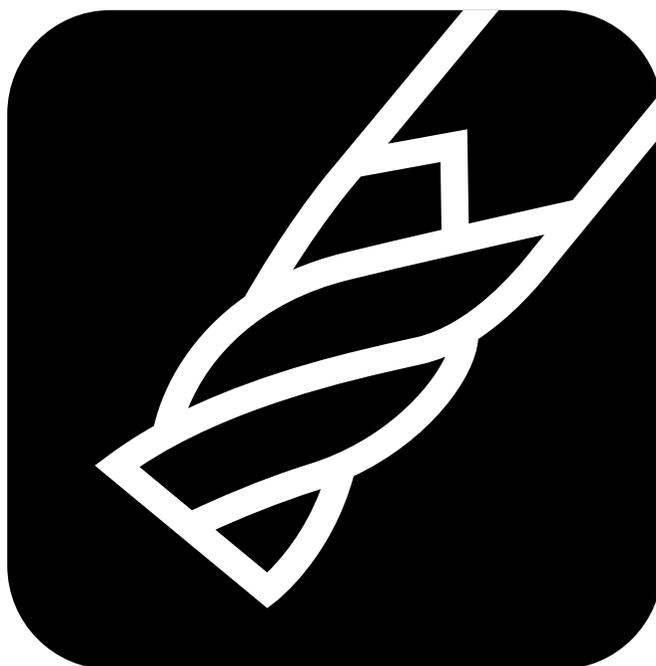


TECHNICAL
DATA

エンドミル加工



オーエスジー株式会社



はじめに

原材料や他の製品に手を加えて、必要とする形や新しい製品を作り出すことを加工と言います。そして加工はその方法によって除去加工、変形加工、付加加工に分類されます。切削加工はこの除去加工に属する代表的な加工方法です。

切削加工の歴史は10万年以上も前の石器時代にさかのぼるとも言われています。青銅器時代には金属（金、銀、銅）の切削加工も行われるようになったそうです。その後、気の遠くなるような変遷を重ねて進化をしてきました。切削に使われる工具も切削の進化に合わせて様々なものが誕生をしました。

エンドミルの誕生時期は定かではありませんが、今や切削加工になくてはならない工具です。誰もが知っているドリルのような知名度こそありませんが、幅広い用途に使え、多種多様です。ここではエンドミルとはどんな工具かを紹介し、その選び方、使い方の基本事項について説明をします。

なおここで使用する用語は、一般表現や加工現場で慣用的に使われる表現も用いており、必ずしもJIS用語とは合致してはいないことをご了承ください。



目 次

1. エンドミルの基礎		5. エンドミルの各部要素と切削特性	
1.1 エンドミルとは	2	5.1 ねじれ刃の基本特性	44
1.2 エンドミル各部の名称	2	5.2 ねじれ角と加工精度	46
1.3 エンドミルの種類	3	5.3 特殊なねじれ刃の効果	48
1.4 エンドミル各部の記号表記方法	10	5.4 刃数と切削特性	50
2. エンドミル刃部の材質と表面処理		5.5 外周刃形状と切削特性	52
2.1 エンドミル刃部の材質	11	5.6 アスペクト比 (L/D) の影響	54
2.2 エンドミルの表面処理	15	5.7 底刃形状と切削特性	58
3. エンドミルによる切削加工		6. エンドミルの再研削	
3.1 切削加工	17	6.1 再研削の時期と方法	59
3.2 エンドミル切削	18	6.2 砥石と研削条件	60
3.3 エンドミルの加工形態	22	7. トラブルの原因と対策	61
4. 切削条件		用語解説	63
4.1 切削速度	23	参考資料	65
4.2 送り量	32		
4.3 切込み深さ	35		
4.4 主要切削3条件決定における注意	37		
4.5 ピックフィード	38		
4.6 切削の向き (アップカットとダウンカット)	39		
4.7 切削油剤	43		



1. エンドミルの基礎

1.1 エンドミルとは

切削加工に使用される刃物（工具）を切削工具と言いますが、切削工具はその用途や加工形態によってバイト、ドリル、タップ、リーマ、フライス、ブローチなどと名称が付けられています。

エンドミルは、この中のフライス（ミリング工具）に属し（図1.1.1）、シャンクと呼ばれる柄を持つ工具（外周面および、端面に切れ刃をもつシャンクタイプフライス）の総称です。



図 1.1.1 フライス（ミリング工具）

そもそも、その名称の由来ですが、フライス盤のことを英語でmilling machine（ミリングマシン）と言い、milling machine（ミリングマシン）に取り付けて使う工具をmill（ミル）あるいはmilling tool（ミリング工具）と言います。エンドミルは図1.1.2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）によりend mill（エンドミル）と言われるようになりました。



図 1.1.2 エンドミル

エンドミルは一本の工具で側面削り、溝削り、正面削りや穴加工もできる、いわゆる多機能工具です（図1.1.3）。

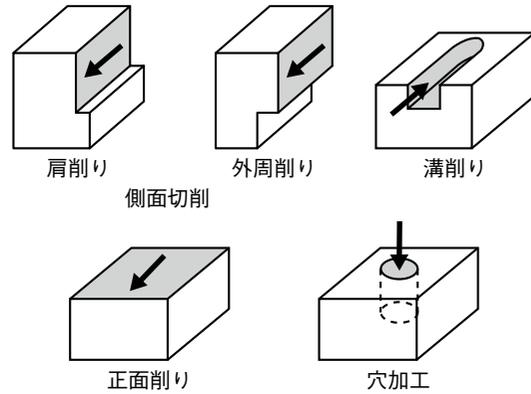


図 1.1.3 エンドミルによる切削加工

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ならびに図1.2.2に示します。

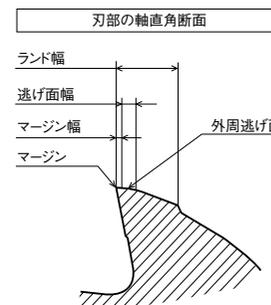
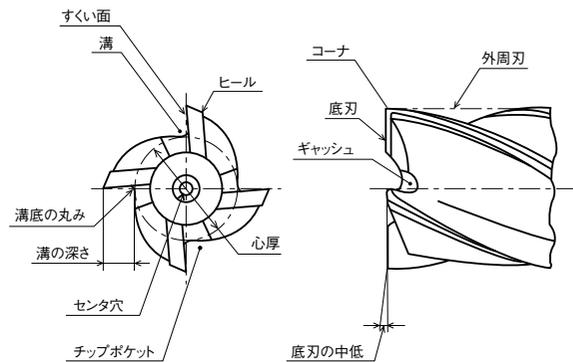
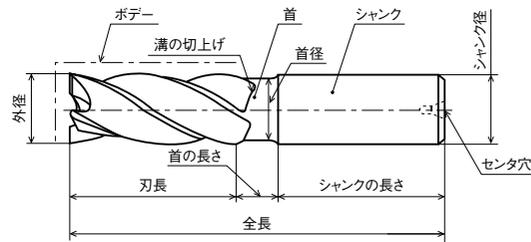


図 1.2.1 各部の名称（JIS B 0172-1993 抜粋）

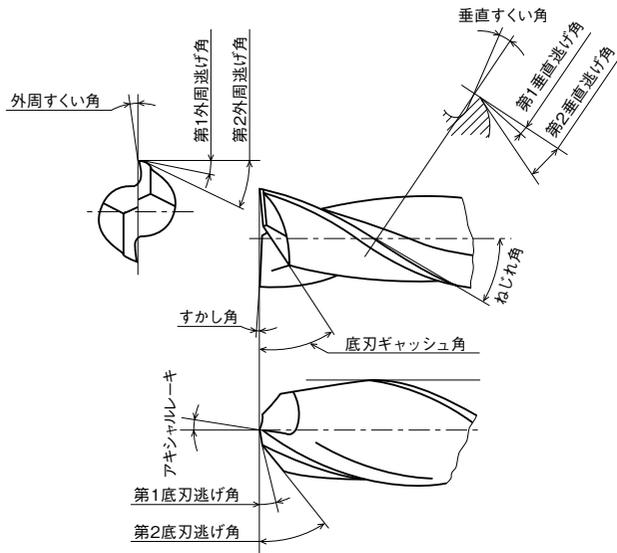


図 1.2.2 エンドミルの角 (JIS B 0172-1993 抜粋)

1.3 エンドミルの種類

(1) 各種エンドミル

エンドミルは用途に合わせたさまざまな形状、仕様のものがあります。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

エンドミルは刃部とシャンク部が一体構造となったソリッドエンドミル、刃部材質が本体にろう付けされたろう付けエンドミル、刃先交換式エンドミルならびにヘッド交換式エンドミルに大別されます (図1.3.2)。

刃先交換式エンドミルのことを、切れ刃の使い捨てを意味するスローアウェイエンドミルと呼ぶこともあります。あるいは刃先交換式エンドミルとヘッド交換式エンドミルを合わせて、インデキサブルエンドミルと言うこともあります。

なお、ろう付けされた刃部材質の部分をチップ、刃先交換式の刃部の部分をインサート (スローアウェイチップ)、そして本体をボデーと言います。



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、(9)、10・・・とありますが、7枚刃、9枚刃は常用されません。図1.3.3のように刃数が多くなると切りくずを收容できる空間が小さくなります。刃数の少ないほうが、切りくずを收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

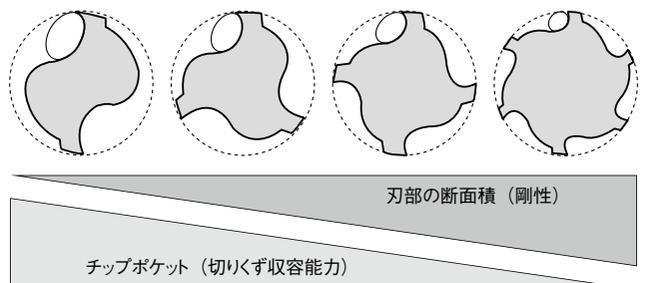


図 1.3.3 エンドミルの刃数



(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、切りくずの收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(たわみや折れに対する強さ)は低下してしまいます。

通常、複数の切れ刃は等間隔(切れ刃間の角度： $\omega = 360^\circ / \text{刃数}$)に配置されることとなりますが、これを意図的に不等分割としたものもあります(図1.3.4)。

奇数刃や不等分割のエンドミルは、外径の測定がマイクロメータでは困難となります。画像測定や光学測定によります。

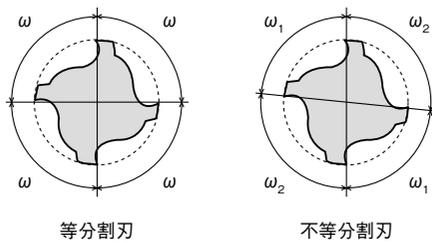


図 1.3.4 等分割刃と不等分割刃

(4) 底刃形状

底刃の基本形状はスクエア、ボール、ラジアスの3種類です(図1.3.5)。

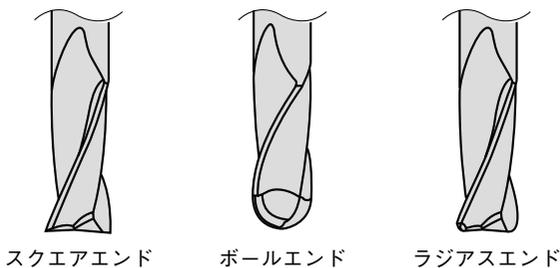


図 1.3.5 底刃の形状

スクエアやラジラスでは、センタ穴が付いたもの(中心まで切れ刃の無いもの)もあります。センタ穴が付いていると、再研削や追加工を行う場合に精度の良い研削が容易に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制約を受けます。センタ穴の有無の事例を図1.3.6に示します。

またスクエアエンドでは底刃のギャッシュ研削面が外周刃まで達するようにすることで、コーナ部の強度を向上させた仕様があります(図6.1.4)。先端から軸方向に0.05~0.20mm程度のわずかな幅で外周刃がだれたようになりますが、チッピングによる早期摩耗対策として大きな効果があります。一方、このコーナ部補強を施されていないものを「ピン角」あるいは「シャープコーナ」と呼びます。

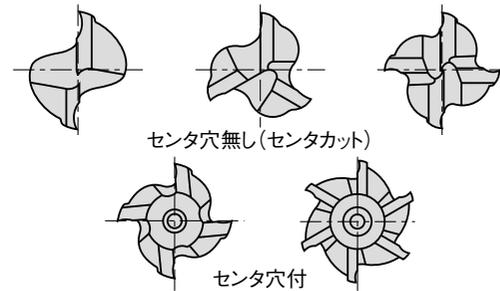


図 1.3.6 センタ穴の有無

(5) 外周刃形状

外周刃形状の代表的なものを図1.3.7と図1.3.8に示します。

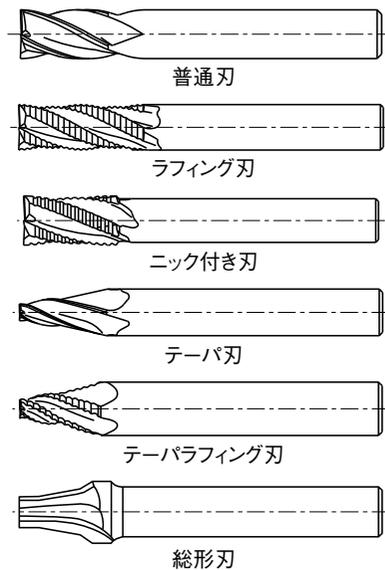


図 1.3.7 外周刃形状



図 1.3.8 刃先交換式エンドミルの外周刃・底刃の形状

(6) 外周の切れ刃とねじれの向き

シャンク側から見て、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 (図1.3.9)。

また、ねじれの向きも右ねじれと左ねじれがあります (図1.3.10)。



図 1.3.9 右刃と左刃

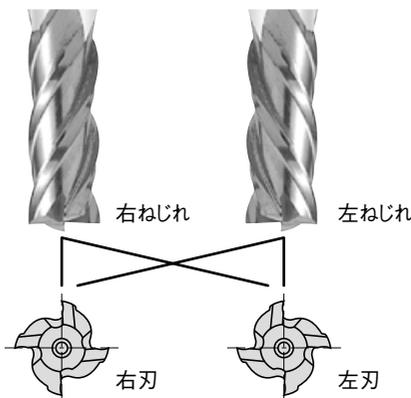


図 1.3.10 ねじれの向きと切れ刃の向き

右ねじは時計回りに回転すると前に進みます。これと同じねじれの方向を右ねじれと言います。

市販されているエンドミルのねじれ角は、0度 (ねじれの無いもの) から60度程度までありますが、標準的には30度程度が多用されています。JISでは、40度以上のものを強ねじれエンドミルと定義しています。

通常、各切れ刃のねじれ角は同一ですが、切れ刃によってねじれ角が異なるものや、切れ刃のねじれ角が場所によって変化するようなエンドミルもあります。

図1.3.11と図1.3.12にそれらの例を紹介します。

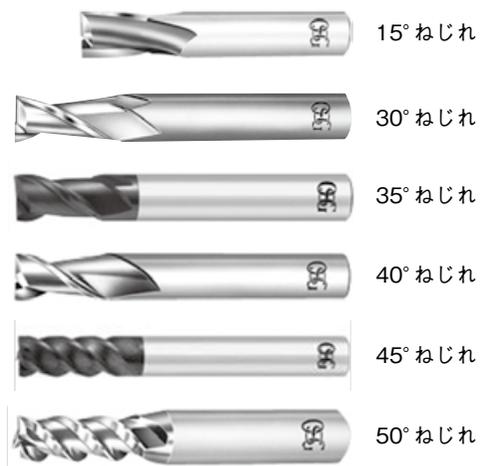


図 1.3.11 外周刃ねじれ角の例

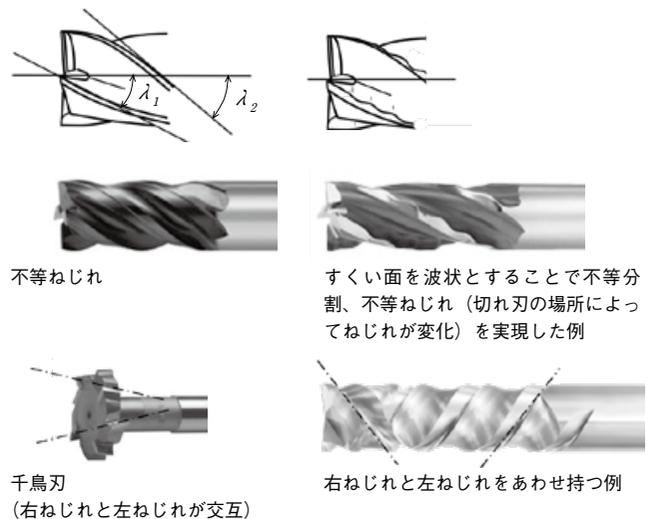


図 1.3.12 特殊ねじれのエンドミル



(7) 首部の形状

刃部とシャンク部をつなぐ首部の範囲が明確でないエンドミルもありますが、使用時の工具突き出し長さが大きく、刃長が短いものには、はっきりとした首部が設けられています。

こうしたエンドミルの首部の形状には、ロングネックあるいはテーパネック（ペンシルネックとも呼ばれます）があります（表1.1）。

ロングネックタイプの小径エンドミルは、深い部分の微細な形状加工などによく用いられます。

テーパネックも同じく深い部分の加工や自由曲面の複雑形状の加工に用いられますが、加工物に干渉しない範囲で首部に勾配を設けることによって、工具剛性（たわみや折れに対する強さ）を高めることができます。

表 1.1 首部の形状

ロングネック	
テーパネック (ペンシルネック)	

(8) シャンクの種類

一般にエンドミルはシャンク（柄）の部分をホルダと呼ばれる保持具でつかみ、ホルダを介して機械に取り付けられます（図1.3.13）。

表1.2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、切削時の負荷や振動でエンドミルがホルダから抜け出てくるような場合は、フラット付きやコンビネーションと呼ばれるタイプのストレートシャンクが用いられます。

このフラットの部分を、ねじで押し付ける機構の専用ホルダでつかむことで、スリップによる回り止めや抜け防止の効果が大きくなります。

抜け防止効果をねじの機構で得るねじ付きタイプのシャンクもあります。

さらに切削負荷が大きく、激しい振動が発生する場合は、ホルダを介さずに機械に直接取り付ける7/24テーパの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、あるいは二面拘束の1/10テーパシャンクを用いることもあります（図1.3.14）。

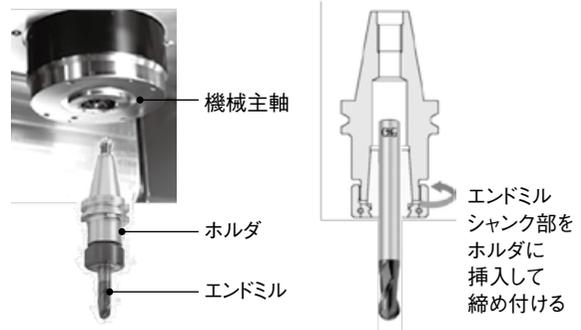


図 1.3.13 エンドミルの機械への取り付け



図 1.3.14 直付けエンドミルの例



表 1.2 シャンクの形状

形状	名称	形状図	特徴
ストレートシャンク	プレーン ストレートシャンク		最も広く採用されている。脱着が簡単で精度も良い。
	ねじ付き ストレートシャンク		抜け防止効果が大きい。
	フラット付き ストレートシャンク		太径のエンドミルでの工具の抜け防止、回り止めのために採用される。
	抜け防止機構付き 焼きばめ専用 ストレートシャンク		焼きばめ保持で、抜け防止機構がついているため振れ精度に優れ把持力も強固。
	コンビネーション ストレートシャンク		非常に強力な保持ができる。大きな負荷がかかる加工での抜け防止として用いる。
テーパシャンク	モールス テーパシャンク	ブレンエンド 	小径エンドミルで稀に用いられる。古くはキー溝エンドミルのシャンクに用いられた。
	ブラウンシャープ テーパシャンク	引ねじ付 中間ねじ付 	重切削でも倒れが少ない。ねじによる締め付けで工具が抜けにくい。
		タング付 	脱着が用意。軸方向に切込む加工の時にテーパによる求心性もあるため用いられることがある。
	7/24 テーパシャンク (ナショナル テーパシャンク)		機械に直接取り付ける。太径エンドミルでの重切削を行う場合に用いることがある。
	7/24 テーパシャンク (ボトルグリップ テーパシャンク)		機械に直接取り付ける。太径エンドミルでの重切削を行う場合に用いることがある。ATCでの工具交換が可能。
	1/10 テーパシャンク (2面拘束 テーパシャンク)		機械に直接取り付ける。太径エンドミルでの高速回転で用いることがある。



(9) インサートの種類

インサート各部の名称を図1.3.15に示します。

インサート（スローアウェイチップ）には、非常に多くの種類があります。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1.3にインサート（スローアウェイチップ）の呼び記号の付け方を示します。

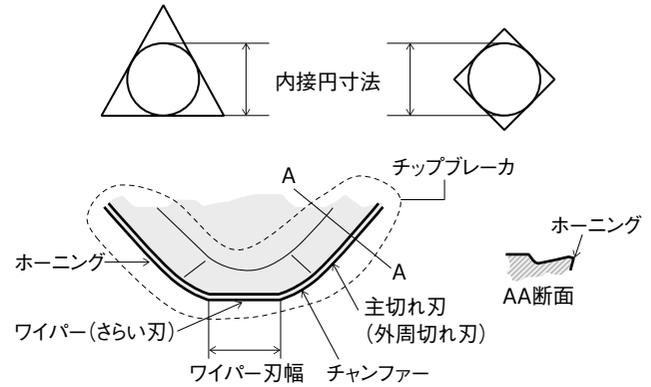


図 1.3.15 インサートの各部の名称

表 1.3 インサートの呼び方 (JIS B4120、ISO1382 準拠)

(例)	Z	D	K	T
(例)	①	②	③	④
① 形状				
C	菱形頂角80°			
D	菱形頂角55°			
O	正八角形			
R	円形			
S	正方形			
T	正三角形			
V	菱形頂点35°			
W	不等角六角形			
Z	その他の形状	—		
② 逃げ角				
A	3°			
C	7°			
D	15°			
E	20°			
N	0°			
P	11°			
X	特殊形状			
③ 公差				
記号	内接円dの許容差(mm)	コーナ高さmの許容差(mm)	厚さsの許容差(mm)	
A	±0.025	±0.005	±0.025	
C	±0.025	±0.013	±0.025	
E	±0.025	±0.025	±0.025	
H	±0.013	±0.013	±0.025	
K	±0.05~±0.15*	±0.013	±0.025	
M	±0.05~±0.15*	±0.08~±0.2*	±0.13	
N	±0.05~±0.15*	±0.08~±0.2*	±0.025	
*許容差の範囲は基準内接円径によって異なる				
④ インサートブレーカ				
記号	穴の形状	ブレーカの有無	インサート断面	
W	一部円筒穴片面取 (40°~60°)	なし		
T		片面		
B	一部円筒穴片面取 (70°~90°)	なし		
U	一部円筒穴両面取 (40°~60°)	両面		
N	—	なし		
R	—	片面		



ここでチップブレーカとは、インサートの切れ刃近傍に設けられた溝（段差曲面）を言います。図1.3.16にその例を示します。

チップブレーカは切削の際に切りくずの流れる方向や切りくずの形状に大きな影響を与えます（図1.3.17）。

もともとは切りくず分断やカールを促進するための単純な溝だったのですが、近年では切りくずの流れのシミュレーションをもとに、複雑な3次元ブレーカと呼ばれるチップブレーカが開発されています。

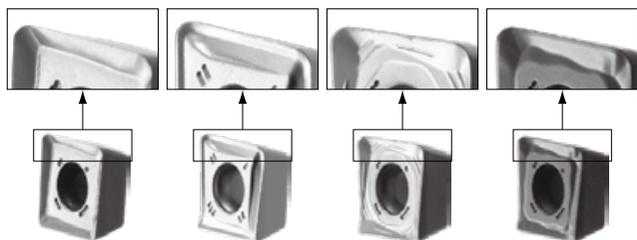


図 1.3.16 チップブレーカの例

15		05		08		S		R	
⑤		⑥		⑦		⑧		⑨	
⑤ 切れ刃の長さ l									
O									
R									
S									
T									
Z									
⑥ 厚さ s									
記号	厚さ s(mm)								
02	2.38								
03	3.18								
T3	3.97								
04	4.76								
05	5.56								
06	6.35								
⑦ コーナ記号									
記号	コーナ半径								
02	R0.2								
04	R0.4								
08	R0.8								
12	R1.2								
16	R1.6								
24	R2.4								
⑨ 勝手									
記号	勝手								
R	右勝手								
L	左勝手								
N	左右共用								
⑧ 主切れ刃記号									
記号	形状								
F	シャープエッジ								
E	丸ホーニング								
T	チャンファホーニング								
S	コンビネーションホーニング								

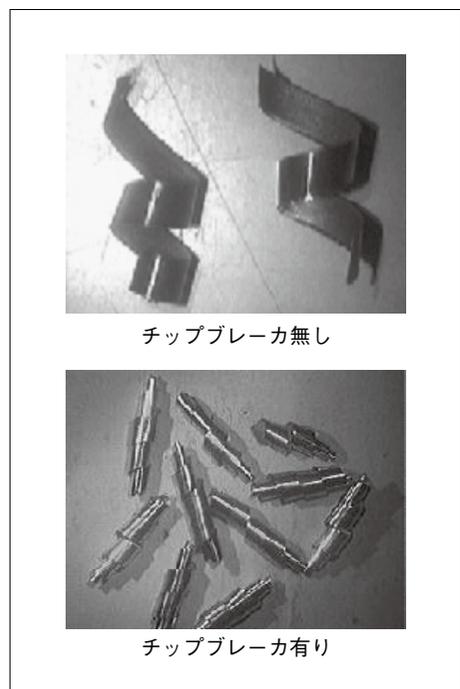


図 1.3.17
チップブレーカ有無での切りくず形状



1.4 エンドミル各部の記号表記方法

これまで工具メーカーや国によって異なっていた各部の記号表記が、ISO13399によって統一されました。図1.4.1および図1.4.2ならびに表1.4に、その抜粋を紹介します。

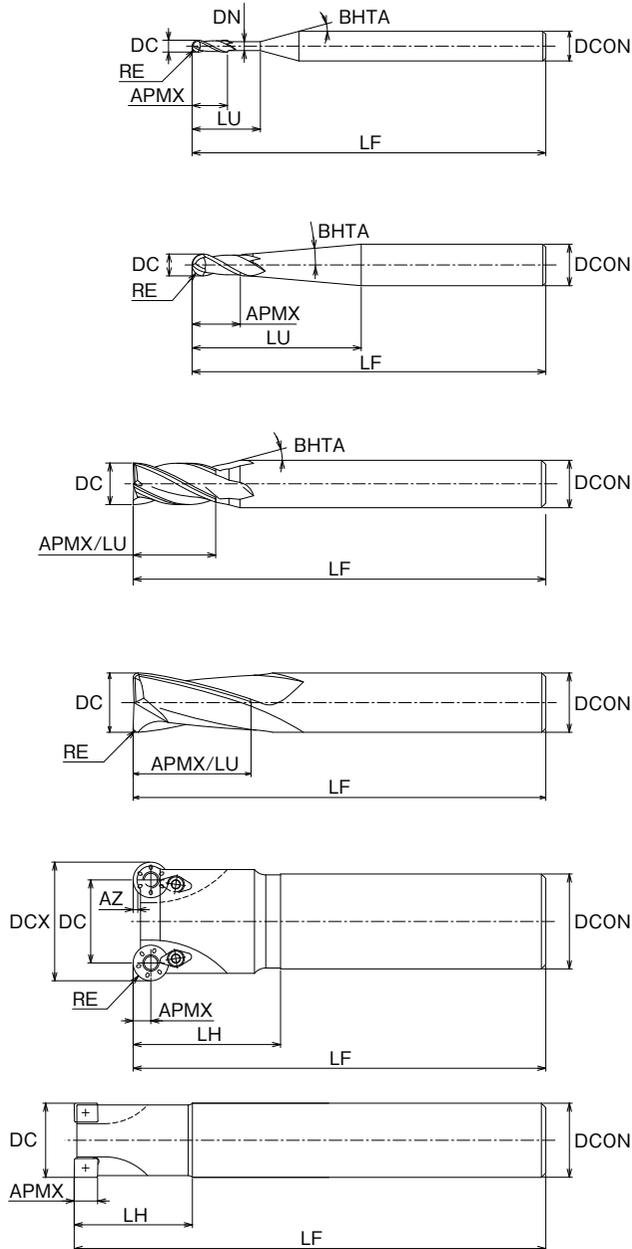


図 1.4.1 エンドミル各部の記号表記 (ISO13399 準拠)

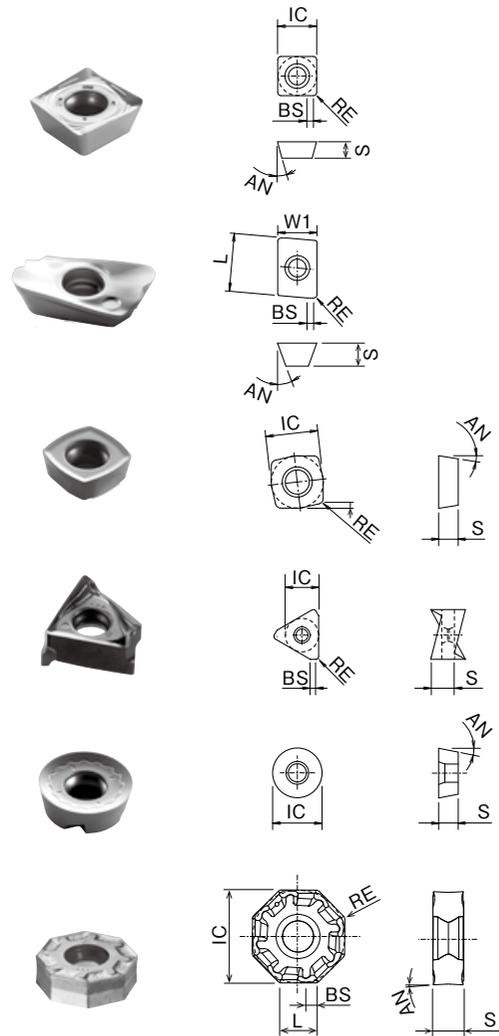


図 1.4.2 インサート各部の記号表記 (ISO13399 準拠)

表 1.4 ISO13399 に準拠した記号 (抜粋)

エンドミルの記号		インサートの記号	
記号	仕様部位	記号	仕様部位
APMX	最大切込み	AN	主切れ刃逃げ角
AZ	内刃有効切れ刃高さ	AS	ワイパー刃逃げ角
BHTA	本体テーパ半角	BS	ワイパー刃幅
DC	切削径	IC	内接円
DCON	接続径	L	切れ刃長さ
DCX	最大切削径	RE	コーナ R
DN	首径	S	インサート厚さ
LF	機能長さ	W1	インサート幅
LH	首下長さ		
LU	使用可能長さ		
RE	ボールエンドミル半径、コーナ R		



2. エンドミル刃部の材質と表面処理

2.1 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。図2.1.1に各エンドミル刃部材料の切削特性を表す概念図を示します。

また表2.1には各材料の特性値（代表値）を表します。ここで、ヤング率は切削時の工具のたわみに対する強さを表し、抗折力はじん性を示すひとつの尺度となります。

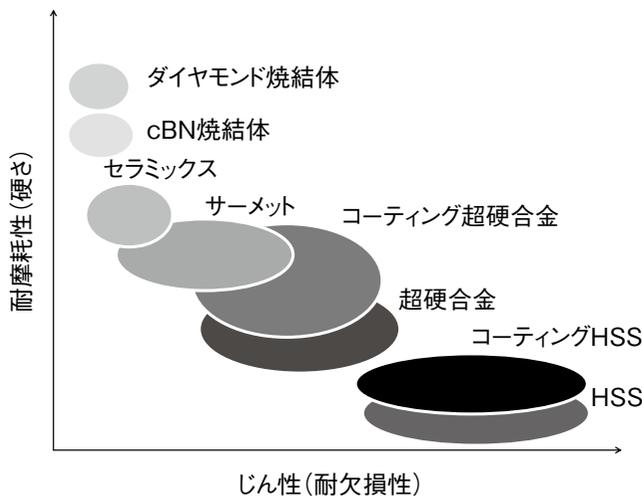


図 2.1.1 各種エンドミル材料の切削特性（概念図）

(1) 高速度工具鋼 (HSS)

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 (表2.2)。

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を実現したものもあります。

エンドミル材料としては、他の材料に比べて安価で加工性もよく、複雑な形状の工具も比較的容易に製作できるというメリットがありますが、切削温度が焼戻し温度の550℃を超えるような領域では使用することができません。

表 2.2 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

表 2.1 各種材質の特性値（代表値）

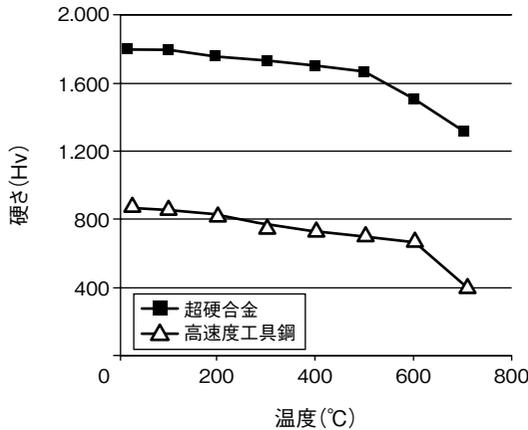
材質	高速度工具鋼	超硬合金	サーメット	セラミックス (Si ₃ N ₄ 系)	セラミックス (Al ₂ O ₃ 系)	cBN	ダイヤモンド焼結体	ダイヤモンド (単結晶)
硬さ (Hv)	800～1,100	1,500～1,900	1,500～1,900	1,300～1,900	1,500～2,000	4,000～6,000	6,000～12,000	9,000～12,000
ヤング率 (GPa)	200～220	450～650	300～500	280～310	350～390	650～750	770～920	1,050～1,220
抗折力 (MPa)	2,500～5,000	1,500～4,000	1,350～2,000	1,300～1,400	500～600	1,000～1,500	1,000～1,500	(150～300)
比重	7～9	13～15	6～7	3～6	3～6	3～5	3～5	3.52

高速度工具鋼における焼入れ硬さ、焼結体の粒度、バインダーの種類、含有量等により特性は変化します。この表は代表値を示したもので、材質ごとの特性を保証するものではありません。



(2) 超硬合金

一般にはタングステン (W) と炭素 (C) からなる化合物である炭化タングステン (WC) の粒を、結合材 (バインダ) にコバルト (Co) を使用して焼結し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。



高速度工具鋼の値はSKH55相当材の値を使用。超硬合金は代表値を使用。

図 2.1.2 高速度工具鋼と超硬合金の高温硬さ

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TiCやTaCを加えたものもあります。

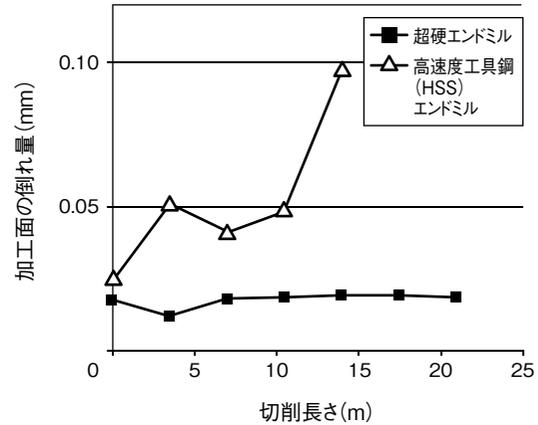
炭化タングステンの粒径を微細化したものを超微粒子超硬合金と呼んで区別することもあります。さらに、その中でおおむね粒径が0.5 μm以下のものを、「超」を重ね超超微粒子超硬合金と呼ぶこともあります。

高速度工具鋼は600°C程度に温度が上昇すると硬さが急激に低下しますが、超硬合金は、高温下でも高い硬さを維持します (図2.1.2)。

また、たわみに対しても超硬合金は高速度工具鋼の2.5倍から3倍程度の強度 (表2.1のヤング率を参照) 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、加工面の倒れやうねりの発生を防ぎます。

図2.1.3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。

こうした超硬合金の特性を利用して、極小径エンドミルでの微細切削もビームやエッチングなどの特殊加工に代わって行われるようになってきました (図2.1.4)。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2.3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)
送り量: 0.05mm/t (191mm/min)
切削の向き: アップカット
切込み深さ: $a_p=15\text{mm}$ $a_e=1\text{mm}$
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

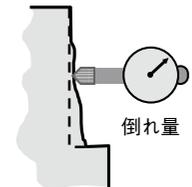
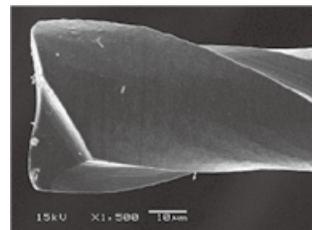
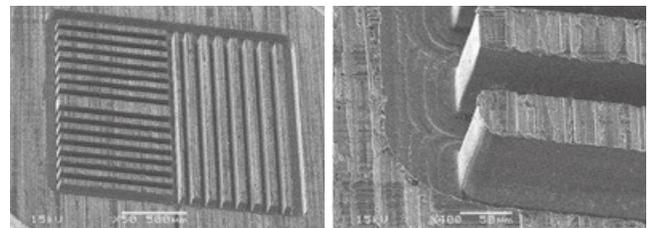


図 2.1.3 超硬エンドミルとHSSエンドミルによる加工精度



エンドミル外径: φ0.05



加工リブの幅: 0.06mm

図 2.1.4 超硬合金エンドミルでの精密微細加工例



表 2.3 切削用超硬質工具材料の分類 (JIS B 4053 による分類)

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

超硬合金は炭化タングステン (WC) の焼結体でしたが、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) をバインダーとして焼結したものをサーメットと呼びます。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。特に炭素鋼、ステンレス鋼の正面切削仕上げ加工での加工面品位の向上には大変有効です。

表 2.4 主なセラミックス材料 (酸化物、窒化物、炭化物) の特性

種類	一般的な呼称	主成分	ビッカース硬度 Hv	比重 g/cm ³	ヤング率 GPa	融点 ℃	熱伝 W/(m·k)	熱膨張係数 x10 ⁻⁶ /℃
酸化物	アルミナ	Al ₂ O ₃	1,500 ~ 2,000	3.9	350 ~ 390	2,050	23 ~ 36	7 ~ 8
	ジルコニア	ZrO ₂	1,180 ~ 1,300	6	200 ~ 210	2,700	3 ~ 4	9 ~ 10
窒化物	窒化アルミ	AlN	980 ~ 1,000	3.3	290 ~ 320	2,200	150 ~ 160	2.4 ~ 4
	窒化ケイ素	Si ₃ N ₄	1,300 ~ 1,900	3.2	280 ~ 310	1,900 (昇華)	20 ~ 28	3 ~ 3.5
	サイアロン	Si ₃ N ₄ -Al ₂ O ₃	1,600 ~ 2,000	3.22	300 ~ 330		15 ~ 16	3 ~ 4
	窒化チタン	TiN	2,000 ~ 2,100	5.4	590	2,930	69	9.4
炭化物	炭化ホウ素	B ₄ C	3,300 ~ 3,400	2.51	450 ~ 460	2,450	20 ~ 35	5
	炭化ケイ素	SiC	2,250 ~ 2,800	3.15	390 ~ 430	2,700 (昇華)	150 ~ 170	4 ~ 4.5
	炭化チタン	TiC	2,980 ~ 3,800	4.9	470	3,180	41	7.6

表の数値は代表値を示します。

(4) セラミックス

セラミックス (Ceramics) とは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。

近年ではシリコンのような半導体や酸化物、炭化物、窒化物、ホウ化物など、主として非金属の無機物質 (一部に金属化合物、有機化合物も含む) を総称してセラミックスと呼ぶようになりました (表 2.4)。中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 (あるいはアドバンスドセラミックス) と呼ぶことがあります。

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、金属に比べ熱に強く硬い、さらに高い耐食性を有するなど、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) を主成分としたものが、鋳物の旋削や正面フライス加工用のインデキサブル工具インサートとして用いられてきました。

最近では繊維強化材 (SiC ウィスカ) を混合 (分散) するなどの手法でセラミックスのじん性向上が図られており、その用途が広がりつつあります。



例えば切削温度が上昇する限られた領域ではありますが、耐熱合金（インコネル）の高速切削などにこうした繊維強化型セラミックス製のソリッドエンドミルが使用されるようになってきました（図2.1.5）。

なおセラミックスの主成分である炭化物、窒化物は、コーティングの被膜材料として広く用いられます。



刃長の短いラジアスタイプ

図 2.1.5 セラミックスエンドミルの例

(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。

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多結晶のダイヤモンド焼結体（PCD: Polycrystalline diamond）とがあります。

ダイヤモンドの単結晶はナノレベルの極めて鋭い刃先（図2.1.6）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。

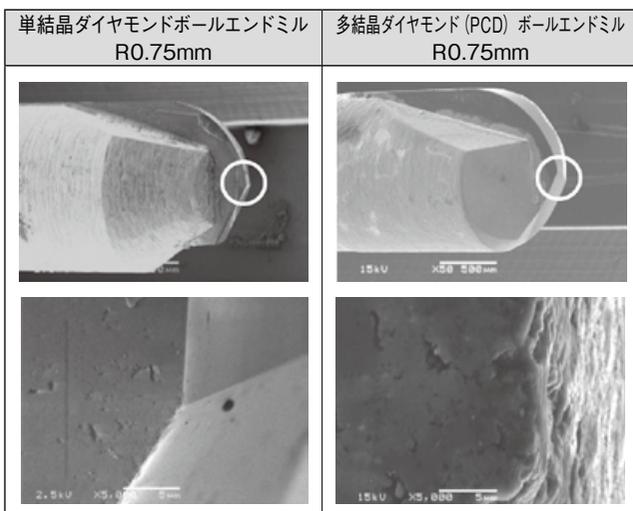


図 2.1.6 単結晶と多結晶ダイヤモンドエンドミルの刃先状態

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）などのバインダを用い、通常は超硬合金を台金として、その上に高压高温下（約5万気圧、1千数百度）で焼き固めたものです。ダイヤモンド焼結体も非鉄金属・非金属加工分野では、なくてはならない工具となっています。

近年ではナノ結晶化、バインダレス化も試みられています。単結晶ダイヤモンドは機械的特性が方位に依存するのに対して、多結晶焼結体は方位依存性が無くなるというメリットがあります。

(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（cBN:cubic Boron Nitride）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2.5）。

表 2.5 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

cBNは天然には存在せず、高温高压の条件でダイヤモンドと同じようなプロセスによって、人工的に合成して作ります。その際用いられるバインダ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、鑄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。



2.2 エンドミルの表面処理

(1) セラミックス被膜のコーティング

切れ刃の表面を改質したり、薄い膜で覆ったりする処理をまとめて表面処理と言います。コーティングは後者の薄い膜で刃先を覆う方法です。

1969年に切削工具では初めてとなるCVD法によるTiCコーティングがインサート（スローアウェイチップ）に施され、ドイツで製品化されると各国でコーティング工具の開発が加速されました。

1980年代になるとPVD法によるTiNコーティングがソリッドエンドミルに施されるようになり、エンドミルの性能が飛躍的に向上しました。

その後同じくPVD法によるTiCN膜や、例えばTiN/TiCN/TiNのような多層膜も実用化されました。

1990年代になるとエンドミルの母材の主流が、HSSから超合金へと移行する中で、TiAlN系の膜が開発されました。TiAlNはTiNに比べ熱伝導率が良く、酸化開始温度も高いため耐熱性に優れ、鋼の高速切削や焼入れ後の直彫り切削を可能としてきました。

またその一方でCrNのように摩擦係数が非常に小さく潤滑性に優れるコーティング被膜も誕生し、銅や銅合金の切削で加工面品位の向上、工具寿命の飛躍的な向上が実現されました。

現在ではAl・Cr系、Cr・Si系やSiC、Zrなどを含有する新しい被膜も実用化され、耐熱性、耐酸化性のさらなる強化が図られています。

膜の構造も、単層あるいは2～3層から多層化が進み、特性の異なる膜を多数重ね合わせた複合多層構造やナノ積層構造の膜などが次々に開発されています（図2.2.1）。

これらの被膜材質はTiC、TiNを始め、いずれも先述したファインセラミックスに類する材質であり、中には酸化開始温度が1,300℃を超えるような被膜もあります。

今後もさらに高温硬さの向上を図ったり、高温下での潤滑性を向上させたりする被膜の開発、改良が進むと考えられます。

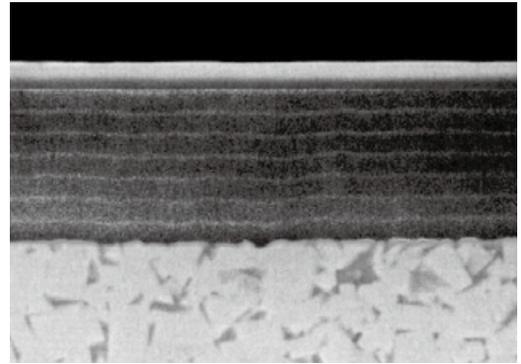


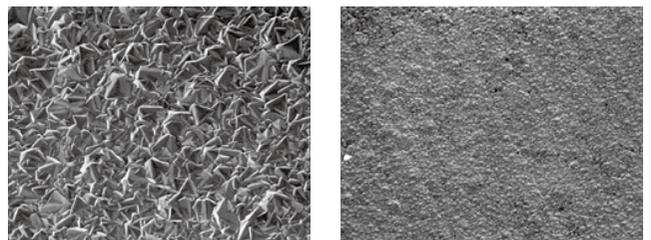
図 2.2.1 多層コーティング膜

(2) ダイヤモンドとDLCコーティング

ダイヤモンドのコーティングはCVD法で処理されます。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高い耐溶着性を示します。

ダイヤモンドの被膜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るため、表面は凹凸状態にあり、非鉄合金の仕上げ面粗さが要求される加工などには、従来、不向きとされてきました。

しかし近年被膜のダイヤモンド結晶を微結晶化する技術（1 μm以下）が確立されて、表面が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りました。これにより、非鉄金属の仕上げ加工も問題なくできるようになり、その用途が広がってきました（図2.2.2）。



従来

微結晶膜

図 2.2.2 微結晶化されたダイヤモンドコーティング膜



同じく炭素原子からなるのですが、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 (Diamond Like Carbon) と呼びます。このDLCも被膜としてコーティング処理 (CVD法、PVD法の両方で可能) 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位依存性が無く、平滑性、潤滑性に大変優れるといった特性があります。

表2.6にダイヤモンドとDLCの特性比較を示します。

表 2.6 ダイヤモンドと DLC

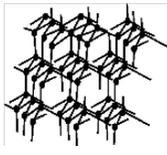
	ダイヤモンド	DLC
硬さ (Hv)	9,000 ~ 12,000	1,000 ~ 8,000
ヤング率 (GPa)	1,050 ~ 1,220	100 ~ 760
結晶形態		
表面形態	結晶面	平坦

表 2.7 エンドミル刃部材料、表面処理と主な用途

刃部材質と表面処理	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。	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。	超微粒子超硬合金:45HRC程度まで 超硬合金 (K種):55HRC程度まで
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
セラミックス	インサートでの正面切削では鋳物の高速仕上げ加工。ソリッド工具ではインコネルの高速切削。用途が限定される。	—
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。	—
単結晶ダイヤモンド	アルミニウムなどの非鉄金属。鋭利な刃先が得られるため、鏡面切削に用いられる。	—
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捉えてください。



3. エンドミルによる切削加工

3.1 切削加工

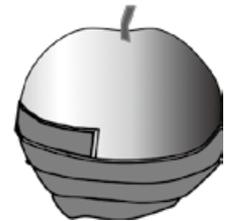
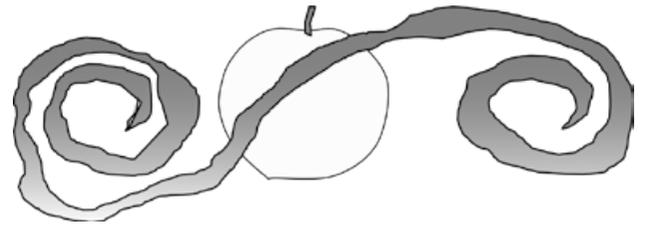
(1) 切削とは

「切削」とは、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不要な部分を切りくずとして分離し、要求される形状を作る除去加工の手法です。

切削加工の特徴を表3.1に示します。

表 3.1 切削加工の長所と短所

長 所	短 所
<ul style="list-style-type: none"> 幅広い材料に対応できる。(例えば導電性の有無に関係なく加工できる) 加工コストが比較的低い。 加工形状の制約が少なく自由度が高い。 加工速度が他の除去法に比べて比較的早く(加工能率が高く)、汎用性が高い。荒加工から精密仕上げ加工まで可能。 所要エネルギーが他の除去加工法に比べて小さい省エネルギー加工。 	<ul style="list-style-type: none"> 切りくずが出る。 工具が摩耗する。 切削に要する力が加工物、工具、工作機械の変形をおこさせ、加工精度の低下をもたらす。 切削により熱が発生し、加工物などの熱膨張を発生させる。また工具の摩耗を促進する。 切りくずだけにとどまらず、加工表面にもわずかに塑性変形をおこさせる。



リンゴの場合

金属切削の場合

図 3.1.1 リンゴの皮

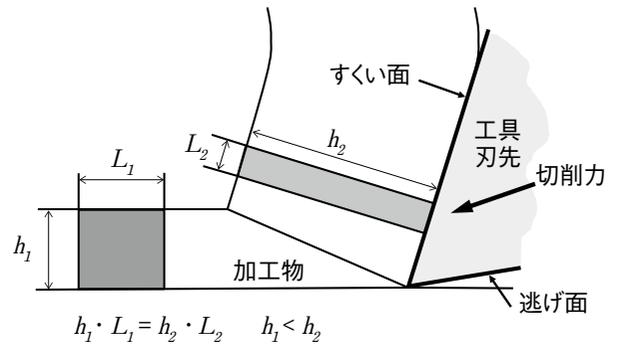


図 3.1.2 切削による切りくず

(2) せん断変形

リンゴの皮をむいても、この皮をつないで巻きつけていけば、もとのようにリンゴに巻きつきますが、金属を切削した切りくずをリンゴの皮のように巻きつけても、もとのようにはなりません(図3.1.1)。

金属切削では、その切りくず生成過程において、切りくずが変形をおこすために、切りくずは厚く短くなってしまいます(図3.1.2)。金属切削におけるこの切りくず変形は「せん断変形」です。せん断変形の様子は、図3.1.3のような単純モデル(2次元モデル)で示されます。

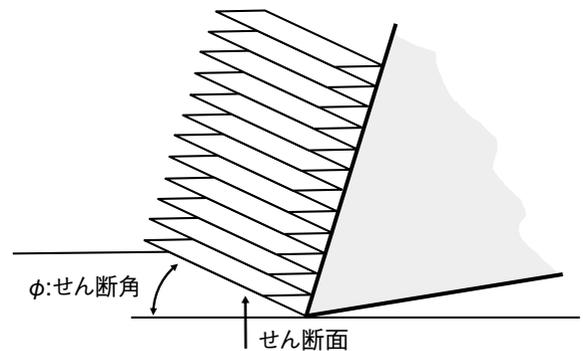


図 3.1.3 せん断変形



(3) せん断角と切れ味

工具の切れ刃によって圧力を受けた加工物の一部(切削部分)は、せん断面(実際には厚みを持った領域)に沿って、せん断変形が発生します。これを繰り返すことで、切りくずが生成され流出します(図3.1.4)。

この時せん断変形を起こす工具が加工物に及ぼす力を「切削力」と言います。そして、その反作用として、工具が加工物から受ける力を「切削抵抗」と言います。切削抵抗には切りくずと切れ刃、加工面と切れ刃の摩擦も加わることとなります。

そもそも切れ味が良いというのは、こういった状態でしょうか。簡単にスパッと切れて(削れて)、切り口(削り面)がきれいで、刃物が減らないというような状態をいうのだと思います。

この官能評価をエンドミル切削でいうならば、切削抵抗が小さく、加工された面の品位が良好で、工具寿命が長いということになります。

切削抵抗を小さくするためには、切りくずの変形、ひずみを小さくして、これに要する力を軽減することが必要です。すなわち金属切削においては、せん断角を大きくすることが、この状態を作り出すこととなります。

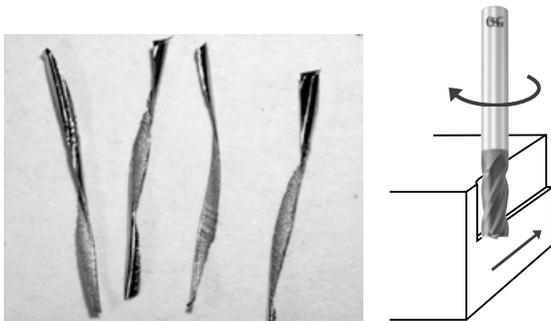


図 3.1.4 エンドミル側面切削での切りくず例

3.2 エンドミル切削

(1) エンドミル切削の特徴

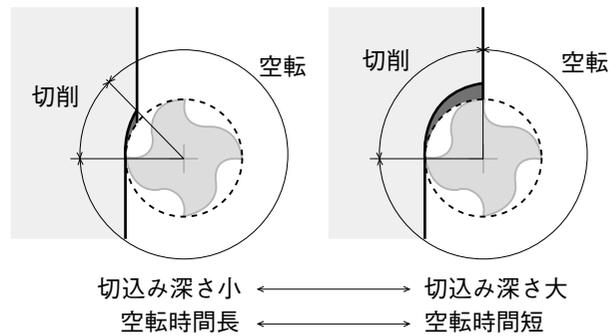
エンドミル切削(図3.2.1)の特徴は、穴加工を除けば図3.2.2に示すような、空転を伴う断続切削の繰り返しであることが挙げられます。

また工具回転が基本であり、図3.2.3のように回転に伴って、切削力の向きと切り取り厚さに変化することも大きな特徴のひとつです。

さらに工具径に対する刃長あるいは突出し長さが大きく、一般にねじれた複数の切れ刃による切削のため、切削位置が常に変化することになります(図3.2.4)。表3.2にエンドミル切削の特性をまとめます。



図 3.2.1 エンドミルによる切削



切込み深さ小 ← → 切込み深さ大
空転時間長 ← → 空転時間短

図 3.2.2 エンドミル加工における空転

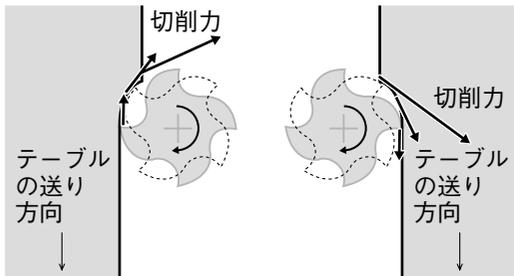


図 3.2.3 切削力の向きの変化

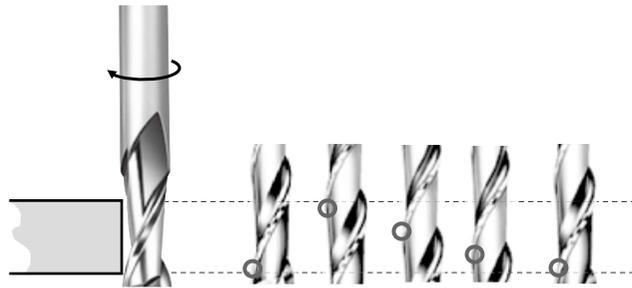


図 3.2.4 切削点の移動

表 3.2 エンドミル切削の特性

切削形態の特徴	切削特性
工具回転による切削	<p>切り取り厚さが変化する。 切削力（切削抵抗）の向きが変化する。 空転域が発生する場合は冷却が促進される。 遠心力が切りくず排出性を高める。 回転による変化が周期的な振動につながる可能性がある。</p>
アスペクト比が大きい切削 (工具の外径に対する突出し長さが大きい)	<p>加工中に工具のたわみを生じやすい。 切削時の振れ回りを生じやすい。</p>
ねじれ刃による切削	<p>切削抵抗の送り方向分力が軽減される。 切削抵抗の軸方向分力が大きくなる。 傾斜切削の作用が得られる。 ねじの作用によって切りくずを強制排出する。 切削点が常に軸方向に移動する。</p>
複数の切れ刃による切削	<p>同時に切削する切れ刃の長さが変化（切削に関与する切れ刃数が増減）して、切削抵抗が変動する。 切削抵抗は複数刃での合力となり、変化をする。</p>
一般に軸直角方向への移動による切削	<p>軸に対して曲げ方向の大きな切削抵抗が生ずる。</p>

(2) 切削抵抗

先述したように切削を行う過程においては、大きな力が必要となります。この力をエンドミルに加えて切削を行おうとすると、これ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。これ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3.2.5に示すように送り方向に働く送り分力と、これと垂直な方向に働く半径方向分力、および軸方向分力として測定することができます。

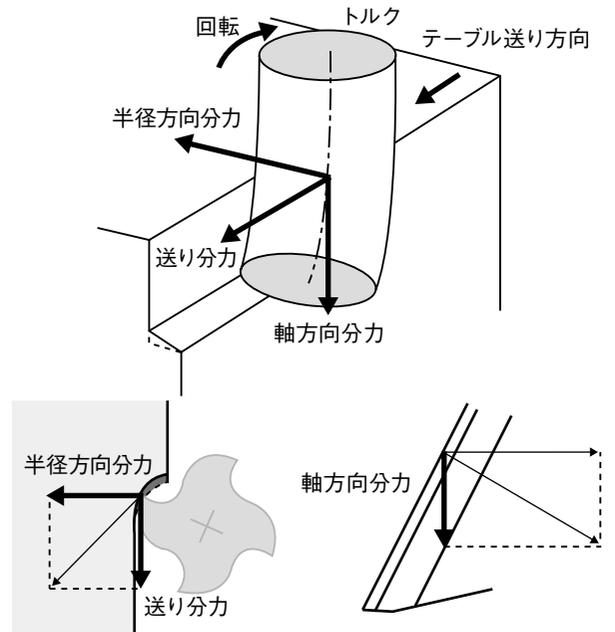


図 3.2.5 エンドミル切削における 切削抵抗分力

切削抵抗は変動を繰り返しますが、その最大値が所要動力を支配します。そして、送り方向分力と半径方向分力の合力が、エンドミルやそれを保持している保持具（ホルダ）をたわまそうとします。合力がエンドミルや保持具の剛性を上回ると、曲げ変形が起きて（たわみが発生して）、加工精度に大きな影響を与えることとなります。

またエンドミルがたわむと元に戻ろうとするので、このたわみ量が大きく、たわみと戻りの繰り返し周期が短ければ振動となります。

さらにこの合力がエンドミルの弾性限界を上回ると、エンドミルは折損してしまいます。



(3) 切削による発熱

エンドミル切削では回転により運動エネルギーを与えられた切れ刃が仕事をするわけですが、この運動エネルギーの多くは、熱エネルギーに変換されます。切削によって変換されるので、これを切削熱と言います。

図3.2.6のように切削によって繰り返されるせん断変形は、多くの切削熱を発生させます。さらに切れ刃と加工面および、切りくずとの間に生ずる摩擦も、切削熱として加わります。

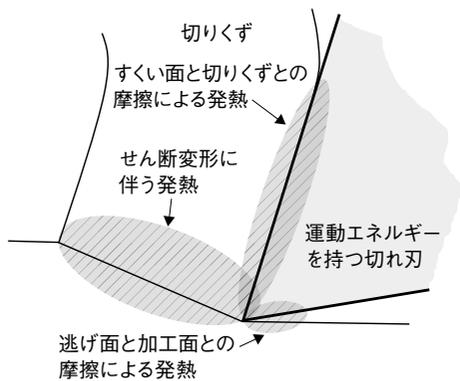


図 3.2.6 切削による熱の発生

しかし切削熱の多くは切りくずに流入すると言われています。加工物やエンドミルへの熱の流入は極めて少ないということです。

そもそもエンドミル加工では図3.2.2に示したような状況で切削が行われます。

切れ刃が実際に切削をしているときには、切削熱を発生させますが、すぐに空転となります。空転時間が長くなる削り方をすれば、切れ刃への熱の流入は少なくなります。

逆に空転時間が短く、切れ刃が加工物に接触している時間を長くすれば、エンドミルへの熱の流入は増加します。

(4) 切削時のびびり振動

エンドミルで切削加工を行っているとき、加工に不要な振動が発生することがあります(図3.2.7)。この工具や加工物、機械の振動を「びびり振動」と言います。びびり振動は、強制振動と自励振動に大別されます。

強制振動は何らかの振動源があって、これにより強制的に振動が加えられ、機械の振動特性によって拡大される現象です。振動源としては加工機の主軸の振れ、モータなどから生ずる振動、断続切削による切削抵抗の周期的な変動などが挙げられます。

主軸の振れや駆動系の振動は、修理などによって取り除くことができますが、問題となるのは、この切削中に発生する切削抵抗の向きや大きさの繰り返し変動に起因する振動です。この変動による振動が機械系や加工物と共振をすると大きなびびり振動となります。

これに対して自励振動は、振動と直接関係ないものが振動を誘発させるような現象を言います。

エンドミル切削における自励振動は、図3.2.8に示すように何らかの原因でびびり振動をしながら、前の切れ刃が切削した凹凸面を、次の切れ刃が切削すると、切り取り厚さが同じ周期で変化し、これに伴う切削抵抗の変動が、びびり振動を再生(あるいは増幅)させ、これが永遠に繰り返されるといえるものです。このため、この現象を再生びびり振動とも言います。

この再生びびり振動はエンドミル切削においては、最も厄介なびびり振動ということになります。

こうしたびびり振動は、機械系や加工物の共振周波数の整数分の1となる時にピーク値を示します。したがって回転速度を決定する際には、こうした領域を避けることが必要となります。

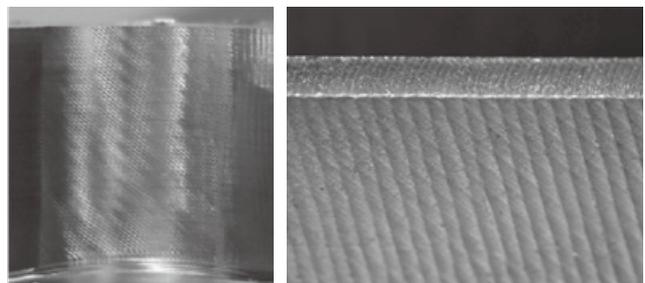


図 3.2.7 びびり振動発生時の加工面

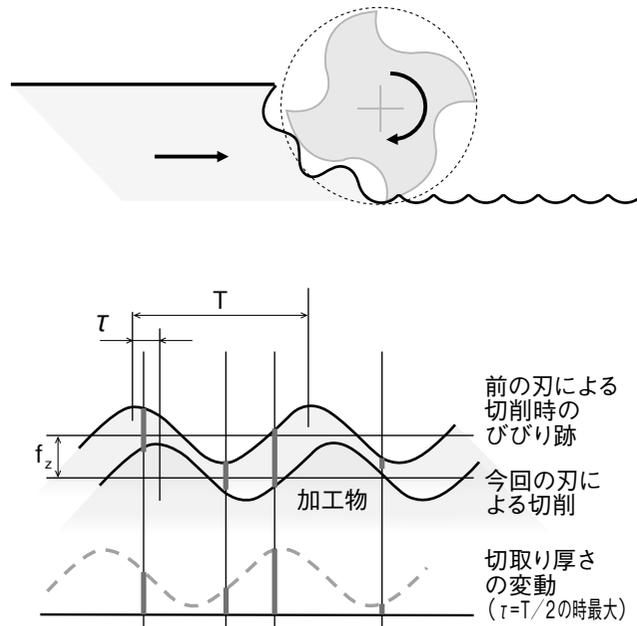


図 3.2.8 再生びびり振動のモデル

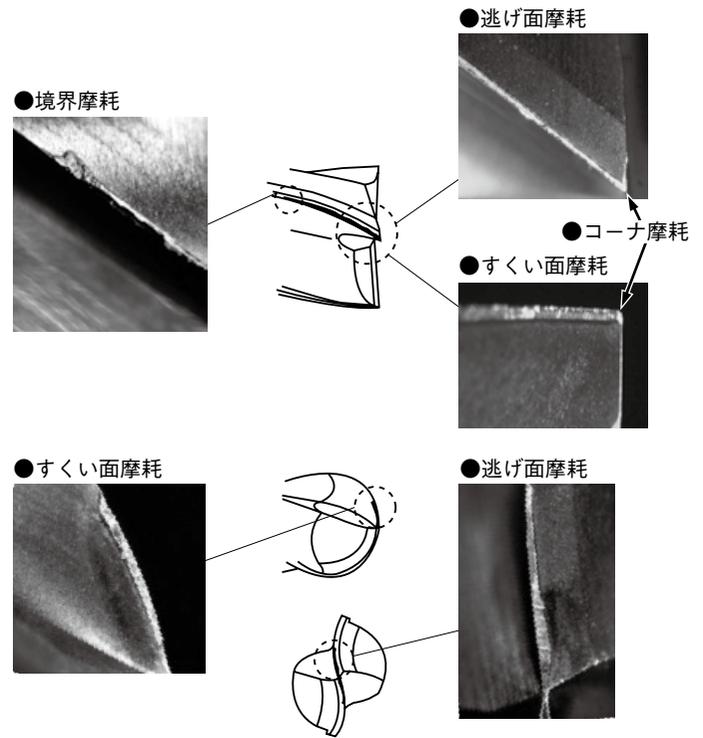


図 3.2.9 エンドミルの摩耗形態

(6) 工具摩耗

エンドミルで切削を続けると、その切れ刃には次第に摩耗が発生し進行していきます。その摩耗形態の代表的な事例を図3.2.9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3.2.10)。

また摩耗の発生要因、損傷の状態によって、機械的摩耗、溶着、拡散摩耗、科学的摩耗、チッピング (図3.2.11)、塑性変形、熱亀裂 (サーマルクラック)、構成刃先などに分類されます。

構成刃先とは切れ刃に溶着が発生した際に、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場合に発生する現象です。切れ刃のすくい角に関係なく図3.2.12のように30~40°の角度で形成されると言われています。これが成長と脱落を繰り返すため、加工面の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。

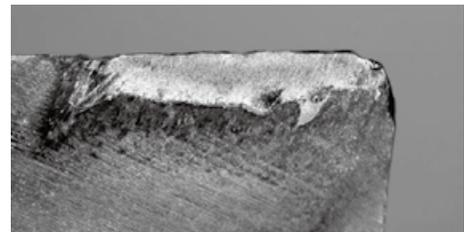


図 3.2.10 クレータ摩耗

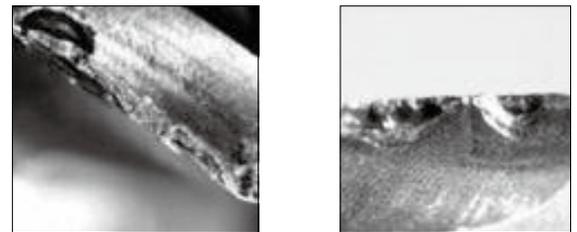


図 3.2.11 チッピング

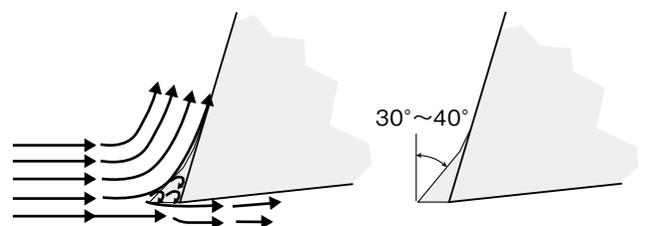


図 3.2.12 構成刃先



3.3 エンドミルによる加工形態

エンドミルの基本的な加工形態は、側面切削、溝切削、正面切削、穴加工となります。もちろん高さのある立ち壁や深い溝をステップ加工することもできます。

CNC制御の無い汎用フライス盤では、こうした2次元加工しかできませんが、CNC制御のフライス盤やマシニングセンタでは、X軸、Y軸、Z軸の動きを組み合わせることで、これらを応用した加工が可能となります。

例えば穴のヘリカル切削や幅の広い溝のトロコイド切削、あるいは曲面の切削など、様々な加工が可能となります。

ボールエンドミル、ラジラスエンドミルを使えば、自由曲面の3次元加工も可能となります。

図3.3.1にこうしたエンドミル加工形態の例を示します。

自由曲面の加工においては、その形状や加工面積などに対して、等高線加工、走査線加工、ヘリカル切削など複数の加工方法を組み合わせ、加工能率や加工精度を向上させることができます。

5軸加工機では工具姿勢を変える（あるいは加工物を旋回させる）ことで、加工物や保持具への干渉を避け、エンドミルを必要最小限の突出し長さで使用することが可能となります。また、ボールエンドミルの切削速度0での加工を避けることもできます（図3.3.2）。

ミルターン加工は、回転する加工物を回転するエンドミルなどで切削を行う工法です。図3.3.3に、その例を示します。

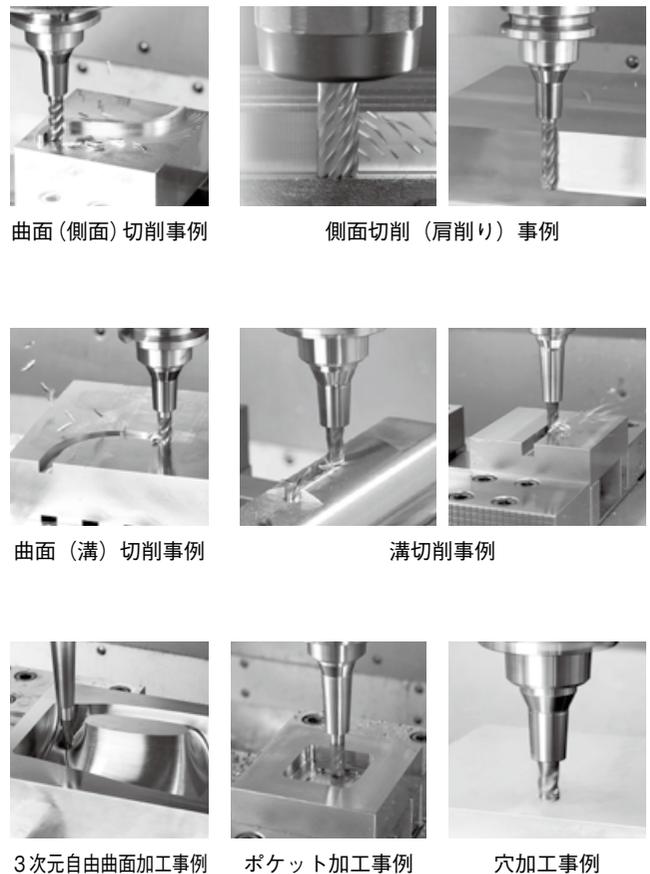


図 3.3.1 エンドミルの主な加工形態

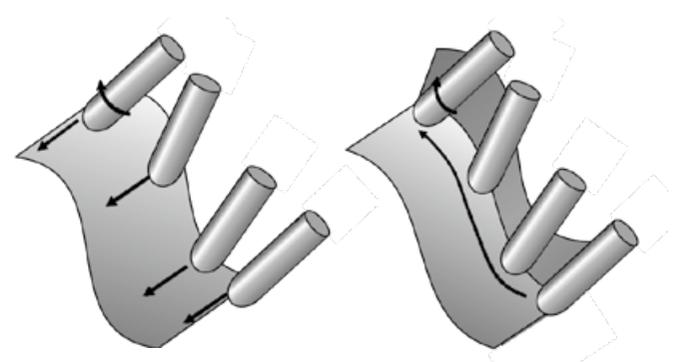


図 3.3.2 5軸加工の例

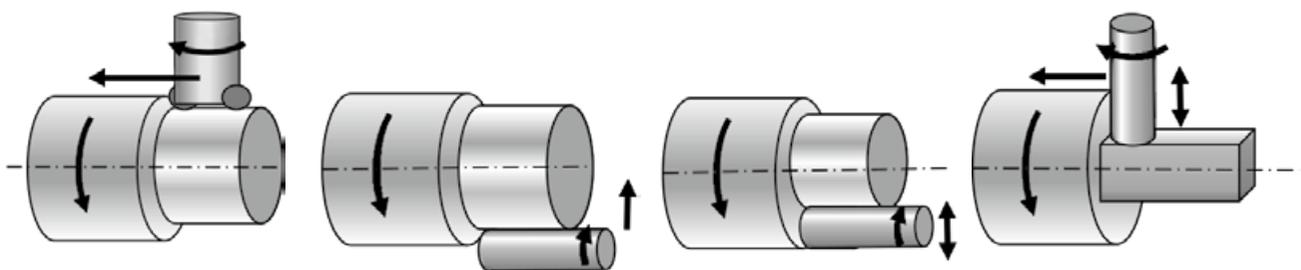


図 3.3.3 ミルターン加工の例



4. 切削条件

4.1 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無視をし、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。

$$V_c = \frac{\pi \cdot DC \cdot n}{1000} \dots\dots\dots (4.1)$$

V_c : 切削速度 (m/min)

π : 円周率

DC : 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})

先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。

そもそも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ことや、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ます。

つまり切削速度が速くなるほど、大きな切削力が得られるということです。

エンドミルでの金属切削加工が、草や髭の場合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）が起きることと、これによる大きな発熱を伴うことだと言えるでしょう。

(2) 切削速度と加工精度

炭素鋼や合金鋼など金属の切削においては、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4.1.1）。

すなわち、せん断変形量が少なくなるため、切削抵抗は、軽減されることとなります。このことは切削速度を上げていくと同じすくい角であっても、切れ味がよくなることを意味します。

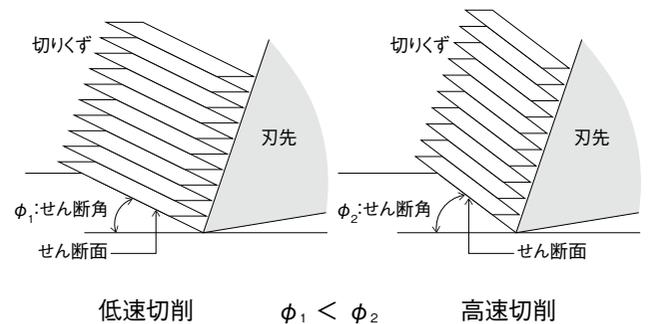
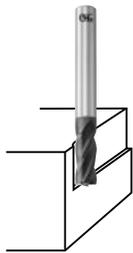
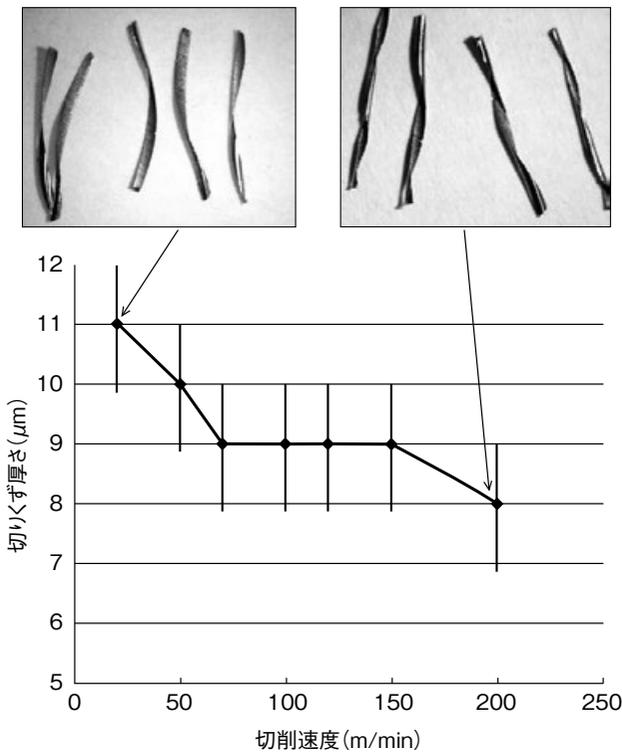


図 4.1.1 切削速度とせん断角

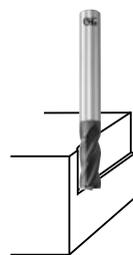
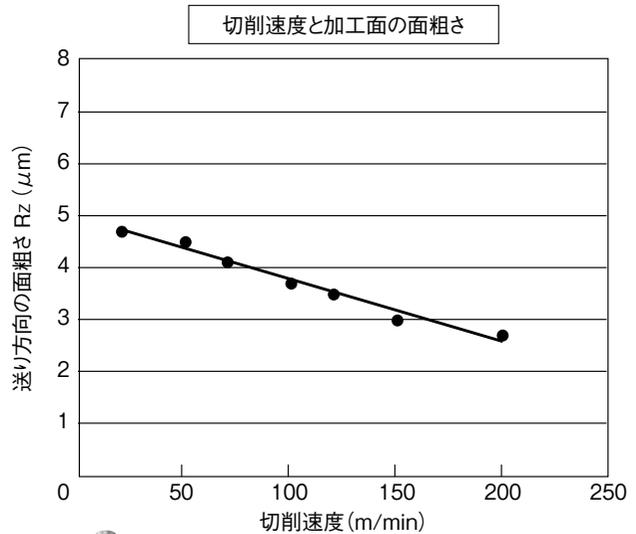
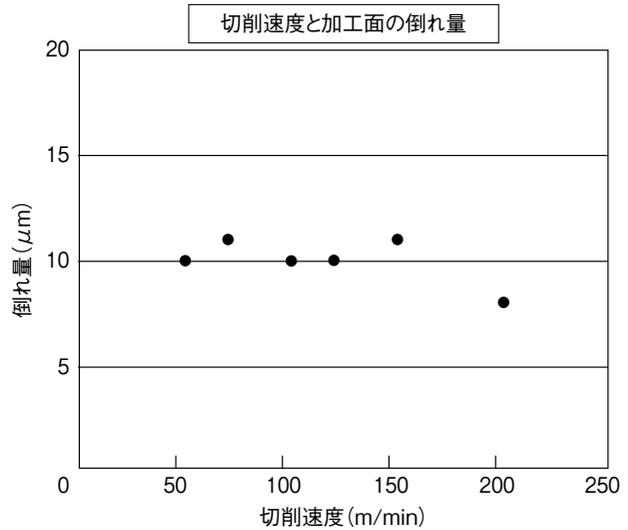
図4.1.2にはコーティング超硬エンドミルを用いて、実際に切削速度と切りくず厚さの関係を調査した結果を示します。

薄い切りくずの生成は、切削抵抗の軽減とともに、加工面品位の向上をもたらすと考えられます。



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
切込み深さ: $a_p=10\text{mm}$ $a_e=0.5\text{mm}$
送り量:0.07mm/t
切削方向:ダウンカット
切削油剤:乾式
測定方法:切りくず中間部を
ポイントマイクロメーターで計測

図 4.1.2 切削速度と切りくず厚さ



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
切込み深さ: $a_p=10\text{mm}$ $a_e=0.5\text{mm}$
送り量:0.07mm/t
切削方向:ダウンカット
切削油剤:乾式

図 4.1.3 切削速度と加工面精度

図4.1.3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いて、切削速度を変化させた際の加工面精度、加工面粗さを測定した結果を示します。

この結果の範囲では、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分かります。

さらに図4.1.4にダイス鋼を、コーティング超硬エンドミルにより切削速度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のほうが光沢度が高くなっていることがわかります。

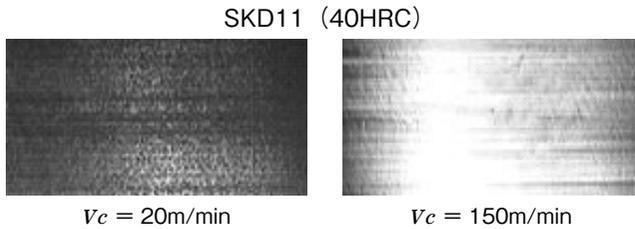


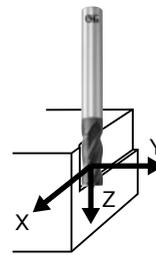
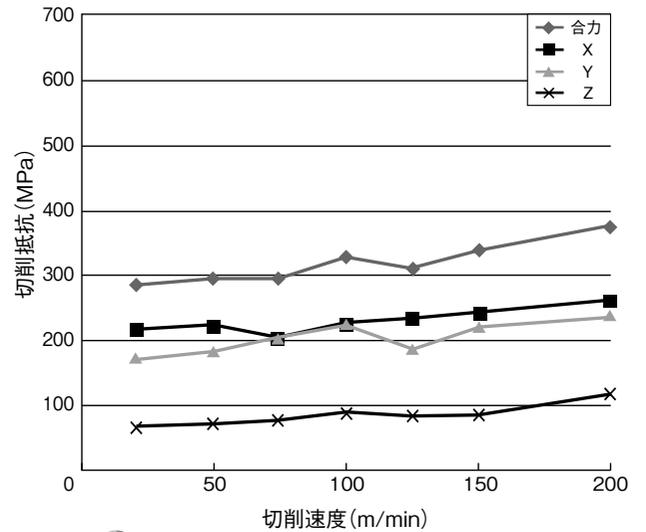
図 4.1.4 切削速度と加工面品位

図4.1.5には切削速度を変化させた際の切削抵抗を測定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分かります。

これは切削速度の増加が、せん断角の増大を促し（切れ味が良くなり）、切削抵抗（切削力）の増加を抑制していることの裏付けと言えます。

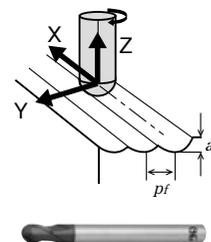
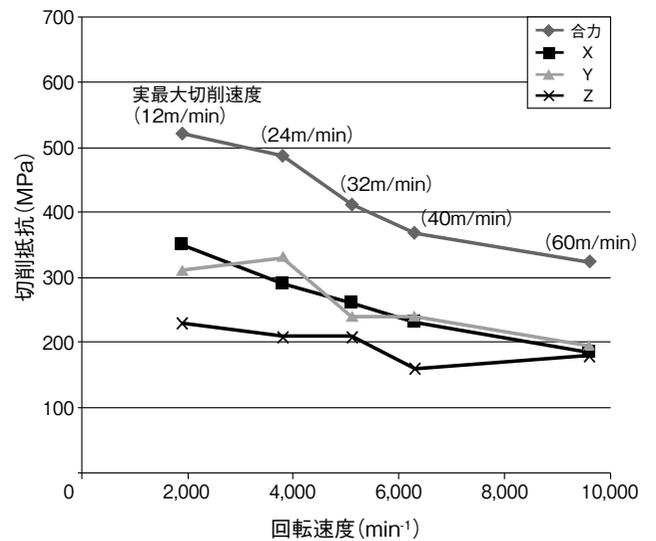
図4.1.6はボールエンドミルでの各切削速度における切削抵抗の測定結果を示します。この結果においては、切削速度の上昇に伴い、切削抵抗が軽減する現象が分かります。

ボールエンドミルの、このような加工では、切削速度を上昇することで、せん断角が増加し（せん断変形量が減少し）、切りくず厚さが薄くなるのと同時に、切削速度 V_c が、0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と言えます。



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
 切込み深さ: $a_p=10\text{mm}$ $a_e=0.5\text{mm}$
 送り量: 0.07mm/t
 切削方向: ダウンカット
 切削油剤: 乾式
 機 械: 立形マシニングセンタ (BT40)

図 4.1.5 切削速度と切削抵抗



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: $1,900\text{min}^{-1} \sim 9,600\text{min}^{-1}$
 送り量: 0.1mm/t
 切込み深さ: $a_p=0.2\text{mm}$ $p_f=0.1\text{mm}$
 切削方向: ダウンカット
 切削油剤: 乾式
 機 械: 立形マシニングセンタ (BT40)

図 4.1.6 ボールエンドミルにおける切削抵抗



(3) 切削速度と工具寿命

切削速度が速くなれば、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。

以前から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) がよく知られてきました。

$$V_c \cdot T^m = C \dots\dots\dots (4.3)$$

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。

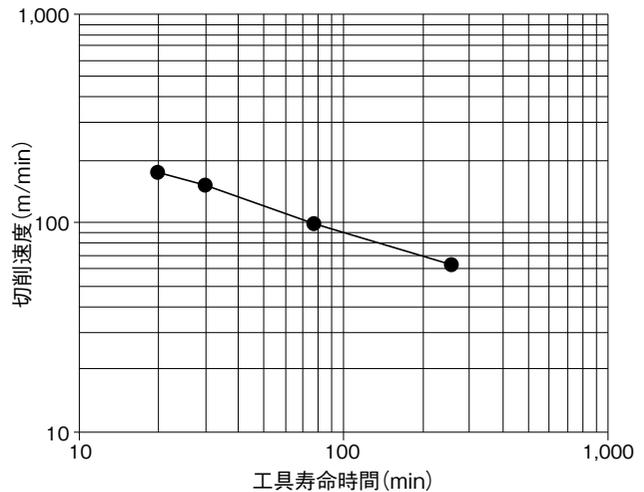
この寿命方程式では切削速度が大きくなるほど (定数の値によって、その変化の度合いが異なるが) 工具寿命時間は、短くなることとなります。

図4.1.7はコーティング粉末HSSエンドミルで、炭素鋼S50Cを切削した試験結果ですが、この寿命方程式がよくあてはまります。

この図は縦軸に切削速度、横軸に工具寿命時間を採り、それぞれを対数目盛で示したもので「V-T線図」や「V-Tグラフ」と呼ばれます。先述の寿命方程式が成り立つ時、このグラフでは、右下がりの直線状にデータが並ぶこととなります。

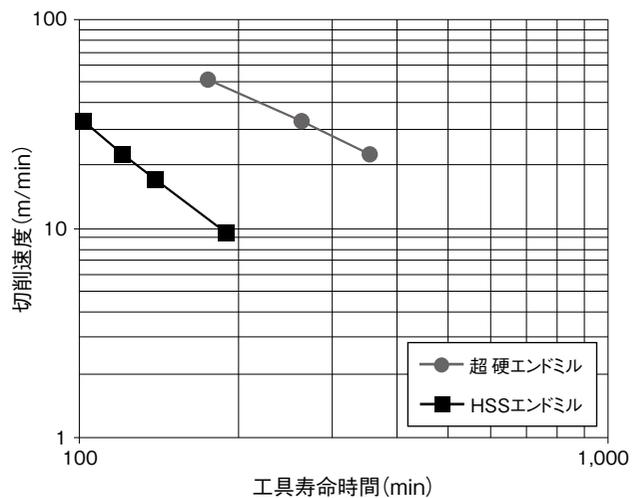
図4.1.8にはHSSエンドミル、超硬エンドミルそれぞれでの湿式による溝切削の例を示しますが、この場合もV-T線上に点が、一直線状に並ぶ結果となっています。

しかし切削速度をさらに上げた領域まで広げて、試験を実施していくと、次第にこの点が、一直線上に並ばなくなっていきます。



エンドミル: コーティング粉末HSSエンドミル
 φ16 4枚刃
 被削材質: S50C
 切削速度: 63~176m/min
 送り量: 0.09mm/t
 切込み深さ: $a_p=10\text{mm}$ $a_e=1\text{mm}$
 切削方向: ダウンカット
 切削油剤: エアブロー
 機械: 立形マシニングセンタ (BT50)
 寿命判定: 外周逃げ面摩耗幅0.4mm

図 4.1.7 切削速度と工具寿命の例



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
 切込み深さ: $a_p=6\text{mm}$ 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

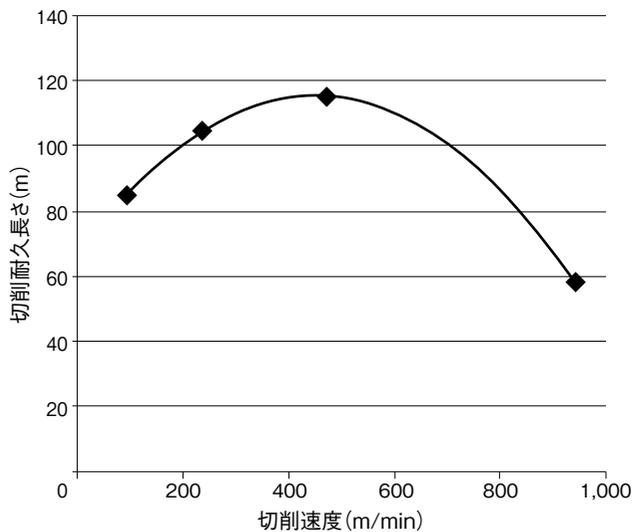
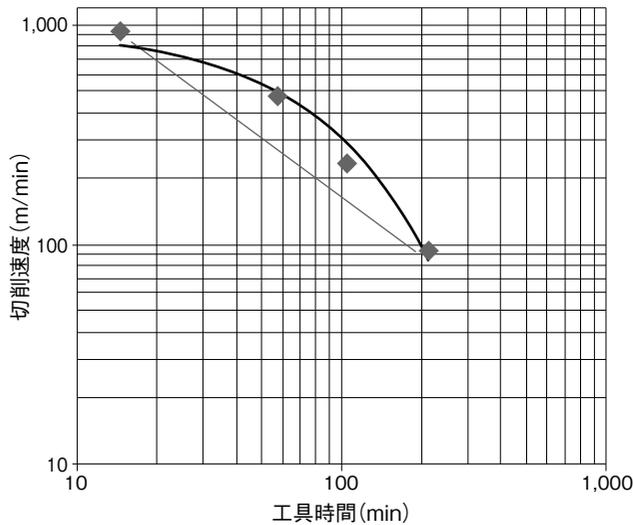


図 4.1.8 超硬・HSS エンドミルでの切削速度と工具寿命



図4.1.9にその例を示します。また同時に切削速度を横軸に、切削耐久長さを縦軸にとったグラフも、併記をします。

この結果では、例えば切削速度100m/min程度で加工をするよりも、切削速度400m/min程度で行った方が加工能率は4倍となり、工具の切削耐久長さも30%程度向上するということになります。



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

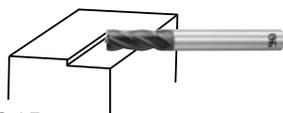


図 4.1.9 高速切削の優位性

この要因としては切削速度の上昇により、せん断角が大きくなる(切りくずが薄くなる)ことで、生成される切りくずの表面積は大きくなり、切削熱が、切りくずに流入しやすくなったことが挙げられます。

切削熱の切りくずへの流入比率が高まった分、工具への流入が減り、熱による摩耗の進行が抑制されたと推測されます。

さらに、せん断角の変化による切削性(切れ味)の改善(おそらく機械的こすり摩耗や凝着摩耗の低減)も、先述の効果に加わり、工具摩耗の進行を緩やかにし、このような高速域での優位性が見られる結果となったと推測されます。

図4.1.10は旋削加工での切削速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。

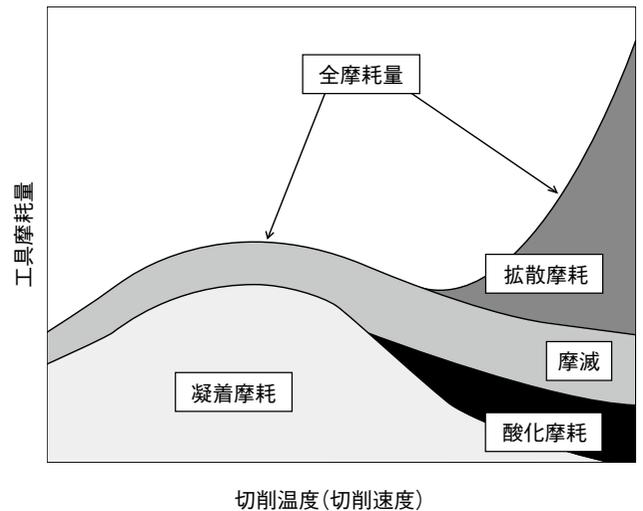
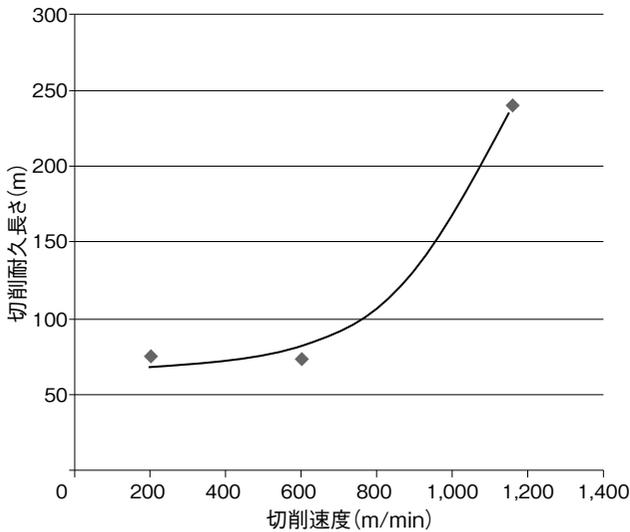
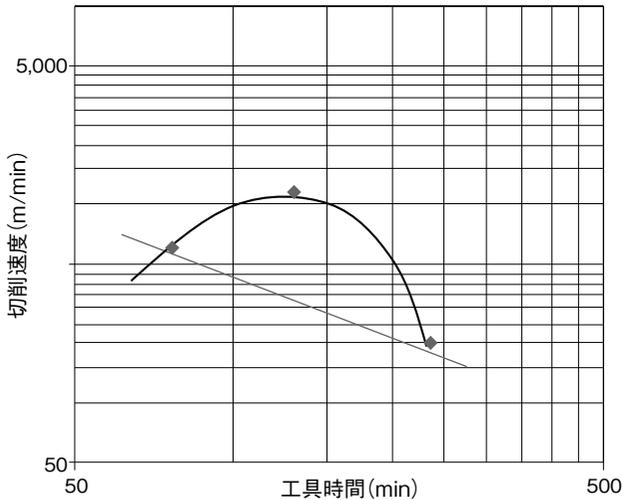


図 4.1.10 切削温度と工具摩耗形態
 (吉田嘉太郎、時松光 編著 ものづくり機械工学 第2版 2003 日刊工業新聞社 より)



図4.1.11には、cBNエンドミルの事例を示します。切削速度1,160m/minでの優位性が顕著に表れています。



エンドミル: cBNエンドミル φ10 1枚刃
 被削材質: FC250
 切削速度: 200~1,160m/min
 送り量: 0.05mm/t
 切込み深さ: $a_p=0.2\text{mm}$ $a_e=9.5\text{mm}$
 切削方向: ダウンカット
 切削油剤: エアブロー
 機 械: 立形マシニングセンタ(BT30)
 寿命判定 逃げ面摩耗幅0.2mm

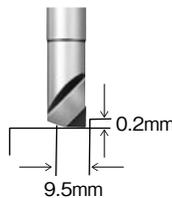


図 4.1.11 cBN エンドミルでの切削速度と工具寿命

このような工具摩耗の進行が穏やかになるような高速領域で、高精度加工を高能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、高能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。

(4) 切削速度と振れおよび振動

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、切削抵抗の変動の原因となります。回転速度の上昇は変動周期を短くし、アスペクト比 (L/D) の増加、切削抵抗の増加は振幅の増大を招きます。

回転速度を上昇させていくと、突然、振動が発生する領域が存在することがありますが、こうした周期的な変動が、機械系あるいは加工物の固有振動数の整数分の1近辺となると共振を起こすからです。

この場合は、共振による振動の大きな領域の回転数を避けることで、回避ができます。共振に関係なく、びびり振動が発生する場合は、切削抵抗を小さくすることが必要です。

一方、切削抵抗による工具のたわみ以外にも、主軸、ホルダ、エンドミルの累積された振れの影響による振動もあります(図4.1.12)。ここで言う振れとは、エンドミルを機械主軸に取り付けた際、図4.1.13のようにダイヤルゲージで測定できる、各刃での値の最大値と最小値の差のことです。

エンドミルの振れは加工精度の悪化ばかりか、工具寿命も短くしてしまいます(図4.1.14)(図4.1.15)。そして、この振れの値は回転速度の上昇につれて増幅する傾向にあります。

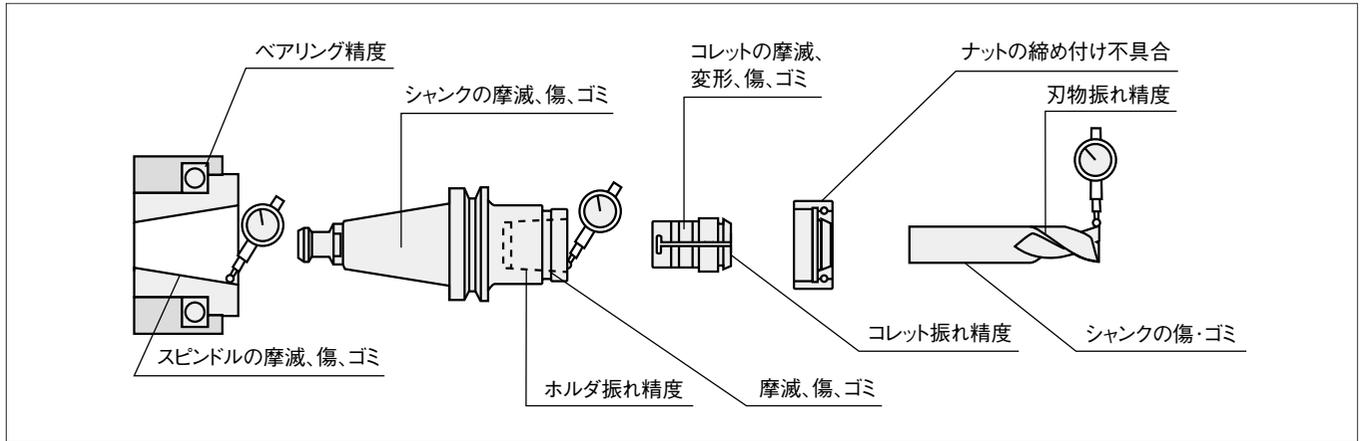


図 4.1.12 エンドミル取り付け時の振れの発生要因 (株式会社 MST コーポレーション技術資料より)

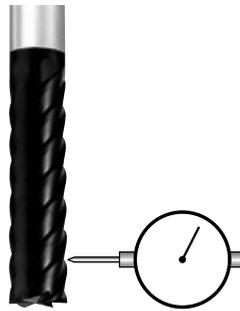
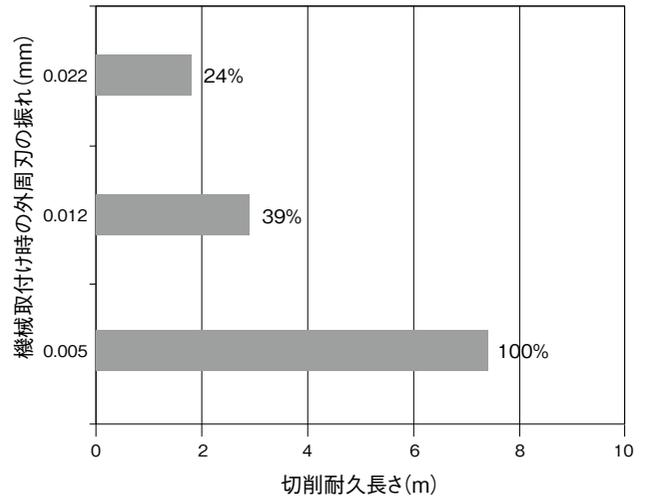
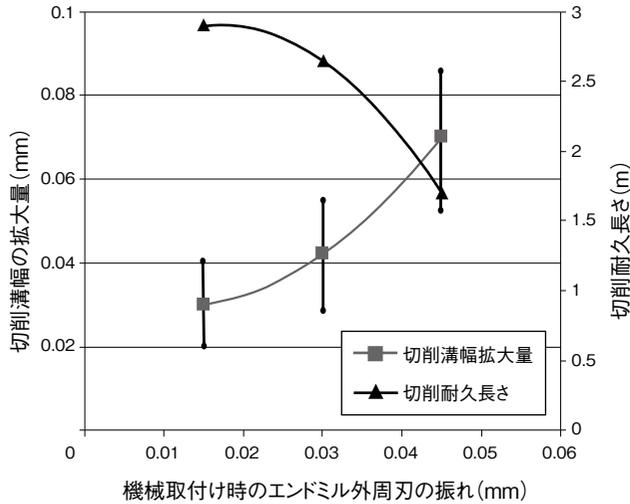


図 4.1.13 外周刃の振れ測定



エンドミル: HSSエンドミル φ16 2枚刃
 被削材質: S45C (94~96HRB)
 切削速度: 34m/min (680min⁻¹)
 送り量: 0.04mm/t (56mm/min)
 切込み深さ: $a_p=10$ 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: 外周刃逃げ面摩耗幅0.2mm
 (2枚の刃のうち、どちらかが0.2mmに達したとき)



図 4.1.14 振れと加工精度および工具寿命

エンドミル: コーティング超硬エンドミル φ4 2枚刃
 被削材質: SKD61 (40HRC)
 切削速度: 36m/min (2,866min⁻¹)
 送り量: 0.08mm/t (46mm/min)
 切込み深さ: $a_p=2$ 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: 外周刃逃げ面摩耗幅0.1mm
 (2枚の刃のうちどちらかが0.1mmに達したとき)



図 4.1.15 超硬エンドミルの振れと工具寿命

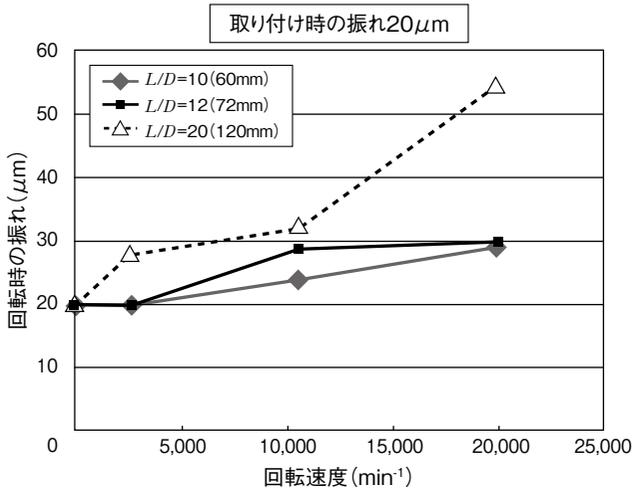
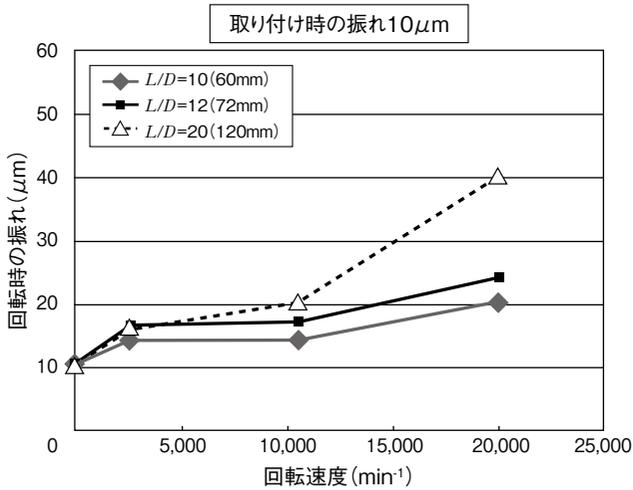
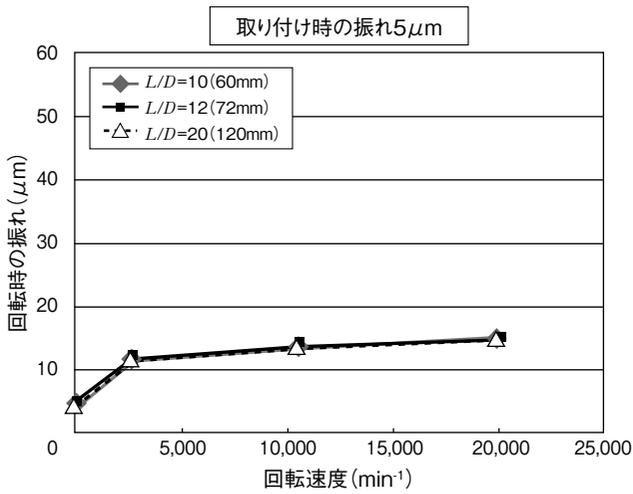


図 4.1.16 高速回転による振れ量の増加

図 4.1.16 に回転速度が振れに及ぼす影響を調べた結果を示します。なお回転時の振れの値は、光学測定器で測定をしました。

回転速度の上昇にともない、振れの値は増加し、アスペクト比 (L/D) が大きくなると、振れの増加傾向は、さらに顕著になります。こうした周期的な振れの増加は、先述した共振と相まって、びびり振動の発生要因となります。

(5) 切削速度の決め方

ここまで説明してきたように、切削速度は切削力の源であり、加工能率ならびに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。

しかし切削速度の上昇に伴って切削熱の発生量は増加し、エンドミルの刃先を高温にさらすこととなります。このため工具材質が、その高温硬さを保つことができる切削温度領域が、切削速度のひとつの限界となります。

また切削中のエンドミルの、たわみや振れ周りの増幅も大きな制約条件となります。したがってアスペクト比 (L/D) が大きくなると、切削速度は思うように上げられなくなってしまいます。一般的な切削速度を表 4.1 に示します。



表 4.1 エンドミル加工における一般的な切削速度

工具材質と加工内容 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	インデキサブル工具での荒加工	ソリッド工具での高速ミーリング	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
	FCD400	20~25	20~30	25~35	40~70	40~150	70~150	~300	~2,000
一般構造用 圧延鋼	SS400	25~40	25~40	35~40	60~80	60~150	80~250	~300	
炭素鋼	S45C S50C	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
ダイス鋼	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	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、おおむねの目安を示すものであり、加工可能な切削速度を保証するものではありません。



4.2 送り量

(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。そして、この移動の速度を「送り速度」と言います。

一般に送り速度は、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_r 、ならびに1刃当たりの送り量 f_z は、

$$f_r = \frac{V_f}{n} \dots\dots\dots (4.4)$$

$$f_z = \frac{V_f}{z \cdot n} \dots\dots\dots (4.5)$$

f_r : 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)

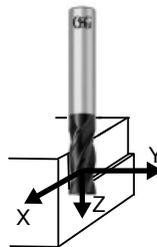
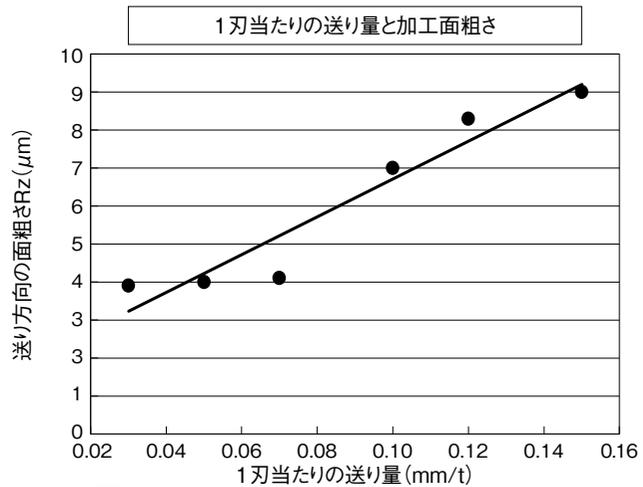
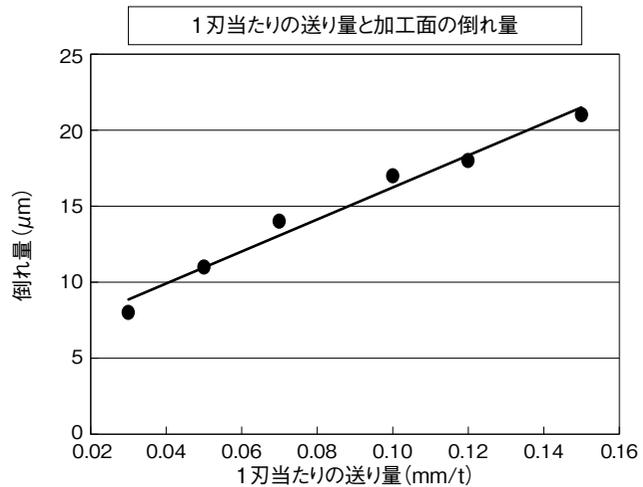
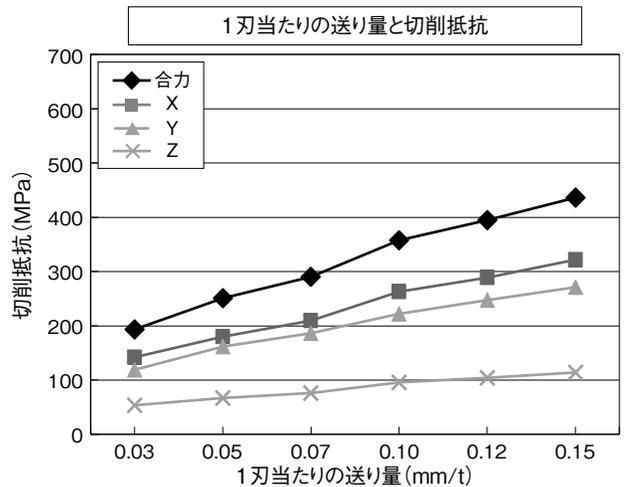
となります。この1刃当たりの送り量は、生成される切りくずの厚さに影響を与えます。

送り速度を1刃当たりの送り量にて表現することで、その送り量の過大、過少といった、相対的な判断がしやすくなります。

(2) 送り量と加工精度

1刃当たりの送り量の増加は、せん断変形量を増すこととなるので、図4.2.1に示すように切削抵抗の増加を招きます。切削抵抗の増加は、エンドミルのたわみや振れ回り量を増大させ、加工精度を悪化させることとなります。

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となります。



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
 切込み深さ: $a_p=10\text{mm}$ $a_e=0.5\text{mm}$
 切削速度: 70m/min
 切削方向: ダウンカット
 切削油剤: 乾式
 機 械: 立形マシニングセンタ(BT40)

図 4.2.1 1刃当たりの送り量と加工面の倒れ量

(3) 送り量と工具寿命

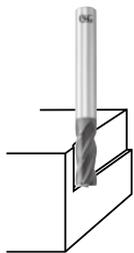
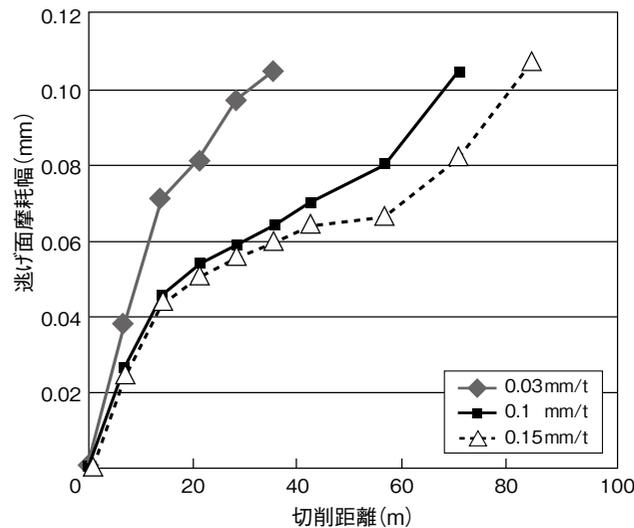
図4.2.2には1刃当たりの送り量と工具摩耗の推移を、比較した実験結果を示します。

1刃当たりの送り量を上げることで、同一切削長さでの工具摩耗量が減少していることが分かります。すなわち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。

また延性材料の切削では強靱なぼりの発生に、脆性材料では、こぼ欠けの発生にもつながります。



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
切込み深さ： $a_p=10\text{mm}$ $a_e=0.5\text{mm}$
切削速度：70m/min
切削方向：ダウンカット
切削油剤：乾式
機械：立形マシニングセンタ(BT40)

図 4.2.2 1 刃当たりの送り量と工具摩耗の推移

(4) 送り量の決め方

1刃当たりの送り量は、エンドミルの剛性（材質特性を含む）と機械や加工物の剛性、エンドミルや加工物の保持剛性が切削抵抗に耐える範囲内で決定されることになります。

これを超えて大きくしていくと、振動が発生したり、切削直後に切れ刃がチッピングを起こしたり、エンドミルが折損したりしてしまいます。

送り量と同じように、切削抵抗に大きな影響を及ぼす条件に切込み深さがあります。

切込み深さが大きくなれば、単位時間当たりの仕事量は増えるので、切削抵抗は大きくなります。特に半径方向の切込み深さは、送り速度を決定する時に大きな影響を及ぼします。

図4.2.3には1刃当たりの送り量が同じ時の、半径方向の切込み深さと切取り厚さの関係を示します。

1刃当たりの送り量が同じであっても、半径方向の切込み深さが大きくなると、切取り厚さが大きくなるのが分かります。

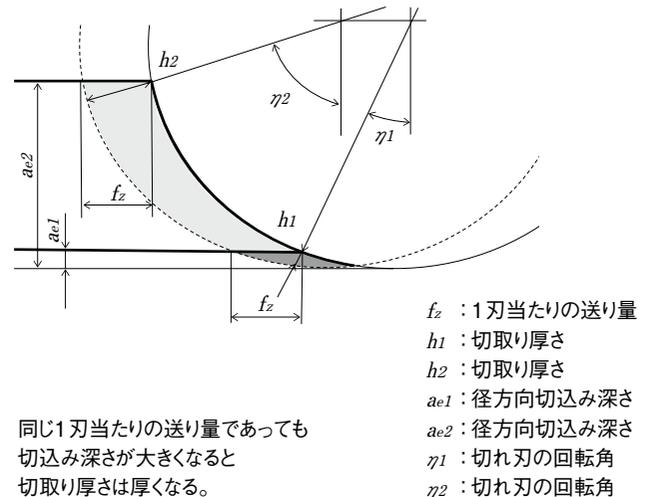


図 4.2.3 同一送り量での切込み深さと切取り厚さ



この時、切込み深さと最大切取り厚さとの関係は、近似的に次式で表すことができます。

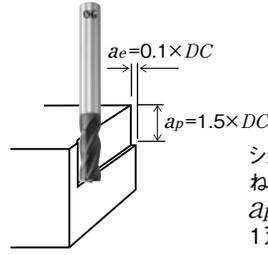
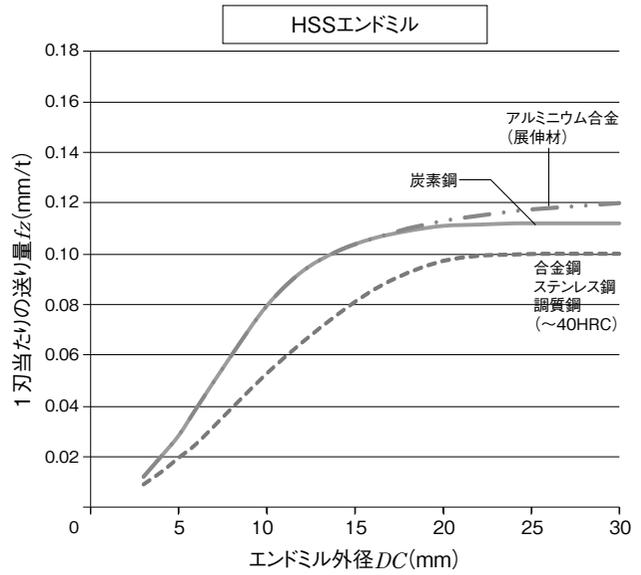
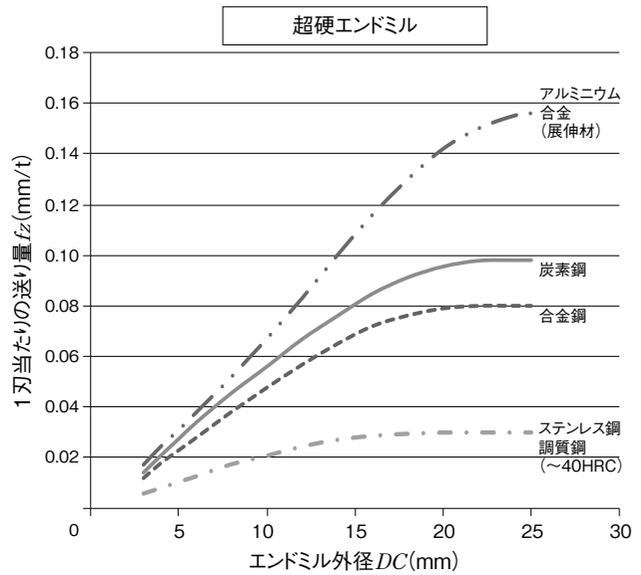
$$\begin{aligned}
 ha &\approx fz \cdot \sin \eta \\
 &= \frac{2fz}{DC} \sqrt{ae \cdot DC - ae^2} \\
 &= 2fz \sqrt{\frac{ae}{DC} \left(1 - \frac{ae}{DC}\right)} \dots\dots\dots (4.6)
 \end{aligned}$$

- ha : 最大切取り厚さ (mm)
- η : 刃先の回転角
- fz : 1刃当たりの送り量 (mm/t)
- ae : 半径方向の切込み深さ (mm)
- DC : エンドミル外径

一般的にエンドミルの1刃当たりの送り量は、図4.2.4に示す値が基準値として示されます。(ショート刃エンドミルで、一定の切込み深さにおいて調査された切削可能領域の中で、比較的加工能率を優先した代表値)

この値を目安に、切込み深さ(切削量)とエンドミル剛性に応じて、補正を行うことになります。例えばミディアム刃長であればこの値の80%、ロング刃長では50~60%程度となります。

さらに最終的には、要求される加工精度、加工面粗さによって調整を行い、1刃当たりの送り量を決定します。



ショート刃 4枚刃 30°
 ねじれエンドミルにおける側面切削
 $ap=1.5DC$ $ae=0.1DC$ の時の、
 1刃当たりの送り量の基準値を示します。

図 4.2.4 基準となる 1 刃当たりの送り量

4.3 切込み深さ

(1) 切込み深さとは

加工能率は単位時間当たりの除去体積（切りくず排出量）で決定されます。エンドミル加工では切込み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。

エンドミルの切込み深さは、通常軸方向の切込み深さ（ a_p ）と半径方向の切込み深さ（ a_e ）によって表されます（図4.3.1）。

したがって1分間当たりの除去体積（切りくず排出量）は、次式で求めることができます（図4.3.2）。

$$Q = \frac{a_p \cdot a_e \cdot V_f}{1000} \dots\dots\dots (4.7)$$

- Q : 1分間当たりの除去体積（切りくず排出量）(cm³/min)
- a_p : 軸方向切込み深さ (mm)
- a_e : 半径方向切込み深さ (mm)
- V_f : 送り速度 (mm/min)

(2) 切込み深さの影響

半径方向の切込み深さが増加すると、図4.3.3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4.2.6）。

厚い切りくずは単位体積当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。

エンドミル加工において半径方向の切込み深さが最大となるのは溝切削です。溝切削においては半径分にある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、切りくずの噛込みや切りくずの再切削などの問題が生じやすくなります。

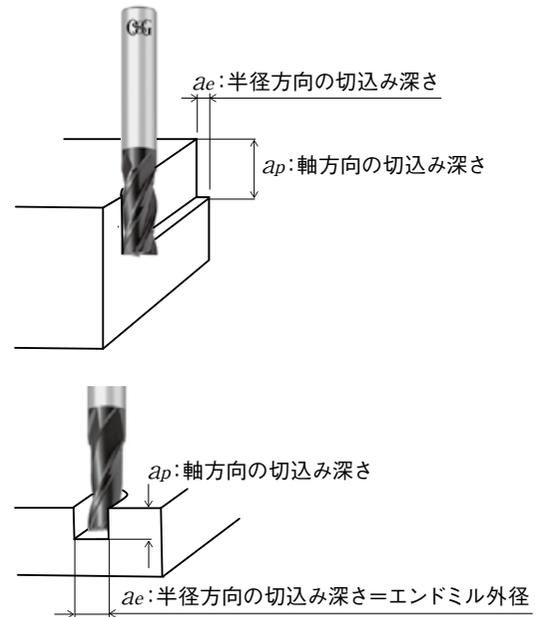


図 4.3.1 切込み深さ

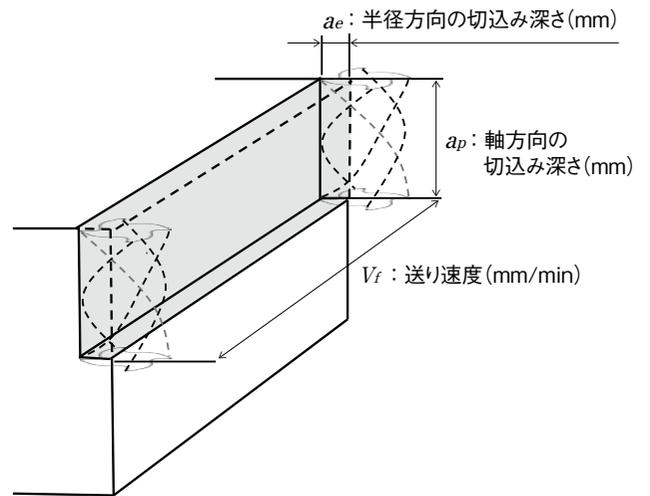


図 4.3.2 切りくず排出量

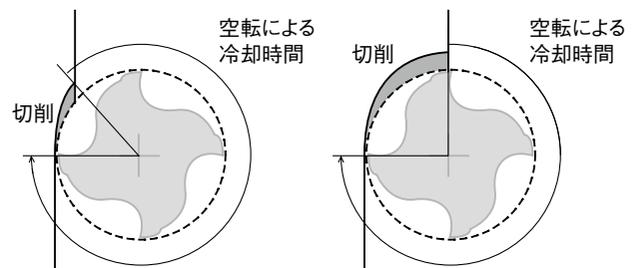


図 4.3.3 切込み深さと空転時間



また切込み深さを大きくすることによる切削抵抗の増加や切削熱の発散減少は、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なります。

これに対し、(側面切削において)軸方向の切込み深さを大きくする場合は、図4.3.3のような空転時間の減少や切取り厚さの増加は発生しません。

この点では半径方向切込み深さを大きくするより有利となりますが、切削を同時に行う切れ刃が複数となり、切削に関与する切れ刃長さも図4.3.4のように増加します。この分だけ切削抵抗も大きくなります。さらに切削位置の変化が曲げモーメントを変動させるため、加工面のうねりの発生を助長します。

(3) 切込深さと加工精度

半径方向の切込み深さを増加させると図4.3.5のように切削抵抗は顕著に増加します。こ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。

軸方向の切込み深さの増加においても、同時に切削を行う切れ刃長さが増加する場合は、切削抵抗が上昇し、加工精度は悪くなります。

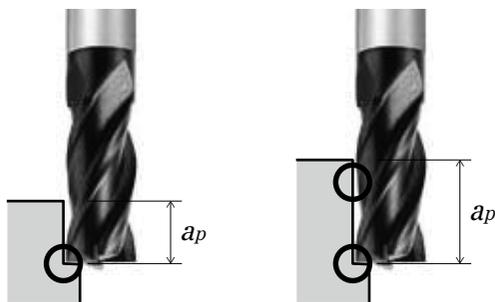
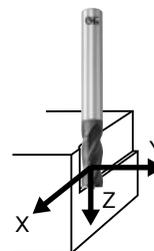
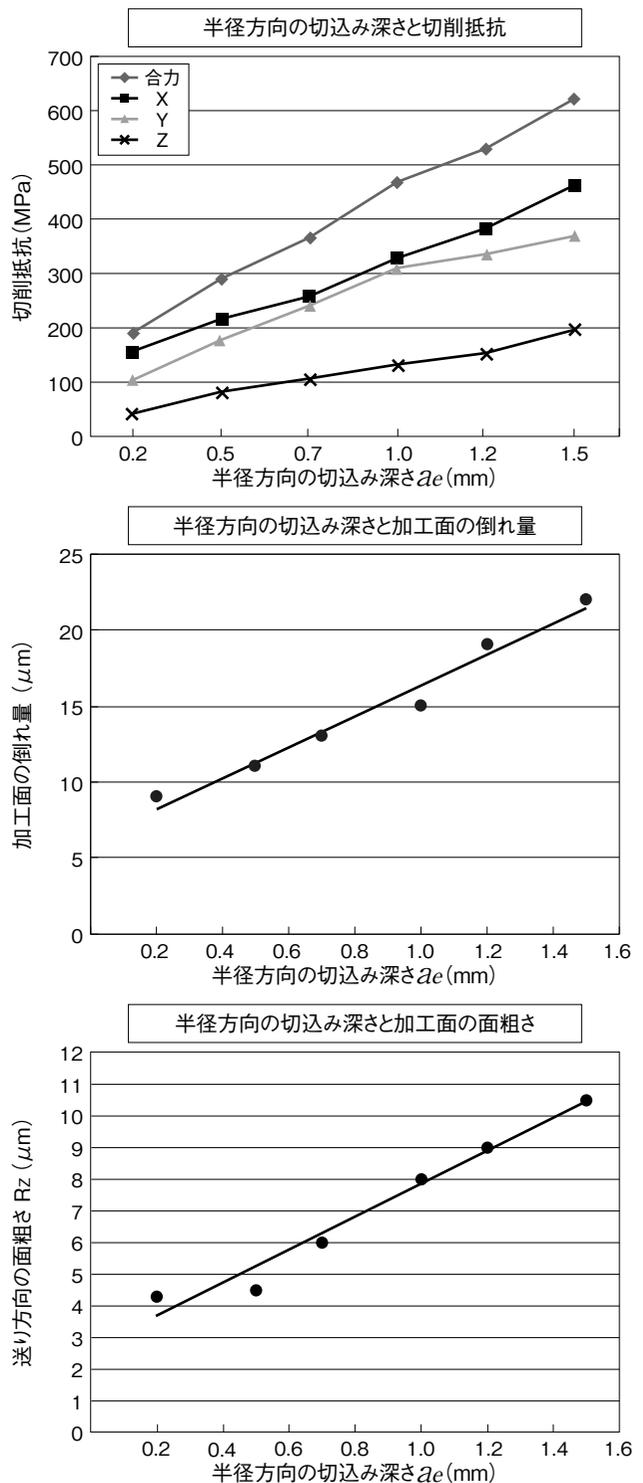


図 4.3.4 軸方向の切込み深さと同時接触切れ刃長さ



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
 切込み深さ: $a_p=10\text{mm}$ $a_e=0.2\sim 1.5\text{mm}$
 切削方向: ダウンカット
 切削油剤: 乾式
 機 械: 立形マシニングセンタ

図 4.3.5 半径方向の切込み深さと切削抵抗、加工精度



4.4 主要切削3条件決定における注意

切削の主要3条件は、各々が単独で決まるのではなく、相互につながりがあることを理解して、決定することが大切です。

表4.2に各切削条件の基本的な相互関係をまとめます。

表 4.2 切削条件の相互関係

切削条件UPの項目	各切削条件をUPした時の熱的現象		各切削条件をUPした時の切削抵抗、振動		各切削条件をUPした時の基本的な対応			
	切削熱の発生	工具温度の上昇	切削抵抗	振動	切削速度	送り量	軸方向の切込み深さ	半径方向の切込み深さ
切削速度UP	大きく増加	ほぼ無し	やや増加	発生領域増加				
送り量UP	増加	やや増加	増加	発生領域増加				
軸方向の切込み深さUP	増加	増加	増加	発生領域増加				
半径方向の切込み深さUP	増加	大きく増加	大きく増加	発生領域増大				

△：適応可能な領域が狭くなる
 ↓：減ずる必要がある
 ↓↓：大きく減ずる必要がある



4.5 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する直角方向のずらし量(図4.5.1)を「ピックフィード」と言います。

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のことを「カスパイト(カスパ高さ)」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、このカスパイトで決まります(図4.5.2)。

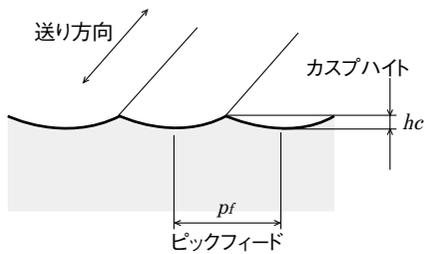


図 4.5.1 ピックフィードとカスパイト

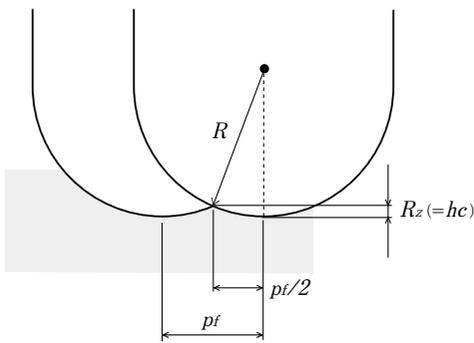


図 4.5.2 ボールエンドミル加工での理論面粗さ

$$hc = R - \sqrt{R^2 - \left(\frac{Pf}{2}\right)^2} \dots \dots \dots (4.8)$$

hc : カスパイト
R : ボール半径
Pf : ピックフィード

この式を展開すると

$$\begin{aligned} (R - hc)^2 &= R^2 - \frac{Pf^2}{4} \\ R^2 - 2R \cdot hc + hc^2 &= R^2 - \frac{Pf^2}{4} \\ hc(2R - hc) &= \frac{Pf^2}{4} \dots \dots \dots (4.9) \end{aligned}$$

この時

$$\begin{aligned} hc \ll 2R \text{ のため、} \\ 2R - hc \approx 2R \dots \dots \dots (4.10) \end{aligned}$$

とすると、

(4.9) 式より近似的な理論粗さRzは

$$Rz = hc = \frac{Pf^2}{8R} \dots \dots \dots (4.11)$$

で表すことができます。

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が0ではないため、これらの振れを累積した工具軌跡として1回転当たりの送り量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ると、仕上げ面粗さの改善のため、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。



4.6 切削の向き（アップカットとダウンカット）

(1) 切削の向きと工具寿命

図4.6.1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。

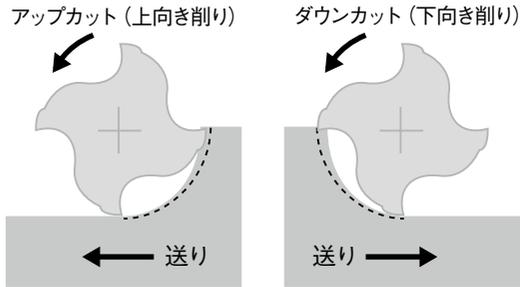


図4.6.1 アップカット(上向き削り)とダウンカット(下向き削り)

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、ダウンカットが決まります。

アップカットでは加工物への刃先の切込み（切り取り厚さ）がゼロから始まり次第に大きくなります。

したがって切削開始時の衝撃は少なくなるのですが、切れ刃が上滑り現象を起こしやすくなり、機械的こすり摩耗の進行が早くなります。

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。切削開始時に、適度な切り取り厚さを確保できるので、上滑り現象が起きにくくなるのと同時に、切り終わりに切りくず厚さがゼロとなるため、切りくず離れが良くなります。

エンドミル切削における切れ刃の軌跡は、トロコイド曲線となりますが、図4.6.2に、その概念図を示します。

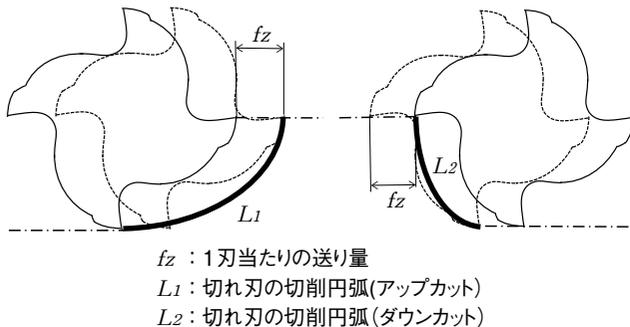


図 4.6.2 切れ刃軌跡の概念

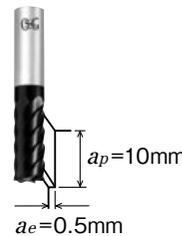
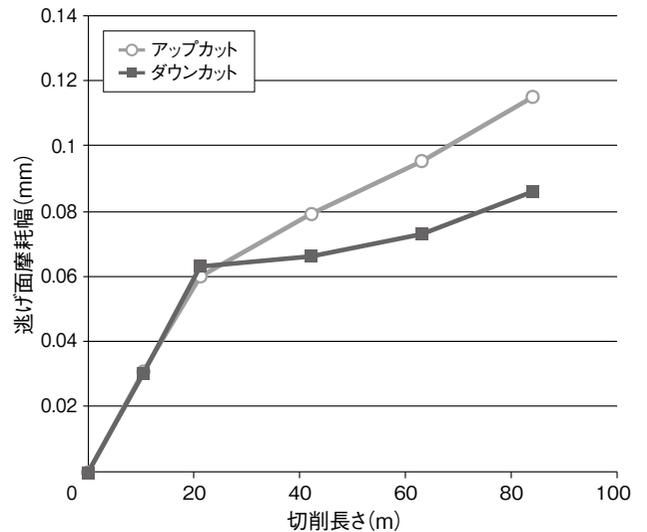
アップカットでは回転に送り量が加わった円弧 L_1 となります。一方ダウンカットでは、送り量を差し引いた円弧 L_2 となります。

円弧の長さ L_1 、ならびに L_2 を比較すると、 L_2 の方が小さいことがわかります。

実際には1刃の送り量は非常に小さいので、この差はわずかになりますが、毎分、エンドミルは数千～数万回転もするわけですから、切削距離が長くなれば、この差の累積は大きくなります。この累積差だけダウンカットの方が加工物との接触時間は短くなります。

以上のような効果により、アップカットに比べダウンカットの方が刃先摩耗の進行が穏やかとなり、工具寿命が長くなります。

図4.6.3にアップカットとダウンカットで、実際に工具摩耗の進行状況を比較測定した結果を示します。摩耗の進行は、ダウンカットの方が穏やかであ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
 $\phi 10$ 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)
 切込み深さ： $a_p=10\text{mm}$ $a_e=0.5\text{mm}$
 切削油剤：水溶性切削油剤
 機械：立形マシニングセンタ(BT40)

図 4.6.3 切削方向と工具寿命



ただし例外として、表面に黒皮があるような場合は、アップカットにて、安定した内部より切削を開始したほうが、刃先のチップングを防止でき、工具寿命が長くなることがあります。あるいは、機械剛性が不足している場合もアップカットをすることで、刃先チップングを防止できることがあります。

(2) 切削の向きと加工精度

図4.6.4はアップカットとダウンカットのそれぞれで、半径方向の切込み深さを変えた時の加工面の形状精度の測定結果です。

ダウンカットでは、すべての切込み深さにおいてアンダーカット（切込み予定位置に対して逃げ勝手）となっています。

一方アップカットでは切込み深さが小さい領域でアンダーカットとなるものの、切込み深さがある値(0.11～0.12 DC)を超えるとオーバーカット（切込み予定位置に対して食い込み勝手）となります。

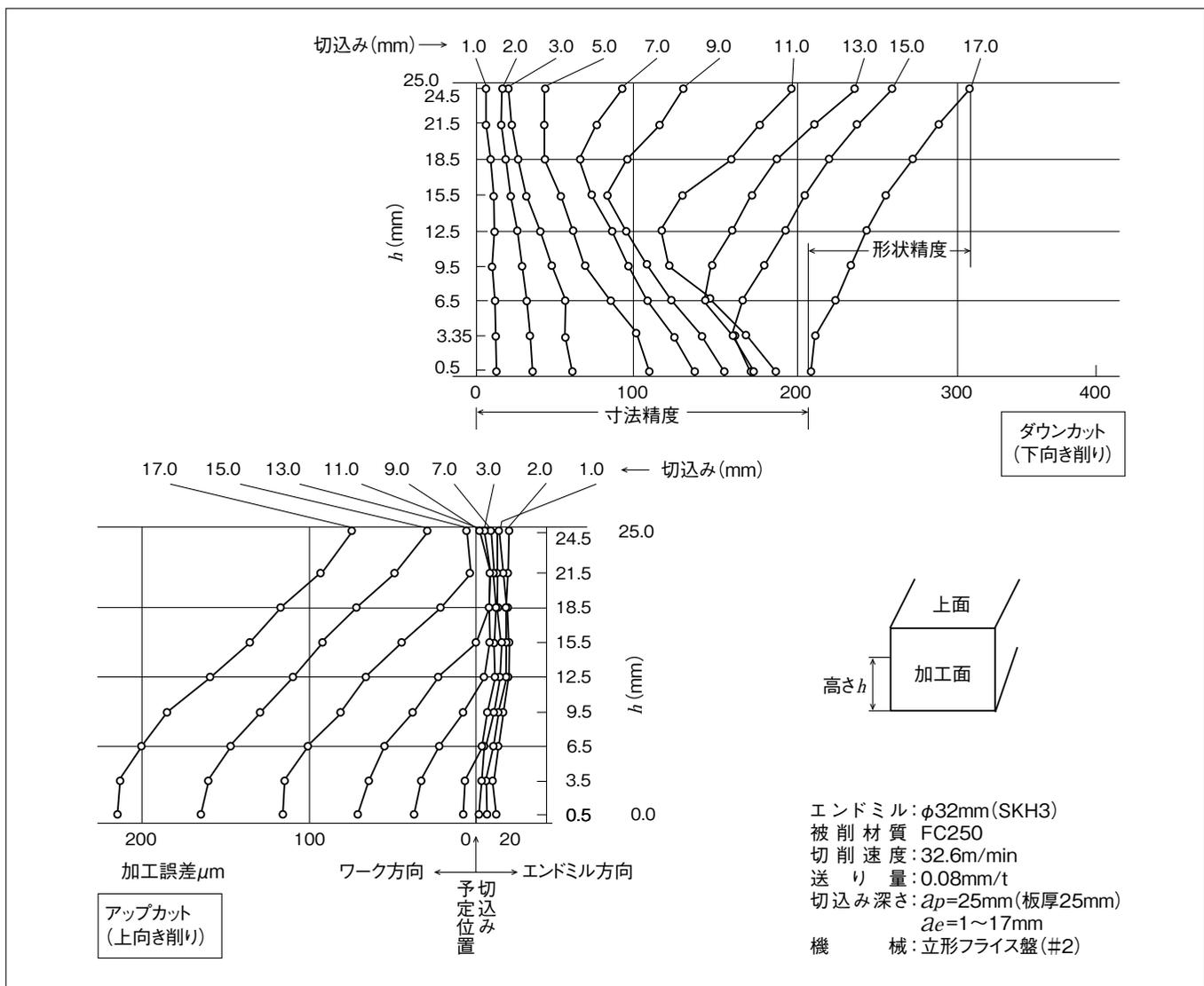


図 4.6.4 切削方向と形状精度 (精密機械 41 巻 3 号 1975 年 3 月 エンドミルによる輪郭加工精度 藤井義也 岩部洋育より)



表4.3にはアップカットとダウンカットの一般的な特徴の比較を示します。

表 4.3 アップカットとダウンカットの比較

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	$R_z = \frac{f_z^2}{8 \left(\frac{DC}{2} + \frac{f_z \cdot z}{\pi} \right)}$	$R_z = \frac{f_z^2}{8 \left(\frac{DC}{2} - \frac{f_z \cdot z}{\pi} \right)}$
	f_z : 1 刃当たりの送り量 DC : 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 ●半径方向（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 ●半径方向（主分力）：アップカットに比べ大きい
工具寿命	<ul style="list-style-type: none"> ●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滑るため、逃げ面摩耗の進行が早くなる 	<ul style="list-style-type: none"> ●滑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	<ul style="list-style-type: none"> ●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 4.6.4 による	
加工表面への影響	<ul style="list-style-type: none"> ●加工硬化性の材料では、硬化層を生じさせる ●切れ刃の抜け際で、切りくず厚さが厚くなるため、加工面の端部にばりやこぼ欠けを生じやすい 	<ul style="list-style-type: none"> ●加工硬化性の材料での硬化が少ない

(3) アップカットとダウンカットが混在する加工

ここまでアップカットとダウンカットの違いについて説明してきましたが、図4.6.5のような溝切削では、アップカットとダウンカットが同時に行われることとなります。

アップカットから切削が始まり、加工溝の中心からは、ダウンカットに変わることになります。

また溝切削でなくても、半径方向の切込みがエンドミル半径を越える場合（図4.6.6）や、切削する領域が工具中心の両側にまたがる場合（図4.6.7）も、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。

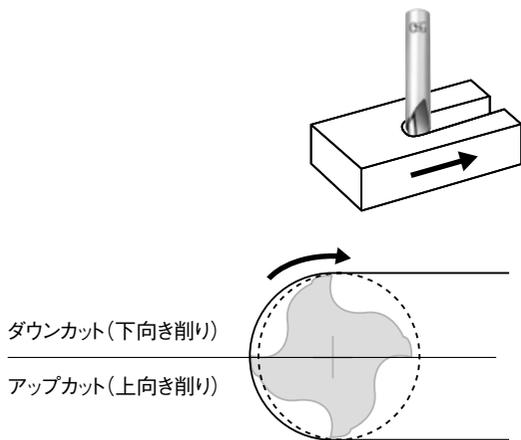


図 4.6.5 溝切削時の切削方向 (アップカットとダウンカット)

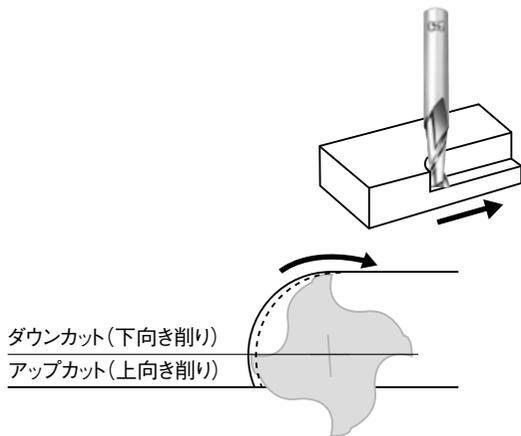


図 4.6.6 アップカットとダウンカットの混在 (径方向切込み>工具半径)

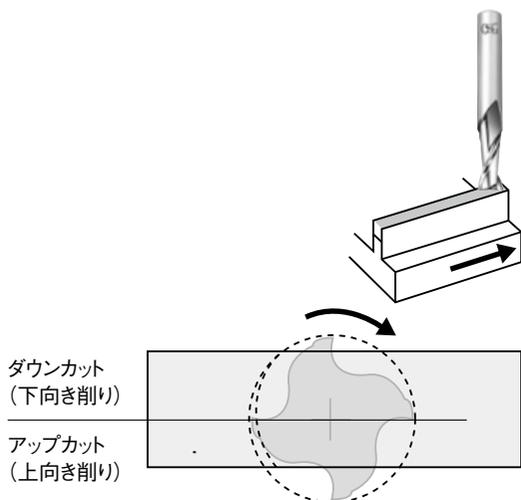


図 4.6.7 アップカット側とダウンカット側にまたがる切削

図4.6.8のような正面切削において、エンドミルの中心と、切れ刃の食いつき点を結んだ線と、送り方向との成す角を「エンゲージ角(食付き角)」と呼びます。

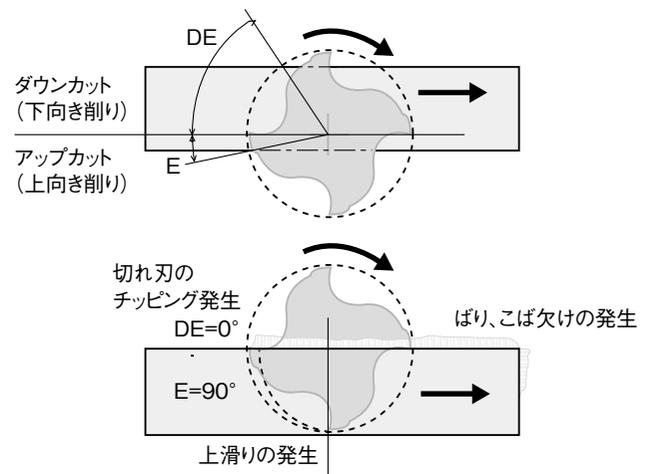
これに対してエンドミル中心と切れ刃の出口点を結んだ線が、送り方向と成す角を「ディスエンゲージ角(出口角)」と言います。

エンゲージ角領域ではアップカットとなり、ディスエンゲージ角領域ではダウンカットとなります。

したがってエンゲージ角が大きくなると、食付き時の上滑り現象が生じやすくなります。

ディスエンゲージ角が小さいと、主切削がアップカットで行われるようになり、切れ刃出口での切りくず厚さが厚くなり、加工物のこぼ欠けやばりを発生しやすくなります。

ディスエンゲージ角が 0° では、切りくず厚さが最大となる時に切削が終わるため、切れ刃のチッピングを生じやすくなります。



E : エンゲージ角(食付き角)
DE : ディスエンゲージ角(出口角)

	小	大
エンゲージ角 E	—	・上滑り現象発生 ・こすり摩耗大
ディスエンゲージ角 DE	・切れ刃のチッピング発生 (0°) ・延性材では、ばりを、脆性材では、こぼ欠けを発生(負)	—

図 4.6.8 エンゲージ角とディスエンゲージ角



4.7 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。

また極圧添加剤の作用も相まって、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得られます。

さらに切りくずの表面は新生面で、酸化物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。切りくずにこすら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、常に凝着を起こしやすい状態に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。

また冷却効果は加工物の熱膨張を減らして、寸法精度の低下を防止し、エンドミルの刃先温度を下げることで刃先の軟化を防ぎ、工具寿命の延長をもたらします。

しかし冷却効果の大きな切削油剤を使用する場合は、エンドミル刃先が発熱と急冷却を繰り返すこととなります。

これによって大きな熱ひずみを生じ、サーマルクラック（熱亀裂）を発生させることがあります。あるいは、刃先温度を下げるために構成刃先を発生させ、かえって工具寿命を短くしたり、加工面粗さを悪化させてしまったりすることもあるので注意が必要です。

こうした問題解決のために、潤滑効果は大きいものの冷却効果は小さいMQL（オイルミスト）や、過冷却の状態を作らないエアブローによる切りくず排出などの方法もあります。

切りくずの強制排出を効果的に行うためには、切削油剤の量、圧力が十分であることが必要ですが、切削油剤をかける向き、および供給の方法も重要になります。

切削熱により高温となった切りくずを素早く加工物から取り除き、機械の外部に排出することが、大切です。

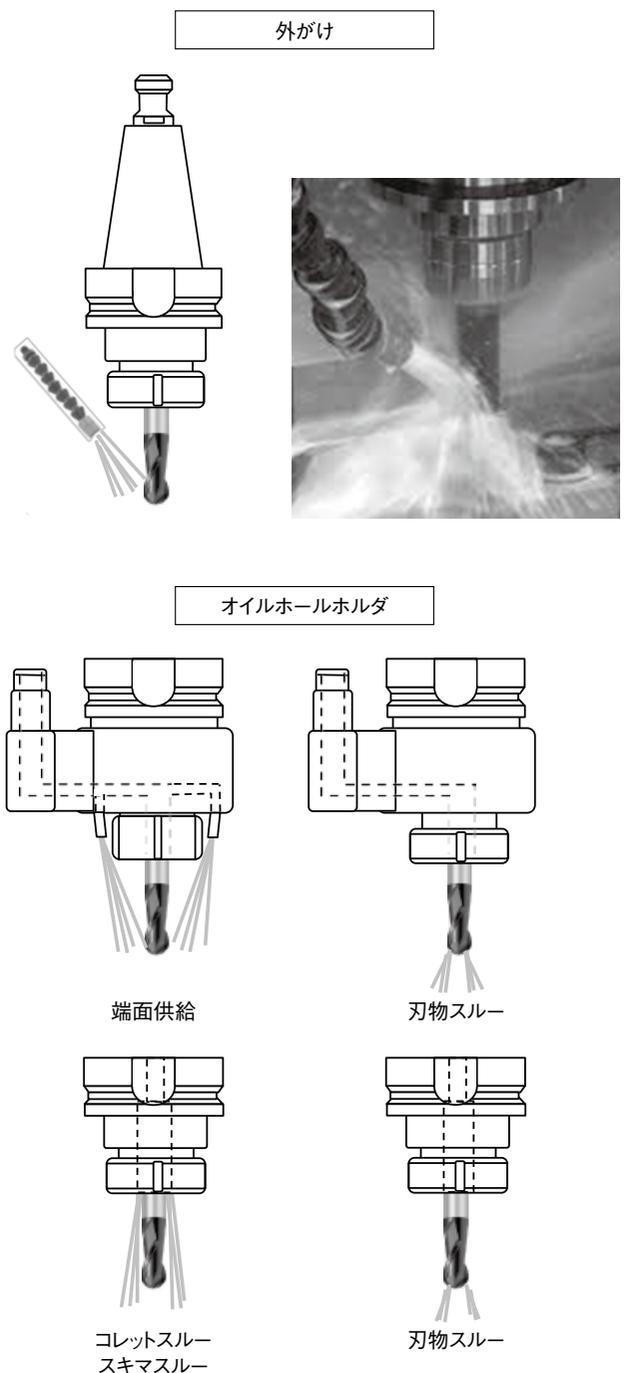


図 4.7.1 切削油剤の代表的な供給方法



5. エンドミルの各部要素と切削特性

5.1 ねじれ刃の基本特性

(1) ねじれの向きと特性

右刃右ねじれや、左刃左ねじれのエンドミルの場合、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になります(図5.1.1)。この時、切削抵抗(軸方向分力)は、ねじの原理により、エンドミルを加工物の方向に、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。この時、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5.1.2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(負の角度)となるため、切りくず厚さは厚くなり、折り曲げるように不連続に生成されるので、良好な切削ができません。

しかし底刃を使用しない加工の場合は、エンドミル

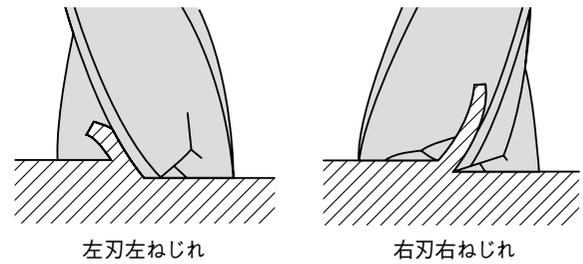


図 5.1.2 ねじれの向きと切削

に抜け勝手の力が働かないとか、ばりが、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組み合わせのエンドミルを使用することがあります。

(2) ねじれ刃での切削抵抗

図5.1.3に、溝がねじれていない直刃エンドミルと、ねじれ溝のエンドミル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。

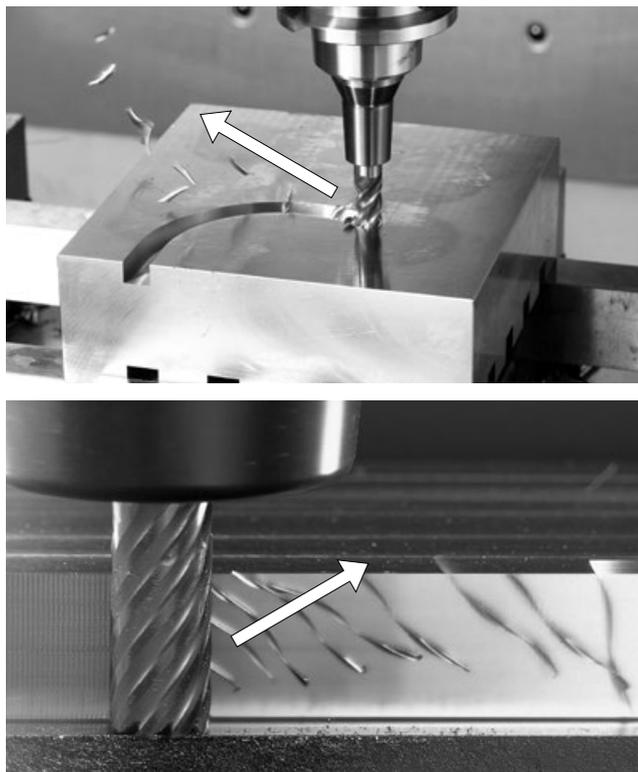


図 5.1.1 ねじの原理による切りくず排出方向

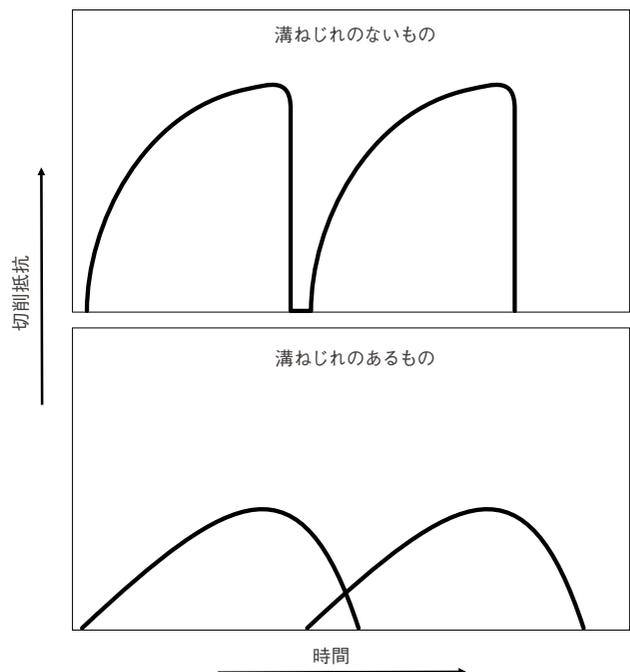


図 5.1.3 切削抵抗の変動



また図5.1.4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。

(3) ねじれ刃による傾斜切削作用

ねじれ刃のエンドミル切削のように、切れ刃が送り方向に垂直ではなく、傾いた状態となる切削方法を「傾斜切削」と言います。傾斜切削では、刃先の角度（垂直すくい角）に対して、有効なすくい角（外周すくい角）が、図5.1.5のように大きく作用します。

$$\tan \gamma = \frac{\tan \gamma_0}{\cos \lambda} \dots\dots\dots (5.1)$$

- γ : 外周すくい角
- γ_0 : 垂直すくい角
- λ : ねじれ角

また同一量の切削を長い切れ刃で行うこととなるため、負荷の分散が図られます。

エンドミルのねじれ刃では、この傾斜切削が常に行われることとなります。

(4) ねじれ刃での問題点

ねじれ角が大きくなるにしたがって、軸方向分力は増加するので、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（加工物の振動）を誘発する原因となったりします（図5.1.6）。

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、ねじれ角が大きいくほど、コーナ部分の欠損を招きやすくなります（図5.1.7）。

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。

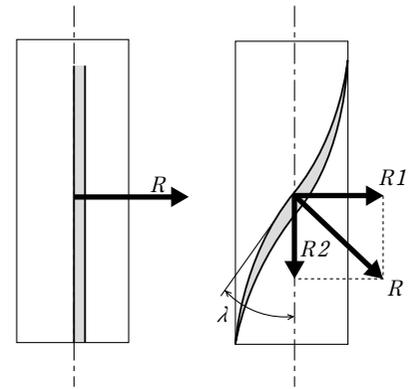


図 5.1.4 切削抵抗の分力

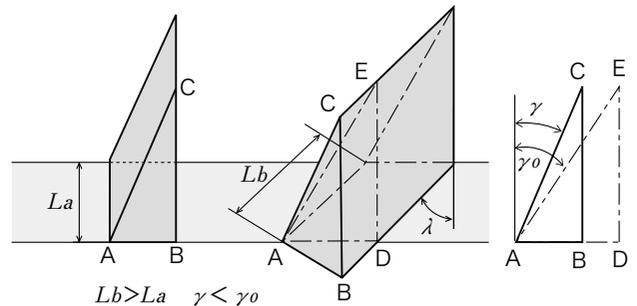


図 5.1.5 傾斜切削の効果

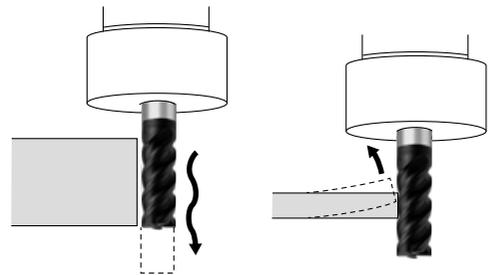


図 5.1.6 強ねじれ刃での問題

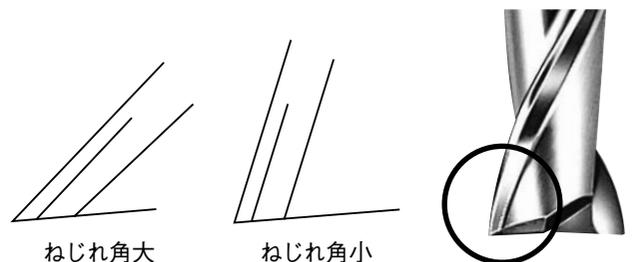


図 5.1.7 ねじれ角とコーナ形状



5.2 ねじれ角と加工精度

図5.2.1にねじれ角の異なるエンドミルで、溝加工を行なったときの、変位量（たおれ量）を比較した試験結果を示します。

ねじれ刃のエンドミルで溝切削を行う場合、切削開始時は、アップカット側で右刃右ねじれエンドミルの鋭利なコーナ部分が加工物に食込み勝手に働き、エンドミルをたわませます。

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いきます。切削位置がシャンク側に移るに従い、曲げモーメントが減少し、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角と加工溝の深さの関係が、図5.2.2のようになった時に最も顕著に表れます。

この時、

$$\frac{\pi \cdot DC}{4hs} = \tan \lambda \dots \dots \dots (5.2)$$

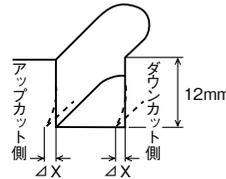
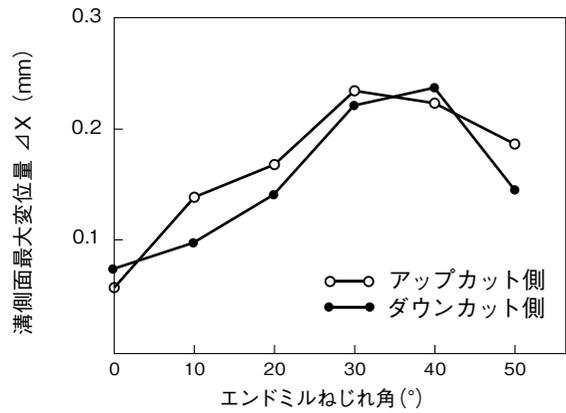
- π : 円周率
- DC : エンドミル外径
- hs : 加工溝の深さ
- λ : エンドミルのねじれ角

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（aからb）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ので、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態にあります。

この(5.2)式が成り立つ状態より、ねじれ角が小さければ、たわみ量は減少し、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、相殺されることで、たわみが多少緩和される傾向にあります。

次に図5.2.3に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
 切込み深さ： $a_p=12\text{mm}$
 切削油剤：不水溶性切削油剤

図 5.2.1 ねじれ角と溝加工における倒れ量
 (一般財団法人機械振興協会 技術研究所加工技術データファイルより)

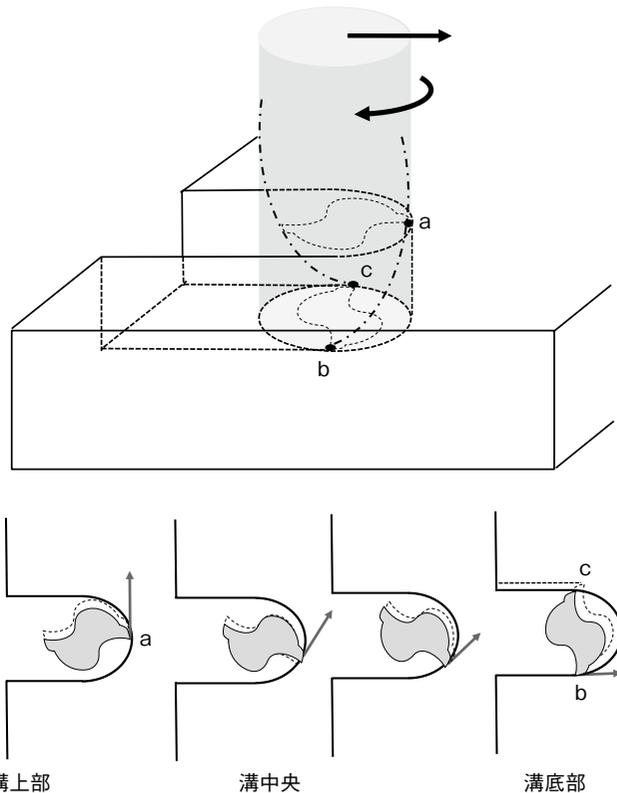


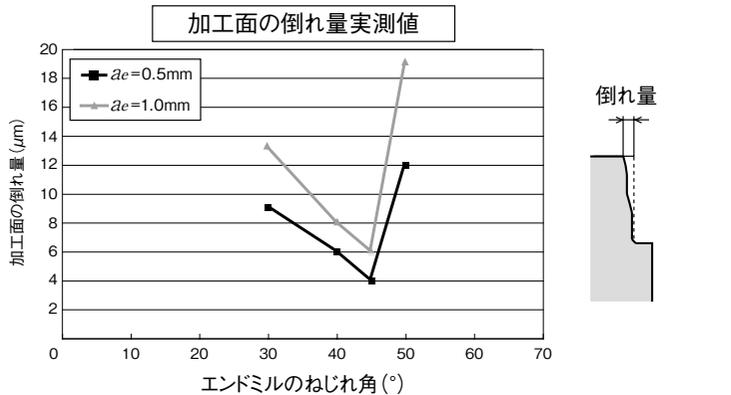
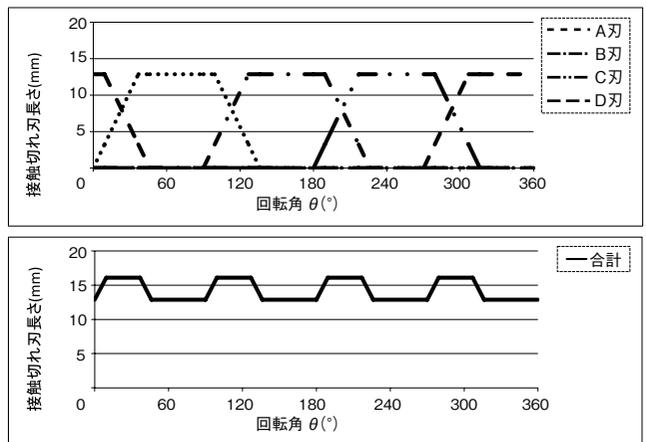
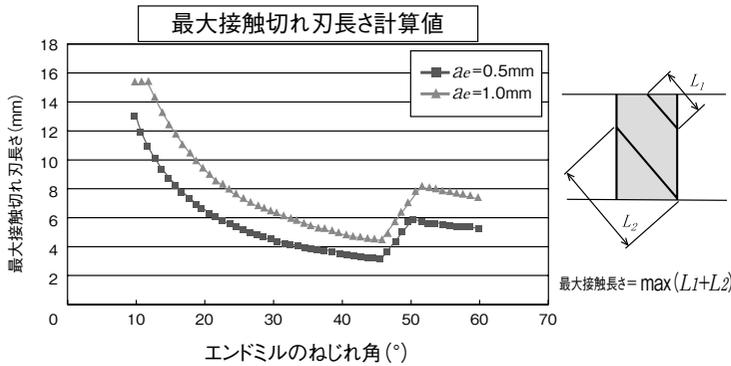
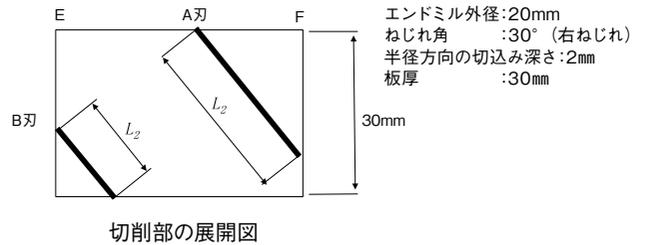
図 5.2.2 溝の倒れ



ここで最大接触切れ刃長さとは、エンドミルのねじれ刃が、同時に加工物に接触する切れ刃長さの最大値 (L_1+L_2) を示します。

加工物に接触している切れ刃の長さは、時間の経過とともに図5.2.4のように変化をします。この時の、合計接触切れ刃長さの最大値のことです。

ねじれ角の変化により、最大接触切れ刃長さも変わります。図5.2.3では最大接触切れ刃長さの計算値 (L_1+L_2 の最大値) と、実際の試験による加工面の倒れ量の値の対比を示します。強い相関があることが、わかります。



エンドミル: コーティング超硬エンドミル
 φ10 2枚刃
 被削材質: S50C
 切削速度: 80m/min
 送り量: 0.1mm/t
 切込み深さ: $a_p=15\text{mm}$ $a_e=0.5, 1\text{mm}$
 切削方向: ダウンカット
 切削油剤: エアブロー
 機 械: 立形マシニングセンタ

図 5.2.3 ねじれ角と加工精度

接触切れ刃長さの変化は、切削抵抗の変動を生み、加工面のうねりや倒れの発生要因となります。

この切れ刃長さの最大値が大きければ、切削抵抗も大きくなります。また、この変化量が大きければ、切削抵抗の変動幅が大きくなります。

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。表5.1にねじれ角選定の目安を示します。



表 5.1 ねじれ角選定の目安 (標準ねじれを基準とする)

ねじれ角 (市販されている 一般的なねじれ角)	切削抵抗			加工能率			加工面精度		
	切削トルク	曲げ抵抗	軸方向 分力	送り量	切込み 深さ	切りくずの 排出性	粗さ	うねり	加工面の 倒れ
弱ねじれ (15°ねじれ)	△	△	◎	△	△	△	△	◎	◎ 溝切削時
標準ねじれ (30°ねじれ)	○	○	○	○	○	○	○	○	○
強ねじれ (45°ねじれ)	○	○	△	◎	○	◎	○	切込み深さに よって異なります	
強ねじれ (50°ねじれ)	○	○	×	◎	◎	◎	○		

◎ 最良 ○ 良 △ 可 × 劣

5.3 特殊なねじれ刃の効果

(1) 左右両ねじれ刃を持つエンドミル

図5.3.1には右ねじれ刃と左ねじれ刃の、両方を持つエンドミルの例を示します。これは、先述したねじれ刃の特性を上手く利用して、要求される加工品位を得ようとするものです。

ばりが両表面に発生することを防止し、表層に異材質が積層してあるような場合では、表層面の剥離を防止する効果があります。

図5.3.2は炭素繊維樹脂やこの積層材などの、トリミングに使用されるエンドミルで、表層のファイバーの剥離や毛羽立ちを防止するために使用される特殊なエンドミル(通常はルータと呼ばれます)です。右ねじれの主切れ刃に、左ねじれの副切れ刃が、刻まれたような形になっています。

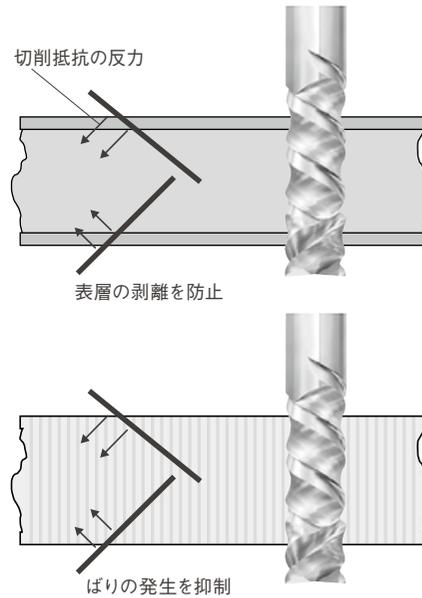


図 5.3.1 右ねじれ刃と左ねじれ刃を持つエンドミル

(2) 不等ねじれエンドミル

図5.3.3は隣り合う溝のねじれ角が異なる不等ねじれ刃エンドミル(不等リードエンドミル)の例です。不等ねじれ刃エンドミルには、切削時の自励振動を抑制する効果があります。

エンドミル切削における自励振動(再生びり振動)については先述しましたが、この時、図5.3.3のようなエンドミルで切削を行うと、図5.3.4に示すように、同一の一枚の刃であっても切削位置によって振動再生の位相がずれることになります。

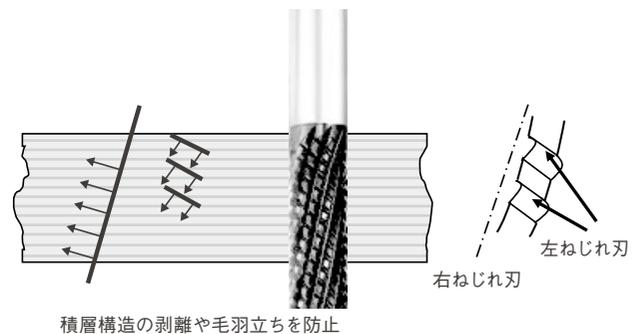


図 5.3.2 副切れ刃を持つ特殊ねじれエンドミル

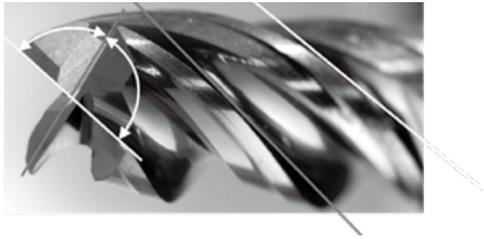


図 5.3.3 不等ねじれエンドミル

等ねじれエンドミルでは切削を行っている切れ刃全域で、同じびり振動が再生されますが、不等ねじれ刃エンドミルでは、前の切れ刃のびり面に対して、次の刃が、振動の位相差を変化させながら切削することとなります。

不等分割刃も同様に再生びりの位相の周期を崩しますが、このように同一切れ刃間での位相のずれは生じません。

同時に切削している刃長間で、振動の位相がずれることは、ちょうど初心者が、バイオリンや管楽器を演奏しようとした時に、共鳴が得られず貧弱な音しか出せない状況によく似ていると思います。

あるいは振動しているギターの弦のなか所をそっと押さえるだけで、音が止まる（カッティング奏法）現象

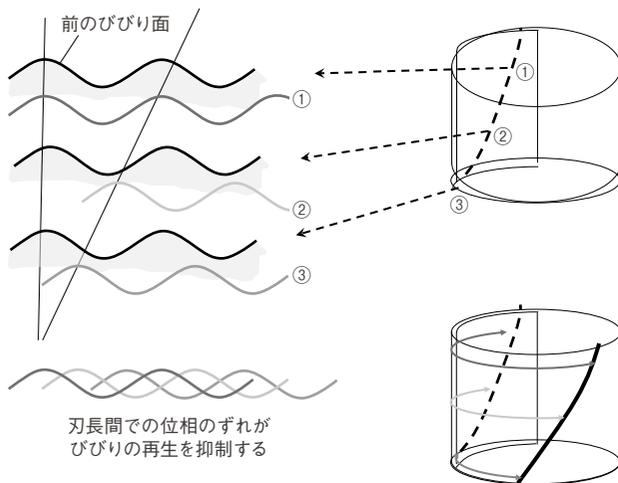
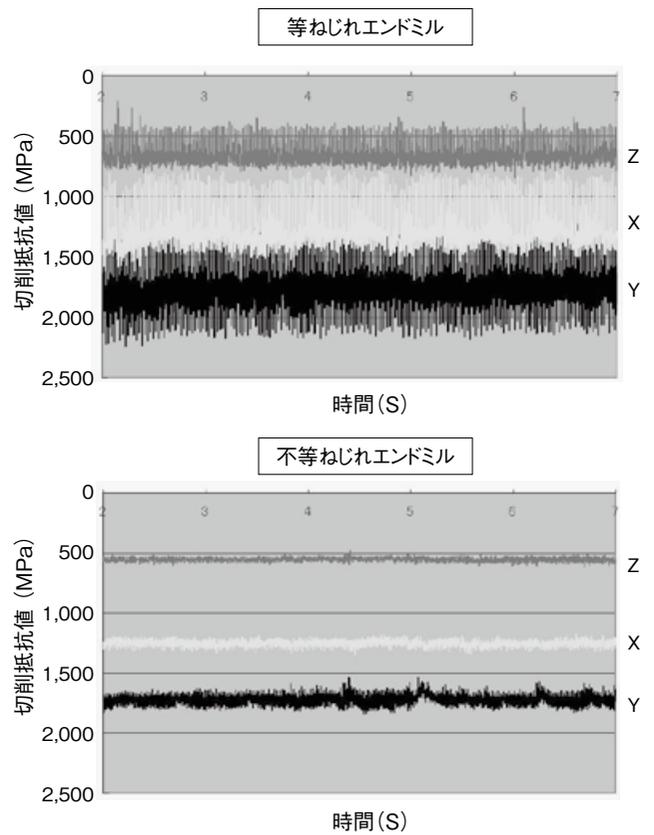


図 5.3.4 不等ねじれの効果

と同じだと考えればよいと思います。

図 5.3.5には不等ねじれ刃エンドミルでの実際の防振事例を示します。ねじれ角の違いがあり、これによる垂直すくい角の変化も伴うので、切削抵抗の値自体は単純比較はできませんが、不等ねじれ刃では、切削抵抗の振幅が小さく、自励振動が抑制されていることが明らかです。



エンドミル：コーティング超硬エンドミル φ10 4枚刃
(等ねじれエンドミル、不等ねじれエンドミル)

被削材質：SUS304

切削速度：70m/min(2,228min⁻¹)

送り量：0.05mm/t(446mm/min)

切込み深さ： $a_p=10\text{mm}$ (溝切削)

切削油剤：エマルジョンタイプ水溶性切削油剤

機械：立形マシンングセンタ(BT40)

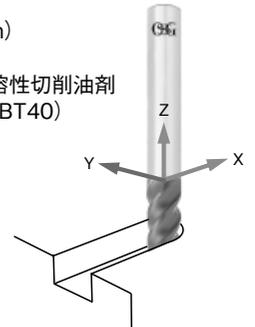


図 5.3.5 不等ねじれエンドミル加工事例



このように不等ねじれ刃は、自励振動を抑制する防振効果がありますが、ねじれの違いにより、切りくず形状が変化し、1刃当たりの送り量も一定ではなくなるというデメリットもあります(図5.3.6)。したがって、加工面の直角度などの加工精度が、非常に厳しい場合は、使用が難しくなります。

また刃長が長くなると、ねじれの差を小さくせざるを得ません。これは、図5.3.7のような方法での対応が可能ですが、こうした問題を解決する特殊切れ刃のエンドミルもあります(図5.3.8)。

このエンドミルでは、不等分割刃、不等ねじれ刃による防振効果が得られるとともに、通常の切れ刃のエンドミルよりも、長い切れ刃で同一幅の切削を行うことになるので、負荷を分散することができます。また切削力の向き(切削抵抗の向き)の変化によって延性材でのぼりの発生を、抑制することができます(図5.3.9)。

ただし同時に切削する切れ刃長さは長くなるため、うねりや倒れの発生を助長する問題もあります。

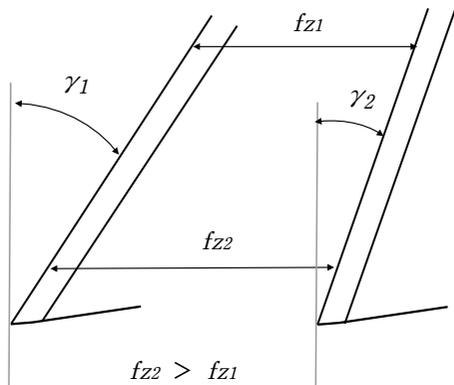


図 5.3.6 不等ねじれ刃と1刃当たりの送り量

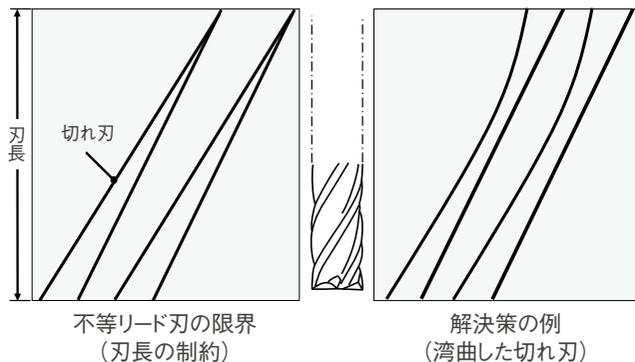


図 5.3.7 不等ねじれ刃の刃長限界と解決策例

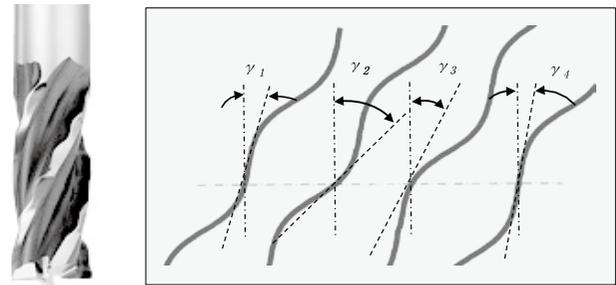


図 5.3.8 正弦波に準じた波状ねじれ刃を持つエンドミル

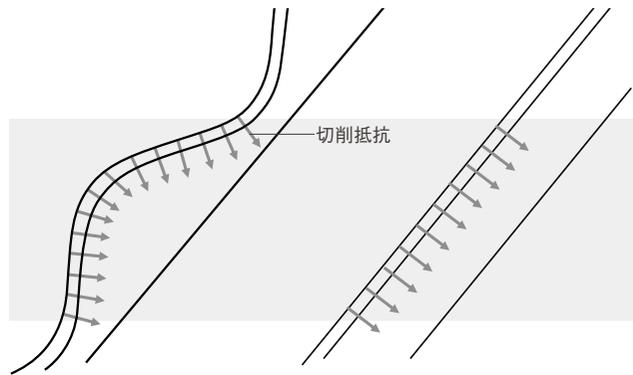


図 5.3.9 波状ねじれ刃の特性

5.4 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5.4.1のように加工面に同時に接触する切れ刃数が増加することになります。この時、同時に加工物に接触している切れ刃長さの最大値は、先述したように変動します。

図5.4.2には刃数とねじれ角が変化した時の最大接触切れ刃長さを示します。最大接触切れ刃長さの増加は切削抵抗の増加につながります。

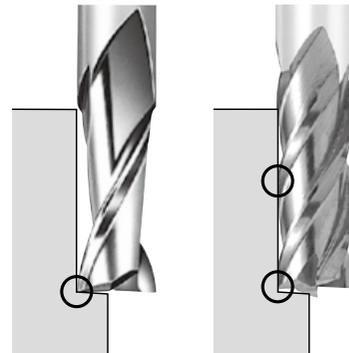


図 5.4.1 刃数の増加による切れ刃接触点の増加

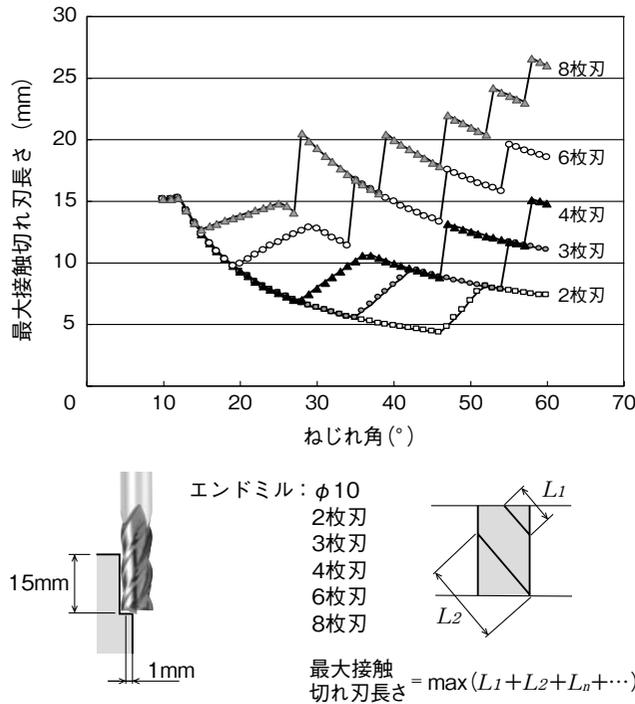


図 5.4.2 刃数とねじれ角と最大接触切れ刃長さ

また図5.4.3には溝切削における刃数の違いによる影響を示します。エンドミルが切削抵抗によって、最も大きいたわみを生じた時に、4枚刃エンドミルのように、切れ刃が加工面として最終的に残る部分を切削していると、加工面の倒れ現象を招くことになります(表5.2)。

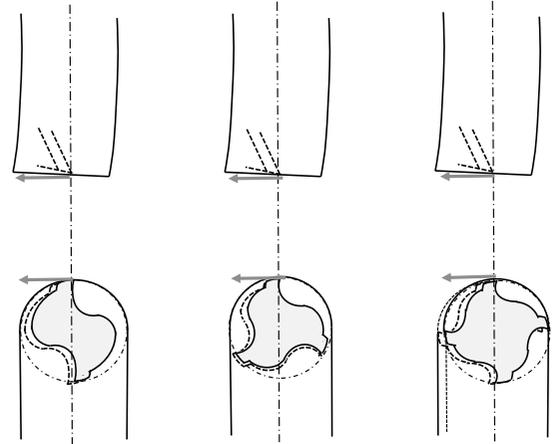


図 5.4.3 溝切削での4枚刃の問題

表 5.2 エンドミル刃数選定の目安

選定条件		刃数			
		2枚刃	3枚刃	4枚刃	6枚刃
エンドミルの強さ	ねじり剛性	△	○	○	◎
	曲げ剛性	△	○	○	◎
	折損強度	△	○	○	◎
加工面精度	粗さ	○	○	◎	◎
	うねり	○	○	◎	◎
	加工面の倒れ	○	○	◎	◎
寿命	摩耗寿命 (1刃当たりの送り量一定)	○	○	◎	◎
	折損寿命 (加工能率一定)	○	○	◎	◎
切りくず処理	切りくずのつまり (収容能力)	◎	◎	△	△
	切りくずの排出性	◎	◎	△	△
容易性	研削の容易性	◎	△	○	△
	研削精度 (切れ刃ごとのばらつき)	◎	△	○	△
選定条件		刃数			
		2枚刃	3枚刃	4枚刃	6枚刃
溝切削	切りくず排出	◎	◎	△	△
	溝幅拡大	◎	◎	△	△
	溝の倒れ(傾き)	◎	◎	△	△
側面切削	加工面精度	△	△	○	◎
	びびり振動	◎	◎	○	○
穴あけ	切りくず排出	◎	◎	△	△
	穴の拡大	○	◎	△	△
	びびり振動	○	◎	△	△
被削材質	非鉄軽合金	◎	◎	○	△
	鋳鉄	○	○	◎	◎
	合金鋼	○	○	◎	◎
	高硬度材	○	○	◎	◎

◎ 最良 ○ 良 △ 可



5.5 外周刃形状と切削特性

エンドミルの中には、図5.5.1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、緻密となり、チップポケットへの収容性が改善されます。被削材への食い付きもよくなり、刃先のこすり現象が少なくなります（図5.5.2）。

さらに図5.5.3でわかるように、同時切削切れ刃長さは短くなり、波状外周刃とすくい角の相関によって、図5.5.4のように、不等ねじれの作用も生ずるため、自励振動を抑制します。

また波状外周刃は切れ刃部の表面積を大きくするため、切削熱の放散効率が高まるとともに、その谷部が切削油剤の浸透性を助け、切削時の冷却、潤滑の作用を促進します。

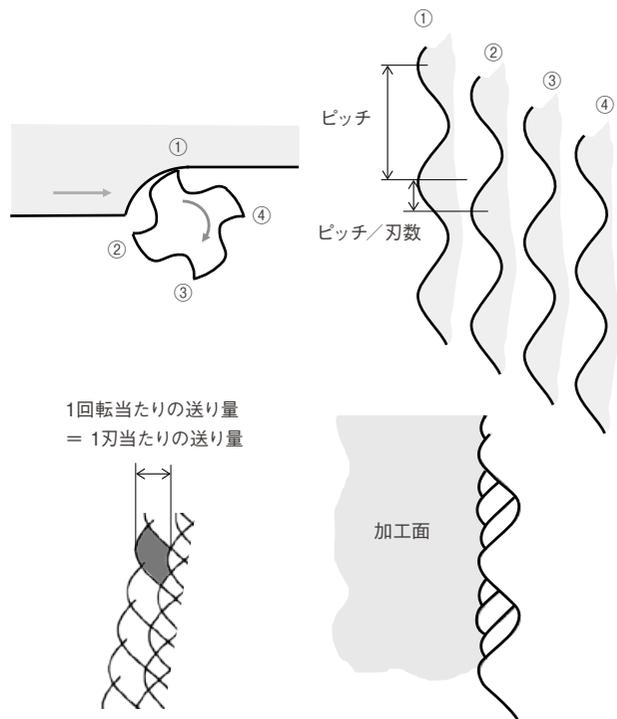


図 5.5.3 ラフィングエンドミルの切削機構



図 5.5.1 ラフィングエンドミル



図 5.5.2 ラフィングエンドミルの切りくず

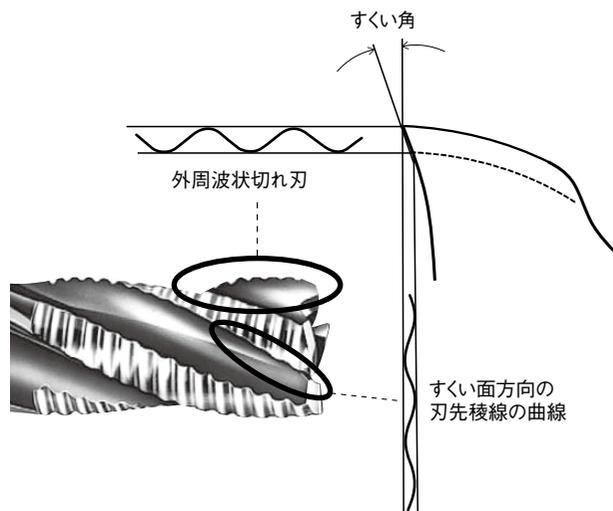


図 5.5.4 波状切れ刃の不等ねじれ作用



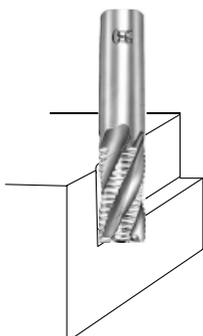
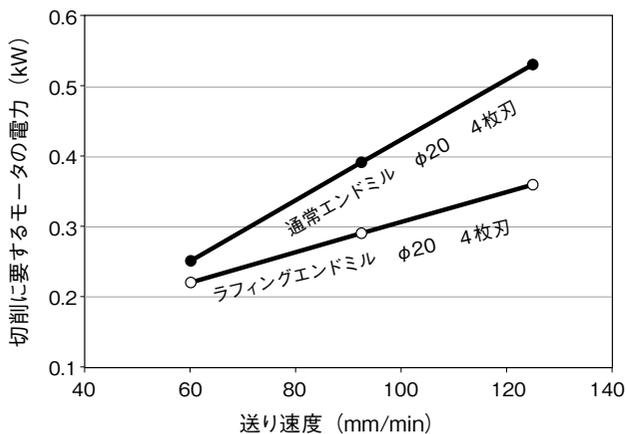
以上のような相乗効果により、ラフィングエンドミルは切削抵抗を軽減することができ、切込深さを大きくした重切削を可能とします。

図5.5.5は通常エンドミルとラフィングエンドミルで、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5.5.6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特長があり、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、おおむね $100\mu\text{mRz}$ 程度となってしまいますが、ニック付きエンドミルであれば、図5.5.7のように、 $20\sim 50\mu\text{mRz}$ 程度とすることも可能となります。

図5.5.8は刃先交換式の、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、あるいは不等ねじれの効果を生むように（階段状に）設定されています。



エンドミル：HSSエンドミル $\phi 20$ 4枚刃
 ：(通常仕様、ラフィング仕様)
 被削材質：S50C
 切削速度 25m/min (403min^{-1})
 切込み深さ： $a_p=30\text{mm}$ $a_e=5\text{mm}$
 切削方向 ダウンカット
 切削油剤：不水溶性切削油剤
 機 械：立形マシニングセンタ(BT50)

図 5.5.5 ラフィングエンドミルによる切削動力の低減

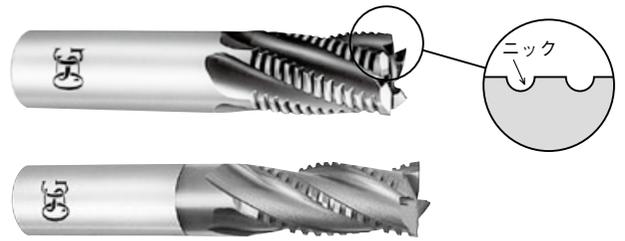


図 5.5.6 ニック付きエンドミル

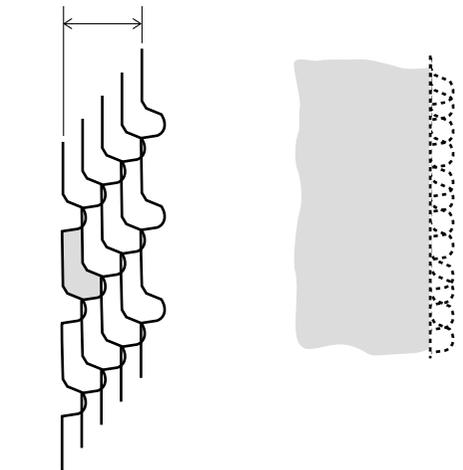
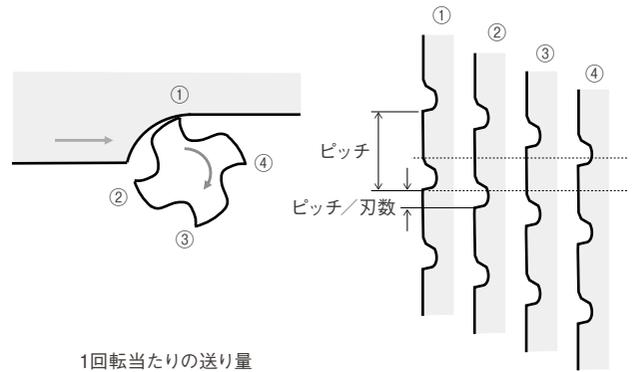


図 5.5.7 ラフィングエンドミルの切削機構



図 5.5.8 刃先交換式ラフィングエンドミル



5.6 アスペクト比 (L/D) の影響

図5.6.1のように上端を固定した丸棒においては、一般に次のような関係が成り立ちます。

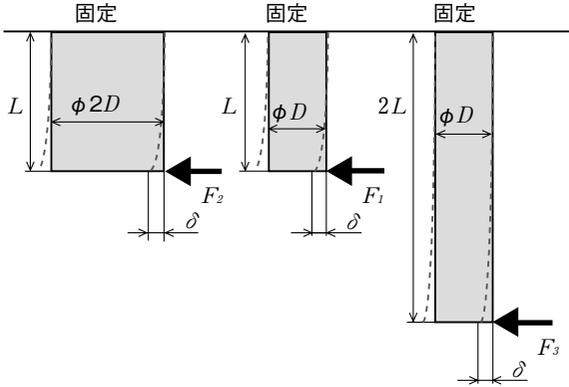


図 5.6.1 丸棒の曲げ強さ

$$\delta = \frac{F \cdot L^3}{3 \cdot E \cdot I} \dots\dots\dots (5.3)$$

δ : たわみ量

F : 曲げ方向に加えた力 (F_1 、 F_2 、 F_3)

L : 丸棒の長さ

E : 縦弾性係数

I : 断面2次モーメント

すなわち

$$F = \frac{3 \cdot E \cdot I \cdot \delta}{L^3} \dots\dots\dots (5.4)$$

ここで、

$$I = \frac{\pi \cdot D^4}{64} \dots\dots\dots (5.5)$$

D : 丸棒の直径

(5.4)、(5.5)式より、 F は D の4乗に比例し、 L の3乗に反比例することが分かります。

したがって、

$$F_2 = \frac{1}{2^3} F_1 = \frac{F_1}{8} \dots\dots\dots (5.6)$$

$$F_3 = 2^4 F_1 = 16 F_1 \dots\dots\dots (5.7)$$

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、16倍もの大きな力が働かないと δ のたわみを生じないことになります。

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)」と表します。

ここでは単純モデル (梁の強度) 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。

図5.6.2には刃長と加工精度 (加工面のたおれ量) を、測定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。

エンドミル：超硬エンドミル $\phi 10$ 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
 切込み深さ： $2p=10\text{mm}$ $2e=0.5\text{mm}$
 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

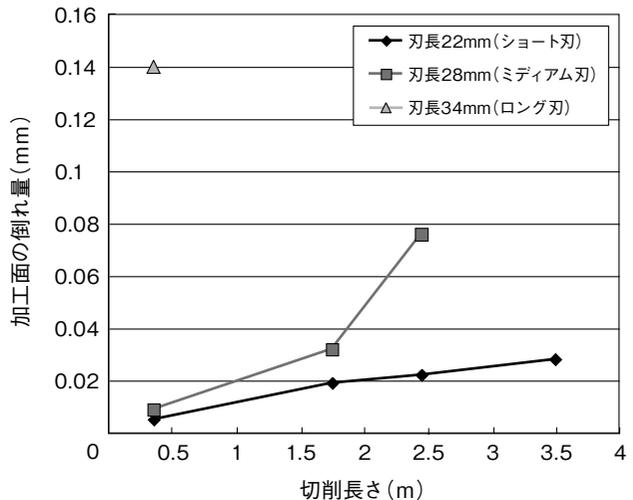
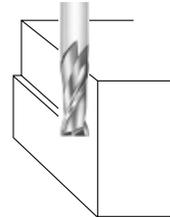


図 5.6.2 刃長と加工精度

そればかりか図5.6.3のように刃長が長くなると、切れ刃の摩耗の進行も早くなります。

刃長が2倍になると剛性は1/8となるのですが、図5.6.4の試験結果で分かるように、工具寿命は1/10以下となってしまいます。

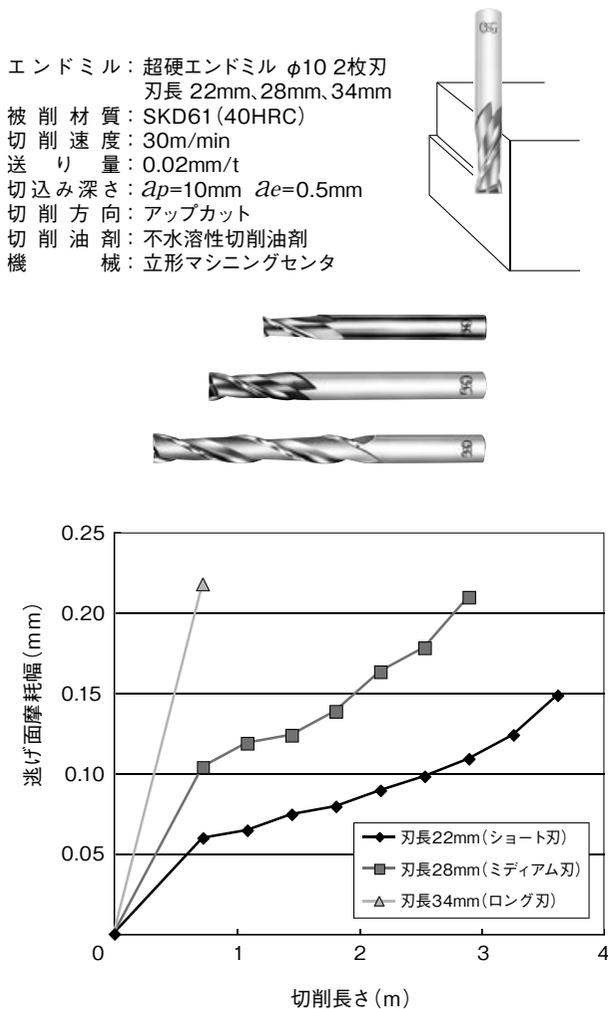
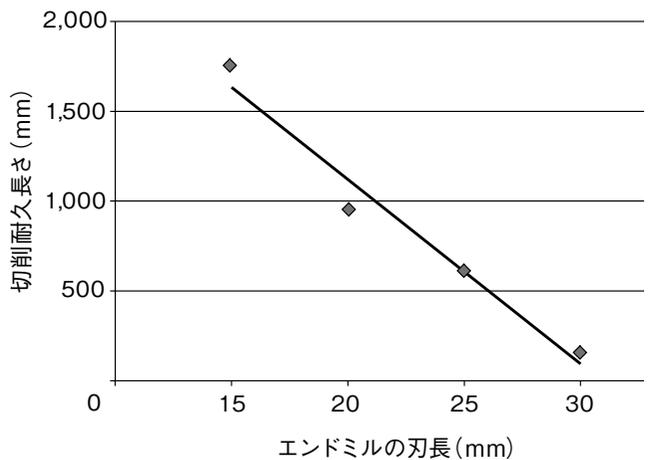


図 5.6.3 刃長と逃げ面摩耗の推移

図5.6.5には超合金製のソリッドボールエンドミルにおける、それぞれの工具突出し長さでの切削適応領域を示します。

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を助長するので、切削適応領域は狭くなります。

この試験では $L/D=8$ になると、切削適応領域が非常に狭くなってしまふことが分かります。



エンドミル：HSSエンドミル φ10 2枚刃
刃長 15mm、20mm、25mm、30mm
被削材質：SKD61 (32~360HRC)
切削方法：溝切削
切削速度：10m/min (340min⁻¹)
送り量：0.037mm/t (25mm/min)
切込み深さ： $a_p=5\text{mm}$
切削油剤：不水溶性切削油剤
機 械：立形フライス盤

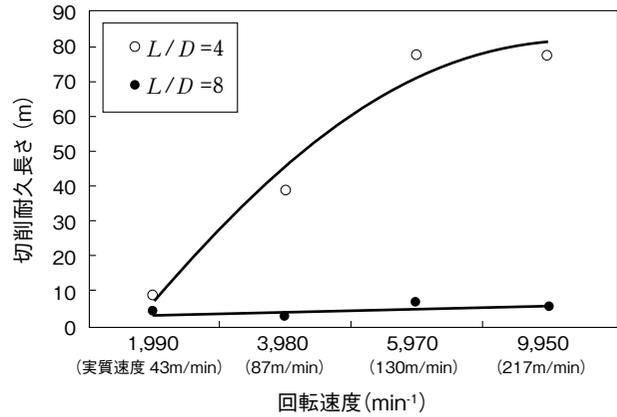
図 5.6.4 刃長と工具寿命



L/D=4 (突出し長さ40mm)における切削領域



回転速度 (min ⁻¹)	切込み深さ (mm)	切 削 状 況							
		○:切削音小 △:切削音中 ×:切削音大、びびり発生							
3,350	3(0.3D)	○	○	○	○	○	○	○	○
	2(0.2D)	○	○	○	○	○	○	○	○
	1(0.1D)	○	○	○	○	○	○	○	○
7,000	3(0.3D)	○	○	○	△	△	△	△	△
	2(0.2D)	○	○	○	○	○	○	○	○
	1(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 (突出し長さ60mm)における切削領域



回転速度 (min ⁻¹)	切込み深さ (mm)	切 削 状 況							
		○:切削音小 △:切削音中 ×:切削音大、びびり発生							
3,350	3(0.3D)	○	○	○	○	○	○	○	○
	2(0.2D)	○	○	○	○	○	○	○	○
	1(0.1D)	○	○	○	○	○	○	○	○
7,000	3(0.3D)	×	×	○	△	△	△	△	△
	2(0.2D)	×	×	○	○	○	○	○	○
	1(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

エンドミル：コーティング超硬ボールエンドミル φ8(R4) 2枚刃
 突出し長さ(L/D) 32mm(4D)、64mm(8D)
 被削材質：SKD61(50HRC)
 回転速度：1,990~9,950min⁻¹
 送り量：0.075mm/t
 切込み深さ： $a_p=2\text{mm}$ $df=0.8\text{mm}$
 切削方向：ダウンカット
 切削油剤：エアブロー
 機 械：立形マシニングセンタ(BT40)



図 5.6.6 突出し長さ各切削速度での工具寿命

L/D=8 (突出し長さ80mm)における切削領域



回転速度 (min ⁻¹)	切込み深さ (mm)	切 削 状 況							
		○:切削音小 △:切削音中 ×:切削音大、びびり発生							
3,350	3(0.3D)	×	×	×	×	×	×	×	×
	2(0.2D)	×	○	○	○	○	○	○	○
	1(0.1D)	○	○	○	○	○	○	○	○
7,000	3(0.3D)	×	×	×	×	×	×	×	×
	2(0.2D)	×	×	△	折損				
	1(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

切削速度を増加することで、刃先摩耗の進行が、緩やかになる領域があることをすでに説明しましたが、アスペクト比(L/D)が大きくなった場合(L/D=8)での切削速度と工具寿命の関係を、図5.6.6に示します。

この結果からも分かるように、アスペクト比(L/D)が大きく、曲げモーメントが増大する環境では、高速ミーリングの手法活用は難しくなります。

エンドミル外径と突出し長さが制約される中で、曲げモーメントを小さくするためには、切削抵抗の半径方向分力ならびに、送り分力を小さくするか、工具剛性を高める(縦弾性係数を大きくする、または制約される工具径の中での工具断面積を増加させる)方法のみです。

エンドミル：コーティング超硬エンドミル φ10(R5) 2枚刃
 突出し長さ(L/D) 40mm、60mm、80mm
 被削材質：NAK55(40HRC)
 切削油剤：エアブロー
 機 械：立形マシニングセンタ(BT40)

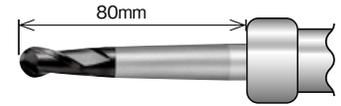


図 5.6.5 突出し長さ各切削領域

もし、大きな突出し長さが要求されるものの、実は刃長は短くてよく、さらに首部にテーパを設けても、加工物や治工具との干渉が生じない場合には、テーパネックエンドミルを使用することで、工具剛性の低下を最小限にすることができます。こうした対応は、切削適応領域を広げ、工具寿命を延長する上で、大変有効です。

図5.6.7には超硬ソリッドボールエンドミルでの、首部テーパ形状による有効性を示します。図5.6.5に対して切削適応領域が広がったことが分かります。

テーパネックエンドミルでの突出し長さ80mmにおける切削領域



回転速度 (min ⁻¹)	切込み深さ (mm)	切削状況							
		○: 切削音小 △: 切削音中 ×: 切削音大、びびり発生							
3,350	3(0.3D)	○	○	○	○	○	○	○	○
	2(0.2D)	○	○	○	○	○	○	○	○
	1(0.1D)	○	○	○	○	○	○	○	○
7,000	3(0.3D)	×	×	×	×	×	×	×	×
	2(0.2D)	×	○	○	△	△	△	△	△
	1(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

エンドミル：コーティング超硬テーパネック（ペンシルネック）
 ボールエンドミルφ10（R5） 2枚刃 シャンク径φ12
 被削材質：NAK55（40HRC）
 切削油剤：エアプロー
 機 械：立形マシニングセンタ（BT40）



図 5.6.7 テーパネックの効果

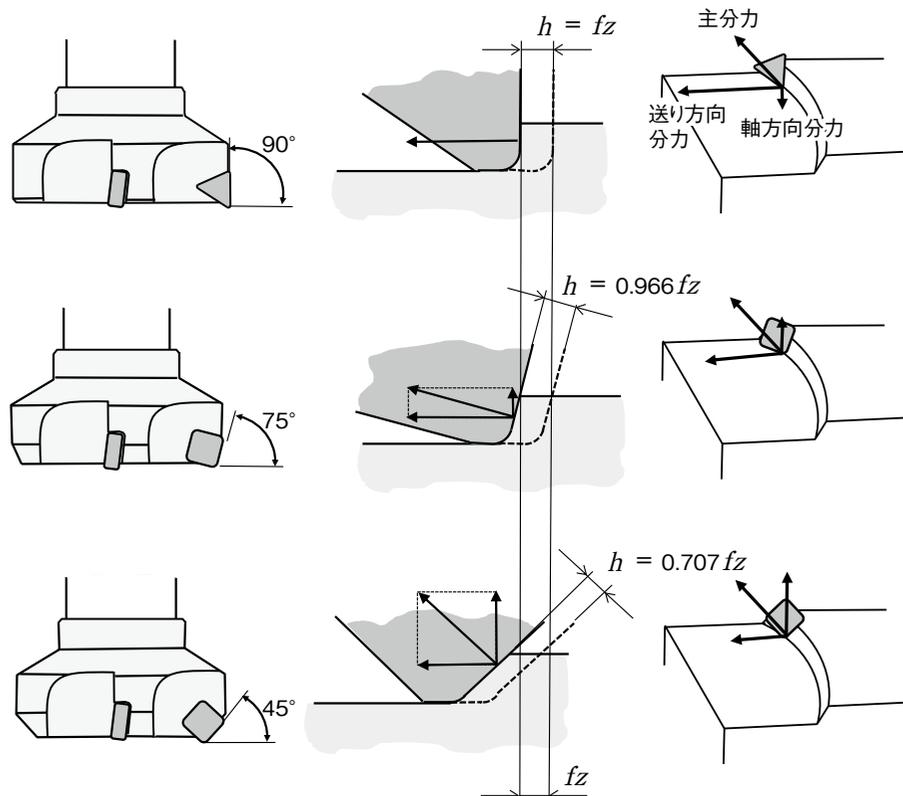


図 5.7.1 切込み角と切取り厚さおよび切削抵抗



5.7 底刃形状と切削特性

正面切削における切込み角と切取り厚さの関係を図5.7.1に示します。加工面と切れ刃とが成す角を切込み角と言います。

切込み角を小さくすると切取り厚さは薄くなり、単位切れ刃長さ当たりの切削抵抗は減少します。これによって工具寿命も長くなる傾向があります。

また切込み角を小さくすると、切削抵抗の送り方向分力は小さくなりますが、軸方向分力が大きくなります。すなわち加工物に対しては、切削力として押し付ける方向に力が働きます(表5.3)。

表 5.3 切込み角と切削特性

切込み角	90°	75°	45°
切りくず形状	厚くて幅が狭い	90°よりやや薄くなる	薄くて幅が広い
切削抵抗	背分力はマイナス方向	90°より送り分力は小さくなり、背分力は45°より小さい	背分力が大きくなる
切削状況	切削状況	加工物を押し付ける方向に力が働くが小さい。薄肉構造物でのひずみを起こしにくい。	加工物を押し付ける方向に力が働く。薄肉構造物ではひずみを生じやすい。鑄鉄切削でのこぼれが生じにくい。

スクエアタイプとラジアスタイプとの比較においても、同様のことが言えます。図5.7.2のような同一切込み深さ、同一送り量での切削を行った場合、ラジアスタイプの方が、切取り厚さが薄くなるのが分かります(図5.7.3)。

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、もしくはねじれ刃仕様となっているとすると、ねじれ刃の作用により、切りくず厚さが薄くなるとともに、切削抵抗も分散(分力への分解ならびに時間的なずれ)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(図5.7.4)。

しかし、こうした切れ刃は、加工面への同時接触切れ刃長さが長くなるため、これが先述の切削抵抗分散による軽減効果を上回る場合は、かえってびびりを誘発することとなってしまいます。

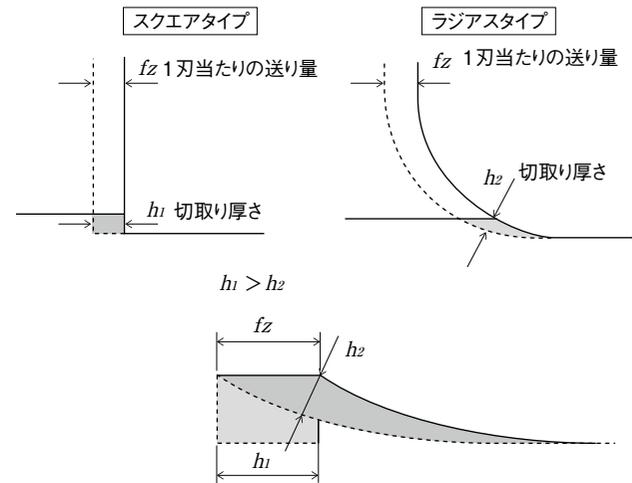


図 5.7.2 スクエアタイプとラジアスタイプの切取り厚さ



図 5.7.3 ラジアスエンドミルの例

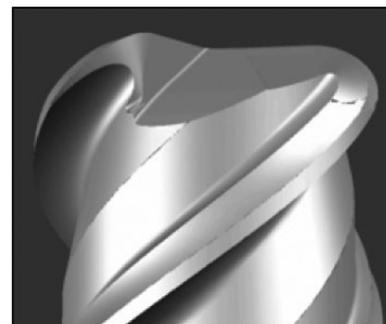


図 5.7.4 コーナR部のねじれ角



6 エンドミルの再研削

6.1 再研削の時期と方法

(1) 再研削の時期

刃先摩耗の進み方は一般に図6.1.1に示すような経過をたどります。初期摩耗が生ずると、安定した進行を示す定常摩耗が続く、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。

したがって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。目安の再研削の時期を外周逃げ面摩耗の量で示すと表6.1のようになります。

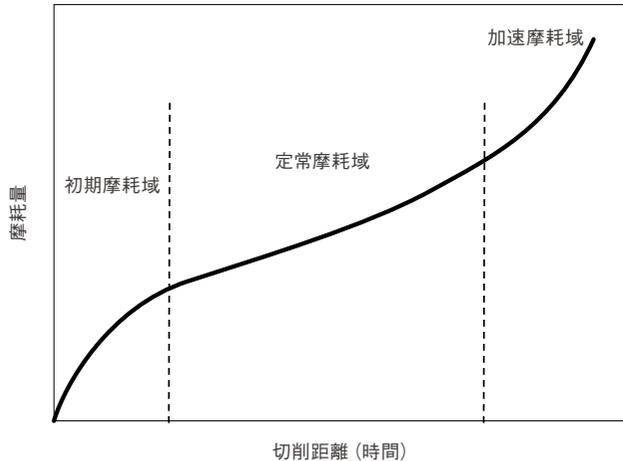


図 6.1.1 一般的な摩耗の進み方

(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、外径寸法の変化が許容されないキー溝加工用のエンドミルなどでは、刃長を詰めて底刃の再刃付けを行います。ボールエンドミルも同様に、刃長を

表 6.1 外周逃げ面摩耗量による再研削時期の目安

加工の種類	エンドミル外径	逃げ面摩耗幅
荒加工	10~12	0.1 ~0.2
	12~30	0.25~0.45
	30~	0.3 ~0.5
仕上げ加工	10~12	0.1 ~0.15
	12~30	0.15~0.25
	30	0.2 ~0.3

(単位:mm)

詰めてボール部の再刃付けを行います。外周刃が波状になっているラフィングエンドミルでは、溝のすくい面を再研削します。

(3) 外周逃げ面の再研削

外周逃げ面の研削は、CNC工具研削盤による強制リード方式 (溝のねじれに沿って刃付けを行う方式)で行います。手動の万能研削盤で、刃受けを使って溝のねじれに倣い研削することもできますが熟練を要します。研削方法としては、図6.1.2に示すような3種類の方法があります。

コンケイブ法で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、逃げ面が凸R形状となり、刃先強度を保ちながら、大きな逃げ量を確保できます。新品のエンドミルの多くは、この方法で研削されています。

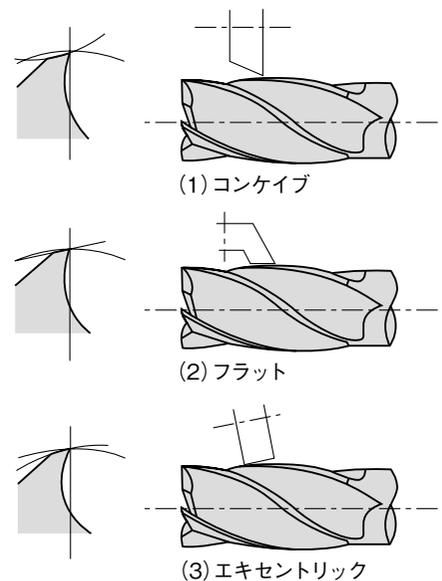


図 6.1.2 外周逃げ面形状と研削方法



(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。

センタ穴付きのHSSエンドミルであれば、手動の万能研削盤にて両センタで支持を行い、砥石を溝に沿わせてすくい面のみなめるような方法で、再研削を行うことも可能ですが、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6.1.3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、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。

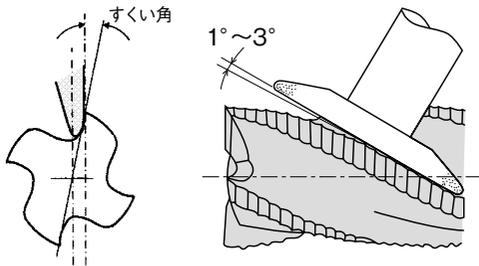


図 6.1.3 溝すくい面研削時のエンドミルと砥石の位置関係

(5) 底刃の再研削

スクエアエンドミルの底刃の再研磨は、直線的な動きのみで研削できるので、万能工具研削盤を使用した手動でも、比較的容易に研削ができます。

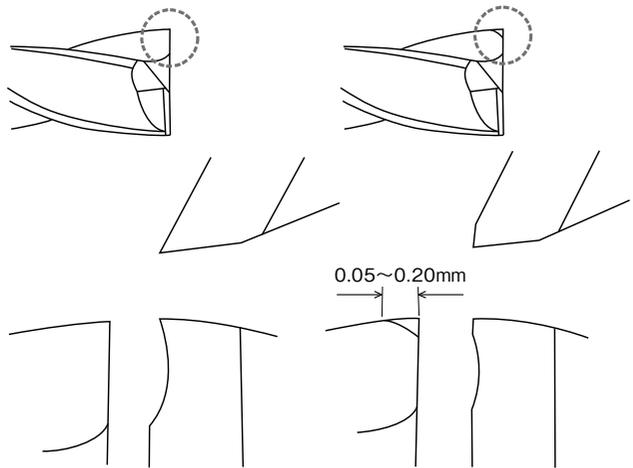


図 6.1.4 コーナ部の強度向上

第1底刃逃げ面（底刃2番面）を研削するときは、通常 $1^{\circ} \sim 3^{\circ}$ のすかし角（中凹）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、図6.1.4のようにギャッシュ部を研削する際、刃先すくい面に砥石がわずかに当たるように（0.05～0.20 mm幅）研削します。

ボールエンドミルやラジラ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、精度が要求される場合は、CNC工具研削盤での再研削が必要となります。

6.2 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6.2に示します。ダイヤモンド砥石は、熱に弱く 600°C 程度で酸化が始まるので、研削代を小さくする、冷却性に優れた研削油剤を使用するなどの注意が必要です。

表 6.2 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	外周逃げ面 すくい面 底刃	WA	# 60 ~ 80	1,000 ~ 1,200	50 ~ 200	0.010 ~ 0.10	0.005 ~ 0.010
	外周逃げ番面 すくい面 底刃	cBN	# 140 ~ 400	1,400 ~ 1,800			
超硬	外周逃げ番面 すくい面 底刃	ダイヤモンド	# 150 ~ 400	1,000 ~ 1,500			



7 トラブルの原因と対策

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7.1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、一般的な判断の目安としてください。

表 7.1 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	加工物に食付く際の送り速度を下げる。
	切込み深さが大きすぎる	切込み深さを小さくする。
	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。切込み深さを小さくする。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。切込み深さを小さくする。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。切込み深さを小さくする。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付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MQ Lとし、過冷却によるサーマルクラックを防止する。
	インサートの締め付け不足	インサートを締め直す。トルクレンチでインサート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。ブ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付き工具に換える。
工具材質が不適當	適切な工具選定を行う。	
工具突き出し長さが大きい	回転速度、送り速度を下げる。切込み深さを小さくする。焼きばめホルダを活用する。	
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MQ Lとする。不水溶性切削油剤を使用する。
折損	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。
	切込み深さが大きい	切込み深さを小さくする。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	回転速度を上げる。1刃当たりの送り量を小さくする。
	工具突き出し長さが大きい	焼きばめホルダを活用する。回転速度、送り速度を下げる。切込み深さを小さくする。
	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	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。
	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。
	切込み深さが大きい	切込み深さを小さくする。
	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	MQ L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。インサート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。



トラブル	原因	対策
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	切込み深さを小さくする。軸方向の切込み深さを小さくしてステップ加工する。
	ホルダの剛性不足	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。
	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。
	切れ味不足	すくい角の大きな工具を選定する。ブレーカ付きインサートを使用する。
	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、ホルダの剛性不足	切込み深さを小さくする。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。
	インサートの締め付け不足	インサートを締め直す。トルクレンチでインサート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。インサート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。主轴の振れを確認する。
	工具突出し長さが大きい	工具外径を太くする。焼きばめホルダを活用する。
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。
	切込み深さが大きい	切込み深さを小さくする。
	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。ペンシルネック工具を使用する。
	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。切込み深さを小さくする。ペンシルネック工具を使用する。
	切削抵抗が大きい	切込み深さを小さくする。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。ブレーカ付きインサートを使用する。
	すくい角が大きい	すくい角を修正する。他の工具に替える。
	逃げ角が大きい	逃げ角を修正する。他の工具に替える。
ばり（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。
	切込み深さが大きい	切込み深さを小さくする。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。ブ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。工具材質を換える。
	すくい角が小さい	すくい角の大きな工具を使う。ブレーカの角度を変える。
こぼ欠け	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欠けが発生するので、工具径路を工夫する。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欠けが発生するので、工具径路を工夫する。入り際での送り速度を下げる。
切りくず絡みつき (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(段付き穴)	ドリル加工を後にする。ステップ送りで加工する。
	チップブレーカの不適	適切なチップブレーカのインサートを選定する。



用語解説

エンドミル用語

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と言う。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。
外径	エンドミルの刃部の直径。
外周刃	エンドミルの外周にある切れ刃。
ギャッシュ	底刃を形成する溝。
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。
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。
シャンク	エンドミルの柄。
シャンク径	エンドミルのシャンクの直径。
主切れ刃	主たる切削を行う切れ刃の部分。
心厚	溝底の直径。
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。
スクウエア刃	コーナ部がR状になっていない角形のエンドミル底刃。
ストレートシャンク	円筒状のシャンク。
ストレート刃	円筒状のエンドミルの外周刃。
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よりこう呼ばれる。インデキサブル・インサートあるいは単にインサートとも言う。
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。
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。
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。
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。
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。
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。
千鳥刃	ねじれ方向が互い違いになっている切れ刃。
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。
テーパシャンク	テーパ形状のシャンク。
テーパ刃	テーパ状になったエンドミルの外周刃。
等底刃	切れ刃の長さがすべて等しいエンドミルの底刃。
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。
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。
ねじれ刃	ねじれを持ったエンドミルの外周切れ刃。
刃数	エンドミルの刃の数。
刃長	エンドミルの刃部の長さ。
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。
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。
副切れ刃	切れ刃のうち主切れ刃を除く部分。
不等底刃	切れ刃の長さが異なるエンドミルの長底刃。親子刃ともいう。一番長い切れ刃を長刃または親刃、それ以外の切れ刃を短底刃または子刃ともいう。
フラット	シャンクの円筒部に設けた平たん部。
ボール刃	ボール状のエンドミル底刃。
マージン	逃げ面上で逃げ角を持たない丸ランドの部分。
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。
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。
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。
面取り刃	面取りコーナを持ったエンドミル底刃。
ラジアス刃	コーナ部がR状になったエンドミル底刃。
ラジアルレーキ	半径方向のすくい角。
ラフィング切れ刃	波状になった切れ刃。
リード	ねじれた切れ刃に沿って、軸の周りを一回転したときに進む距離。



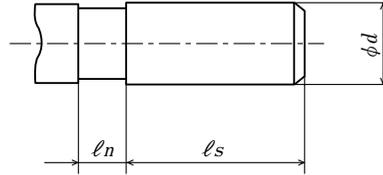
エンドミル加工用語

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。	
1回転当たりの送り量	エンドミルの一回当たりの送り量 f_r は次のように求める。 $f_r = Vf / n$ Vf : 送り速度 (mm/min) n : 回転速度 (min^{-1})	mm
ウェット加工	切削油剤を使用した加工。	
MQ L	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)。	
エンゲージ角	正面切削において工具 (エンドミル) 中心と切れ刃の食付き点を結んだ線と送り方向の成す角度。	
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。	
送り速度	工具と工作物の相対的移動速度。	mm/min
回転速度	一分間当たりの回転数。	min^{-1}
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
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する。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がある。	
工具寿命方程式	F.W. テー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の予測することができる。	
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、柔らかいとは別の特性。	
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断続切削方法を言う。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行えば、CAMの軽減も図れる。また、高速ミーリングではテー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。	
軸方向の切込み深さ	エンドミルの軸方向においてエンドミルが切込んでいる深さ	mm
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。 $V_c = \pi \cdot DC \cdot N / 1000$ π : 円周率 DC : エンドミルの外径 (mm) n : 回転速度 (min^{-1})	m/min
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
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MQ L (Minimum Quantity Lubrication) と言う。	
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に加え方による変形。	
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。	
塑性変形	固体が弾性限界を越えて変形をし、外力をなくしても変形したままとま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。	
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。	
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。	
ドライ加工	切削油剤を使用しない加工。	
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。	
半径方向の切込み深さ	エンドミルの半径方向においてエンドミルが切込んでいる深さ	mm
比切削抵抗	単位切削断面積 (1mm^2) に対して切削に要する切削抵抗	N/mm^2
ピックフィード	金型の自由曲面加工などをと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
1刃当たりの送り量	エンドミルの一刃当たりの送り量 f_z は次のように求める。 $f_z = Vf / (Z \cdot n)$ Vf : 送り速度 (mm/min) z : エンドミルの刃数 n : 回転速度 (min^{-1})	mm/t
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。	
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。自由曲線の工具径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。	
ヤング率	弾性限界内の応力とひずみの関係は σ (応力) = $E \cdot \epsilon$ (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。	

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 に準拠)



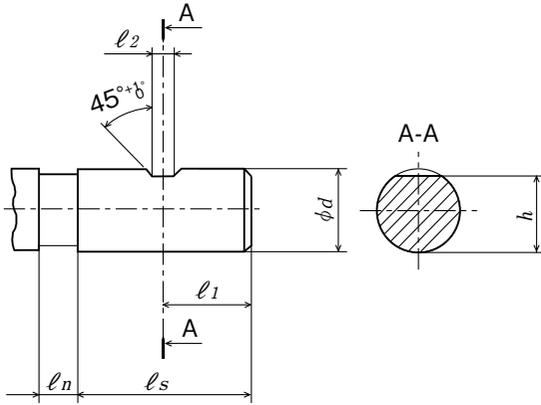
単位 (mm)

シャンク径 d		シャンクの長さ ℓ_s						参考	
基準寸法	許容差 h8	基準寸法						許容差	首の長さ ℓ_n
		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			40	50	60	80		
5	-0.018	36	36	45	56	70	90	6	
6				40	50	60	80		100
8	0	40	50	56	70	90	110	8	
10	-0.022			60	80	100	125		
12	0	45	56	70	90	110	140	10	
14	-0.027								48
16		0	50	70	90	110	140	180	
18	-0.033								56
20	0	60	90	110	140	180	225	20	
25	-0.033								70
32	0	80	110	140	180	225	280	22	
40(42)	-0.039								90
50		0	90	125	160	200	250	315	
63	-0.046	110							

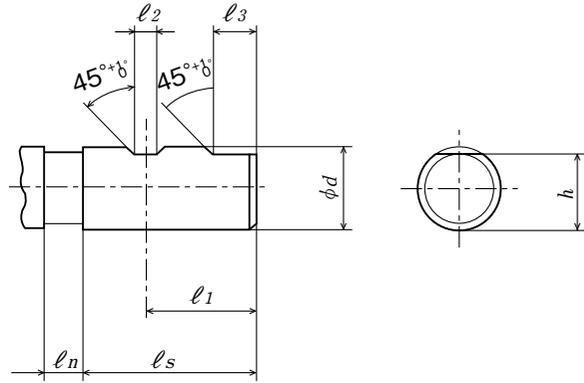


フラット付きストレートシャンク部の形状及び寸法 (JIS B 4005-1998 に準拠)

シングルフラット付き
(シャンク径 ϕd が6mm以上、20mm以下)



ダブルフラット付き
(シャンク径 ϕd が25mm以上、63mm以下)



単位 (mm)

シャンク径 d		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
6	0 -0.008	36	+2 0	18	0 -1	4.2	+0.2 0	—	—	4.8	0 -0.4	8
8	0 -0.009					5.5	6.6					
10	0 -0.011	40		20		7				8.4	10	
12	0 -0.011	45		22.5		8				10.4	12	
16	0 -0.013	48		24		10				14.2		
20	0 -0.013	50		25		11				18.2	16	
25	0 -0.016	56		32		12		17	+1 0	23	20	
32	0 -0.016	60		36		14		19		30		
40	0 -0.019	70		40						38	22	
50	0 -0.019	80		45		18		23		47.8		
63	0 -0.019	90		50						60.8		



■材料規格対照表

■一般構造用鋼

日本	アメリカ	欧州	中国	ISO
JIS	ASTM/AISI	EN	GB	
SS330	A	S235JR		
	B			
	C			
SS400	D	S275JR		
	50			
	55			
	58			
	65			
	70			
SS490	70	S355JR		
	C			
	D			
SM570	C			
	D			
SM490A	D			
SM490B	E			
SM490C	A			
SM490Y	B			
SM520	50W			
SV330	A			
SV400	B			

■炭素鋼

日本	アメリカ	欧州	中国	ISO
JIS	ASTM/AISI	EN	GB	
S15C	1015	C15E	15	C15E4
		C15R		C15M2
S15CK		C15E	20	C15E4
		C15R		C15M2
S25C	1025	C25		C25
		C25E		C25E4
		C25R		C25M2
S45C	1045	C45	45	C45
		C45E		C45E4
		C45R		C45M2
S50C	1049		50	C50
		C50E		C50E4
		C50R		C50M2
SB410	Grade415	P265GH		PT410GH
SB450	Grade450	P295GH		PT450GH
SB450 M	GradeA			
SB480	Grade485	P295GH		PT480GH
SB480 M	GradeB			

■合金鋼

日本	アメリカ	欧州	中国	ISO
JIS	ASTM/AISI	EN	GB	
SCM415			15CrMo	
SCM418			20CrMo	18CrMo4
				18CrMoS4
SCM418H		18CrMo4		18CrMoS4
		18CrMoS4		18CrMoS4
SCM420		18CrMo4		
		18CrMoS4		
SCM421		22CrMoS3-5		
SCM430	4130		30CrMo	
SCM432				
SCM435	4137		35CrMo	34CrMo4
				34CrMoS4
SCM435H	4135H			34CrMo4
				34CrMoS4
SCM440	4140	42CrMo4	42CrMo	42CrMo4
		42CrMoS4		42CrMoS4
SCM440H	4140H			42CrMo4
				42CrMoS4
SCM445	4145			
SCM445H	4145H			
SCM822				
SCM822H				
SCr415			15Cr	
SCr415H			15CrH	
SCr420	5120		20Cr	20Cr4
				20CrS4
SCr420H	5120H		20CrH	20Cr4H
				20CrS4
SCr430	5130		30Cr	
SCr430H	5130H			34Cr4
				34CrS4
SCr435	5132		35Cr	34Cr4
				34CrS4
				37Cr4
				37CrS4
SCr435H	5135H			34Cr4
				37Cr4
SCr440	5140	41Cr4	40Cr	41Cr4
		41CrS4		41CrS4
SCr440H	5140H		40CrH	41Cr4
				41CrS4
SCr445				
SMn420	1522		20Mn2	22Mn6
SMn420H	1522H			22Mn6H
SMn433			30Mn2	
SMn433H				
SMn438	1541		40Mn2	36Mn6
SMn438H	1541H			36Mn6H
SMn443	1541		45Mn2	42Mn6
SMn443H	1541H			42Mn6H
SNC236				



■合金鋼

日本	アメリカ	欧州	中国	ISO
JIS	ASTM/AISI	EN	GB	
SNC415				
SNC415H				
SNC631				
SNC631H				
SNC815				
SNC815H				15NiCr13
SNC836			12CrNi2H	
SNCM220	8617	20NiCrMo2-2		20NiCrMo2
	8620	20NiCrMoS2-2		20NiCrMoS2
SNCM220H	8620H		20CrNiMoH	20NiCrMo2
				20NiCrMoS2
SNCM240	8640			41CrNiMo2
				41CrNiMoS2
SNCM415				
SNCM420	4320			
SNCM420H	4320H		20CrNi2MoH	
SNCM431				
SNCM439	4340			
SNCM447				
SNCM616				
SNCM625				
SNCM630				
SNCM815				

■炭素工具鋼

日本	アメリカ	欧州	中国	ISO
JIS	ASTM/AISI	EN	GB	
SK140			T13	
SK120	W1-11 1/2		T12	C120U
SK105	W1-10		T11	C105U
SK95	W1-9		T10	
SK90				C90U
SK85	W1-8		T8Mn	
SK80				C80U
SK75			T8	
SK65			T7	
SKS2				
SKS11	F2			
SKS21			W	
SKS31				105WCr1
SKS41				
SKS43	W2-91/2			105V
SKS44	W2-81/2			
SKS51	L6			
SUJ2	52100			B1

■ダイス鋼

日本	アメリカ	欧州	中国	ISO
JIS	ASTM/AISI	EN	GB	
SKD11	D2		Cr12MoV	
SKD61	H13		4Cr5MoSiV1	X40CrMoV5-1

■高速度鋼

日本	アメリカ	欧州	中国	ISO
JIS	ASTM/AISI	EN	GB	
SKH2	T1			HS18-01
SKH50				HS1-8-1
SKH51	M2			HS6-5-2
SKH52	M3-1			HS6-6-2
SKH53	M3-2			HS6-5-3
SKH54	M4			HS6-5-4
SKH55				HS6-5-2-5
SKH56	M36			
SKH57				HS10-4-3-10
SKH58	M7			HS2-9-2
SKH59	M42			HS2-9-1-8

■工具鋼

日本	アメリカ	欧州	中国	ISO
JIS	ASTM/AISI	EN	GB	
SKT3				
SKT4				55NiCrMoV7
SKT6				45NiCrMo16

■パイプ鋼

日本	アメリカ	欧州	中国	ISO
JIS	ASTM/AISI	EN	GB	
STAM290GB		E155		
SGP	TypeF(A)	S195T		
STKM11A	1008	E155		
STPT370	A	P235GH		
STB340	A	P235GH		
STPG370	A	P235TR2		
STS370				
STPT410	B	P265GH		
STB410	C	P265GH		
	A-1			
STPG410	B	P265TR2		
STK400	A	E320		TS9
STKM12B				
STKR400		S275JR		
STAM390G				
STS410				
STKM14A		CFSC4		
STKM13C	1020	CFSC4		
STKM18C		E355		
STKM19A		E355		
STKM19C		E355		
STK490		E355		TS18
STKR490		S275JR		
STS480				
STKM12A				R33
STKM12B				
STKM13A	1020	E235		
STKM13C	1020	CFSC4		R37
STKM14B	1026			



■パイプ鋼

日本	アメリカ	欧州	中国	ISO
JIS	ASTM/AISI	EN	GB	
	1025			
STKM14C	1026			
	1025			
STKM17A	1050			
STKM18B		E355		R50
STKM18C		E355		
STKM19A		E355		
STKM19C		E355		

■ばね鋼

日本	アメリカ	欧州	中国	ISO
JIS	ASTM/AISI	EN	GB	
SUP6				60Si8
SUP7	9260			60Si8
SUP9	5155			55Cr3
SUP9A	5160			60Cr3
SUP10	6150			51CrV4
SUP11A	51B60			60Cr3
SUP12				55SiCr6-3
SUP13	4161			60CrMo3-3

■耐熱鋼

日本	アメリカ	欧州	中国	ISO
JIS	ASTM/AISI	EN	GB	
SUH1		1.4718		X45CrSi93
SUH3				
SUH4				
SUH11				X50CrSi182
SUH21				
SUH31				
SUH35		1.4871		
SUH36				
SUH37				
SUH38				
SUH309	S30900			
SUH310	S31000			
SUH330				
SUH409		X6CrTi12		X6CrTi12
SUH409L	S40910			X2CrTi12
SUH446	S44600			X15CrN26
SUH600				
SUH616	S42200			
SUH660				
SUH661				

■ステンレス鋼

日本	アメリカ	欧州	中国	ISO
JIS	ASTM/AISI	EN	GB	
SUS304	S30400	1.4301		L-No6X5CrNi18-9
SUS405	S40500	1.4002		L-No66X6CrAl13
SUS420F	S42020	1.4029		
SUS430	S43000	1.4016		L-No67X6Cr17
SUS430LX	S43035	1.4510		L-No70X3CrTi17
SUS440A	S44002	1.4109		
SUS630	S17400	1.4542		L-No101-X5CrNiCuNb16-4
SUS631	S17700	1.4568		L-No102X7CrNiAl17-7
SUS410	S41000	1.4006		L-No82X12Cr13

■鋳鋼

日本	アメリカ	欧州	中国	ISO
JIS	ASTM/AISI	EN	GB	
SCH15	HT	GX50NiCrCoW35-25-15-5		GX40NiCrSi35-17
	HT50			

■快削鋼

日本	アメリカ	欧州	中国	ISO
JIS	ASTM/AISI	EN	GB	
SUM21	1212			9S20
SUM22	1213	9SMn28	Y15	11SMn28
SUM22L		9SMnPb28	Y12Pb	11SMnPb28
SUM23	1215			
SUM23L				
SUM24L	12L14			11SMnPb28
SUM25				12SMn35
SUM31	1117			
SUM31L				
SUM32			Y20	
SUM41	1137		Y30	
SUM42	1141			
SUM43	1144			44SMn28

■鋳鉄

日本	アメリカ	欧州	中国	ISO
JIS	ASTM/AISI	EN	GB	
FC250	Class No.250B	EN-GJL-250		ISO185/JL/250
FC300	Class No.300B	EN-GJL-300		ISO185/JL/300

■ダクタイル鋳鉄

日本	アメリカ	欧州	中国	ISO
JIS	ASTM/AISI	EN	GB	
FCD400-18	60-40-18	EN GJS-400-18		400-18S
FCD400-15	60-40-18	EN GJS-400-15		400-15S
FCD600-3	80-55-06	EN GJS-600-3		600-3



■アルミニウム合金

日本	アメリカ	欧州	中国	ISO
JIS	ASTM/AISI	EN	GB	
A1080P		EN AW-1080A	1A80	
A1070P		EN AW-1070A		
A1050P			1A50	
A1100P	1100	EN AW-1100		AI99.0Cu
A1200P	1200	EN AW-1200		AI99.0
A2014P	2014	EN AW-2014		AlCu4SiMg
A2017P	2017			
A2017AP	2014	EN AW-2017		AlCu4MgSi(A)
A2024P	2024	EN AW-2024		AlCu4Mg1
A2024PC	Alclad 2024			
A2024BE	2024	EN AW-2024		AlCu4Mg1
A2024BD	2024	EN AW-2024		AlCu4Mg1
A2024W	2024	EN AW-2024		AlCu4Mg1
A2024TD	2024	EN AW-2024		AlCu4Mg1
A2024S	2024	EN AW-2024		AlCu4Mg1
A3003P	3003	EN AW-3003		AlMn1Cu
A5052P	5052	EN AW-5052	5A02	AlMg2.5
A5052BE	5052	EN AW-5052		
A5052BD	5052	EN AW-5052		AlMg2.5
A5052W	5052	EN AW-5052		AlMg2.5
A5052TD	5052	EN AW-5052		AlMg2.5
A5052TWA	5052			Al-Mg4.5Mn0.7
A5052S	5052	EN AW-5052		
A5052FH				
A5083BD		EN AW-5083		Al-Mg4.5Mn0.7
A5083W		EN AW-5083		Al-Mg4.5Mn0.7
A5083TE	5083	EN AW-5083		Al-Mg4.5Mn0.7
A5083TD	5083	EN AW-5083		Al-Mg4.5Mn0.7
A5083TWA	5083			
A5083S	5083	EN AW-5083		Al-Mg4.5Mn0.7
A6061P	6061	EN AW-6061		Al-Mg1SiCu
A6063TE	6063	EN AW-6063		Al-Mg0.7Si
A7075P	7075	EN AW-7075	7A09	AlZn5.5MgCu
A7075BE	7075	EN AW-7075		AlZn5.5MgCu
A7075BD	7075	EN AW-7075		AlZn5.5MgCu
A7075TE	7075	EN AW-7075		AlZn5.5MgCu
A7075TD	7075	EN AW-7075		AlZn5.5MgCu
A7075S	7075	EN AW-7075		AlZn5.5MgCu
A7075FH	7075	EN AW-7075		
A7075FD	7075	EN AW-7075		

■アルミニウム合金鋳物

日本	アメリカ	欧州	中国	ISO
JIS	ASTM/AISI	EN	GB	
AC1B	204.0	EN AC-21000		AlCu4MgTi
AC2A		EN AC-45200		AlSi5Cu3Mn
AC2B	319.0	EN AC-45200		AlSi5Cu3Mn
AC3A		EN AC-44100	ZAlSi2	AlSi12(b)
AC4A		EN AC-43100		AlSi10Mg
AC4B		EN AC-46200		AlSi8Cu3
AC4C	356.0	EN AC-42000	ZAlSi7Mn	AlSi7Mg
AC4CH	A356.0	EN AC-42100		AlSi7Mg0.3

■アルミニウム合金鋳物

日本	アメリカ	欧州	中国	ISO
JIS	ASTM/AISI	EN	GB	
AC4D	355.0	EN AC-45300		AlSi5Cu1Mg
AC5A	242.0			
AC7A	514.0	EN AC-51300		AlMg5
AC8A		EN AC-48000	ZAlSi2Cu2Mg1	AlSi12CuMgNi
AC8B				
AC8C	332.0			
AC9A				
AC9B				
ADC1	A413.0	EN AC-44300		AlSi12(Fe)
ADC3	A360.0	EN AC-43400		AlSi10Mg(Fe)
ADC5	518.0			
ADC6	515.0			
ADC10	A380.0	EN AC-46200		AlSi8Cu3
ADC10Z	A380.0	EN AC-46500		AlSi9Cu3(Fe)(Zn)
ADC12	383.0			AlSi11Cu3(Fe)
ADC12Z	383.0	EN AC-46100		AlSi11Cu2(Fe)
ADC14	B390.0			AlSi17Cu4Mg

■マグネシウム合金

日本	アメリカ	欧州	中国	ISO
JIS	ASTM/AISI	EN	GB	
MD1B	AZ91B			
MD1D	AZ91D	EN-MB21120		MgAl9Zn1(A)
MD2B	AM60B	EN-MB21230		MgAl6Mn
MD3B	AS41B	EN-MB21320		MgAl4Si
MD4	AM50A	EN-MB21220		MgAl5Mn
MD5		EN-MC21210		MgAl2Mn
MD6	AS21A	EN-MB21310		MgAl2Si

■銅

日本	アメリカ	欧州	中国	ISO
JIS	ASTM/AISI	EN	GB	
C1020P	C10200(B152:97)	CW008A		
C1020PS	C10200(B152:97)	CW008A		
C1020R	C10200(B152:97)	CW008A		
C1020RS	C10200(B152:97)	CW008A		

■黄銅

日本	アメリカ	欧州	中国	ISO
JIS	ASTM/AISI	EN	GB	
C2600P	C26000(B36:01)	CW505		
C2600R	C26000(B36:01)	CW505		
C2600RS	C26000(B36:01)	CW505		

■青銅

日本	アメリカ	欧州	中国	ISO
JIS	ASTM/AISI	EN	GB	
C6140P	C61400(B169:01)			



冷間金型用鋼のブランド対照表

分類	JIS 他	会 社 名													使用硬さ (HRC)	
		日立 金属	愛知 製鋼	関東 特殊鋼	山陽 特殊鋼	大同 特殊鋼	NKK	日本 高周波 鋼業	不二越	三菱 製鋼	理研 製鋼	ポーラー	ウッデ ホルム	エラス チール		
炭素工具鋼	SK3		SK3		SK3	YK3	SK3	K3		SK3		K990			58~61	
	SKS93		SK301		QK3M	YK30	NKG93	K3M		SKS93					55~60	
	SKS3		SKS3		QKS3	GOA	NKE3	KS3		SKS3		K460	ARNE		55~62	
	SKS31		SKS31			GO31		KS31				K465			55~62	
	SKD1	CRD	SKD1	RFB	QC1	DC1		KD1		R32		K100	SVERKER3		55~62	
	SKD11	SLD SLD-i	SKD11		QC11	DC11		KD11	CDS11	R31	RD11	K105	SVERKER21		55~62	
	SKD11(改)	SLD8 SLD10	AUD11		QCM8 QCM10	DC53		KD11S KD11MAX KD21	MDS9			K340	SLEPNER		55~62	
	SKD12	SCD	SKD12		QC12	DC12		KD12				K305	RIGOR		55~62	
	AISI D2	SLD2	A-D2		QCD2	DC3		KD11V				K105 K110			55~62	
	プリ ハー ドン	40HRC 33HRC	HPM1 HPM2T			PCM40	NAK55 GO40F		KAP					IMPAX RAMAX S		40
			HPM2				PX5		KPM30							33
			HPM7				PXA30									33
	火災焼入鋼	HMD5 HMD1	SX105V SX4		QF3	GO5		FH5						FERMO CALMAX		55~62
	高温戻し用鋼	SLD8	AUD15		QCM8	DC53 DCMX	NKD101	KD11S	MCR12							62~64
	低温高焼入鋼	ACD37	AKS3			GO4		KSM								58~62
	耐衝撃用鋼	YSM	AKS4		QF1	GS5		KTV5	SRS6			K630	PREGA COMPAX		55~60	
	その他	ACD8						KDQ1	ICS22			K190PM			-	
		ARK1	SX5			DC-MX		KDQ2	MCR1				CALMAX		-	
			SX44					KDQ3					ELMAX (粉末)		-	
SLD- MAGIC		TCD					KD23A					VANADIS4E (粉末)		-		
		SXACE											VANADIS10 (粉末)		-	
高速度 工具鋼	SKH51	YXM1			QH51		H51	SKH9		RHM1	S600		M2	55~65		
	SKH51(改)							SKH9D						57~66		
	SKH52	YXM2											EM3-1	57~66		
	SKH55	YXM4						HM35		RHM5	S705		EM35	57~66		
	SKH55(改)							HM35	HS53M				WKE42	57~66		
	SKH57	XVC5						MV10	HS93R		RHM7	S700	WKE45	55~66		
	SKH57(改)	YXM60							FM38V HS98M					57~68		
	マトリックス	YXR3 YXR7 YXR33			QHS GHZ	DRM1 DRM2 DRM3		KMX1 KMX2 KMX3	DURO-FZ DURO-F1 DURO-F3 DURO-F7 DURO-SP						55~64	
	その他							S70	HSU2C						-	
	粉末高速度鋼	HAP10 HAP50 HAP72 HAP5R			SPM23 SPM60 SPMR8 SPMV6 SPMX4N	DEX20 DEX80 DEX-M1 DEX-M3			FAX31 FAX40 FAX55 FAXG1 FAXG2			S390 S690 S790	VANADIS23 VANADIS60	ASP2005 ASP2015 ASP2023 ASP2052 ASP2060	58~70	
	SKH40	HAP40			SPM30	DEX40			FAX38			S590	VANADIS30	ASP2030		



熱間鍛造金型用鋼のブランド対照表

分類	JIS 他	会社名											使用硬さ (HRC)		
		日立金属	愛知製鋼	関東特殊鋼	山陽特殊鋼	大同特殊鋼	NKK	日本高周波鋼業	不二越	三菱製鋼	理研製鋼	ポーラー		ウッデホルム	
合金工具鋼	SKD4	YDC	SKD4		QD4			KD4	HDS4	HD25		W105		40~50	
	SKD5	HDC	SKD5					KD5	HDS5	HD26		W100		45~50	
	SKD6							KD6	HDS6	HD21A		W300		40~52	
	SKD6(改)												VIDER	40~52	
	SKD61	DAC	SKD61		QD61	DHA1		KDA	HDS61	HD21AX		W302		40~52	
	SKD61(改)	DAC3 DAC10 DAC55 DAC-S DAC-MAGIC	AUD61		QDA61	DHA2 DH21 DH31-S DHA-WORLD DH31-EX		KDA1 KDA1S KDAMAX					W303 W403	ORVAR 2M	40~52
		DAC3 DAC10 DAC55	AUD61		QDA61	DH31-S		KDA1 KDA5 KDAMAX						ORVAR-S DIEVER	40~52
	SKD62	DBC	SKD62		QD62	DH62		KDB			HD21B				40~52
	SKD7	YEM	AUD7		QD10	DH72		KDH1			HD23		W320		40~50
	SKD7(改)	DAC40 YEM-K	AUD71 AUD72		QDH	DH71 DH32 DH73				HDN1	HD23M				40~50
	SKD8	MDC	SKD8			DH41		KDF			HD27				40~50
	SKD8(改)	MDC-K DAC45				DH42		KDF2			HD28 (NT200)				40~50
	SKT4	DM	SKT4A		QT41	GFA		KTV			HD13T		W500		38~45
	SKT4(改)	YHD26 YHD28	AUD60		QDT	GF78		KTV2			HD14M HD20B				38~45
折出硬化鋼	YHD3	AUD91 MPH-K			DH76					HD22B				-	
その他	FDAC E-DAC			QF5	DH2F DHA-FX DHA-Thermo		KAP90F					W335 W303 W321		-	
高速度工具鋼	SKH51	YXM1			QH51			H51	SKH9		RHM1	S600		55~63	
	SKH51(改)								SKH9D					57~65	
	SKH55	YXM4						HM35	HM35		RHM5	S705		57~62	
	マトリックス系	YXR33	QHZ			DRM1 DRM2 DRM3			DURO-FZ DURO-F1			W360		53~65	

ダイキャスト金型用鋼のブランド対照表

分類	JIS 他	会社名											使用硬さ (HRC)	
		日立金属	愛知製鋼	関東特殊鋼	山陽特殊鋼	大同特殊鋼	NKK	日本高周波鋼業	不二越	三菱製鋼	理研製鋼	ポーラー		ウッデホルム
一般用	SKD61	DAC	SKD61		QD61	DHA1		MFA				W302		40~50
	SKD6(改)	DAC10 DAC-S			QDA61			KDA1					ORVAR-S DIEVER	40~50
	SKD6							KD6				W300		40~50
	快削プリハードン	FDAC			QD6F	DH2F		KDA SS						38~42
	その他					DHA-WORLD		KDA5 MFA-K						-
大物用	SKD61(改)	DAC55 DAC-MAGIC	AUD61		QDN	DH31 DH31-EX DHA-WORLD		MFA-H					ORVER-S DIEVER	44~48
	その他							MFA-KH				W303		-
精密用	SKD7	YEM	AUD7		QD10	DH72		KDH1				W320		42~50
	SKD7(改)	DAC40			QDH			KDW				W321		42~50
	その他	DAC10 DAC55 DAC-MAGIC				DH21 DH33		MFA-K	DURO-N1					48~53
高融点用	SKD8	MDC				DH41		KDF						42~50
	SKD8(改)	DAC45				DH42		KDF2						47~51
	その他													-
特殊用	マルエージング鋼	YAG	AMAR		QM300	MAS1C		KMS18-20	EXE0-M21			V720		50~57
	SKH51	YXM1			QH51			H51	SKH9		RHM1	S600		55~60
	マトリックス系	YXR33	QHZ			DRM1		KDW2	MDS1					52~58
	SCM系	HPM2 HPM7				PX5 PXA30		KPM30					IMPAX HOLODAX	30~33
	その他												HOTVAR	30~40



■プラスチック金型用鋼のブランド対照表

分類	JIS 他	会 社 名														硬さ (HRC)			
		日立 金属	愛知 製鋼	川崎 製鉄	神戸 製鋼所	山陽 特殊鋼	大同 特殊鋼	NKK	日本 高周波 鋼業	新日本 製鐵	三菱 製鋼	住友 金属 工業	中部 鋼板	トビー 工業	日本 製鋼所		ポラー ー	ウッデ ホルム	
アズ・ ロール鋼	SC系			RMS	S50C S55C				S45C~ S55C (厚板)	S45C~ S55C (厚板)			S50C	S50C				13	
	SCM系			SCM435	SCM435			SCM415										13	
				SCM440	SCM440			SCM435										13	
								SCM440		SCM440			SCM440					13	
プリハードン 鋼	SC系		AUK1	RMS53CN	KTSM2A	PC55	PDS1		KPM1	N-PUK30	MT50C	SD10			NPD2		UHB11	13	
				RMS55CN	KTSM21								SD17			NPD2S			13
					KTSM22								SD21						13
					U2000														13
	SCM系 (AISIP 20系)		AUK11	RMS-P28 RMS-30PH	KTSM3A KTSM31 U3000	PCM28	PDS3			N-PUK40			SD61 SD90 SD200			NPD3 NPD3S		CALMO	28
		SCM系 (改)	HPM7			KTSM3M		PX5		KPM30		MU-M	SD70			NPD3MF	M200	PLAMAX	33
	HPM7					U3500		PXA30		KPM30		MU-P	SD100		NPD3M	M238	IMPAX	33	
	HPM7									KPM30		MT24T			NPD5S			33	
	SUS系 (快削)								S-STAR		KSP1					NPD7	MAX0		33
									D-ATAR								MAX1	STAVAX	33
		HPM77							G-STAR								MAX4		33
																	MAX3	RoyAlloy	33
	SUS系	PSL HPM38				QSH6	NAK101		U630						NPD8	M303	STAVAX	35	
	SKD61 (改)	FDAC	AUD61			QD6F	DH2F		KDA						NPD5	W302	ORVAR	40	
AISIP21	HPM1			KTSM40EF	PCM40	NAK55		KAP65		MEX41						M261	NIMAX	40	
	HPM- MAGIC			KTSM40E	PCD40S	NAK80		KAP88								M461		40	
	CENA1 HPM-PRO					NAX- PRM												40	
焼き入れ 焼き戻し鋼	SKD11 (改)	HPM31	AUD11		KAD181 (粉末)	QCM8	PD613		KD21						NPD6	K105	CALMAX	60	
		ZDP4 (粉末)			KAD181 (粉末)				KD11S						NPD6MA	K110	RIGOR	60	
		ZCD-M			KAD181 (粉末)										NPD6MB	K340	VANADIS4	60	
					KAD181 (粉末)													VANADIS6	60
		HAP5R			KAD181 (粉末)													VANADIS10	60
	SUS系	SUS440C			KAS440 (粉末)	QPD5	SUS440C		KSP2								M340	ELMAX (粉末)	57
					KAS440 (粉末)	SPC5 (粉末)	DEX-P1 (粉末)		KSP3								N685	ELMAX (粉末)	57
					KAS440 (粉末)	SPC5 (粉末)	DEX-P1 (粉末)										N690	ELMAX (粉末)	57
					KAS440 (粉末)	SPC5 (粉末)	DEX-P1 (粉末)										N695	ELMAX (粉末)	57
		HPM38				QSD40M	S-STAR		KSP1								MAX1	STAVAX	52
		HPM38S					D-STAR										MAX4	RAMAX S	52
時効処理鋼	マルエージ ング鋼	YAG		HT210		QM300	MASIC		KMS18-20		DMG シリーズ	SMA200				V720		53	
									KMS18-20		DMG シリーズ	SMA245				V721		53	
	SUS系 非磁性鋼	ASL407																	
その他		HPM75				QSD15									JUS289S			43	
		HIT51,52,55 (Al系)															PREMO	-	
		HIT71,72,75 (Cr系)															PRODAX	-	
	HIT71,72,75 (Cr系)																SUPER PRODAX (Al系)	-	



鋼のロックウェルC硬さに対する近似的換算表

(HRC) ロックウェル Cスケール 硬さ ^{注1)}	(HV) ピッカース 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	タンクステン 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	15 N スケール 荷重 147.1N	30 N スケール 荷重 294.2N	45 N 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	2079	55
54	577	—	534	543	78.0	—	66.1	87.4	72.0	59.8	72	2010	54
53	560	—	519	525	77.4	—	65.4	86.9	71.2	58.6	71	1952	53
52	544	500	508	512	76.8	—	64.6	86.4	70.2	57.4	69	1883	52
51	528	487	494	496	76.3	—	63.8	85.9	69.4	56.1	68	1824	51
50	513	475	481	481	75.9	—	63.1	85.5	68.5	55.0	67	1755	50
49	498	464	469	469	75.2	—	62.1	85.0	67.6	53.8	66	1687	49
48	484	451	455	455	74.7	—	61.4	84.5	66.7	52.5	64	1638	48
47	471	442	443	443	74.1	—	60.8	83.9	65.8	51.4	63	1579	47
46	458	432	432	432	73.6	—	60.0	83.5	64.8	50.3	62	1530	46
45	446	421	421	421	73.1	—	59.2	83.0	64.0	49.0	60	1481	45
44	434	409	409	409	72.5	—	58.5	82.5	63.1	47.8	58	1432	44
43	423	400	400	400	72.0	—	57.7	82.0	62.2	46.7	57	1383	43
42	412	390	390	390	71.5	—	56.9	81.5	61.3	45.5	56	1334	42
41	402	381	381	381	70.9	—	56.2	80.9	60.4	44.3	55	1294	41
40	392	371	371	371	70.4	—	55.4	80.4	59.5	43.1	54	1245	40
39	382	362	362	362	69.9	—	54.6	79.9	58.6	41.9	52	1216	39
38	372	353	353	353	69.4	—	53.8	79.4	57.7	40.8	51	1177	38
37	363	344	344	344	68.9	—	53.1	78.8	56.8	39.6	50	1157	37
36	354	336	336	336	68.4	(109.0)	52.3	78.3	55.9	38.4	49	1118	36
35	345	327	327	327	67.9	(108.5)	51.5	77.7	55.0	37.2	48	1079	35
34	336	319	319	319	67.4	(108.0)	50.8	77.2	54.2	36.1	47	1059	34
33	327	311	311	311	66.8	(107.5)	50.0	76.6	53.3	34.9	46	1030	33
32	318	301	301	301	66.3	(107.0)	49.2	76.1	52.1	33.7	44	1000	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) 今泉英明・斉藤益生・岡田一公 (1998)
「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」、『型技術』1998年8月、日刊工業新聞社
- 2) 今泉英明・斉藤益生・岡田一公 (2000)
「コーティング超硬 エンドミルによる高能率加工」、『型技術者会議論文集』2000年6月
- 3) 今泉英明 (2007)
「金型加工におけるエンドミルの技術動向」、『月刊トライボロジー』2007年3月 No.235、新樹社
- 4) 今泉英明 (2000)
「エンドミルの高速切削」(シンポジウム 高速切削の現状と課題 2000年3月講演資料)
- 5) 今泉英明 (2006)
「高能率、高精度加工を実現する最新工具情報」(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)
- 6) 今泉英明・他 (1988) 例えば「波状外周切れ刃と切削特性」『エンドミルのすべて』、大河出版
- 7) 松岡甫篁・安斎正博・高橋一郎 (2002)「はじめての切削加工」工業調査会
- 8) 吉田嘉太郎・時松光編著 (2003)『ものづくり機械工学 第2版』日刊工業新聞社
- 9) 中山一雄 (1978)『切削加工論』コロナ社
- 10) 切削油技術研究会 (1988)『フライス加工ハンドブック』切削油技術研究会
- 11) 株式会社MSTコーポレーション「ツールホルダ基礎知識」(技術資料)
- 12) 岩本晃二 (2007)「コーティング基礎講座」
(日本トライボロジー学会第3種研究会「エコマシニングとトライボロジー」第7回研究会 2007年7月講演資料)
- 13) 今泉英明 (2011)「エンドミルの最新技術動向」、『精密工学会誌 Vol.77』2011年 No.8
- 14) 今泉英明 (2010)
「切削工具の基礎のきそ エンドミル編 (5回連載)」、『機械技術』2010年7月～12月、日刊工業新聞社
- 15) 日本工具工業会 (2015)『切削工具の手引書』2015年5月、日本工具工業会
- 16) 機械振興協会技術研究所『加工技術データファイル』機械振興協会技術研究所
- 17) 藤井義也・岩部洋育 (1975)「エンドミルによる輪郭加工精度」、『精密機械』1975年3月 41巻3号



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ー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）工具ではインサート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、所定のインサート、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だと、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眼鏡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。
- ・工具を研削するときは、局所排気装置の設置をおこない保護マスク、保護眼鏡を着用下さい。
- ・工具の再研削、追加加工研削を行うと粉塵などが発生します。これらを飲み込んだり、吸引したりすると身体に有害です。
- ・コバルトおよびその無機化合物は、特定化学物質に指定されています。通常の使用における工具は適用除外されますが、物理的な変化を加える（再研削、追加加工）職場では、特定化学物質障害予防規則（特化則）に従った取り扱いをする必要があります。

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。その他の詳細については、当社までお問い合わせ下さい。



shaping your dreams

本社
〒442-8543 愛知県豊川市本野ケ原三丁目22番地 TEL(0533)82-1111
E-mail: cs-info@osg.co.jp Web: https://www.osg.co.jp/

東日本営業部
〒140-0002 東京都品川区東品川4-12-6
品川シーサイドキャナルタワー 19階 TEL(03)5715-2966

西日本営業部
〒550-0013 大阪府大阪市西区新町2-4-2 405号
TEL(06)6538-3880

アプリケーション営業部
〒451-0051 愛知県名古屋市西区則武新町3-1-17
BiZrium名古屋 4階 TEL(052)589-8320

仙台	TEL (022) 390-9701	三河	TEL (0566) 62-8286
郡山	TEL (024) 991-7485	トヨタ	TEL (0533) 82-1145
茨城	TEL (029) 354-7017	名古屋	TEL (052) 589-8320
両毛	TEL (0270) 40-5855	岐阜	TEL (058) 259-6055
宇都宮	TEL (028) 651-2720	京滋	TEL (077) 553-2012
新潟	TEL (025) 288-3888	大阪	TEL (06) 4308-3411
東京	TEL (03) 5715-2966	明石	TEL (078) 927-8212
八王子	TEL (042) 645-5406	金沢	TEL (076) 268-0830
厚木	TEL (046) 230-5030	岡山	TEL (086) 241-0411
諏訪	TEL (0266) 58-0152	広島	TEL (082) 532-6808
上田	TEL (0268) 28-7381	四国	TEL (087) 868-4003
静岡	TEL (054) 283-6651	九州	TEL (092) 504-1211
浜松	TEL (053) 461-1121	北九州	TEL (093) 922-8190
豊川	TEL (0533) 82-1145	熊本	TEL (096) 386-5120

「工具の技術的なご相談は…」 コミュニケーションダイヤル

0120-41-5981 土日祝日、会社休日を除く

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

安全にお使いいただくために

- 工具を使用する時は、破損する危険があるので、必ずカバー・保護眼鏡・安全靴等を使用して下さい。
- 切れ刃は素手で触らないで下さい。
- 切りくずは素手で触らないで下さい。
- 工具の切れ味が悪くなったら使用を中止して下さい。
- 異常音・異常振動が発生したら、直ちに使用を中止して下さい。
- 工具には手を加えないで下さい。
- 加工前に工具の寸法確認を行って下さい。

OSG代理店

Copyright © 2019 OSG Corporation. All rights reserved.

- 製品については、常に研究・改良を行っておりますので、予告なく本カタログ掲載仕様を変更する場合があります。
- 本書掲載内容の無断転載・複製を禁じます。

T-8.web(DN)
23.12

オーエスジー株式会社