

基礎加工学

切削加工Ⅱ (切削理論Ⅱ)



鈴木 孝明

087-864-2343 (大学居室)
087-887-1873 (FROM香川)
suzuki@eng.kagawa-u.ac.jp
http://www.eng.kagawa-u.ac.jp/~suzuki/



切削加工について、

1. 切削工具 (材質、寿命)
2. 加工精度
3. 切削仕上面の粗さ
4. 加工変質層
5. 切削液
6. 切削性



必須条件

- ① (高速で能率よく削るためには、高温でも被削材より硬いことが必要)。
- ② (もろくない、じん性が高い)。
- ③ 。

なるべく満たすべき条件

- ④ 安価である。
- ⑤ 熱膨張係数が小さい。
- ⑥ 被削材が溶着しにくい。
- ⑦ 研削などで所望の形に成形しやすい。(条件③と矛盾する。)
- ⑧ 切刃稜を鋭利にとぎやすい。



表 2.2 各種切削工具材料の性質

工具材料 性質	高速度鋼 (18% W, 4% Cr, 1% V)	超硬合金		サーメット	セラミック ス	CBN (単結晶)	ダイヤモンド (単結晶)
		K種 (WC+ Co)	P種 (WC+TiC, TaC+Co)				
比重 (g/cm ³)	8.65	14~15	11~13	5.7~7	3.9~4.3	3.5	3.5
ビッカース硬度 (室温) (kgf/mm ²)	960	1300~1650	1400~1600	1500~2000	1800~2100	4500	8000~ 12000
圧縮強さ (GPa)	3~4	4.4~5.6	4.5~4.8	2.9~3.2	3.4~4.9	—	—
抗折力 (GPa)	3~4	1.5~2.1	1.3~1.9	0.8~1.6	0.4~0.9	—	—
ヤング率 (GPa)	210	560~620	520~550	390~430	340~370	670	970
比熱 (kJ/kg·K)	0.50	0.21	0.25	—	0.8	—	0.5
熱伝導率 (W/m·K)	17	60~80	29~60	8~33	17~21	130	210
熱膨張係数 ($\times 10^{-6}$ K ⁻¹)	11	5~5.5	5.5~6.5	8~8.5	6.3~8	4.7(室温~ 900°C)	0.9~1.2





工具の材料や材種および切削条件の選択は、高品位の切削加工を能率よく、しかも経済的に行うためにはきわめて重要！

P.84

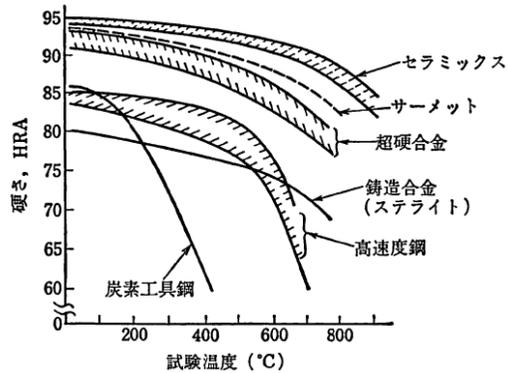


図 2.22 各種工具材料の硬さと温度の関係

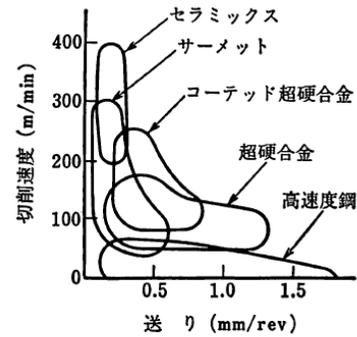


図 2.23 各種工具材料の適用範囲の概略

それぞれの材料は だけですぐれた性能を発揮する

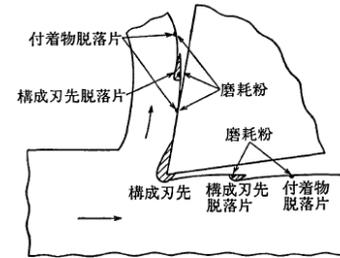


図 3.84 切削工具の異なる磨耗機構 (超硬工具)

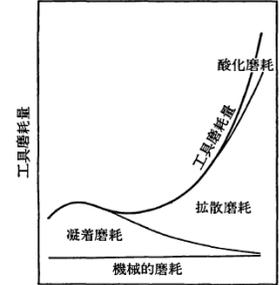


図 3.85 工具の磨耗機構と切削温度との関係(A. E. Focke 氏)

- ① 凝着磨耗
突起どうしの接触→凝着→剥離のプロセス
- ② 拡散磨耗
高温下で、工具と切りくず、あるいは工具と工作物との接触面を通じて、両材料を構成する元素が拡散
- ③ 機械的磨耗
接触しつつ相対運動をする2面が、機械的にわずかずつ削りとられてゆく過程
- ④ 電気・化学的磨耗
熱電流
- ⑤ 化学的磨耗
高温下で、工具材と雰囲気が反応し、反応生成物が逐次磨耗してゆく過程



工具損傷:多くは突発的に発生し、バラツキが大きく、いったん発生するとそのまま寿命点に達してしまうほか、往々にして工作物を傷つける場合すらある。

P.84

工具損傷(1) に起因する脆性損傷

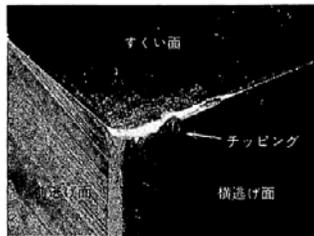


図 3.74 サーマット工具のチッピング

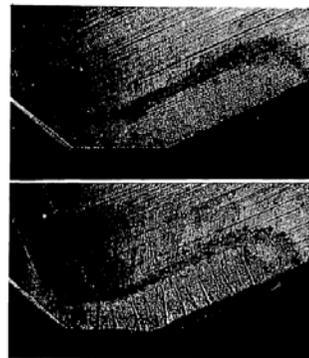


図 3.75 サーマット工具のすくい面に生じたき裂(熱き裂)
上: き裂の発生
下: き裂を起源として“くしの歯状磨耗”(comb wear)が進行したもの



刃先が被削材に食い込むときに大きな衝撃を受けるために欠けを生じる。
フライスのような断続切削では、急加熱と急冷により、刃先は繰返しの熱応力を受けて、損傷しやすい。



工具損傷:多くは突発的に発生し、バラツキが大きく、いったん発生するとそのまま寿命点に達してしまうほか、往々にして工作物を傷つける場合すらある。

P.84

工具損傷(2) に起因する塑性変形

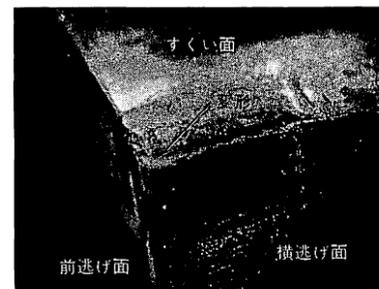


図 3.76 超硬工具の塑性変形
切刃稜の変形に注意。

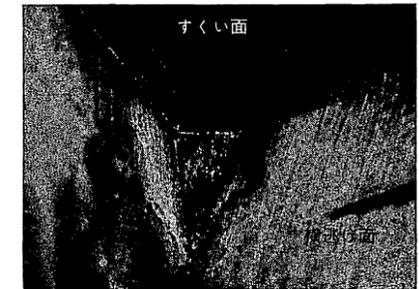


図 3.77 高速度鋼工具の全損

高温での硬さに比較的乏しい高速度鋼工具による無理な高速切削や、Co量の多い超硬合金工具による重切削などにみられる。



①

切削抵抗による工具内の応力が過大であったり、工具内に異常な欠陥が存在したりする場合に生ずる。(切削を開始して間もなく発生するもので、刃先は1回の発生でほとんど使用不能となるため、実用的には最も好ましくない損傷の型。)

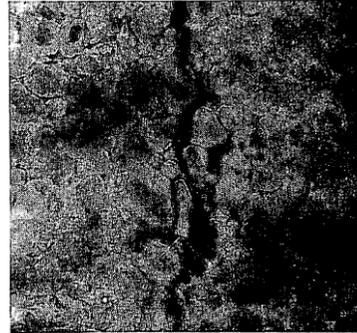


図 3.86 超硬合金の結合相に沿って発生した疲労クラック

②

フライス削りのような断続切削に良くおこり、比較的低い応力のくり返し(通常数百回以上)により、工具材が疲れ破壊をおこす。

③

刃先に構成刃先、あるいは切りくずが溶着したままで切削を終わるとき、または溶着したままで工作物に再進入するときに、工具内に異常応力を生じて損傷をおこす。



工具の摩耗、刃こぼれ、変形などによる使用限界のこと。
などで表す。

工具寿命の主な判定基準

- ① 刃先の損耗による工作物の
- ② 工具の
- ③ 切削上面の性状 の変化
- ④ の増大
- ⑤ 切削温度、振動、音響、アコースティックエミッション、切りくず形状などの切削特性値の変化

以上の各項目が、ある限度に達したとき



特定の許容摩耗幅以下で、
特定の切削時間まで、
良好な切削を継続できる切削速度

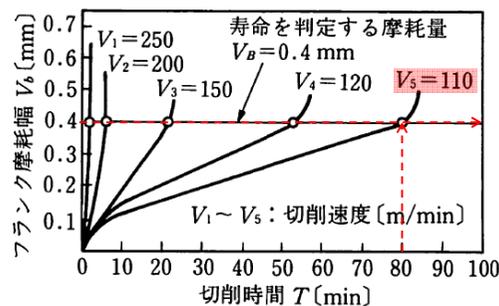


図 5.18 フランク摩耗幅と切削時間の関係

たとえば...

- 許容摩耗幅: 0.4mm
- 切削時間: 80分間
- 寿命切削速度: $V_{80} = \text{}$ [m/min]



いずれも長さ、または長さの組み合わせである角度に関する量

- ① 寸法精度: 直径、長さ、厚さなど
- ② 形状精度: 真円度、円筒度、真直度、平行度、直角度など
- ③ 面精度: 表面粗さ、表面うねり
- ④ エッジ精度: バリ、こぼかけ

加工精度を高めようとする、加工時間の延長、加工工程数の増加、より精度の高い工作機械の要求などがおこるので、加工費の増大を招く。

設計者は、にとどめるよう、十分に検討する必要がある。





加工精度は、「」
」によってきまる

① 工作機械の静的精度

工作機械各部の送り・回転運動、位置決めなどの精度
 (機械要素、組立て、床への据え付け、経年変化などの精度)
 加工誤差は、現れる。

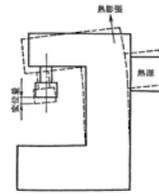


図 3.54 工作機械の熱変形の影響

② 熱膨張

工作機械・工作物・工具の温度上昇により熱膨張を起こし、また、温度上昇が不均一であれば熱変形をおこして、加工精度を低下させる。

熱膨張の原因になる熱源

1) 工作機械内部の熱源 → によって現れる

2) 切削熱 → によって現れる

3) 環境(室温とその変動、日照など) → によって現れる

防止対策: 発熱量の減少、熱源の隔離、冷却、工作機械の構造変更
 (片持形に比べて対称形は熱変形が少ない。ベッド上面を傾けると切りくずが上にのらないため切削熱も伝わらない。)



加工精度は、「工作物と工具刃先との相対位置や相対運動が理想値にどの程度接近するか」によってきまる

③ 切削抵抗によるたわみ

切削抵抗の背分力によって工作物、工具および工作機械がたわむと、所定の深さまで削れない。

対策1) 切削抵抗の背分力の減少

対策2) 剛性の増加

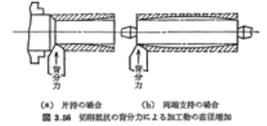


図 3.56 切削抵抗の背分力による加工物の直径増加

④ 振動

振動によって工作物と工具刃先の相対位置が変動すると、仕上面に波状の凹凸ができ、振動の周期に応じて形状精度や面精度を低下させる。

⑤ 工具と工作物の取付位置の誤差

⑥ 工具磨耗や欠損による刃先後退と構成刃先による過切削

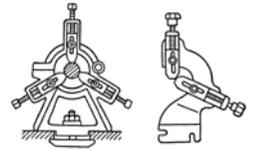


図 3.57 振れ止め



(1) 表面粗さの影響

(2) 理論粗さ

(3) 切刃の輪郭の影響

(4) 工具と工作物の相対運動の変動

(5) 転写精度の低下

(6) 盛り上がりとむしり取りの影響



表面粗さが大きいことによる不都合

① 他の物体と擦る場合、が大きくなる。

② その結果、がふえる。

③ 同一体積の磨耗に対し、が大きくなる。

④ が保ちにくい。

⑤ レンズや反射鏡などの光学的性能を低下させる。

⑥ くり返し応力を受ける部品では、が低くなる。

⑦ 次に仕上加工を行う場合、を大きくしなければならぬ。

⑧ 外観や触感が悪い。



(a) 粗面

(b) 平滑面

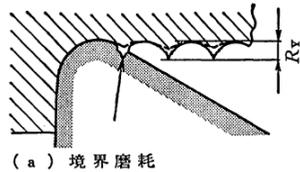
谷底で応力集中が発生。
 荒い面の方が疲労強度が弱い。
 (疲労破壊は表面で起こる。)

図 3.58 同一体積磨耗したときに生ずる寸法変化、 Δ に対する粗さの影響

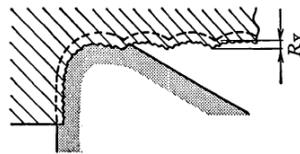




切刃の輪郭、とくにコーナ部の形には新品でもある程度の誤差がある。切削して不均一な磨耗(境界磨耗・刃先の平坦化)がおこると、さらに変形して、仕上面粗さは理論粗さから離れる。工具磨耗が進行すると、境界磨耗と刃先の平坦化の進行に応じて、仕上面粗さは増減をくり返しながら増大する。



(a) 境界磨耗



(b) 磨耗による刃先の平坦化

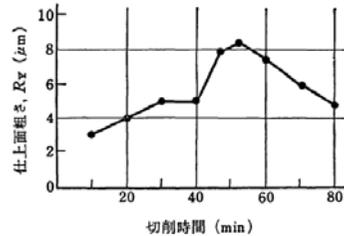


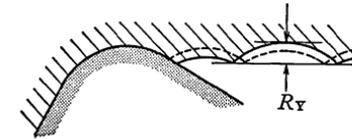
図 3.62 切削時間にもなる仕上面粗さの変化の例

被削材: S45C, 工具: P10 超硬,
刃部形状: -5, -5, 5, 5, 30, 0, 0.8 mm,
切削速度: 200 m/min, 切込み: 0.5 mm,
送り量: 0.05 mm



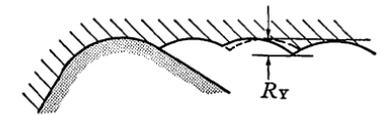
① 切込深さの変動

切込方向の振動などによって切込深さが変動すると、切削方向の粗さは当然増大するが、隣どうしの溝の位相が完全にそろわない限りは、送り方向の粗さも増大する。

図 3.63 切込みの変動による粗さの増大
点線は理論粗さ曲線。

② 送りの変動

送り運動の不正や送り方向の振動によって送り量が変動すると、送りマークのピッチが変動し、粗さが増大する。

図 3.64 送りの変動による粗さの増大
点線は理論粗さ曲線。

切刃の輪郭がそのまま仕上面に転写されることは少ない。

① 先行き裂の発生

もろい材料(鋳鉄、青銅など)を削る場合には、切刃から前方にき裂が発生してき裂形切りくずが発生するが、そのき裂が前下方に向かうと切刃の輪郭はそのままは転写されなくなり、一般に粗さが増す。その粗さ曲線はかなり不規則になる。

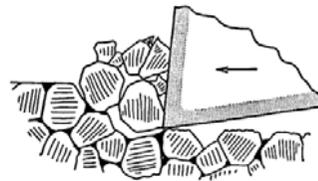


図 3.65 掘りおこしによる粗さの増大

② 構成刃先

構成刃先が発生すると、工具の切刃の輪郭とは異なった、不規則ではげしい凹凸をもった仕上面ができる。構成刃先は一般に成長と脱落をくり返すから、切削方向の粗さも大きくなる。



切削幅の両端では側方からの拘束がないから、材料は側方に逃げようとする。

- ・延性材料の切削では、盛り上がりを生じ粗さが増大する。
- ・脆性材料の切削では、両端で破壊がおこり、粗さがかえって小さくなる場合もある。

切削中の側方への流動を減らすためには

- 対策① すくい角の増大
- 対策② 端部での切取厚さを減らすためのコーナ半径の増大と送りの減少
- 対策③ 切刃傾き角の増大

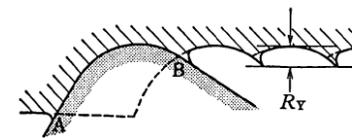


図 3.66 盛り上がりによる粗さの増大





切削加工では、一般に切りくずが [] する。これらの変形や温度上昇は、多少なりとも仕上面表層にまでひろがる。結果、内部と違った性質を持つ、変質した表層部を加工変質層とよぶ。

- ・ [] (切削、研削、ラッピングなど)
 - 塑性変形と熱の影響を受けた加工変質層が発生しやすい
- ・ [] (放電加工、電子ビーム加工、レーザ加工など)
 - 熱の影響だけによる変質層ができる
- ・ [] による除去加工(化学研磨、電解研磨など)
 - 変質層を作らない数少ない加工法

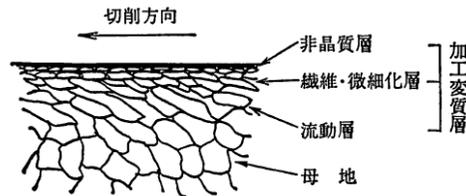


図 3.67 加工変質層

加工変質層の特徴

- 1) []
- 2) []
- 3) []
- 4) []



加工変質層は、切りくずを作る際の変形や温度上昇が仕上面表層にまでひろがってしまうために生ずるもの。

加工変質層をなるべく薄く、また、変質の程度をなるべく少なくする方法

- ① [] が大きくなるような条件で削る。
 - 具体策としては、工具のすくい角を大きくし、切削速度を増し、有効な切削液を使って潤滑と冷却を行うなどがある。
- ② [] を薄くする。
 - 一般の3次元切削ではコーナ部が仕上面を作るから、送りの減少、アプローチ角(横切刃角)の増大のほか、コーナ半径の増大も役立つ。
- ③ 切刃稜の欠けや丸味、逃げ面の磨耗などを除いて、切刃を鋭利に保つ。



バリやこぼかけが発生する条件は、加工変質層が発生する条件と似ている。

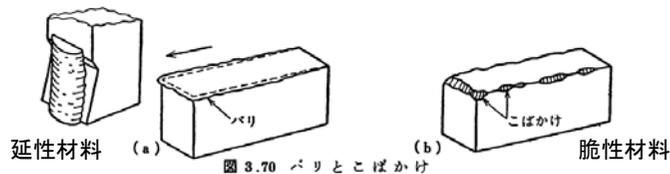


図 3.70 バリとこぼかけ

バリやこぼかけを少なくする方法は、加工変質層を減少させる方法が適用できる。

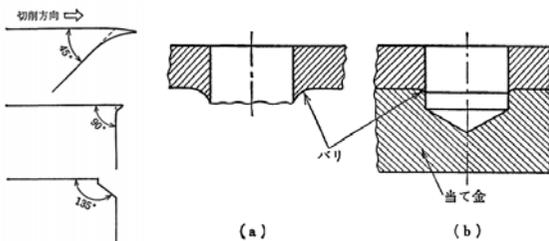


図 3.72 当て金によるバリの減少

- 1) 被削材の延性を適度に調節し、バリの発生とこぼかけの発生の中間状態にする。
- 2) 角の部分はあらかじめ面取りをしておく。
- 3) [] をして一緒に削る。

図 3.71 鋭い角ほど大きいバリが発生する



切削や研削をうまく行うために、切削点近傍に液体(切削油剤)をかけながら削る場合が多い。 P.88

切削油剤の機能

- (1) []

切削工具と切りくずの間に油剤が入ればすべりやすくなり、摩擦力が減って切削抵抗が減る。したがって、消費動力や発熱量が減り、工具と工作物の熱膨張や工具磨耗も少なくなり、加工精度は向上する。

- (2) []

切削油剤は、切削点近傍の高温部に触れると温度が上がり、また一部は酸化することによって熱を奪う。その結果工具と工作物の温度上昇が減り、熱膨張や工具磨耗が減って加工精度が向上する。冷却能力からみると、切削油剤は比熱や酸化熱がなるべく大きく、また粘性や表面張力が小さくて狭いすきまにも浸入しやすいもののがよい。

- (3) []

ドリルによる深穴加工、研削などでは、発生した切りくずを切削点近傍から早く排除することが非常に重要であり、そのためにポンプを使って大量の油剤を流す。

切削油剤にはこのほかにレベンダー効果とよばれる興味ある効果もある。

切削油剤による潤滑がうまく行われるのは、低速軽切削か、普通の切削でも削り始めの数mmの部分だけであって、それ以外の一般の切削では十分には行われにくい。
 1) 切りくずと工具すくい面の間には高圧がはたらき、
 2) 切りくずは油剤を追い出す方向に流れ、
 3) 刃先付近は高温になりやすいので、油剤が蒸発してしまう、などのためである。





切削油剤の選択や使用上の注意。

1)

引火、作業者の衛生上の障害(液、飛まつ、発生する蒸気やガスなどによるもの)、悪臭による不快感、製品や工作機械のさび、蒸気による機械や工場内部のよごれ、などが問題になる。

2)

切削油剤の多くは使用にともなって性能が低下する。保存しておくだけで変質し、性能が低下したり悪臭を発生するものもある。

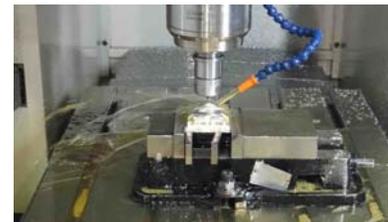
3)

性能の低下した油剤の安全適切な廃棄処理も重要である。



1) 不溶性切削油(油、または、油に添加剤をまぜたもの)

- 水溶性のものに比べて がすぐれている。
- (マシン油、スピンドル油、灯油など) が安価で変質もしないので広く使われるが、潤滑性はあまり高くない。
- (なたね・大豆・オリーブ油など) や (ラード油) は、吸着性が強く、潤滑能力が高い。しかし高価で、保存性もよくないので、一部の精密加工にだけ使われる。
- (鉱物油+極圧添加剤〔塩素や硫黄の化合物、高温高圧下で金属と反応して軟らかい金属化合物の膜を作ってすべりやすくするもの]) は潤滑性が高いので、難削材の切削や、ねじその他の総形削りに使われる。



2) 水溶性切削油(水を主体として、添加剤を加えたもの)

- 冷却性能がすぐれている。
- 添加剤
 - 鉱油: 潤滑性を与える
 - 乳化剤(石けん、界面活性剤): 鉱油を水とまぜる
 - 湿潤剤(界面活性剤): 表面張力を減らしてすきまにも浸入しやすくする
 - 防錆剤(一般にアルカリ): さび防止
- 2種類に大別
 - : 乳化油ともよばれ、比較的多量の鉱油を含み、水にまぜると白濁する。水溶性切削液の中では一番潤滑性があるが、不透明なために切削部分が見にくい、時間がたつと水と油が分離したり腐敗したりしやすいなどの欠点がある。
 - : 界面活性剤が主体で、油は含んでいない。水で希釈すると半透明、または、ほぼ透明になる。



材料の を示す性質

- ① 製品に要求される品位
(精度、仕上面粗さ、加工変質層、バリなどに対する要求)
- ② 能率よく(早く、安く)削れる

具体的な問題

- 1) が得やすいこと。
- 2) が小さいこと。
- 3) が長いこと。
- 4) がよいこと。





i) 炭素鋼

- ① 低炭素鋼 (0.2%C以下): 延性に富むので、工具磨耗はすくないが、構成刃先が発生して仕上面がむしれやすく、切りくずが折れにくい。
- ② 高炭素鋼 (0.6%C以上): 変形応力が高い。セメントタイトが多く、工具が磨耗しやすい。
- ③ 中炭素鋼 (0.4%C前後): 総合的にみて一番削りやすい。

ii) 合金鋼

固溶体を作り、加工硬化したり、硬い炭化物を析出したりして、工具が磨耗しやすい。

iii) ステンレス鋼

加工硬化しやすく、熱伝導率も低いので、工具が磨耗しやすい。また、鋸歯状切りくずを発生して振動をおこしやすい点でも削りにくい。

iv) 快削鋼 (鋼中に快削添加物を入れたもの)

自動機などで無人大量生産しようとする場合、工具寿命が長く、切りくずの処理性がよいことが必須のため、広く使われる。

v) 鋳鉄

- ① 普通鋳鉄: もろいため、切りくず処理は容易。組織の不均一性のために平滑な仕上面は得にくく、また、工具寿命がばらつきやすい。
- ② 球状黒鉛鋳鉄: 延性が高いので、せん断形や流れ形の連続切りくずを発生し、また刃先に付着物が堆積しやすいが、切りくずは折れやすく、工具寿命も悪くない。

vi) 銅、アルミニウムとその合金

硬度は低いのに切削抵抗が大きく、仕上面がむしれやすい。適度に硬化し延性を下げた合金は被削性がよい。工具磨耗が少ないので高速切削も実用されている。切りくずが折れにくいのでフライス削りが好まれる。



これだけは絶対にこえられない、しかし、その制限範囲内にありさえすればどうでもよい、という条件

① 製品の品質

寸法精度、仕上面の粗さなど

② 工作機械の能力

切削動力、切削速度、送り量などには使用する工作機械によって制限がある

③ 工作物の強度

切削抵抗や遠心力(旋削の場合)による工作物の変形や破壊が問題になることがある



良否の程度を数的に評価する指標(切削条件の選定の場合)

i) 1個当たりの加工時間

製品1個当たりに要する加工時間が最小になるような条件を選ぶ。

$$(\text{加工時間}) = (\text{正味切削時間}) + (\text{工具交換時間}) + (\text{工作物着脱時間})$$

ii) 1個当たりの加工費

製品1個を作るに要する費用が一番安くなるような条件が望まれる。

$$(\text{加工費}) = (\text{切削費}) + (\text{工具交換費}) + (\text{工作物着脱費用})$$

工場経費(人件費、設備の償却費、間接経費など)

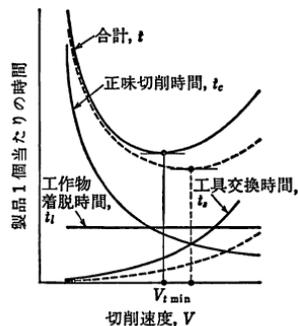


図 4.2 切削速度と加工時間の関係

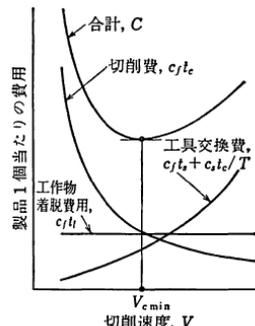


図 4.3 切削速度と加工費の関係



1. 細長い丸棒外周の長手旋削を行うさい工作物のたわみによる加工誤差を減らすための対策を列挙せよ。
2. 刃部形状が0、0、7、7、15、15、0.4mmなるバイトによる旋削で、送り量を0.1、0.2および0.4mmに変えたとき、仕上面の送り方向の理論粗さを R_y で示せ。
3. コーナ半径が0のバイトによる旋削面の送り方向の理論粗さを示せ。
4. ある切削加工で切削速度100m/minで削ったときの工具寿命が200min、200m/minにしたら25minであった。Taylorの寿命方程式が成立するとして、60分寿命速度を求めよ。[149m/min]
5. 工具寿命方程式の指数 n の値が、工具材料の高温での耐磨耗性を示す指標となる理由につき考察せよ。

