

エンドミルの基礎



目次

1. 切削加工と切削工具
2. エンドミルの加工
3. 切削作用と切削時の現象

目次

1. 切削加工と切削工具

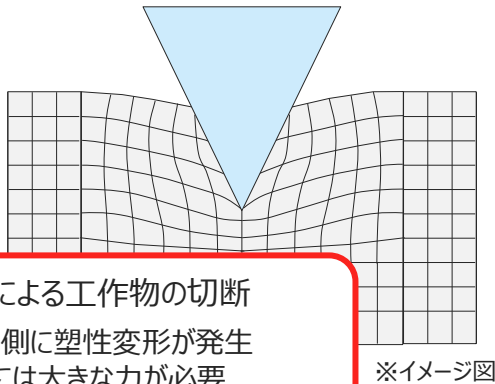
2. エンドミルの加工

3. 切削作用と切削時の現象

切削加工とは何か

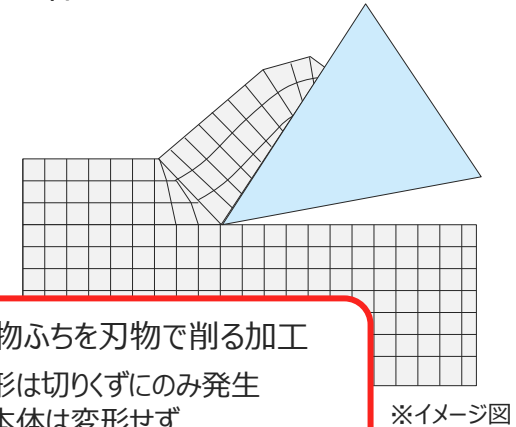
切削加工とは？

刃物を加工物に当てて動かし、その内部に局部的に発生する大きな応力で破断を起こさせることによって、不要な部分を切りくずとして分離し、所望の形状の新表面をもった製品を作ること。



a) たがねによる工作物の切断

- ・切断部両側に塑性変形が発生
- ・押し込みには大きな力が必要



b) 工作物ふちを刃物で削る加工

- ・塑性変形は切りくずにのみ発生
- ・工作物本体は変形せず

切削加工の対象

・金属材料 ・木材 ・プラスチック など・・・

切削加工の特徴

切りくずを出さない工作法に比べ、比較的高い工作精度が得られる。

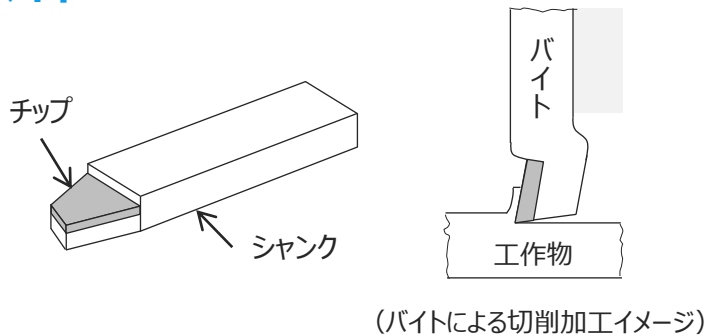
切削加工技術の急速な進歩・多様化



**切削加工を有効に活用するためには、
切削という現象への体系的な理解が重要！**

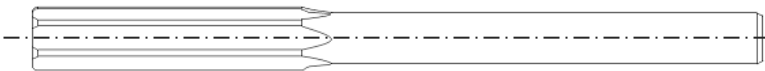
切削加工に用いられる工具

バイト



旋盤・平削り盤・形削り盤・中ぐり盤などに用いられる切削工具

リーマ



ドリルなどで開けられた穴の内壁を滑らかで精度のよいものに仕上げるための切削工具

《各工具の特徴》

切れ刃の枚数が少ない工具→製作費・再研削費が安価

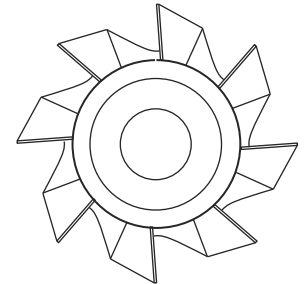
複数の切れ刃を持つ工具→高い切削能率



経済的・能率的な切削加工のためには、各工具の特徴はもちろん、切削作用への十分な理解が必要

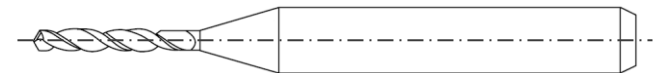
フライス

円筒・円錐の外周や端面に多数の切れ刃をもった回転切削工具

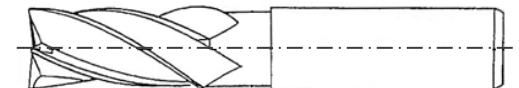


ドリル

穴あけに用いる切削工具
切れ刃は先端のみ

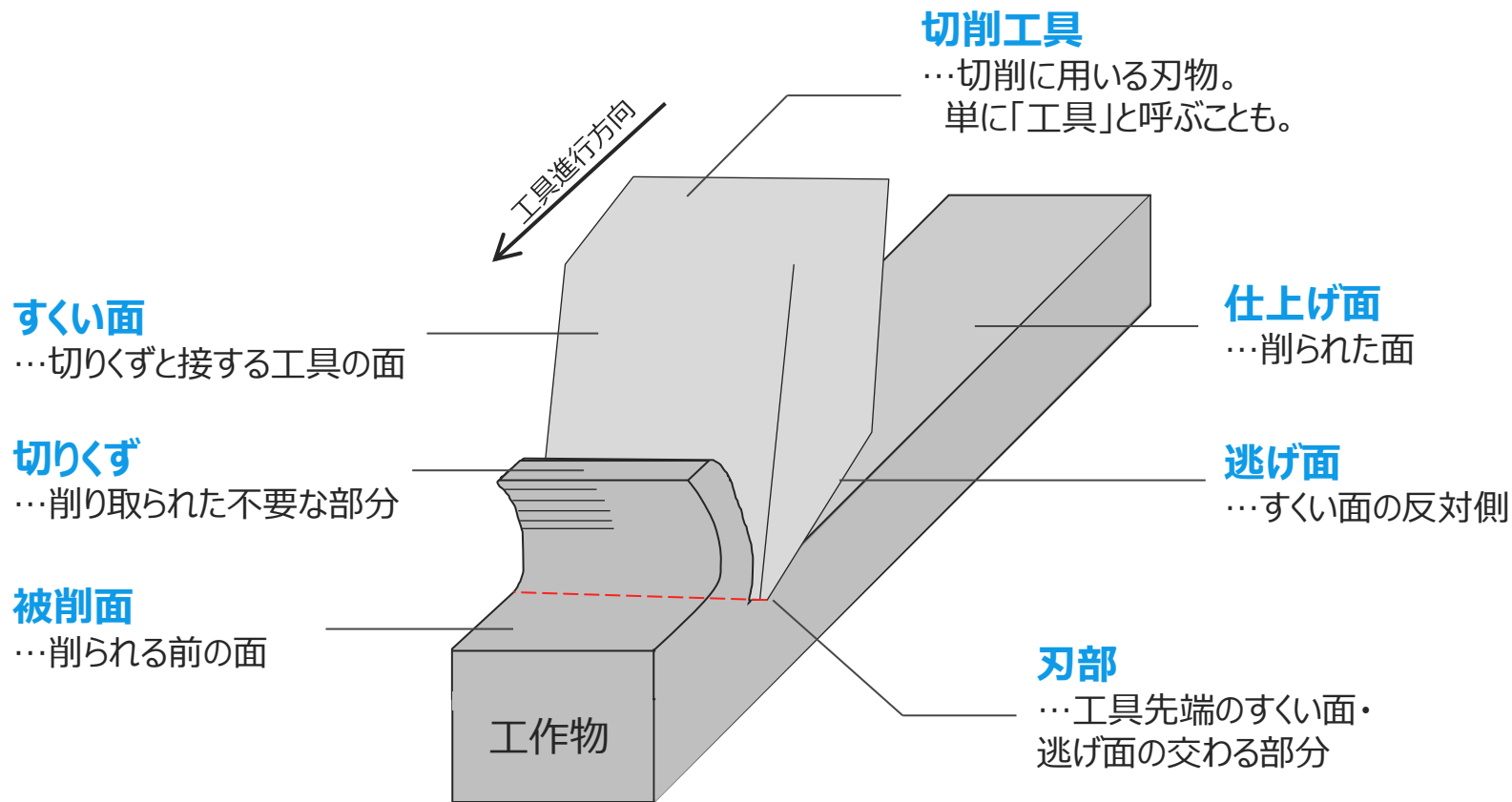


エンドミル

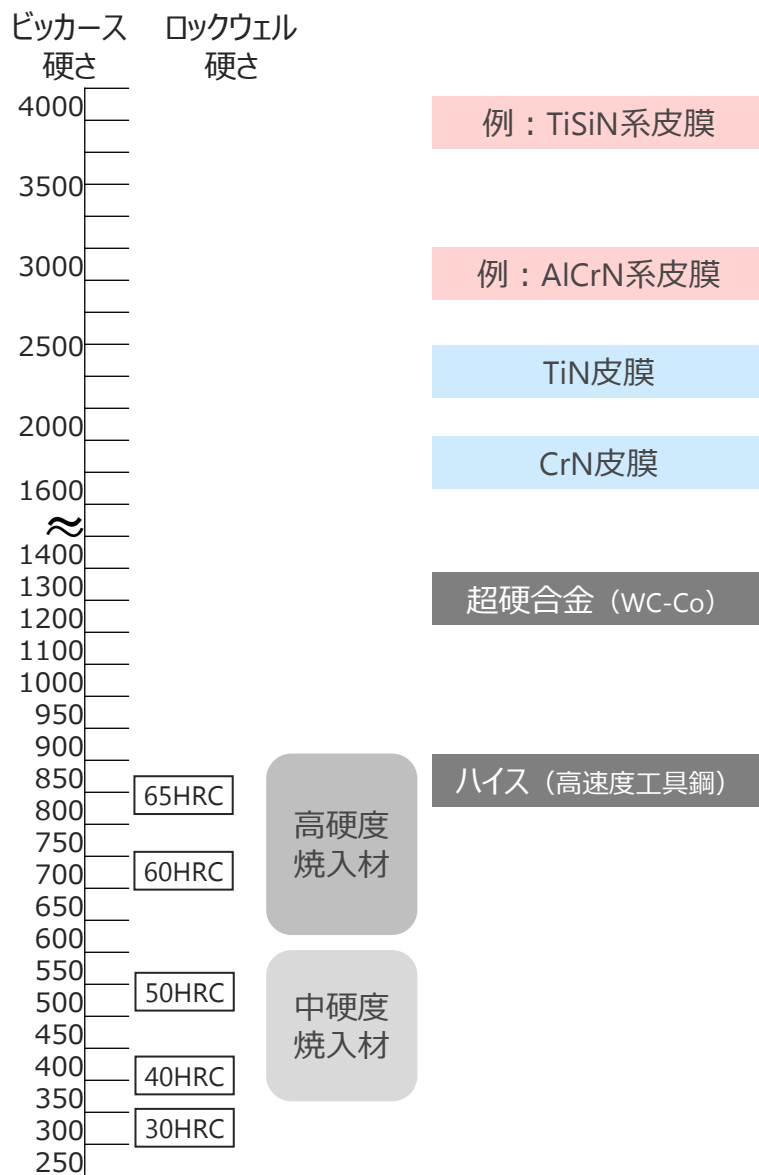


外周や端面にも刃がある多機能工具。1本の工具で外周削りから曲面削り、穴加工まで可能

切削加工に関連する部分と名称



被削材 vs. 工具材 硬さ比較



•被削材に対して、ビッカース硬さ換算で3倍（4倍）以上の硬さが工具材に必要

•超硬合金で切削できるのは30HRC程度の被削材まで。40HRCは少し厳しい。ハイスでは焼入材の切削は困難。



皮膜をコーティング（工具母材の硬さを補う）

コーティング工具材硬度 $\geq$ 被削材硬度 $\times 4$ とすると、

40HRC焼入材 $\Rightarrow$ 工具材硬さは1600Hv以上必要
CrN（少し難しい） TiN（切削可能）

50HRC焼入材 $\Rightarrow$ 工具材硬さは2000Hv以上必要
TiN（実際には切削困難） AlCrN系（切削可能）

65HRC焼入材 $\Rightarrow$ 工具材硬さは3300Hv以上必要
TiSiN系コートで切削可能

コーティング皮膜 —コーティングの目的—

工具の長寿命化、
切削性の向上のために・・・



コーティング技術の利用

工具表面を被膜で覆うことで
新たな特性を付与

コーティングに求められる性能

硬度

工作物に対して刃を立たせるための硬さ

耐熱性

切削時の高温でも変質しない耐熱性

靱性

刃の欠けを食い止める靱性（ねばさ）

潤滑性

切削時の摩擦を抑える潤滑性

コーティング方法

PVD法（Physical Vapor Deposition）

蒸発した金属と反応ガスを反応させ工具を被覆するコーティング。
比較的低温（500度以下）で処理できる。

CVD法（Chemical Vapor Deposition）

熱化学的反応によるコーティング。複雑形状でもコート可能だが、
処理温度が高温（900～1000度）のため工具素材によっては適用不可

コーティング皮膜 —実際のコーティング利用—

コーティングの種類

セラミックス系コーティング

高硬度、高耐熱性を有する被膜。被膜に別の元素を添加することで特性の変更も可能

ダイヤモンドコーティング

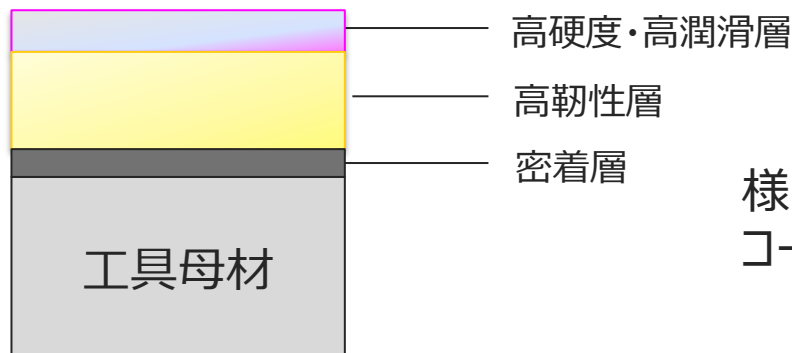
優れた硬さ、非鉄金属に対する対溶着性を有する被膜。

※炭素原子からなるコーティングは
鉄系材料には不向き

DLC (Diamond-Like Carbon) コーティング

平滑性・潤滑性に優れる炭素系被膜。ただし、ダイヤモンドのように硬くはない。

コーティングの多層構造化



様々な特性のコーティングを複数重ねることで、
コーティング被膜の高性能化を実現

**コーティングの特徴と用途を理解し使用することで、
工具寿命や切削性を向上させることができる。**

まとめ

切削加工とは

工作物のふちに近い部分に固い刃物を押し込み、切りくずとなる部分に塑性変形を起こさせて切り離す加工方法を切削加工という。

切削加工の利点

切削加工は幅広い材種を加工対象とでき、比較的高い工作精度が期待できる。

切削加工と工具

各工具の特徴を理解し、適切な用途で使うことが経済的・能率的な切削加工のために重要。

工具は被削材の3倍以上の硬さを有する必要がある。

目次

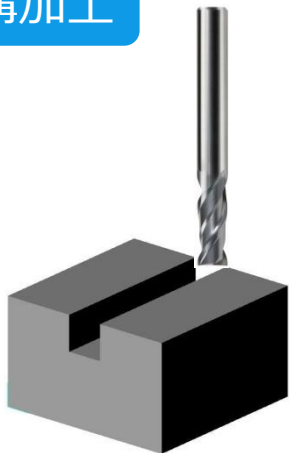
1. 切削加工と切削工具

2. エンドミルの加工

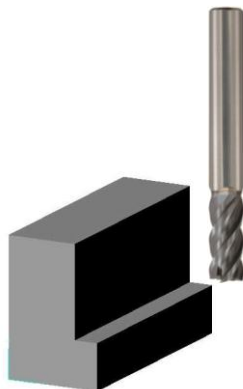
3. 切削作用と切削時の現象

エンドミル加工の種類

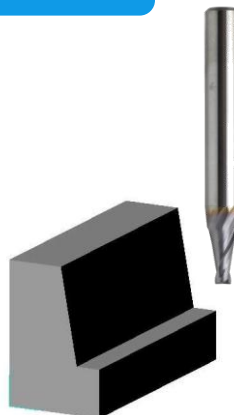
溝加工



側面加工



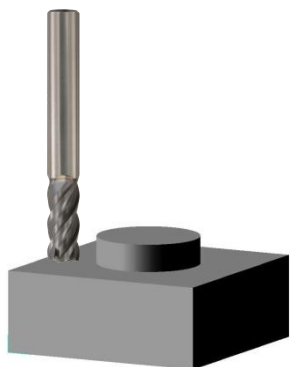
テーパ加工



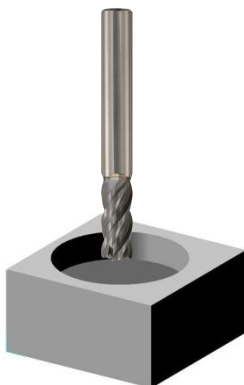
倣い加工



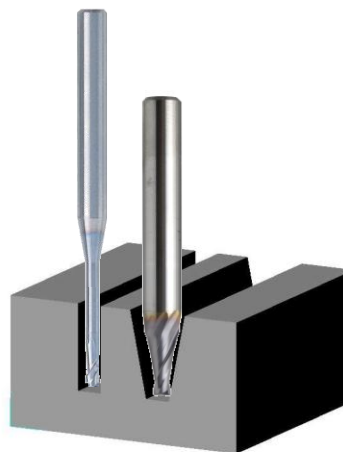
コンタリング加工



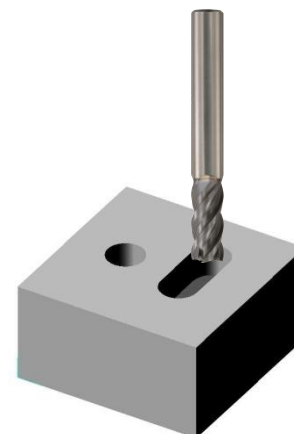
ポケット加工



リブ加工



座グリ加工



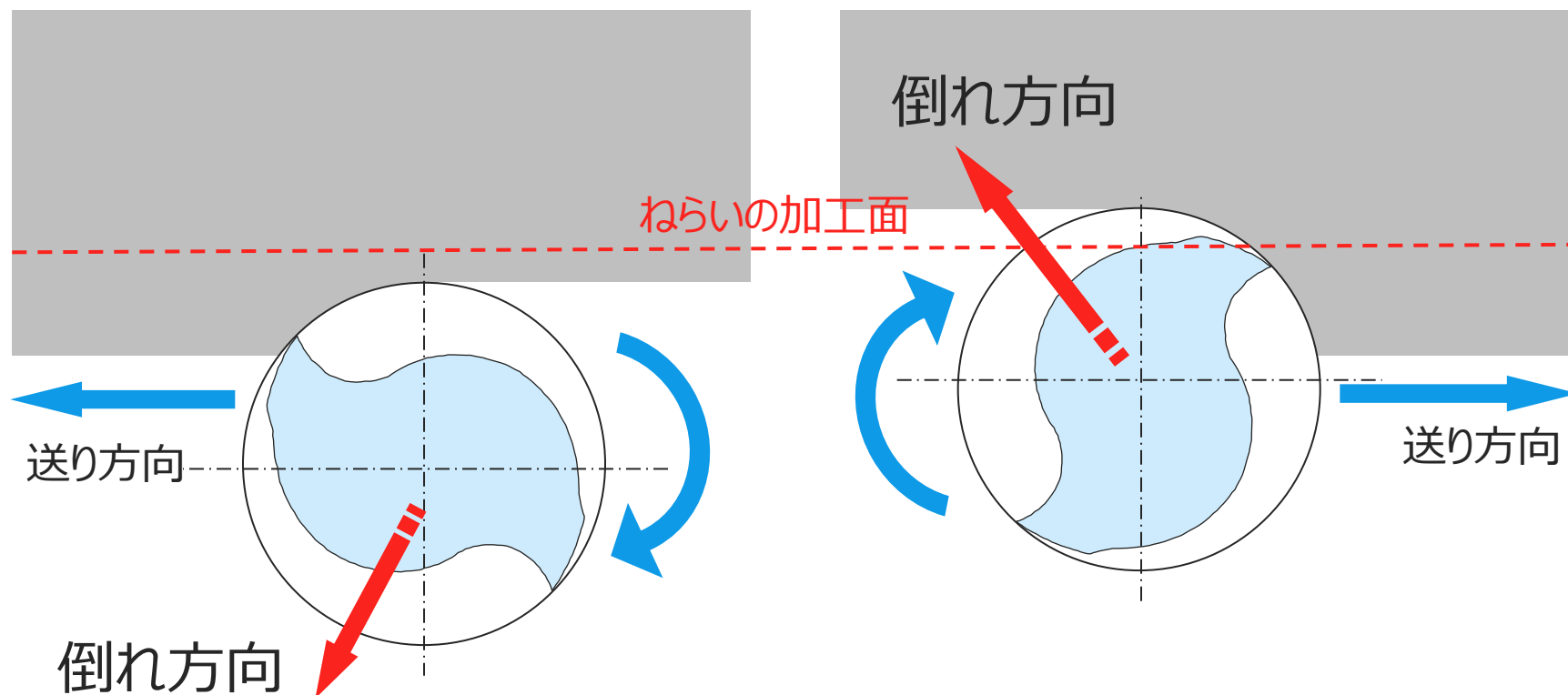
エンドミルの加工方法 ダウンカット VS. アップカット

基本的にダウンカットを推奨

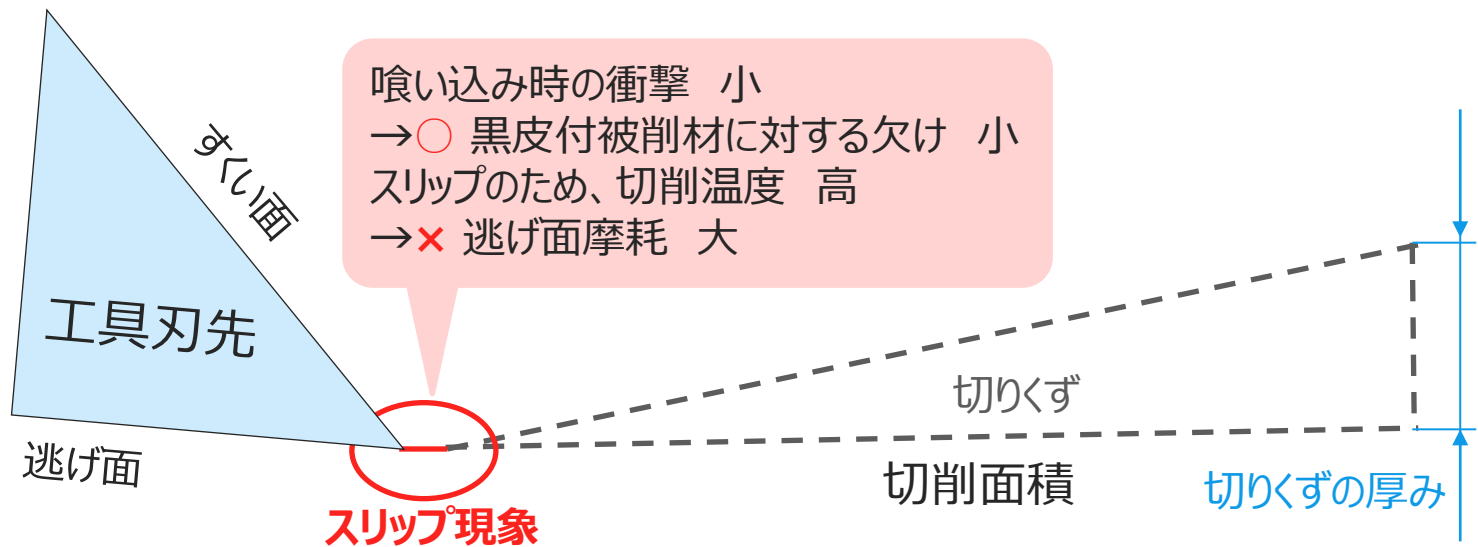
※一般に、金属加工全般では倒れ方向の他に加工面品位なども考慮して、ダウンカットを推奨しますが、樹脂系材料などでは、アップカットの方が加工面品位が優位となる場合があります。

ダウンカット 削り残し：再加工余裕あり

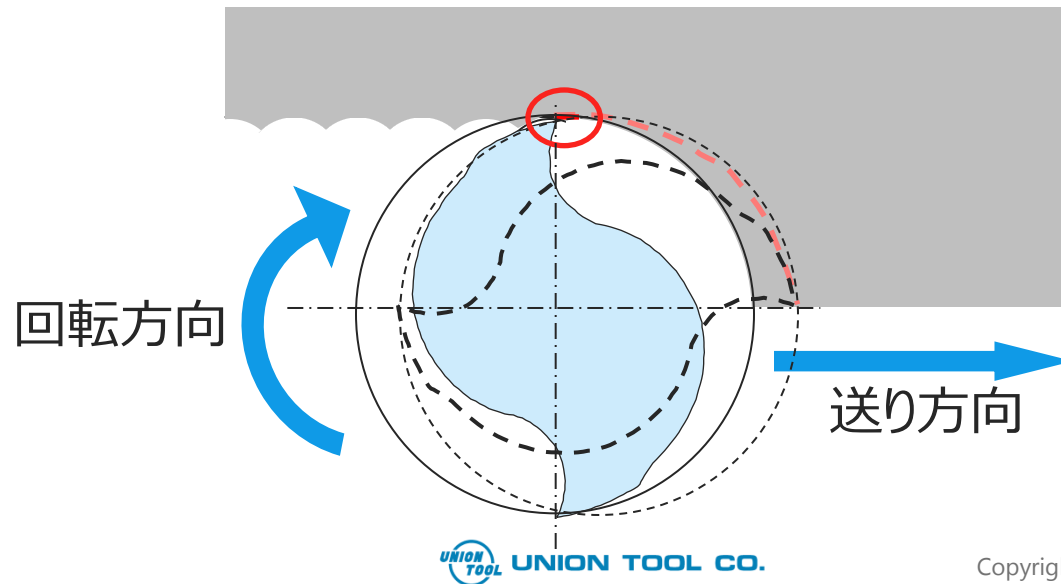
アップカット 削り過ぎる：再生不可能



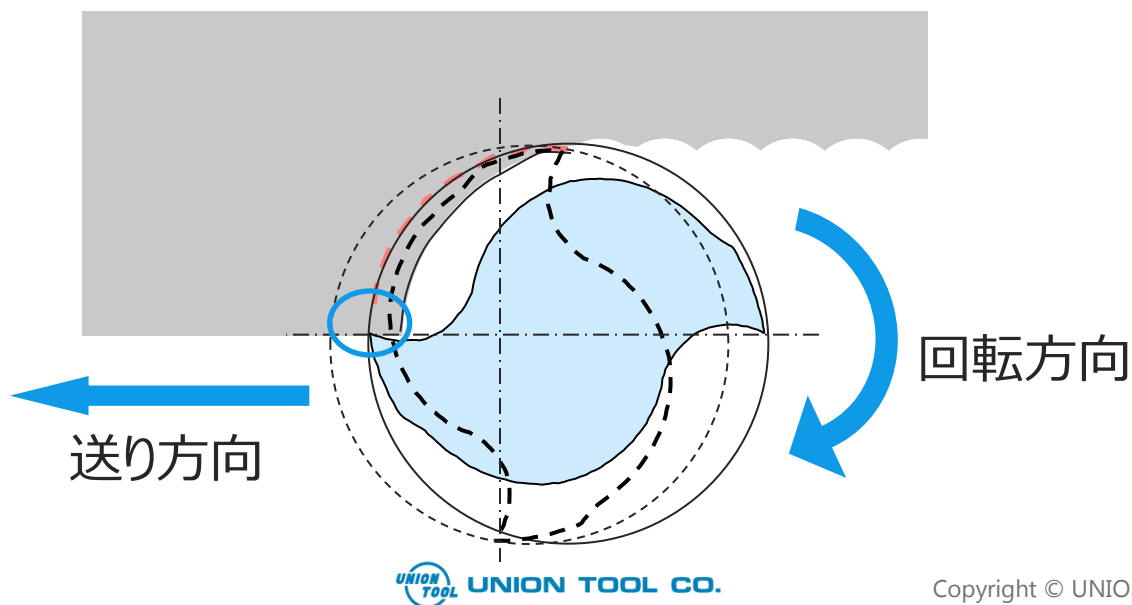
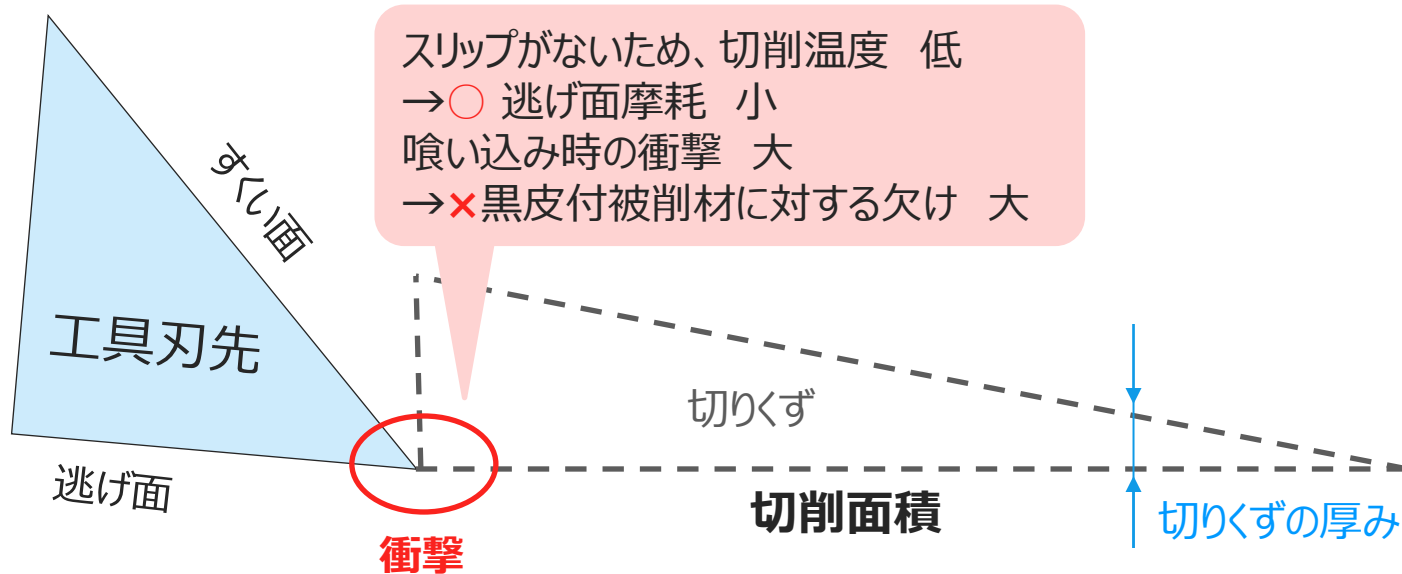
アップカット



※スリップ現象：切り込みが極小のため、被削材に刃が切り込まずに擦る様な加工になってしまう現象

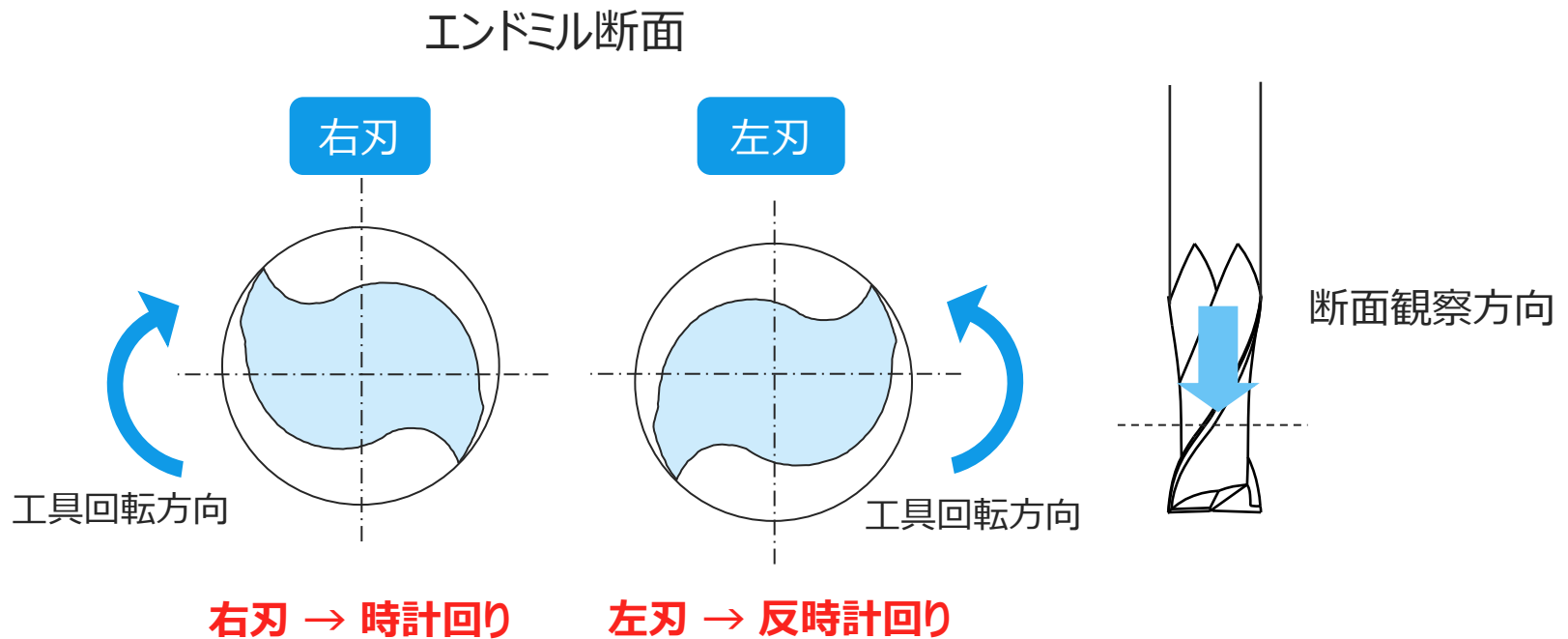


ダウンカット



右刃／左刃の違い

刃の向きによって切削の回転方向が変わる

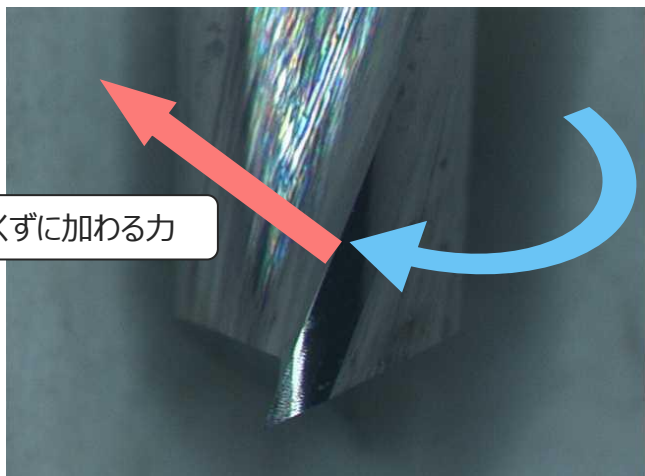


工具回転方向が時計回りで切削する工具を「右刃」と呼ぶ。
その反対で反時計回りで切削する工具を「左刃」と呼ぶ。
普通のエンドミルは「右刃」。「左刃」エンドミルは非常に珍しい。

右ねじれ／左ねじれの違い

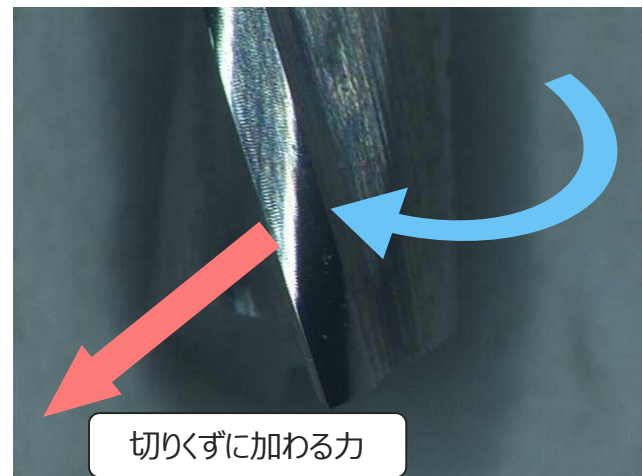
ねじれの向きによって切りくずの排出方向が変わる

右刃右ねじれ



上方向へ持ち上げられる

右刃左ねじれ



下方向へ押し下げられる

右刃右ねじれ：切りくずが上方向に排出される。

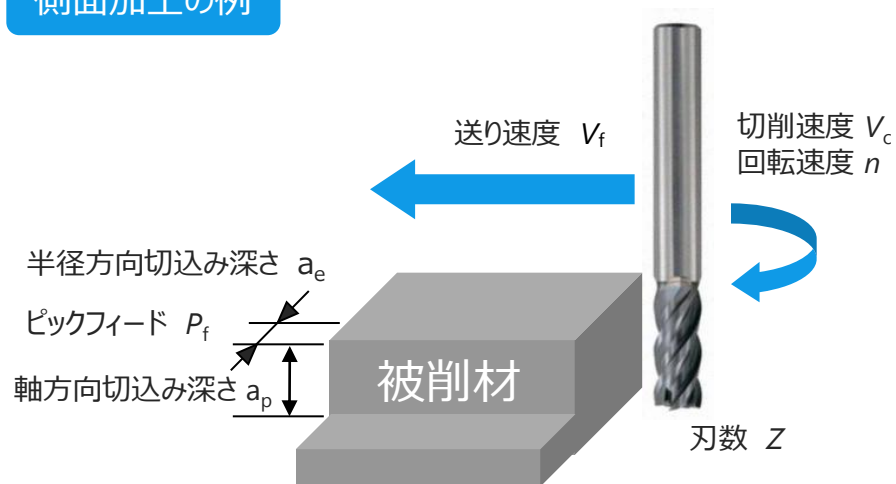
右刃左ねじれ：切りくずが下方向に排出される。

普通のエンドミルは「右刃右ねじれ」。「右刃左ねじれ」は珍しい。

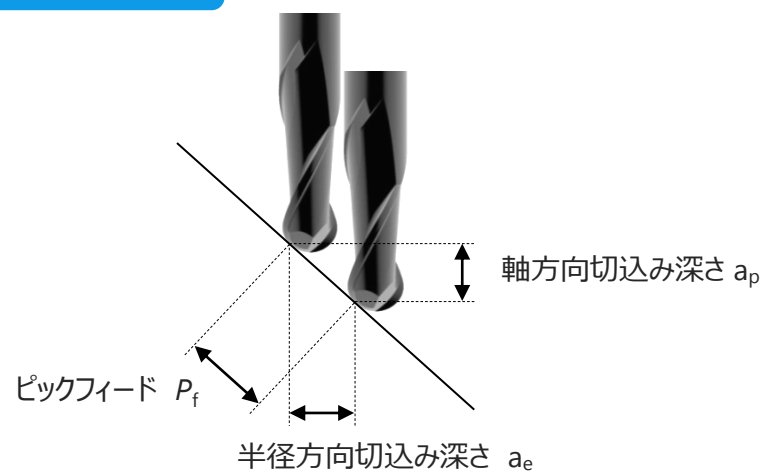
切削条件に用いられる項目 1

項目	従来表現	推奨表現	単位	意味
切削速度	V	V_c	m/min	円周上の1点が単位時間（1分間）あたりに移動する距離
回転速度	N	n	min^{-1}	1分間あたりに回転する数
送り速度	F	V_f	mm/min	単位時間（1分間）あたりに進行方向に移動する距離
1刃当たりの送り量	Sz	f_z	mm/t	次の刃が来るまでの横移動量
送り量	f	f	mm/rev	1回転あたりの横送り量（工具が1回転するときの横移動量）
刃数	Z	Z	(刃)	工具の切れ刃の数
軸方向の切込み深さ	Ad	a_p	mm	軸方向の切込み量
半径方向の切込み深さ	Rd	a_e	mm	横方向の切込み量
ピックフィード	Pf	P_f	mm	加工工具の移動量

側面加工の例



斜面加工の例



切削条件に用いられる項目 3

2. 一刃あたりの送り量 f_z [単位 : mm/t]

関係する値	送り速度 V_f [mm/min]	: 1分間あたりの横方向送り量 (機械軸移動量)
	回転速度 n [min^{-1}]	: 1分間あたりに回転する数 [回転する数/min (1分)] [min^{-1}]=[rpm: r evolutions p er m inute]
	刃数 z [t]	: 切れ刃の数

1回転あたりの横送り量 f [mm/rev]は? (※rev = revolution : 回転)

$$\begin{aligned} f &= \frac{V_f \text{ [mm/min]}}{n \text{ [rev/min]}} = \frac{V_f}{n} \left[\frac{\text{mm}}{\text{min}} \right] \times \left[\frac{\text{min}}{\text{rev}} \right] \\ &= \frac{V_f}{n} \text{ [mm/rev]} \end{aligned}$$

1刃あたりの送り量 f_z [mm/t]は?

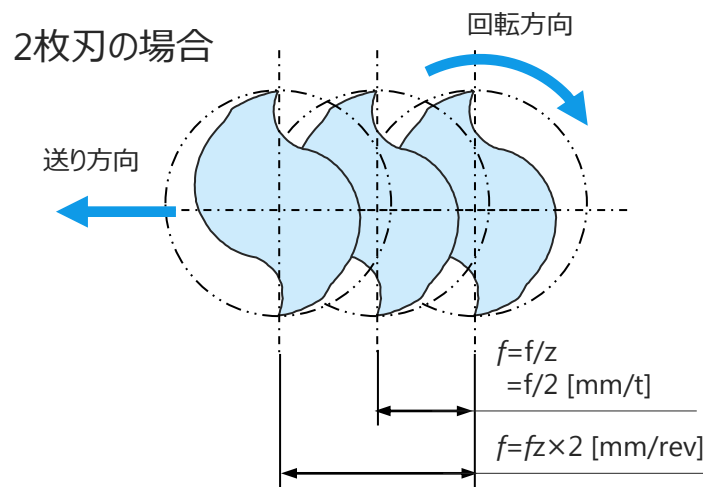
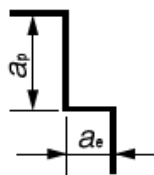
1回転あたりの横送り量を1回転あたりの切削に寄与する切れ刃の数、すなわち、刃数で除することで求められる。

$$f_z = \frac{f \text{ [mm/rev]}}{z} = \frac{V_f}{n \times z} \text{ [mm/t]}$$

その他の「切削条件に用いられる項目」

半径方向の切込み深さ : a_e

軸方向 (Z方向) の切込み深さ : a_p

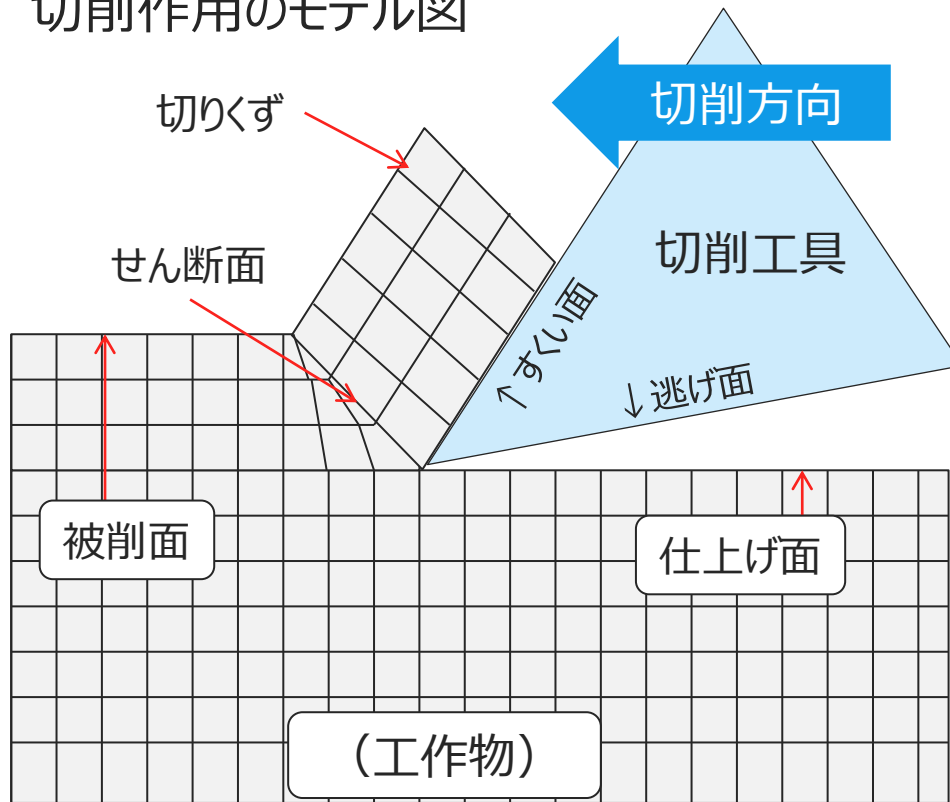


目次

1. 切削加工と切削工具
2. エンドミルの加工
3. 切削作用と切削時の現象

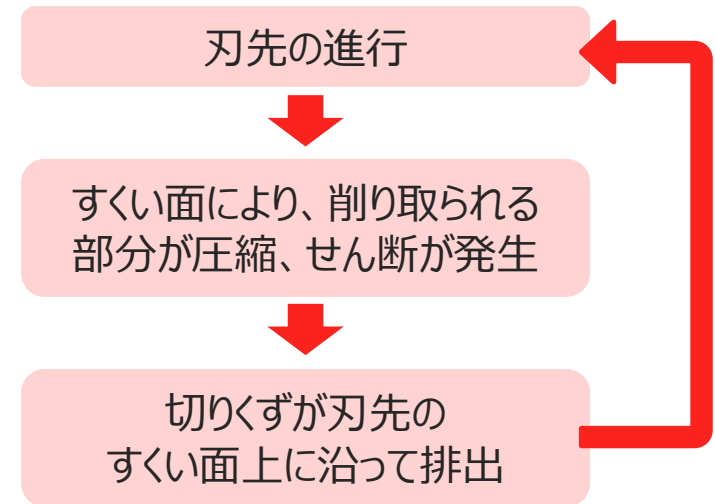
切削作用

切削作用のモデル図



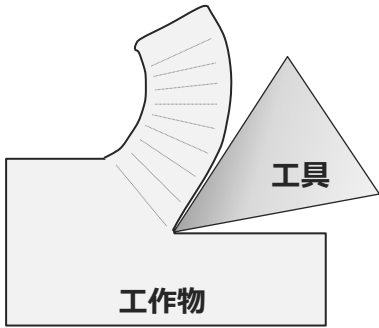
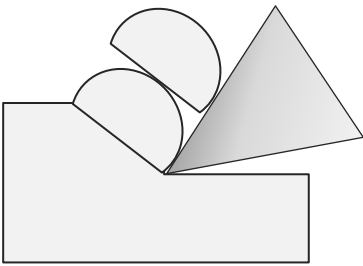
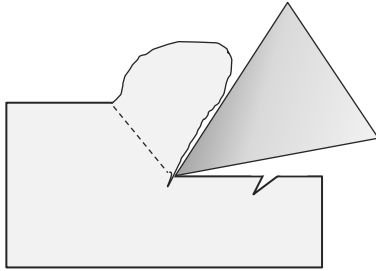
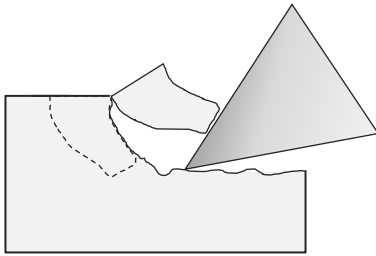
※工作物のふちに近い部分を削っている状態

切削の流れ



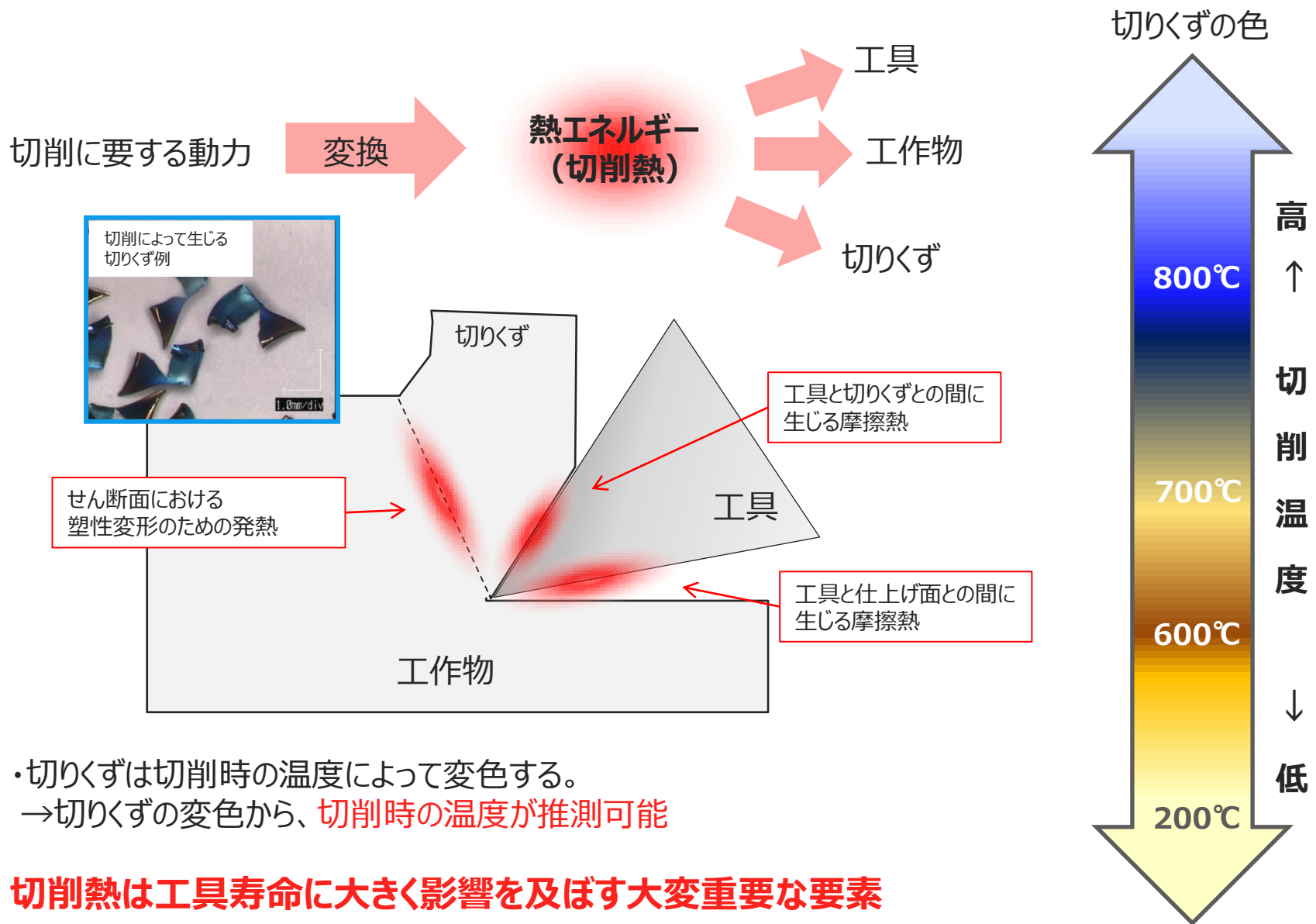
- 塑性変形は切りくずの方にのみ見られ、工作物にはほとんど変形が見られない。
- この切りくずは、切削時の条件によってさまざまな形態を示す。

切りくずの形態 —切りくずの形状—

	流れ形	せん断形	むしれ形	亀裂形
模式図				
特徴	・切りくずが連続的に刃部のすくい面上を流れるようにできる形。 ・刃部に加わる力に変動がなく、滑らかな仕上げ面が得られる。 ・もっとも望ましい形。 ※切りくずが適当な長さで折れないと、工具にからみつくなどして却って切削の妨げとなる →ある程度の長さで折断する工夫（工具形状、切削油材）	・切りくず部分の変形→せん断が繰り返される。 ・仕上げ面は流れ形より劣る。	・切りくず部分が工具上に堆積し、やがて大きな裂け目を生じてせん断を起こす。 ・仕上げ面には傷跡が残り、著しく悪い。	・切りくず変形時に亀裂が生じ、工作物と切り離されることで生成する。 ・亀裂が加工面を著しく悪化させる。
原因		・工作物の脆性が高い。 ・工作物の熱伝導率が低い。	・工作物の延性が高い。	・工作物の脆性が高い。
対策		・切削速度を上げる。	・切り込み深さを浅くし、切削速度を上げる。	・切削速度を上げ、1刃あたりの送り量を下げる。

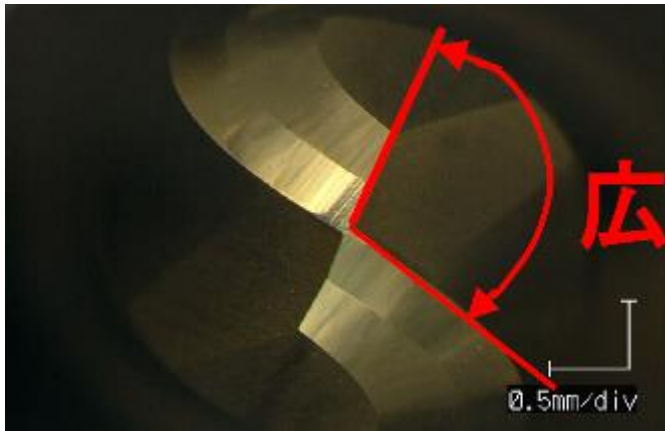
切りくずの状態は、どのような切削が行われたかを知るための情報源

切りくずの形態 —熱の発生と切削温度—

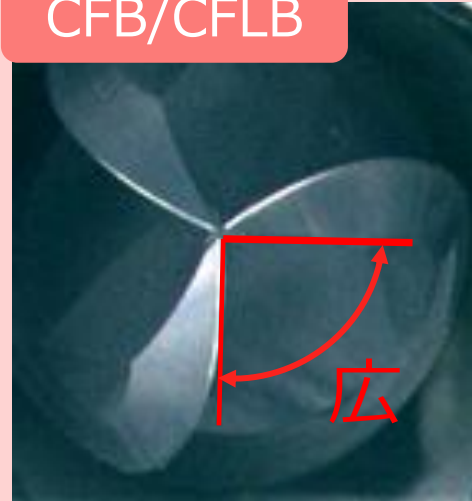


工具形状と切りくずの違い

2枚刃

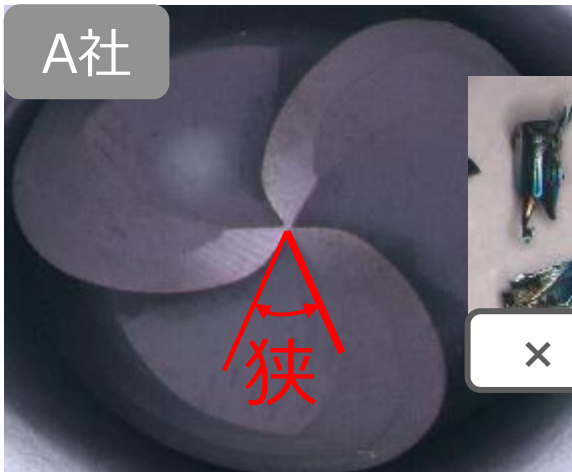


CFB/CFLB



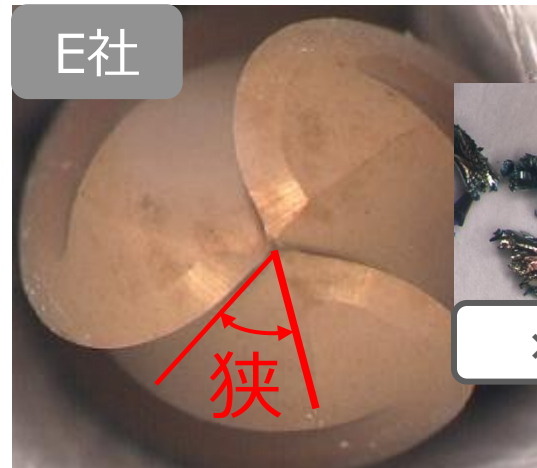
○ 理想形

A社



× 圧縮変形

E社



× カール

加工条件の設定

工具損傷を抑えつつ切削能率を上げるためには・・・

切削速度（工具回転速度）

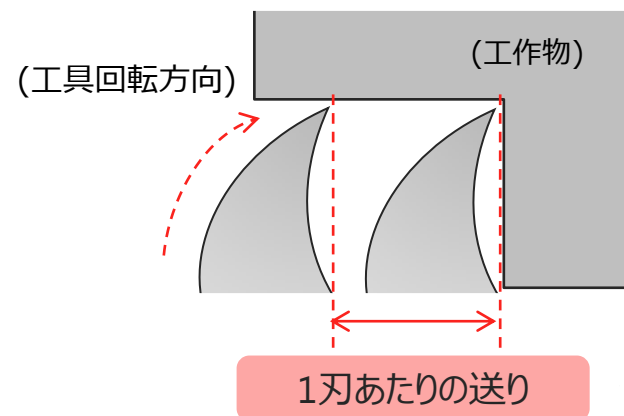
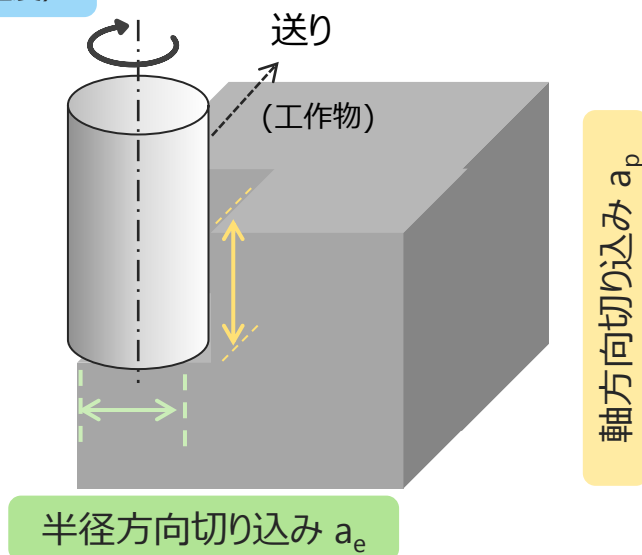
軸方向切り込み a_p

1刃あたりの送り

半径方向切り込み a_e

どの要素を変えるべきか？

切削速度（工具回転速度）



事例紹介

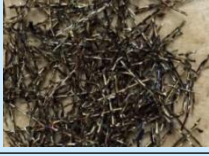
工具：HMS 6100-2200（直径φ10、刃長22）

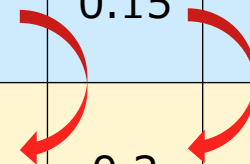
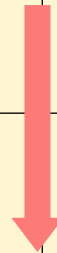
被削材：SKH51（63HRC）

クーラント：エアブロー 加工内容：側面加工



HMS SKH51 加工条件最適化

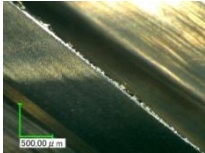
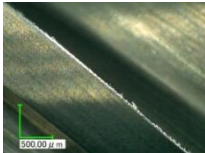
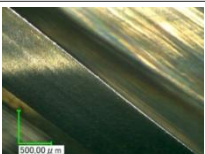
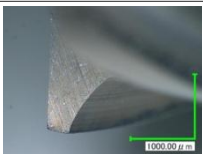
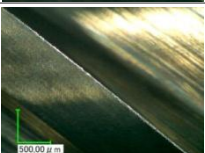
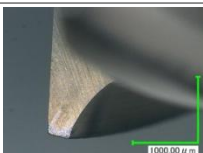
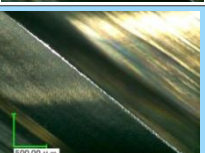
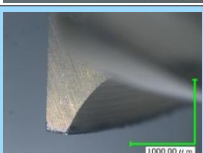
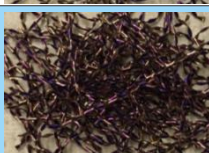
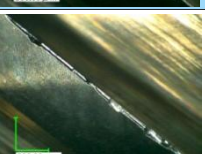
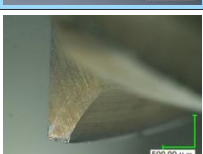
	切りくずの状態	n min ⁻¹	切削速度 m/min	Vf mm/min	1刃当たり送り mm/t	Ap mm	Ae mm	能率 mm ³ /min
条件1		4000	125.6	1350	0.0563	10	0.15	2025
条件2		3000	94.2	1000	0.0556	10	0.15	1500
条件3		2000	62.8	675	0.0563	10	0.15	1013
条件4		2000	62.8	675	0.0563	20	0.2	2700
条件5		2000	62.8	1000	0.0833	20	0.2	4000
条件6		2000	62.8	1000	0.0833	20	0.4	8000



HMS SKH51 加工条件最適化

各加工条件の加工後工具

条件1～3は9000mm³加工後、
条件4～6は50000mm³加工後の状態を示す。（条件5で20分の加工時間）

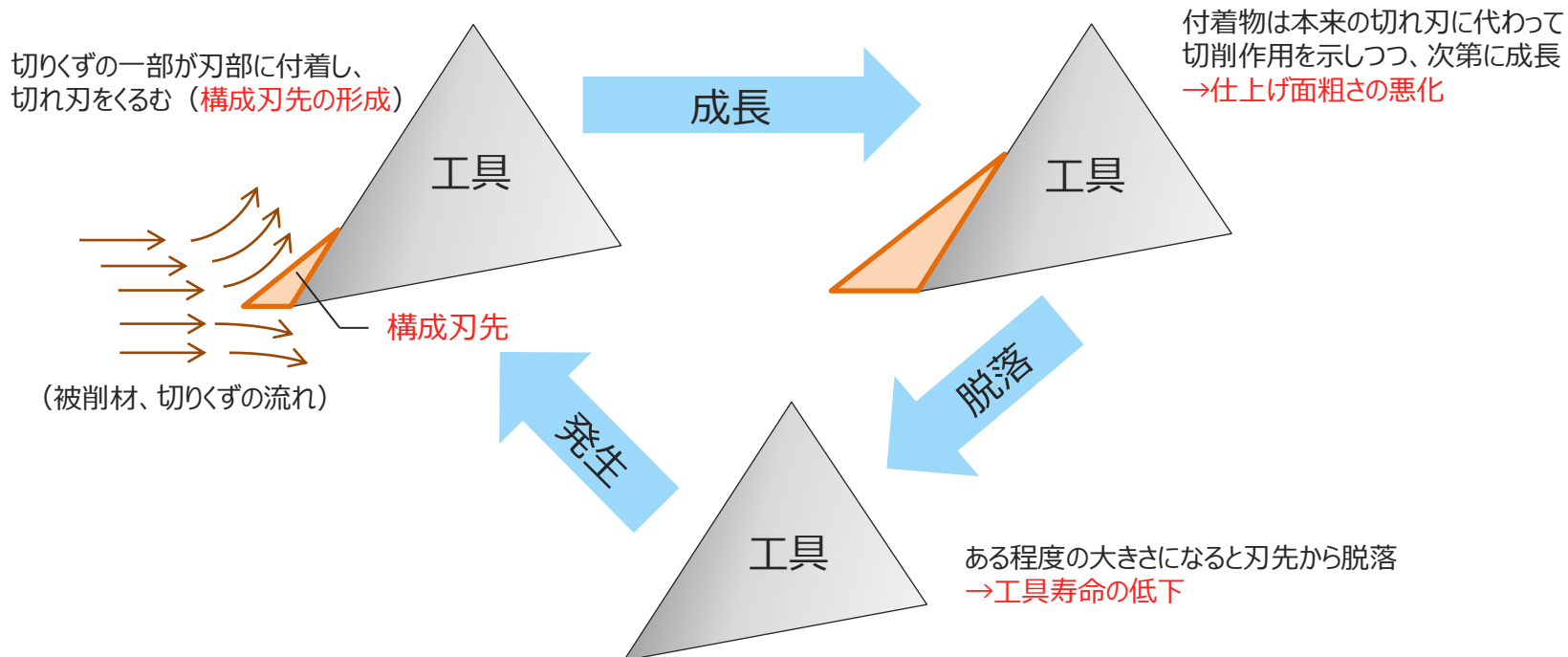
	外周逃げ面	すくい面	切りくず	能率 [mm ³ /min]
条件1				2025
条件2				1500
条件3				1013
条件4				2700
条件5				4000
条件6				8000

切削加工における様々な現象 —構成刃先—

- 実際の切削加工では様々な現象が生じ、加工を行う上での障害となる。

構成刃先…工具に付着した切りくずの一部が切れ刃をくるみ、切れ刃に代わって切削作用を示す現象

構成刃先の形成サイクル



対策

- ・切削速度を速め、温度を高める。
- ・潤滑性の良い切削油材を与える。

切削加工における様々な現象 —びびり振動—

- 実際の切削加工では様々な現象が生じ、加工を行う上での障害となる。

びびり振動

現象

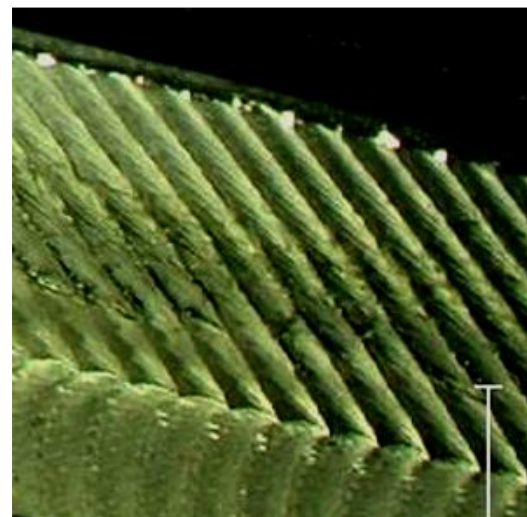
- ・ 切削加工において、工作物・切削工具・工作機械間で共振が発生し、仕上げ面に縞模様が生じること。

影響

- ・ 仕上げ面粗さの悪化、工具寿命の低下が生じる。
- ・ びびり振動により、切削困難となるケースもある。

対策

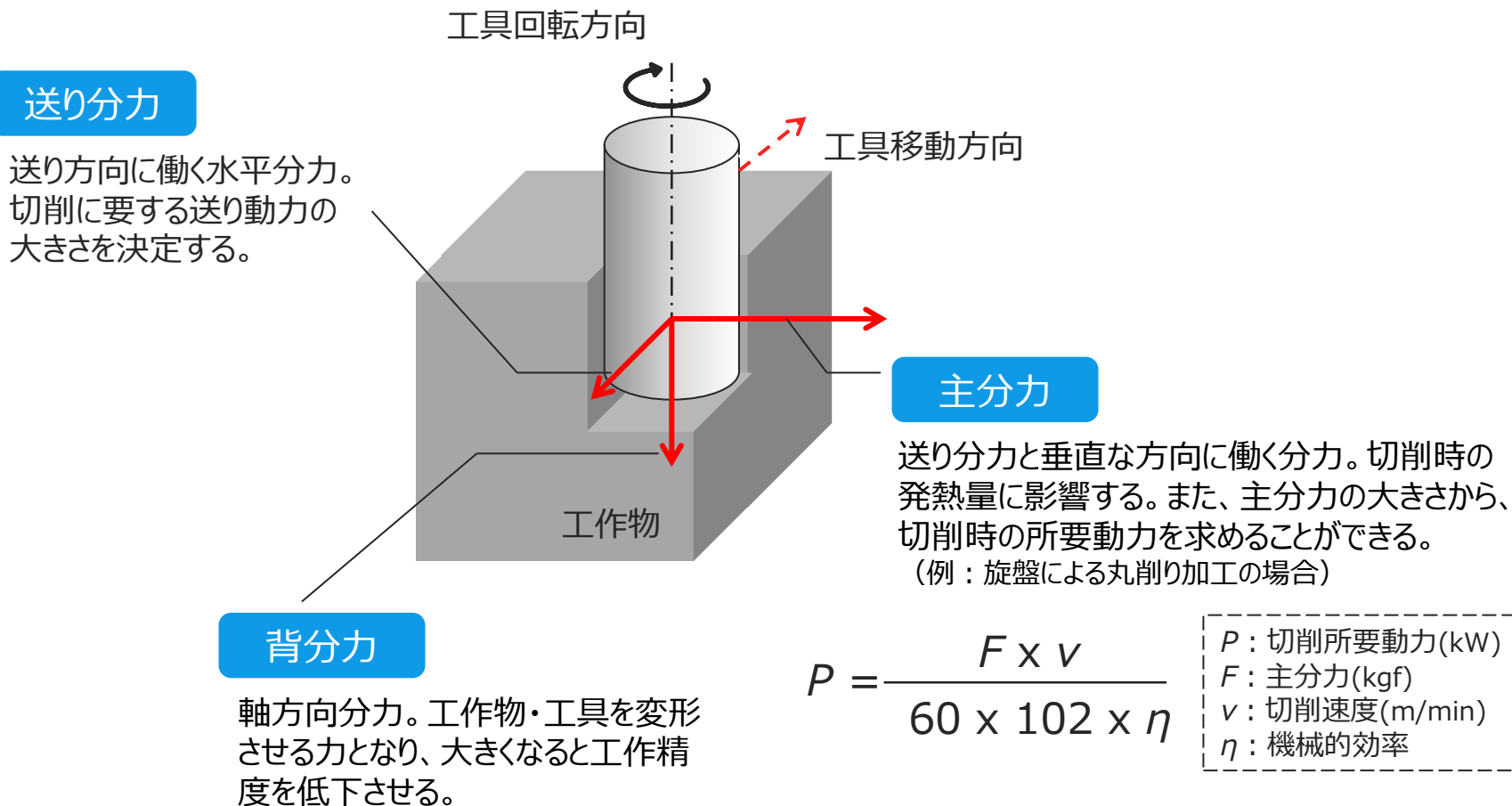
- ・ 工作物・切削工具の取り付け（突出し長さ）や工作機械の運動部を調整する。
- ・ 切削速度・送り量・切り込みなど切削運動の大きさを調整する。



びびり振動によって工作物に生じた縞模様

切削抵抗 —切削抵抗の各分力—

切削抵抗…切削時、工作物に切削工具を押し込む際の反力。
3方向の分力として考えることができる。



切削抵抗 —主分力の大きさと変化する要因—

- ・切削抵抗の3分力のうち、主分力は特に重要

(切削時の所要動力や発熱を決定する要素であるため)



一般には主分力を「切削抵抗」と称する場合がある。

- ・切削抵抗（主分力）は切削時の条件により変化する。

切削抵抗を変化させる要因（一般的な傾向）

切削抵抗（主分力）	小	大	備考
工作物の材質	やわらかい	硬い	—
刃部の形状 (すくい角の大きさ)	すくい角が 大きい	すくい角が 小さい	主分力が減少するのはすくい角が約30° までの範囲。
切削面積 (切り込みx送り量)	小さい	大きい	切り込みを小さくし送り量を大きくすること で主分力を小さくできる場合もある。
切削速度	速度が大きい	速度が小さい	速度が一定以上の高速になった場合、あ まり変化はない。

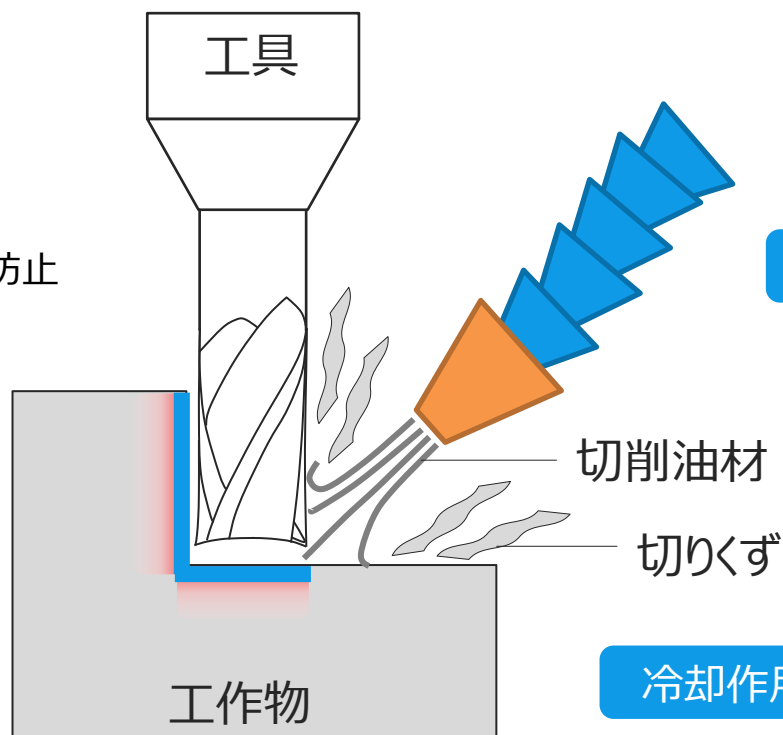
切削油材 —切削油材の役割—

切削油材…切削加工において良い仕上げ面を得、
工具寿命を長くするために切削部に与えるもの

切削油材の担う3つの作用

潤滑作用

- ・工具の刃部と切りくず、および仕上げ面との摩擦防止
- ・構成刃先の発生防止



洗浄作用

切りくずを洗い流すことによる
刃部の欠損・仕上げ面の傷防止

冷却作用

- ・工具の冷却による工具寿命延長
- ・工作物の温度上昇による寸法の狂いを防止

切削油材 —切削油材の特性—

切削油材への要求

- ・人体に対して無害であること
- ・工作物や工作機械、塗料をおかさないこと
- ・発火・発煙などの危険性が低いこと
- ・腐敗・変質などが少ないこと

実際には、これらすべてを
満足する切削油材は得られない。



切削油材は、
「工具寿命」・「仕上げ面」・「切削能率」の
いずれに重点を置くかで選定する。

切削油材の種類と特性

切
削
油
材

水溶性：冷却性が良好

不水溶性：潤滑性が良好

不水溶性切削油材の性能を決定する要素として・・・

粘度　　：　低粘度→洗浄・冷却作用　大
　　　　　高粘度→潤滑作用　大

添加剤　：　有→切削性能の向上
（ただし、工作物や給油装置の腐食、
および高温切削時に有害ガス発生の恐れ有り）

脂肪油分：　有→構成刃先の発生防止
　　　　　　　潤滑作用の向上

切削油材 —MQL加工—

MQL(**M**inimum **Q**uantity **L**ubrication)とは・・・ごく少量の切削油材のみを使用する加工法。

切削油材利用時の問題点として・・・

コスト・・・切削油材にかかる費用・ポンプを駆動する電気代

環境負荷・・・使用済み廃液の処理・電気エネルギーの大量消費

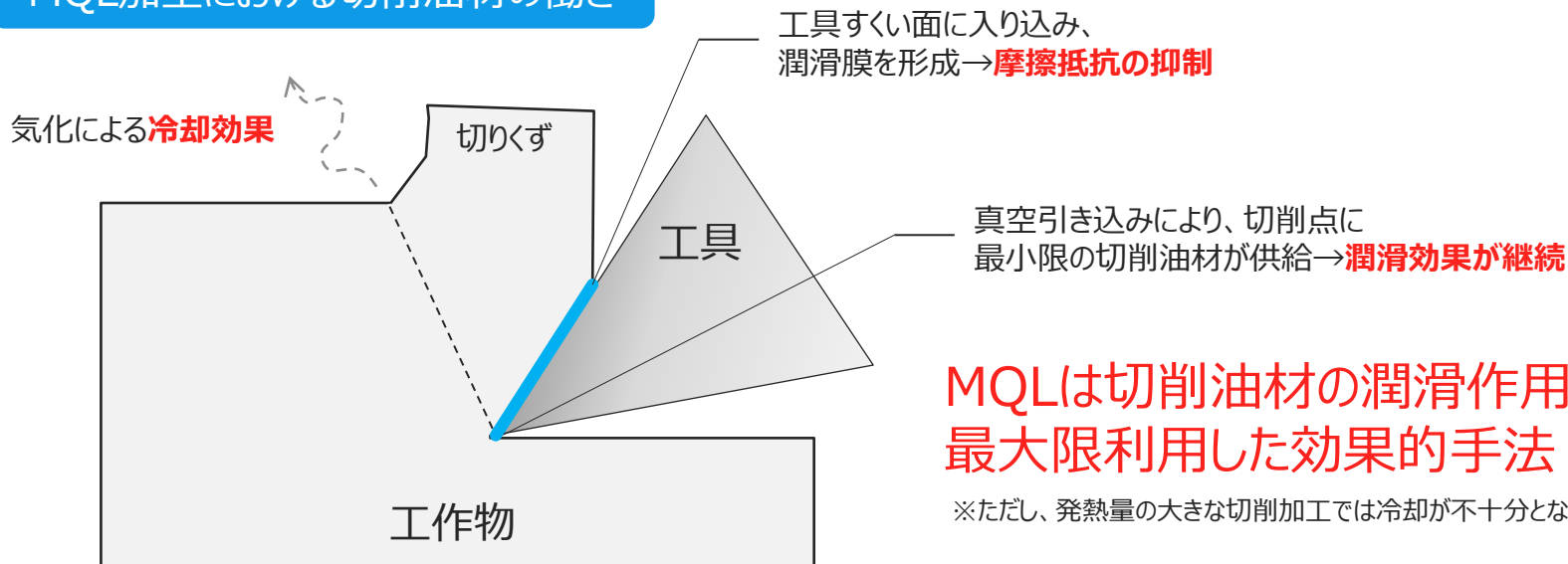
切削油材の
使用量を減らしたい



少量（2～10ml/hour）の切削油材を高圧エアによって噴霧する**MQL加工**が注目

（MQL採用により、エネルギーコスト25%減、切削油材コスト95%減の例も有り）

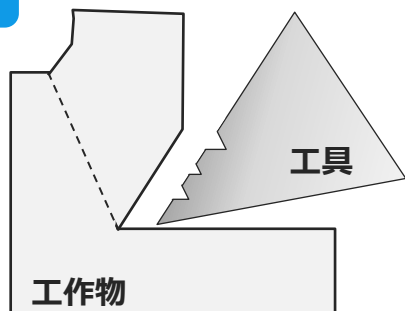
MQL加工における切削油材の働き



工具摩耗 — 摩耗の形態 —

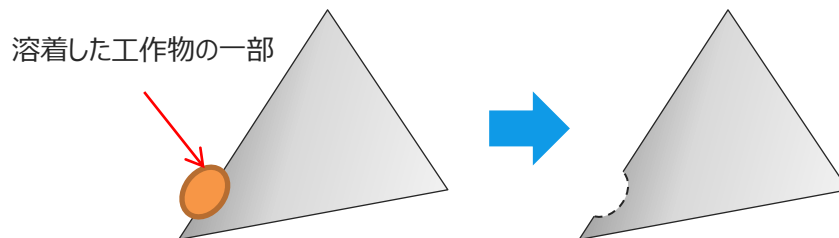
- ・切削を継続して行くと工具の刃先は摩耗を生じる。
- ・摩耗はその原因により様々な形態を示す。代表的な事例は以下の通り。

機械的摩耗



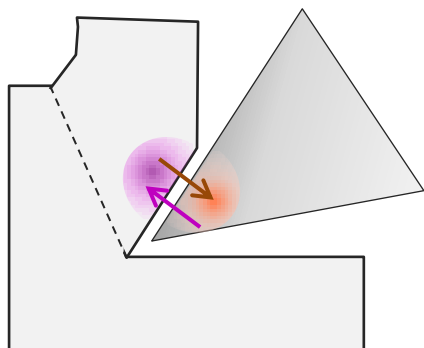
工作物中の固い粒子などが工具の切れ刃を引っ掻いて削り取る摩耗

溶着摩耗



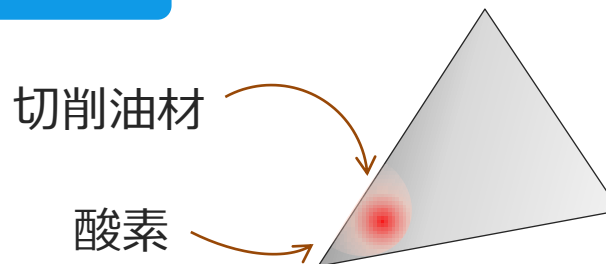
工具すくい面に工作物が溶着し、脱落時に工具の一部を持ち去る摩耗

拡散摩耗



工作物と工具との間で相互拡散が発生し、硬くない化合物が生成することで生じる摩耗

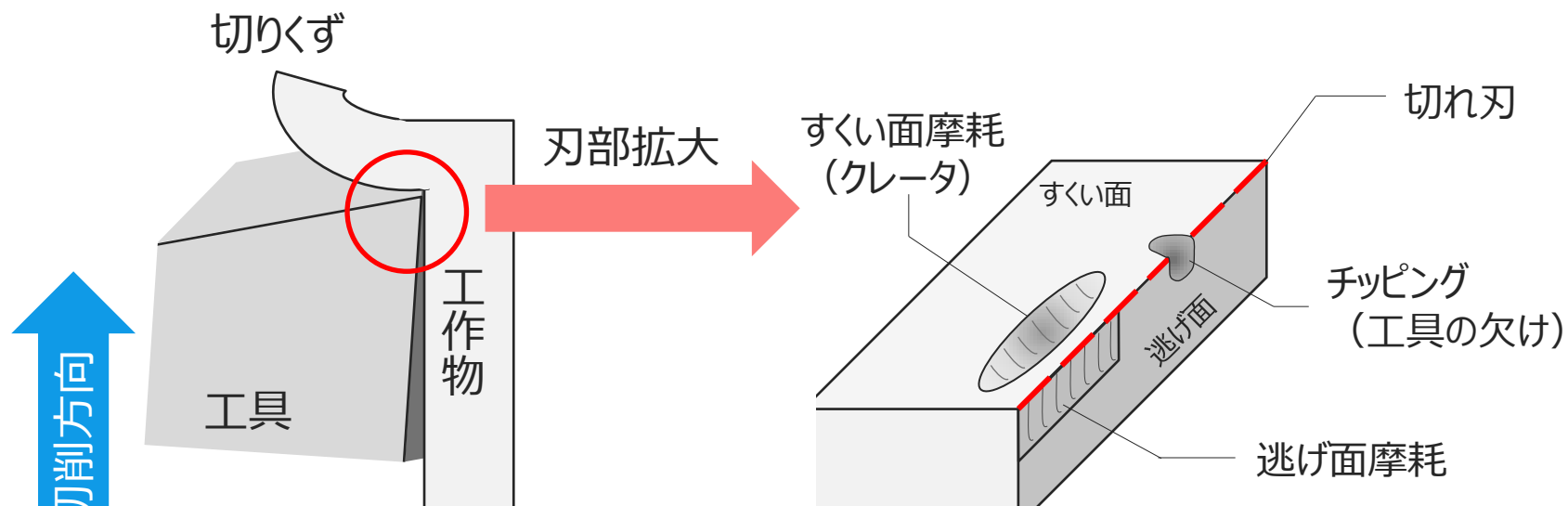
化学的摩耗



工具が他の物質（切削油材・空気中酸素など）と反応して化合物を作り、それが取り去られていく摩耗

工具摩耗 — 摩耗の部位 —

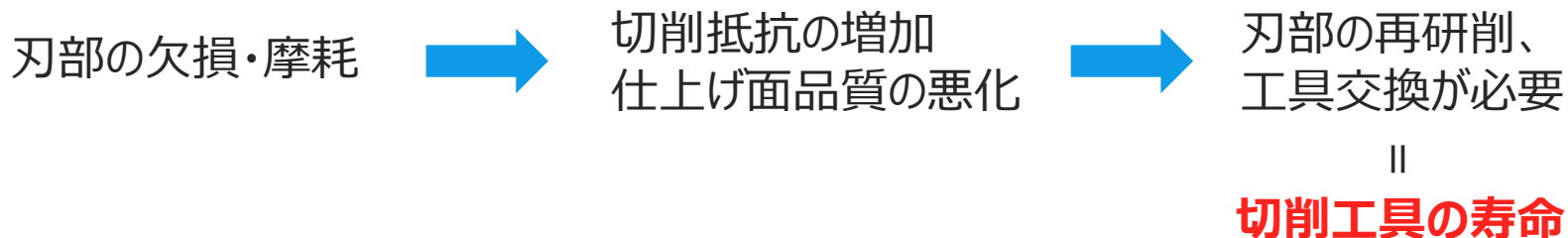
切削工具刃部の摩耗は、摩耗の生じた部位に応じて以下の通りに呼称する。



※クレータとは
すくい面摩耗で、切れ刃近くに生じるくぼみ。
超硬工具による鋼材の高速切削で生じやすい。

摩耗が発生・進行した場合は刃部の再研削や、切削工具の取り換えが必要となる
→**切削工具の寿命**

工具寿命 —寿命の目安・判断—



工具寿命の判断基準

- ・仕上げ面に光沢のあるしま模様が生じたとき。
- ・仕上げ寸法や仕上げ面の粗さの変化が、ある値に達したとき。
- ・切削抵抗の背分力、または送り分力が急に増加したとき。
- ・切削抵抗の主分力が、切削開始の時に比べて、ある値だけ増加したとき。
- ・刃部の摩耗がある値に達したとき。

超硬工具の工具寿命判断基準

逃げ面摩耗幅 w (mm)	クレータ最大深さ t (mm)	摘要
0.2	0.03	精密軽切削、 非鉄合金などの仕上げ削り
0.4	0.05	合金鋼などの切削
0.7	0.08	鋳鉄・鋼などの一般切削
1 ~ 1.25	0.08	普通鋳鉄などの荒削り

工具寿命 —寿命を決定する要素—

工具寿命方程式 (F.W.テラー)

$$V_c \cdot T^m = C \quad \Leftrightarrow \quad T = \left(\frac{C}{V_c} \right)^{\frac{1}{m}}$$

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

上式より...

切削速度 V_c の増加



工具寿命 T の減少

(刃先の速度増加により、**切削熱**が上昇することが原因)



**熱に強い工具素材の選定、
切削熱を抑える工夫 (切削条件の検討、冷却油材の適正な使用) が重要 !**

※近年では耐熱性が改善されたコーティング超硬工具の発達により、上式が直接当てはまる工具はほぼ見られない。また、エンドミル加工のような断続切削も上式とは異なる傾向を示す。

まとめ

切削作用

「刃先の進行」→「塑性変形発生」→「切りくずの排出」を連続的に繰り返すことで切削加工が行われる。

切りくず

切削条件・工具材質・発熱が形態に反映

↓
どのような切削が行われているかを知る情報源

実際の切削加工での現象

構成刃先
びびり振動

} 工具寿命や加工後の仕上げ面に影響
↓
発生を防ぐ対策が必要

切削抵抗

工具の切れ味や切削条件などによって変化（切削状態・動力・切削熱との関連性）

切削油材

切削油材の作用を理解し、切削加工に合わせて適切なものを選定

工具寿命

工具の使用 → 摩耗などにより工具状態が悪化 → 仕上げ面品質の低下

- ・工具寿命を見極め、良好な仕上げ面が得られるよう注意
- ・コーティング技術により、工具の長寿命化・切削性向上が可能