属のスパナを使用し確実に行って下さい。また、所定のチップ、部品以外は絶対に使用しないで下さい。
- ・加工物の保持が不十分ですと、工具や加工物が破損し飛散する危険があります。加工物の保持は確実に行って下さい。

加工する時の注意

- ・回転中の工具、加工物等に触るとけがをします。回転中の工具、加工物等には絶対に触らないで下さい。衣服にたるみがあると巻き込まれる危険があります。たるみのない衣服を着用して下さい。
- ・工具が加工中に衝撃的な負荷を受けると破損、飛散しけがをする危険があります。また、加工中に高温の切りくずが飛散したり長く伸びた切りくずが排出され、けがや火傷をする危険があります。必ず安全カバーや保護めがね等の保護具を使用して下さい。
- ・工具を改造したり、本来の使用目的以外で使用すると工具が破損、飛散しけがをする危険があります。工具は改造しないで下さい。本来の使用目的で使用して下さい。
- ・切削条件基準表の数値は、新しく作業を立ち上げる時の目安として下さい。加工物の形状や機械剛性に合わせて条件を調節する必要があります。
- ・加工中に異常な振動等が発生した場合は、直ちに加工を中止して下さい。そのまま続けると工具が破損、飛散しけがをする危険があります。異常の原因を取り除いてから加工を再開して下さい。
- ・摩耗が進んだり、痛んだ状態の工具を使用し続けると破損、飛散の原因となります。切れ味が悪くなったなら工具を交換して下さい。
- ・不水溶性切削油剤を使用する時は、加工時に発生する火花や破損による発熱で引火、火災の危険があります。防火対策を必ず行って下さい。

加工後の注意

- ・加工直後の工具、加工物は、高温になっているため火傷をする危険があります。素手で触らないで下さい。
- ・加工物に生じたバリでけがをする危険があります。素手で触らないで下さい。
- ・加工後は必ず加工物の寸法を確認して下さい。

以上は、当社製品を安全にお使いいただくための基本的注意です。その他の詳細につきましては、当社までお問い合わせ下さい。

◆製品については、常に研究・改良を行っておりますので、予告なくカタログ掲載仕様を変更する場合があります。



shaping your dreams

オーエスジー株式会社

〒442-8543 愛知県豊川市本野ヶ原3-22
☎(0533)82-1111 FAX(0533)82-1131

東部営業部

〒143-0025 東京都大田区南馬込3-25-4 ☎(03)5709-4501 FAX(03)5709-4515

中部営業部

〒465-0058 愛知県名古屋市名東区貴船1-9 ☎(052)703-6131 FAX(052)703-7775

西部営業部

〒550-0013 大阪府大阪市西区新町2-18-2 ☎(06)6538-3880 FAX(06)6538-3879

仙台 ☎(022)390-9701	静岡 ☎(054)283-6651	岡山 ☎(086)241-0411
郡山 ☎(024)991-7485	浜松 ☎(053)461-1121	四国 ☎(087)868-4003
新潟 ☎(025)286-9503	豊川 ☎(0533)92-1501	広島 ☎(082)507-1227
上田 ☎(0268)28-7381	安城 ☎(0566)77-2366	九州 ☎(092)504-1211
諏訪 ☎(0266)58-0152	名古屋 ☎(052)703-6131	北九州 ☎(093)435-3655
岡毛 ☎(0270)40-5855	岐阜 ☎(058)259-6055	熊本 ☎(096)386-5120
宇都宮 ☎(028)651-2720	三重 ☎(0594)26-0416	東部GST ☎(03)5709-4501
八王子 ☎(042)645-5406	金沢 ☎(076)268-0830	中部GST ☎(052)703-6131
茨城 ☎(029)354-7017	京滋 ☎(077)553-2012	西部GST ☎(06)6538-3880
東京 ☎(03)5709-4501	大阪 ☎(06)6747-7041	
厚木 ☎(046)296-1380	明石 ☎(078)927-8212	

〈工具の技術的なご相談は…〉

コミュニケーションダイヤル

よい 工具 は 一番
0120-41-5981

9:00~12:00 / 13:00~19:00 土日祝日を除く

コミュニケーションFAX **0533-82-1134** コミュニケーションE-mail **hp-info@osg.co.jp**

〈その他のお問い合わせは…〉 E-mail:**cs-info@osg.co.jp**

〈最新情報〉 **OSG HP**

<http://www.osg.co.jp>

〈無料メールマガジン〉 **OSG E-mail 倶楽部**

<https://www.osg.co.jp/support/club/>

OSG代理店

※本書掲載内容の無断転載・複製を禁じます。※ All rights reserved. ©2015 OSG Corporation.



このカタログの印刷には、
環境に配慮した植物油インキ
を使用しております。

T-8.513.AC.BAH(DN)
15.07