

切削理論とバイト刃先の形状

2007 年 10 月 1 日 第二装置開発 金工室 河合利秀

このレポートは 1997 年の名大技術研修で切削をテーマにした報告を基に、切削理論を勉強するために作り直したものです。

はじめに

今回の実習では、最も一般的な汎用切削機械である「旋盤」の切削工具 = バイトの刃先研磨に焦点を絞り、切削理論と刃先形状の関係についての理解を深めることを大きな目的とします。

最初の切り口として、現在の工業製品の加工精度と切削加工について考え、汎用切削によって狙っている精度を「誤差理論」の立場からみたうえで、切削理論を展開します。

切削理論は、加工誤差との関連性を考える項目に絞り、切削理論の特有な言葉や概念を簡潔に述べ、その上でバイト刃先の形状と問題点について記述します。

1、工業製品と到達加工精度限界

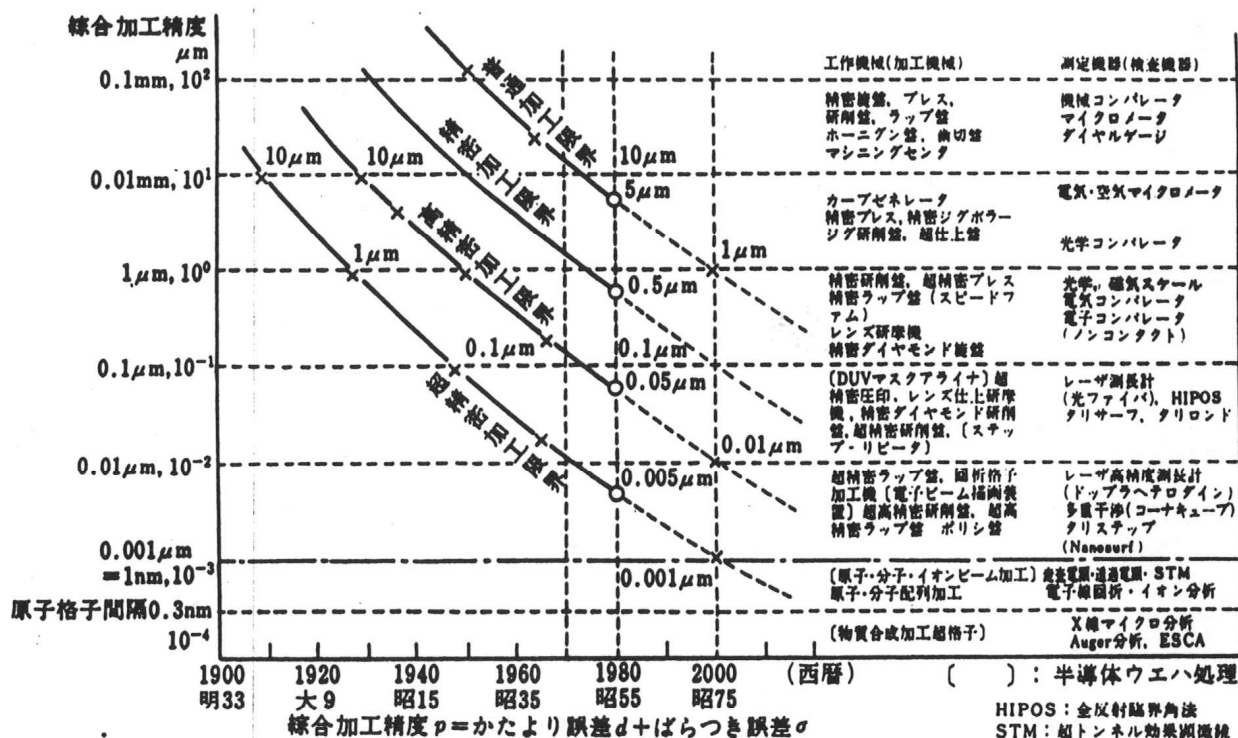


表 1、工業製品と到達加工精度限界

私たちが日常的に接している工業製品がどのような加工精度の部品で作られているかを調べると、表 1 のようになります。

この表は少々古いのですが、到達加工精度限界の推移を考えるにはとてもわかりやすい表です。

表 1 によれば、加工技術と工業製品の性能は年々向上しており、2000 年には、汎用加工で 1 μm 、精密加工で 0.1 μm 、高精度加工で 0.01 μm 、超精密加工では 0.001 μm つまり 1nm の加工限界精度を実現するということが予想されています。

どうでしょうか？ 20 年前の予測ですが、ほぼこの線に乗って技術開発が進んでいることを、今私たちは確認できるでしょう。

2、加工誤差

加工技術を向上する上では加工誤差の解析が大切です。そこで、実際の加工誤差について考えてみましょう。

図1、加工誤差の度数分布

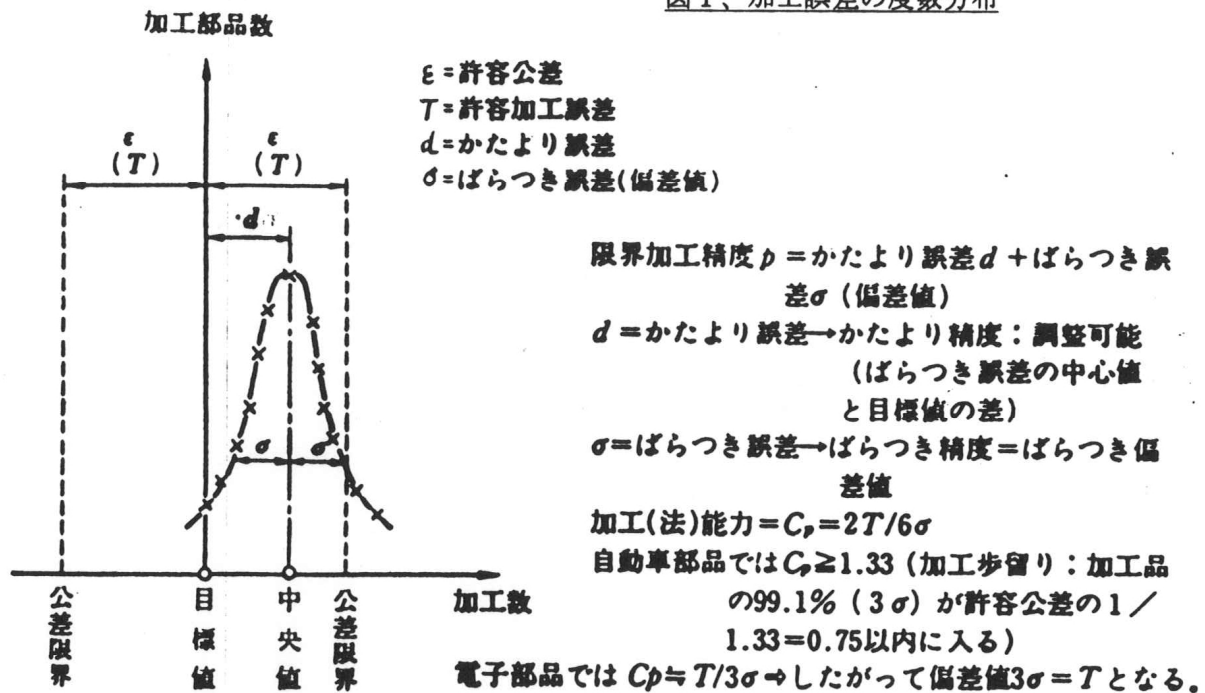


図1はある製品の加工誤差の度数分布を表したものです。

実際の製品の加工寸法を測定したものの分布は、この例のように一つの山を持った分布となります。「目標値」と「許容誤差」は設計で決められています。この時のこのとき、「目標値」と「中心値」のずれが「偏り誤差」、平均分布の幅が「ばらつき誤差」です。

この図から、次の加工において「目標値」とのずれを修正すれば「偏り誤差」を無くすることができます。「偏り誤差」が無くなれば加工誤差は「ばらつき誤差」のみとなります。このことから、「ばらつき誤差」を小さくしていくことが加工精度を上げることであると結論付けられます。

それでは、次に「ばらつき誤差」の原因について考えてみましょう。

工作機械は、主軸の回転とテーブルの直線送り機構によって構成されています。これらの構成要素に「ばらつき誤差」の原因が潜んでいます。

工作機械の回転機構は、軸回転の芯振れによる誤差や振動、熱膨張によるスラスト方向の変位、直線案内機構にはスティックスリップ（不連続で微小な断続的動き）や送り機構のバックラッシュなどがあり、これらを小さく抑えることで加工精度を向上できます。

こうした観点で汎用工作機械による加工の精度限界を考えると、一昔前は $1\mu\text{m}$ の精度は神業といわれていた職人さんの腕前も、今では当たり前で作れる精度でなければならぬでしょう。

私たちは、今普通に使っている測定器によって「ばらつき誤差」の原因になる要素を $1\mu\text{m}$ の精度で直接見る方法を知っています。デジタル式マイクロメータは $1\mu\text{m}$ の分解能をもち、ストレートエッジとピークメータを併用すれば $1 \sim 2\mu\text{m}$ の変位を直接見ることができ、回転軸の偏芯は $1 \sim 2\mu\text{m}$ の分解能で簡単に確認できてしまうのですから。

工作機械の機構部分が調整されれば、「ばらつき誤差」を大きくするもう一つの原因である「刃物」がきちんとできればよいのです。次項以降は刃物の問題を考えます。

3、切削加工とは・・・切削理論

産業界では様々な加工技術が用いられていますが、私たち大学の装置開発で中心となるのは汎用工作機械を使った「切削加工」です。そこで、「切削加工」について考えましょう。

切削加工の定義を調べてみると、「切削加工とは、加工物より硬い工具（刃物）を用い、工具を加工物に押し当てて、切りくずを生成させる行為である」とあります。

それではまずこの定義に従い、私たちの身の回りにある「切削加工」の例を探してみましょう。

例えば、包丁やナイフでりんごの皮をむいたり、魚をおろして調理する行為はまさしく「切削加工」です。同様に、ナイフで鉛筆を削ったり、剃刀で髭を剃ったりする行為も「切削加工」といえます。夏の風物詩「カキ氷」は「切削加工」によって生成した氷の切屑です。

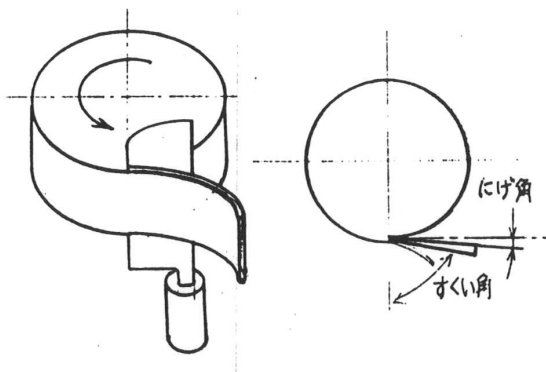


図2、大根のかつら剥き

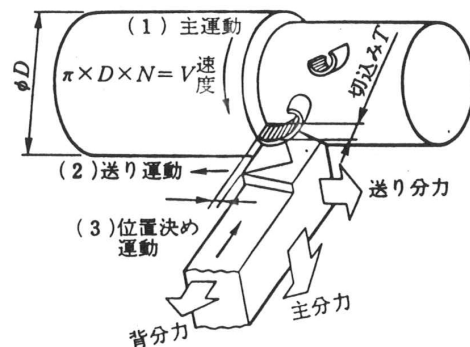


図3、バイトに働く応力

このような生活の中にある切削加工の中から、大根の「かつら剥き」を考えてみましょう。図2は「かつら剥き」を例にして、刃物の位置や角度について観察したものです。

この図は、安定した厚さの「かつら剥き」を作る上で、刃物の「逃げ角」が重要なことを示しています。興味のある方は自宅で大根の「かつら剥き」に挑戦してみてください。この時、図2に示す「逃げ角」を意識するとかなり上手に出来ます。包丁は刃物の「刃先角度」を小さくして少ない人の手の力で加工できるようになっています。

図3は旋盤による加工を主軸方向から見たものです。先例の大根の「かつら剥き」の図と比較して応力を考えてみて下さい。背分力は材料を押す力の反力なので、この応力で材料は撓んでいます。

金属のような塑性材料の加工を考えると、加工物が回転したとき、刃先が加工物に食い込み、刃先付近の加工物が大きく塑性変形して切屑となって行きます。その時の塑性変形に必要な力が切削応力であり、その反力が切削抵抗であると考えられます。

切削抵抗が小さければ材料を撓ませる応力も小さいので、高精度の加工を実現できます。

刃物の材質や角度の問題はあとの項に譲って、ここでは加工部分の様子をもう少し詳しく見てみましょう。図4は加工物に刃物が食い込んでいる部分を、加工物の塑性変形を考えたすべり線場として解析したものです。

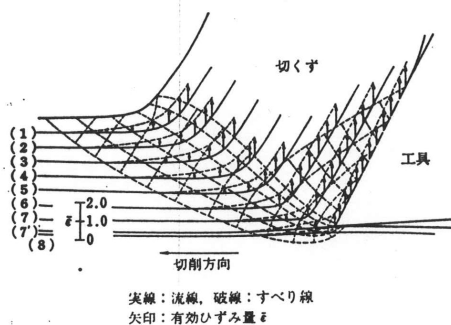


図4、刃先付近のすべり線場

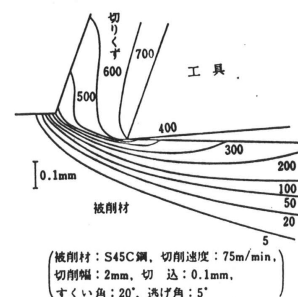


図5、刃先付近の温度分布

この時の矢印が「有効ひずみ量」で、このような変形に關与する刃物と切りくずの界面応力の合計が「切削抵抗」となり、そのときの塑性仕事のほとんどが熱に変換されると考えられます。

図5は刃物と工作物の温度分布を計算したものです。

この図から、変形を受けて切りくずになったばかりのところの刃物に接している部分が最も高い温度となっています。この切削温度は主に切削速度の関数として表されますが、加工物の諸元である比切削抵抗、熱伝導率、密度、比熱、加工条件に属する切り取り幅や切り取り厚さなどによっても大きく異なります。

図4と図5から連想できることは、刃先先端が高温高压の条件になっているということです。切削の様々な問題は、この高温高压における金属の物理・化学現象として現れることに注目してください。

4、切り屑の形状と切削効率

次に、切り屑の形態によって切削の状態を四つに分類したものを図6に示します。

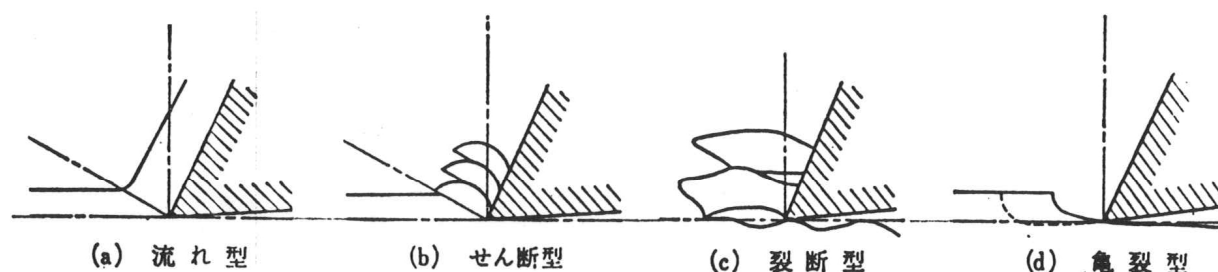


図6、切り屑の形状による切削の分類

切削によって生じた切り屑が連続して流れるように出てくる状態を「流れ型」、切り屑の塑性変形が大きく連続的な切り屑になる状態を「せん断型」、さらに塑性変形が大きくなって変形領域が加工面まで及びむしり痕を残すものを「むしり型」、加工物の脆性が大きい場合に加工応力によって亀裂が走りそのまま切り屑となって飛び散るものを「亀裂型」としています。

塑性材料（アルミニウム、銅、鋼鉄、ステンレス鋼、ナイロン、テフロンなど）の切削加工は流れ型がよいことになります。

鋳鉄、ペークライト、ガラスエポキシなどはどんなに頑張っても流れ型にはならず、亀裂型となってしまいます。大きな破片ではなくても、切り屑が粉のようになってしまいますね。これは亀裂型です。

マシナブルセラミックスは、亀裂が表面に留まるよう針状の結晶を素材中に分散させたもので、本来強い脆性を示すセラミックスを機械加工可能にしました。

こうした切り屑の形による分類と共に、切削の状態を評価する指標として「切削効率」を用います。

「切削効率」は生成した「切り屑の長さ」を「切削距離」で除したもので、図4の塑性変形量が小さいほど「切削効率」は1に近くなります。

超精密加工の場合「切削効率」は1に限りなく近付くのではや切削効率では加工状態を表すことができず、刃物に加わる加工圧力を使います。テフロンやナイロンを加工したときも、切り屑の塑性変形はほとんど認められず、切削効率が1に近い値となります。

それに比べ、ステンレスや銅の加工では、切削効率が0.5～0.2と悪いにも関わらず「流れ型」の切り屑になります。しかし、切削効率の悪い加工では、塑性変形領域が加工表面に残ってしまい、加工硬化という問題を引き起こしています。このように、切削抵抗が大きいことの理由も、塑性変形が大きいということと理解できますね。

加工硬化特性のある材料を精度良く加工するには、まえ段階の荒削りにおいても加工硬化層の生成を極力少なくすることが必要なのです。つまり、精度の良い加工を実現するには、切れ味の良いバイトを作る必要があるということです。

5、刃物について

先に述べた大根の「かつら剥き」にもう一度戻り、刃物について考えて見ましょう。

「逃げ角」が重要なことは先に述べたとおりです。この場合、加工物が柔らかいことと、刃物と加工物の摩擦抵抗が少ないので加工時に発生する摩擦熱もすくなく、図2のように薄い刃物でも問題ありません。魚や肉などのように硬い骨も混在するものを加工する包丁は、「刃先角度」を大きくして刃先強度を上げています。残りの角度が「すくい角」です。

旋盤用の刃物＝バイトの形状を図7に示します。

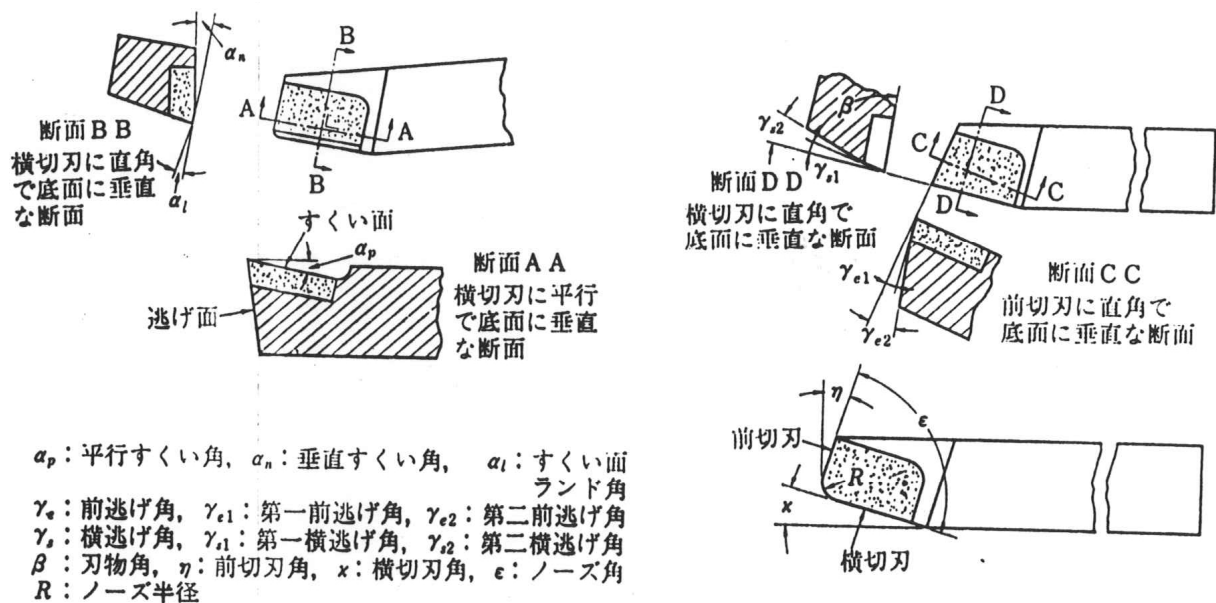
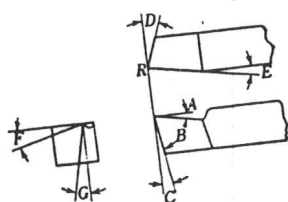


図7、旋盤用のバイト形状と角度

バイトの「にげ角」はおよそ $5^\circ \sim 12^\circ$ と、「かつら剥き」の場合と同じです。しかし、今度は加工物が硬い金属なので、刃先の強度を増すために「刃先角度」を大きくしますが、加工時の摩擦抵抗も増大しますので、加工物の性質に応じた値となります。

表2に被削材に対するバイトの角度を示します。これはあくまでも指標ですが、バイトを作る上で大いに参考になるとと思います。



被削材		高速鋼 バイト				超硬 バイト			
		すくい角	横すくい角	前逃げ角	横逃げ角	すくい角	横すくい角	前逃げ角	横逃げ角
鋳鉄	硬	5	12	8	10	0~6	0~10	4~6	4~6
	軟	5	12	8	10	0~6	0~12	4~10	4~10
硬鋼		8~12	12~14	8	10	0~10	4~12	5~10	5~10
軟鋼		12~16 ^{1/2}	14~22	8	12	0~15	8~15	6~12	6~12
黄銅	硬	0	-2~0	8	10	0~5	4~8	4~6	4~6
青銅	軟	0	-4~0	8	10	0~10	4~16	6~8	6~8
アルミニウム		35	15	8	12	5~15	8~15	6~10	6~10

表2、被削材に対するバイト角度

(1) バイト刃先の材質

バイト刃先の材質としてよく使われるものに、高速度鋼（ハイス、ハイスピードスチールを省略した呼び方）と超硬合金（炭化タングステンの粉末とニッケルの粉末を焼き固めたもの）があります。

この2種類の刃先材質は、すくい角と逃げ角も違ってきます。（表2）

切削速度や切削除去量の比較では超硬合金の方がハイスに比べて優秀であるように見えますが、切削抵抗は超硬合金の方が大きく、その分工作機械の剛性も必要となります。

この他に、サーメット、セラミックス、多結晶及び単結晶ダイヤモンドやCBNなど新しい刃物素材が開発されており、夫々切削条件は異なります。

さらに最近ではHIPなどの表面コーティング技術が身近になり、ハイスの刃先に窒化チタンや炭化チタンなどをコーティングした刃物が開発されました。炭化チタンをコーティングものは刃物寿命が従来品の3倍に延びて加工コストを下げました。

特にエンドミルはコーティング技術でハイスエンドミルの工具寿命が飛躍的に伸び、加工コストを大きく下げ、産業界にインパクトを与えました。

(2) 刃先の形態

私たちの工場では主にハイスのロー付けタイプを使用しています。超硬合金のバイトもロー付けタイプを使っています。ロー付けタイプのバイトは、両頭グラインダーで刃先形状を整形し、油砥石によって刃先を研ぎ出しますので、素材や切削の条件によって自由に刃先の形状や角度を変えられることが大きな魅力です。

民間の工場などの大量生産現場では、超硬合金の刃先交換型刃物（チップタイプ）が全盛を迎えています。刃先が消耗したら刃物交換をしなければならないのですが、チップタイプは、先端のチップを交換するのみでそれまでの座標を使って加工を継続できます。これは、刃先を交換する度に座標を調整する必要がないように刃先の形状精度を良く作ってあるからです。

しかし、チップタイプの刃先の切れ味はハイスに及ばないので、仕上げ加工などミクロン単位の加工を行うときにはハイスのバイトが不可欠です。



写真1、ハイス・ロー付け



写真2、超硬・ロー付け



写真3、チップタイプ

写真1はハイスのロー付けタイプ、写真2は超硬のロー付けタイプ、刃先を両頭グラインダーで整形し、油砥石で刃先を研磨します。写真3はチップタイプ、三角チップは6箇所、四角チップは8箇所に切刃が整形されています。写真3中央の四角チップは超硬に窒化チタンがコーティングされています。

(3) 手研ぎバイトの必要性

先に述べたように、民間の工場ではチップタイプのバイトが全盛なのですが、実験装置を作るときに、ここをほんのちょっとだけ削りたいというようなことが沢山あります。私たちにとってはこちらの方が大事なのですが、そのような加工はチップタイプのバイトでは不可能である場合がほとんどです。

極端な例ですが、小さい部品の内径加工ではチップタイプのバイトに使えるものがなく、結局その加工を断念することになります。このような加工を可能にするには、自分で小さなバイトを作る必要があります。住友や東芝でできない人工衛星の部品が金工室で製作可能な理由はここにあります。

このように、両頭グラインダーでバイトを作る技術はたいへん有効なのですが、この技術は奥が深く、危険も伴うので、身につくまでには相当の時間と試行錯誤が必要です。

大手製造メーカーにおいては、手研ぎバイトを作れる人が少数いて、技能オリンピックにエントリー

するような若い工員さんに伝承されています。しかし、大学には手研ぎで自由にバイトを作れる人を、私はこれまで見たことがありません。手研ぎバイトの技術は大学にこそ必要だと思うので、是非とも身につけてほしいと思います。



写真4、3～5φのバイト



写真5、小径ネジ切りバイト



写真6、ハール式総形バイト

写真4～5は完成バイト（粉末ハイスを焼結、焼入れしたもの）を両頭グラインダーで整形、油砥石で刃付けしたもの。写真6はハール機構（バネのような折り返しの付いたシャンク）のロー付けバイトにRやゴムホース取り付け部分のたけのこ形状を両頭グラインダーで整形、油砥石で刃付けしたものです。このようなバイトが自由自在に作れば加工の幅がぐっと広がります。

6、刃先の現象を考える

（1）構成刃先

切削加工を考える際にどうしても避けて通ることのできない問題が「構成刃先」です。これは刃先に被削材が付着し、これがあたかも刃先のように振舞う現象で、この付着物が急速に成長と脱落を繰り返し、1分間に数十回～数百回生成・成長・脱落を繰り返すので、仕上げ面が悪くなり、加工寸法の誤差も大きくなります。

構成刃先の生成・成長と脱落の様子を図8に示します。

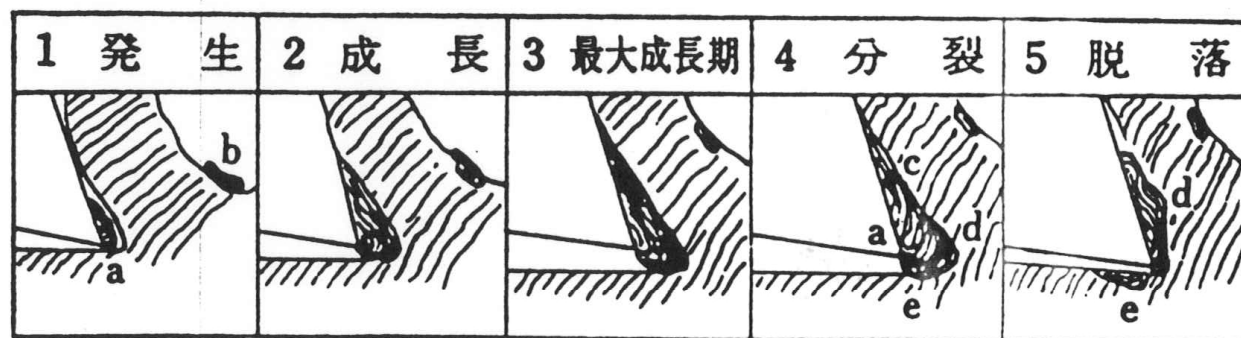


図8、構成刃先の生成・成長・脱落の過程

バイトの切刃は被削材との摩擦で高温・高圧になっています。金属同士が高温高圧になれば互いに金属分子が拡散し、合金層を生成します。合金層は刃物や被削材の本来の物性とは異なり、合金層があたかも刃先のような振る舞いをします。これが急速に成長・脱落を繰り返すのです。構成刃先を形成した部分は徐々に脱落・磨耗するので刃先は次第に失われていきます。

構成刃先は一般的に切削速度が遅いときに発生する確率が高いので、構成刃先が発生したら切削速度を上げることで解決する可能性があります。

反対に、切削速度を極端に遅くして切削剤が刃先に浸透しやすくなると構成刃先を防ぎます。

構成刃先はハイスバイトだけでなく、超硬合金やコーティングバイトでも起こります。

特にアルミニウムを加工する場合に発生しやすく、著しく加工精度を損ないます。こうした場合には油性の切削剤を用いることで改善できます。

(2) ノーズ半径

次にノーズ半径について考えてみましょう。

ノーズ半径とは、バイト先端の僅かなRのことです。



写真7、大き目のノーズ半径



写真8、ネジ切りバイト

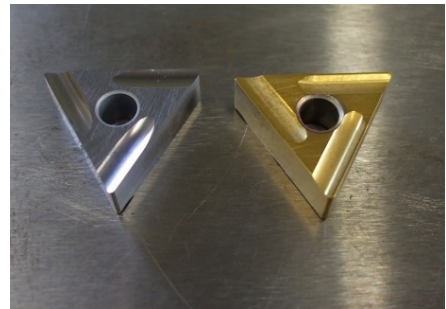


写真9、チップのノーズ半径

写真7は剣バイトのノーズ半径でR1.2mm程度、写真8はネジ切りバイトのノーズ半径でR0.2mm、写真9はスローアウェイタイプのチップのノーズ半径でR0.4mmです。このように、どのバイトの先端もノーズ半径をつけています。

ところが、フライス用のエンドミルにはこのようなRが付いていません。それでは、なぜ旋盤のバイトにノーズ半径が付いているのでしょうか？

これは、図5のバイトの温度分布を見ながら考えてください。

図5のようにバイト先端の温度は被削材との摩擦抵抗で高温になります。先端が尖っている場合と、ノーズ半径がある場合とでは、発生した熱の伝播速度が異なります。尖っている部分は熱の伝播速度が遅く、ノーズ半径がある場合は伝播速度が速いため、結果的に先端部分の温度上昇が異なります。

ノーズ半径のない尖った方はより高温になり、刃先強度や構成刃先の生成など、刃先の消耗する度合いが大きく、工具寿命を著しく低下させます。ノーズ半径があることによって工具寿命を確保できると言った方が正しいかもしれませんが、旋盤加工は連続加工が当たり前なので、刃先の熱の伝播速度が工具寿命に大きく影響するのです。

フライス盤の刃物は断続切削なので、熱の伝播速度に対し余裕が生まれ、ピン角になっていても工具寿命に大きな影響を与えないと考えられているようです。

しかし、実際にはエンドミルの刃先の消耗も大きいので、ピン角が必要でない部分では小さく半径ノーズ半径を入れたエンドミルを使うことで工具寿命を伸ばしつつ良好な加工面も得られます。

(3) ノーズ半径が関連している面取り加工の寸法

旋盤加工では、バイトのノーズ半径があることによって、段付き棒の内角はピン角ではありません。そのために、この部分に入る部品はノーズ半径より大きな面取りをしておかなければなりません。

面取りが不可能なら、ノーズ半径が組み立て精度に影響しないよう、盗み溝を設けておきます。

こうしたことから、面取り寸法は旋盤バイトのノーズ半径を考慮した値にする必要があります。一般的にノーズ半径は0.4mmが用いられていますが、目的に応じて0.2や0.8を使い分けています。

設計段階で、とんと無意識的に面取り記号をC0.5としているのは、汎用スローアウェイチップのノーズ半径がR0.4mmであることから妥当な値であるといえます。

まとめ

工業製品の加工限界の推移と誤差論から一般加工の精度目標を $1\mu\text{m}$ として、切削理論からすべり線場と切削抵抗や切削応力の関係、熱分布から構成刃先とノーズ半径の関係、切り屑の形状から切削効率の関係から見てきました。その中で、市販のチップタイプのバイトに頼るのではなく、ロー付けバイトや完成バイトを両頭グラインダーで自由に成型し、目的に合うバイトを作れることの重要性を見てきました。

いかがですか？ あとは自分で思い浮かべた形になるよう、両頭グラインダーに向かうのみです。

参考文献

表 1、工業製品と到達加工精度限界

谷口紀男：ナノテクノロジーの起訴と応用 1988 年 11 月

表 2、被削材に対するバイト角度

機械工学便覧 工作機械

図 1、工業製品の加工誤差の度数分布

J I S Z 8 1 0 3

図 2、大根のかつら剥き

河合利秀：名大技術研修報告 1997 年

図 3、バイトに働く応力

河合利秀：名大技術研修報告 1997 年

図 4、刃先付近のすべり線場

臼井英治：切削・研削加工学 上、共立出版 1971 年

図 5、刃先付近の温度分布

奥島啓式、垣野義昭：精密機械 3 5 1969 年

図 6、切り屑の形状による切削の分類

為谷誠八：旋盤作業 日刊工業新聞 1966 年

図 7、旋盤用のバイト形状と角度

田中義信、津和秀夫、井川直哉 共著：精密工作法 上 共立出版 1979 年
・・・ J I S における刃物角度の定義・・・として引用

図 8、構成刃先の生成・成長・脱落の過程

田中義信、津和秀夫、井川直哉 共著：精密工作法 上 共立出版 1979 年

写真はすべてオリジナルです。