621.9.01:621.9.039:678

プラスチック切削における切りくず生成機構*

小 林 昭**

Mechanism of Chip Formation in Machining Plastics

by Akira KOBAYASHI

Analysis of chip formation of several kinds of highpolymer has been conducted in order to establish the optimum cutting conditions in view of the background that ever increasing application fields of highpolymers necessitate various types of machining.

The mechanical properties of highpolymers vary widely depending upon the types, that is, from rubber-like elasticity to glass-like brittleness, and are also affected by strain rate and temperature. Thus the behavior of chip formation of highpolymers differs from that of metals, namely, the types of chip formation are classified into continuous and discontinuous, moreover the former is subdivided into continuous flow* and shear, the latter into discontinuous simple shear, complex shear and crack. These types of chip depend not only upon the characteristics of the work material but also upon the magnitude and direction of stress or strain during cutting.

1. 緒 言

最近の高分子材料の進歩はめざましいものがある。高分子材料のうちのプラスチックは、種類も多く性質もいろいろな面ですぐれたものがあるために⁽¹⁾、工業材料として広く用いられるようになってきた。プラスチック部品はレオロジカルな特性を生かして普通は各種成形加工法で製作されるが、部品の寸法精度が高いとき、部品数量があまり多くないときには、切削加工が必要とされる⁽²⁾。また各種成形加工後にいろいろな切削加工工程も必要である。現在プラスチックの切削加工は、金属材料や木材を切削加工する経験と技術あるいは勘に任せられている場合が多い。しかし、プラスチックの性質はゴム状高弾性からぜい性を示すものまで広範囲であり、しかも環境温度や変形速度によってそれらの性質が広く変るので⁽¹⁾⁽³⁾、すべてのプラスチックをうまく切削加工するのはたいへんむずかしいといえよう。プラスチックの切削加工に当って、プラスチックの持つ特性をよく理解し、与えられた切削条件でどのような破壊挙動を示し、どのようにして切りくずが生成されるかについて知る必要がある。

金属の切削機構に関する研究は長い間行なわれてきて最近急速な進展を見せている。ところがプラスチックのような高分子材料の切削機構について論じられた報文はまことに少ない。金属切削理論の立脚点となっ

ているせん断面形成は、プラスチックの切削機構のすべてを表わすものではない⁽⁴⁾。

本報ではプラスチック切削における切りくず生成機構について論じようと思う。

2. 数種のプラスチックの切りくず

プラスチックは第1表に示すとおり普通熱可塑性と熱硬化性とに分けられ、前者は鎖状二次元の、後者は網状三次元の分子構造を持つものが多い⁽¹⁾。

これらの分類によるそれぞれの代表的二、三から生じる切りくずについて調べてみよう。

2.1 熱可塑性プラスチックの場合 第1図⁽⁵⁾はスチロール樹脂を 0.2 m/min の削り速度で切削したとき、切込み (mm) と工具すくい角とによって、どのように切りくず形態が変るかを表わしたものである。工具すくい角が正で増すにつれて、また切込みが減るにつれて、切りくずは連続して固くカールするようになり、すくい角が負になるにつれてまた切込みが増すにつれて、切りくずはむしれたようになることがわかる。同じようなことはメタクリル樹脂切削の場合にも認められる⁽⁶⁾。

四ふっ化エチレン樹脂を低速で切削するときは、長く続いた切りくずを生じるが、高速切削の場合には工具すくい角が正のうちは切りくずは連続しているが、0 から負になるにつれて切りくずは断続してくることがわかった⁽⁵⁾⁽⁷⁾。削り速度 765 m/min, 切込み 0.073 mm の条件で得られた切りくずについて、顕微鏡撮

* 昭和 38 年 11 月 29 日 第 715 回講演会において講演，原稿受付 昭和 39 年 1 月 6 日。

** 正員，電気試験所（東京都中央区銀座東 8-19）。

影によって表面と断面形状を調べたものが第2図である。すくい角が正で大きいときは、切りくず断面は連続しており表面もなめらかである。すくい角 20° の切りくず表面には明らかなせん断のあとが見られる。すくい角 0° になると切りくず表面にはせん断のあとのほかに、ところどころに割れが見られ、断面形状も少し断続的になってくる。 -10° になるとこの傾向はさらに強くなり、割れも大きくなるし切りくずの断続性が明らかになる。

ポリアミド樹脂(ナイロン6)を切削したときの切りくず表面と断面とを調べた結果、いずれも切りくずは完全に連続していることが認められた⁽⁸⁾。これに対して同じ条件で硬質塩化ビニル樹脂を切削したときの切りくずは、切込みの小さいときはすべり間隔は小さいが切込みが大きくなるにつれてすべり間隔はかなり大きくなり、ある程度断続的になることが報告されている⁽⁸⁾。またポリカーボネート樹脂についてはかなり広い切削条件範囲で連続した切りくずの出るのが認められた⁽⁹⁾。ポリエチレン樹脂を低速切削するときには四ふっ化エチレン樹脂を低速切削した場合とよく似た挙動を示すが、高速切削のときには大部分の条件で連続した切りくずが得られた⁽¹⁰⁾。アセタール樹脂については、負のすくい角および正で大きいすくい角のところを除いて連続した切りくずが観察されてい

る⁽¹¹⁾⁽¹²⁾。ポリプロピレン樹脂およびAS, ABS樹脂からは、割合に広い範囲で連続した切りくずが得られる⁽²⁰⁾。以上をまとめてみれば、熱可塑性プラスチックの切削にあたっては、連続した切りくずを生じる範囲はかなり広くて切削しやすいといえよう。いいかえれば切削条件の選択が適当ならばなめらかな加工面と高い加工精度とが容易に得られることであって、すくい角、切込みあるいは削り速度をあまり大きくしすぎたとき、切りくず生成機構が異なり切りくずは連続しなくなつて、加工の結果もよくない。

2.2 熱硬化性プラスチックの場合 熱可塑性プラスチックの切削しやすさに比べれば、熱硬化性プラスチックを切削するとき、普通の条件で断続した切りくずが生じやすく加工面が荒れるので、かなり切削しにくい。

第3図は紙入りフェノール樹脂積層板を削り速度 70 m/min で切削したとき、切込みとすくい角との組合せで、切りくずがどのように変わるかを示したものである⁽¹³⁾。連続した長い切りくずは切込みの小さいときだけに得られるが、切込みが大きくとすくい角が正で大きくなるにつれて、切りくずは連続しなくなりつい

第1表 現用プラスチックの分類

プラスチック	熱硬化性プラスチック	フェノール樹脂(木粉, 綿ブロック, 石綿, 雲母, ガラス繊維, 薄片状布やコードなどが充てん材となる)
		ユリヤ樹脂(α -セルロース: 充てん材) メラミン樹脂(α -セルロース, セルロース, ブロック, 石綿, 薄片状布, ガラス繊維: 充てん材)
	熱可塑性プラスチック	アルキッド樹脂 ポリエステル樹脂(ガラス繊維, 鋳物質, 石綿, 合成繊維: 充てん材) シリコン樹脂(石綿, ガラス繊維, 鋳物質: 充てん材) エポキシ樹脂(ガラス繊維, 鋳物質, シリカ: 充てん材)
		ポリエチレン樹脂(高, 中, 低密度) ビニル重合体および共重合体(酢酸ビニル, ポリビニルアルコール, 塩化ビニル, 塩化ビニル酢酸ビニル共重合体, 塩化ビニリデン, ぎ酸ビニル) メタクリル樹脂 スチロール樹脂[耐衝撃用, 耐熱用, 一般用, ガラス繊維入り, スチレン・アクリロニトリル(AS), スチレン・ブタジエン・アクリロニトリル(ABS)]
		四ふっ化エチレン樹脂 三ふっ化エチレン樹脂 ポリアミド樹脂(ナイロン 6, 66, 610) ポリカーボネート樹脂 アセタール樹脂 ポリプロピレン樹脂 ポリウレタン樹脂

第1図 スチロール樹脂の切りくずの種類

には細かい粉状となる。第 4 図は充てん材のはいらないポリエステル樹脂注形品の切りくずの各種を示したものである⁽¹⁴⁾。負のすくい角を持つ工具で切削したときには、(a), (b) のように不透明で多数のぎざぎざを持った切りくずが生じ、すくい角を正にするとある程度連続した切りくずが得られるが、切りくず表面には (c) のような割れが認められ、またすくい角と切込みとを大きくすると、(d) のように切りくずは断続し鋭い角を持った透明のものが得られる。

3. 切りくず生成の種類⁽¹⁵⁾⁽¹⁶⁾

(A) 第 5 図は四ふっ化エチレン樹脂を削り速度 0.019 m/min という低速で、切込み 0.5 mm の条件で、すくい角を 3 種類に変えて切削しているときの切削中の模様を示したものであって⁽⁶⁾⁽⁷⁾⁽¹⁸⁾、切削作用も切りくずの生成もともになめらかであり、連続であることが明らかである。このような切りくずは、四ふっ化エチレン樹脂やポリエチレン樹脂のように、破壊時

第 2 図 四ふっ化エチレン樹脂の切りくずの表面と断面形状

の伸びの大きいゴム状高弾性を示す材料を低速切削するときに認められる。加工物は大きな変形を受けるが、切削抵抗から解放されるとひずみの大部分は遅れ弾性的に回復している。切りくずも大きな変形を受けながら排出されるが、ひずみはしだいに大部分が回復し、生じた切りくずの厚さを測定すると切込みの大き

さにほとんど等しくなり、切削比は1に近くなる。この切りくず生成機構を「連続流れ形*」と名づける(金属切削のときいわれている「連続流れ形」とは本質的に異なるので*印をつける)。この形態の切りくず生成はすべり形破壊によるものではなくて、高弾性変形によるものであると考えられ、金属切削には認められないものである(ゴム切削の場合には認められる⁽²²⁾)。この切りくずが生成されるときには、切削抵抗の変動は少なく加工面あらさも小さく、削り残しや削りすぎに気を付けさえすれば加工精度はかなり高い。

(B) 第6図はスチロール樹脂を削り速度 0.2 m/min, 切込み 0.25 mm の条件で、すくい角 10° の切削工具で切削しているときの模様を示したものであって⁽⁴⁾, 工具刃先から斜め上方に向かってせん断面が形成され、せん断面に沿ってのせん断によって切りくずが生成されていることがわかる。せん断間隔が小さいので、切りくずは連続しており、金属切削のときの切りくず生成とよく似ている。この場合には第2図上に示したとおり、切りくず表面にすべりのあとが認められる。また切りくず厚さは切込みの値よりも大きくなっている。せん断面は切りくず生成に要する仕事量が最小になる方向⁽¹⁹⁾に生じるものと考えられる⁽⁴⁾。この切りくず生成機構を「連続せん断形」と名づける(金属切削のときいわれている「連続流れ形」に対応するものである)。この形態の切りくずが生成されるときに

第3図 紙入りフェノール樹脂積層板の切りくずの種類

(a) $\alpha = -10^\circ$, $d = 0.023$ mm, $V = 715$ m/min

(b) $\alpha = -20^\circ$, $d = 0.05$ mm, $V = 136$ m/min

(c) $\alpha = 40^\circ$, $d = 0.015$ mm, $V = 1430$ m/min

(d) $\alpha = 40^\circ$, $d = 0.08$ mm, $V = 362$ m/min

第4図 ポリエステル樹脂注形品の切りくずの種類

は、加工面のあらさ値も小さく、加工精度も高い。

(C) 第 7 図はメタクリル樹脂を削り速度 0.8 m/min 、切込み 0.5 mm の条件で、すくい角 -10° の切削工具で切削しているときの模様を示したものであって⁽¹⁷⁾⁽¹⁸⁾、工具刃先に生じるせん断領域が広くなり、この領域でのせん断によって切りくずが生成される。このとき切りくず表面を見るとせん断間隔はかなり広く、切りくずとしては非連続形に属するものと思われ

る。この切りくず生成機構を「非連続単純せん断形」と名づける。この形態の切りくずが生成されるときには、図からわかるとおり加工面あらさも良くなく、加工精度も十分でないので、うまく切削加工するためにはこの形態の切りくずが生成される条件を選ぶべきではない。

(D) 第 8 図はスチロール樹脂を削り速度 0.2 m/min 、切込み 0.25 mm の条件で、すくい角 -30° の

削り速度 0.019 m/min 、切込み 0.5 mm 、加工物 四ふっ化エチレン樹脂

第 5 図 連続流れ形* 切りくずの生成

すくい角 10°
削り速度 0.2 m/min
切込み 0.25 mm
加工物 スチロール樹脂

第 6 図 連続せん断形切りくずの生成

すくい角 -30°
削り速度 0.2 m/min
切込み 0.25 mm
加工物 スチロール樹脂

第 8 図 非連続複合形切りくずの生成

すくい角 -10°
削り速度 0.8 m/min
切込み 0.5 mm
加工物 メタクリル樹脂

第 7 図 非連続単純せん断形切りくずの生成

すくい角 0°
削り速度 0.8 m/min
切込み 0.25 mm
加工物 メタクリル樹脂

第 9 図 非連続複合形切りくずの生成

切削工具で切削しているときの模様である⁽⁴⁾⁽²⁰⁾。この条件では切りくずは非常に粘り挙動を示しながら生成されている。このように負の大きなすくい角を持つ工具で切削するときには、背分抵抗が大きく、せん断面ではせん断応力のほかになりに大きな圧縮応力が同時に働くので、単純にせん断面ですべて切りくずが生成されるのではなくなるものと考えられる。この切りくず生成機構を「非連続複合形」と名づける。この形態の切りくずが生成されるときには、切削中に塑性

すくい角 40°
削り速度 0.2 m/min
切込み 0.25 mm
加工物 メタクリル樹脂

第 10 図 非連続クラック形切りくずの生成

すくい角 0°
削り速度 1430 m/min
切込み 0.08 mm
加工物 ポリエステル樹脂注成品

第 11 図 非連続クラック形切りくずの表面に観察される羽毛状模様

(a) プラスチックの代表的な応力-ひずみ曲線の形 (1)

(b) プラスチックの代表的な応力-ひずみ曲線の形 (2)

(c) プラスチックの代表的な応力-ひずみ曲線の形 (3)

第 12 図

変形域の大きさが変動し、加工精度も悪く加工面あらさも大きいので、うまく切削加工するためにはこの形態の切りくずが生成される条件を選ぶのはよくない。

(E) 第9図もまた「非連続複合形」に属するものである。これはメタクリル樹脂を削り速度 0.8 m/min, 切込み 0.25 mm, すくい角 0° で切削しているときであって⁽¹⁵⁾⁽¹⁸⁾, せん断面あるいはせん断領域でのせん断以外に、工具刃先から斜め下方に割れが周期的に発生している。割れが生長してある長さに達すると、割れの先端から自由面に向かって新しいせん断面が形成され、見掛けのせん断角が大きくなり非連続形の切りくずが生成される⁽¹⁷⁾。周期的な割れが加工面に残るので、加工精度やあらさが悪くなるのはいうまでもない。

(F) 第10図はメタクリル樹脂を削り速度 0.2 m/min, 切込み 0.25 mm の条件で、すくい角 40° の切削工具で切削しているときの模様であって⁽⁴⁾⁽¹⁵⁾, 工具刃先から斜め下方に向かって割れが生長し、割れの生長、発達が主原因となって、断続的に非連続切りくずが生成される場合である。この形態の切りくずは、フェノール樹脂、ポリエステル樹脂あるいはエポキシ樹脂のようなぜい性を示す熱硬化性プラスチックおよびメタクリル樹脂やスチロール樹脂のようなある種の熱可塑性プラスチックを、大きなすくい角と切込みで切削するとき生成される。切りくずはすべり形破壊ではなくて、完全なぜい性破壊によって生じるので、第4図(d)に示した貝がら状をしたものが多く、切りくず表面には羽毛状模様(hackle marks)が観察される⁽⁴⁾⁽¹⁵⁾。第11図に示したものは、ポリエステル樹脂注形品を、削り速度 1430 m/min, 切込み

0.08 mm, すくい角 0° の条件で切削したとき得られる切りくず表面に認められる羽毛状模様⁽¹⁴⁾であって、ガラスのような硬ぜい材料の破断面に見られるものと同じようなものである。この切りくず生成機構を「非連続クラック形」と名づける。この形態の切りくずは、鋳鉄などがある条件で切削した時以外には金属切削のときにはほとんど認められない。この形態の切りくずが生成されるときには、切削面に大きな割れが残るので、加工面あらさや加工精度は非常に悪くなり、この条件を選ぶべきではない。特にメタクリル樹脂のように加工性の良い材料でも、切削条件の選び方によってはこの形態の切りくずを生じるようになるので、実際の加工にあたっては注意する必要がある。

以上をまとめてみると、プラスチック切削のときの切りくずの種類を、第2表のようにまとめてあらわすことができよう⁽¹⁵⁾⁽¹⁶⁾⁽²¹⁾。

第2表 プラスチック切削のときの切りくずの種類

連続形	流れ形*	
	せん断形	
非連続形	単純せん断形 複合クラック形	圧縮応力を伴ったせん断形
		引張応力を伴ったせん断形

第13図 メタクリル樹脂の切りくずの形態の分類 (削り速度 0.2 m/min)

第14図 ポリエステル樹脂注形品の切りくずの形態の分類

4. 切りくず生成の機構

切りくずの形態は切削条件ばかりでなく、プラスチックの種類によっても異なる。それは切削中に加工物

に働く応力やひずみの大きさや方向が切削条件によって変り、プラスチックの持つ特性によって切りくず生成機構が違って くるためと 考えられる。外力が加わって破壊するまでの代表的な応力-ひずみ曲線の形は、プラスチックの種類によって第 12 図のように変る⁽³⁾⁽²¹⁾。(a) 図はフェノール樹脂成形品、ポリエステル樹脂注形品およびガラス布入りポリエステル樹脂積層品の応力-ひずみ曲線であって、破壊までの応力とひずみとは直線関係にあるとともに破壊時の伸びは小

(a) ポリカーボネート樹脂切削のとき、種々の切込みにあける工具すくい角と切削抵抗二分力との関係

第 15 図

さくて、いわゆるぜい性破壊を示している。これに対して、ポリウレタンゴム、ポリアミド樹脂、ポリエチレン樹脂あるいは四ふっ化エチレン樹脂のような熱可塑性プラスチックは、(c) 図に示すとおり破壊時に数百 % の伸びを持ちゴム状高弾性を示している。メタクリル樹脂、ポリカーボネート樹脂、アセタール樹脂や耐衝撃性スチロール樹脂などの応力-ひずみ曲線は (b) 図に示すとおり、破壊時の伸びは数十 % であって、(a) と (c) 図との中間の値を持ち金属材料の応力-ひずみ曲線に類似している。

次は引張強さに対する圧縮強さの比較の問題である⁽³⁾⁽²¹⁾。熱硬化性プラスチックの圧縮強さの値は引張強さの値よりも大きくて (5~6) 倍の強さを持っている。これに対して熱可塑性プラスチックのあるものは圧縮強さのほうが引張強さよりも大きく、ゴム状高弾性を示す材料では逆の傾向を示している。これらはそれぞれ第 12 図に示した 3 種類の応力-ひずみ曲線と対応するものであって、プラスチックの持つ特性によって切りくず生成機構が違ふことが当然予想されるのである。

第 2 表に述べた分類にしたがって、切削条件によってプラスチック別の切りくずがどのように変るかを調べてみよう。

第 13 図はメタクリル樹脂を削り速度 0.2 m/min で切削したとき、すくい角、切込みおよび加工物温度で、切りくずの形態がどのように変るかを示した一例である⁽¹⁷⁾。また第 14 図はポリエステル樹脂注形品について、削り速度、すくい角、切込みによって変化する切りくず形態を示している⁽¹⁴⁾。いずれの図においても、○が連続せん断形、△が非連続単純せん断形、△が非連続複合形、▲が非連続クラック形、×が切りくずを生成しない領域をあらわしている。切込みの小さいほど、削り速度のおそいほど、そして加工物温度が高くなるにつれて、連続形切りくずの生成される範囲は広くなることが明らかにわかる。ここで考えなければならないのが、切削中に加工物に働く切削抵抗の大きさと方向、加工物の変形の模様などであろう。四ふっ化エチレン樹脂の切削中の変形が工具すくい角によってどのように変るかを、切削中の瞬間写真および 8 mm 映画によって調べたところ、すくい角が正のときには工具真下の加工物は引張ひずみを受け、すくい角が負になると圧縮ひずみが大きくなることがわかった⁽⁶⁾。これは切削抵抗二分力の測定結果からも明らか

である。すなわち第 15 図は二、三のプラスチックについて工具すくい角 α と切削抵抗二分力 F_c , F_t との関係を示したものであって、 α が 0 または負のときには F_t は正で圧縮を、 α が正になるにつれて F_t は負になって引張りを示すようになる。

また削り速度を変えたときの切りくず生成機構の相違は、切削抵抗や加工面あらさの測定値から類推することができ、応力-ひずみ曲線に及ぼす変形速度の影響から説明できる。

5. 結 論

現用されているプラスチックについて、広い範囲に切削条件を変えて生じる切りくずの形態および切りくず生成模様の観察から、次の結論を得た。

(1) プラスチックの切りくずは、連続形と非連続形とに分けられる。

(2) プラスチックに見られる切りくずには、金属切削のとき見られない特異なものがあることを見いだした。

(3) 切りくずの形態はプラスチックの種類と切削条件とによって異なり、これは材料の示す粘弾性挙動によって左右される。

文 献

- (1) 小林, 構造材用プラスチック工学, (昭 37-5), オー・ム社.
- (2) A. Kobayashi, *Modern Plastics*, 40-11 (1963-7), 110.
- (3) 小林, 機械と工具, 9-10 (昭 38-10), 21.
- (4) A. Kobayashi & K. Saito, *Bull. Electrotechnical Laboratory*, 26-8 (1962-8), 595.
- (5) A. Kobayashi & K. Saito, *C.I.R.P. Annalen*, 11-2 (1963-10), 82.
- (6) 小林・斎藤, 材料試験, 9-79 (昭 35-4), 345.
- (7) 小林・斎藤, 高分子, 9-97 (昭 35-4), 257.
- (8) 益子・ほか 2 名, 機械学会論文集 29-202 (昭 38-6), 1054.
- (9) A. Kobayashi, *Modern Plastics*, 41-2 (1963-10), 229.
- (10) 小林・ほか 2 名, 第 9 回合成樹脂工業技術発表講演会前刷, (昭 38-3-26).
- (11) U.M. Rao & others, *ASME Paper* No.63-Prod-12.
- (12) 小林・樽見, 機械と工具, 10-3 (昭 39-3), 21.
- (13) 小林・樽見, プラスチックス, 15-4 (昭 39-4), 1.
- (14) 小林, 機械の研究, 16-7 (昭 39-7), 833.
- (15) A. Kobayashi, *4th Inter. Congr. on Rheology (Providence)*, (1963-8-29).
- (16) 小林・斎藤, 高分子, 12-132 (昭 38-3), 183.
- (17) A. Kobayashi & K. Saito, *J. Polymer Science*, 58-166 (1962-4), 1377.
- (18) A. Kobayashi *Modern Plastics*, 41-1 (1963-9), 144.
- (19) M.E. Merchant, *J. Appl. Phys.*, 16-6 (1945-6), 318.
- (20) 小林, 機械工作, 11-74 (昭 39-11), 51.
- (21) A. Kobayashi, *Bull. Electrotechnical Laboratory*, 27-4 (1963-4), 291.
- (22) 非金属材料の精密加工法 (上), 非金属材料加工技術の講座第 I 巻, ゴム・エポナイトの切削加工法 (昭 38-10), 地人書館.