硬質塩化ビニル切削の特異性に関する研究

(第1報)*

——切りくず生成の特異性が切削現象ならびに加工面に及ぼす影響——

金 枝 敏 明**

Characteristics in Rigid-Polyvinylchloride Cutting Mechanism (1st Report)
- Characteristic Chip Formation Effect on Machined Surface -

Toshiaki Kaneeda**

Rigid-Polyvinylchloride(R-PVC) cutting mechanism has been studied. Especially, generating mechanism and condition for periodical surface irregularities have been investigated. The cutting forces are affected by cutting speeds and tool rake angle. The maximum cutting forces exist between 4 and 10 m/min cutting speeds which are called critical cutting speeds. At these speeds, the cutting mechanism changes from continuous to discontinuous chip formation. Above these speeds the periodical irregularities are generated on the machined surface by less than 30° rake angle cutting. The periods depend upon depth of cut and the rake angle. Smooth surface can not be obtained at the critical rake angle. Rake angle 30° cutting produces continuous chip, however relatively smooth machined surface has some big damages caused by cracking. The cutting model offered by author can explain characteristic R-PVC cutting phenomena well.

Key words: polyvinylchloride cutting mechanism, periodical surface irregularities, characteristic chip formation, critical cutting speed, critical rake angle,

1. 緒 言

硬質塩化ビニル切削における工具摩耗は、金属切削のそれと異なり切削初期から刃先丸味が増大し、すくい面摩耗と逃げ面摩耗の区別できない特異なものである。安味¹⁾はその点に着目し、刃先の摩耗に伴い加工面が荒れること、比切削抵抗が大きくなることなど、刃先の摩耗形状が切削現象に及ぼす影響を調べた。

しかしその根本である刃先稜が丸味を帯びる詳しい原因については、十分に明らかにされているとはいえない。それは切削機構そのものが不明なことが一因とも考えられる。また著者によれば刃先が十分鋭利な状態においても常用切削速度では加工面が荒れることを指摘しており²⁾、今一度硬質塩化ビニルの切削機構を調べる必要があると思われる。近年レーザディスク等のディスクの地下材料に硬質塩化ビニル等の熱可塑

性プラスチックが使用されること³⁾があり、精密切削のニーズが増加しており、こういった点からも切削機構を明らかにする必要があるものと考えられる。

そこで本報では上述の観点から硬質塩化ビニルの切削現象を調査し、その特徴的なところおよびその加工面に及ぼす影響について報告する。

2. 実験装置および方法

実験に使用した切削装置としては低速から通常速度まで幅広く切削速度が設定可能で、工具や被削材が剛性高く保持でき、二次元切削が容易な形削盤(刃物台の最大ストローク650mm)を主として用い、比較的速度の高いところは旋盤を使用する。旋盤では円筒状の被削材の表面上に断面が矩形状のねじ山を作り、それをねじ切りの要領で切削して二次元切削を実施する。

一般に精密切削を実験的に研究するにはそれ相応の実験装置が必要なのは言うまでもなく、今回用いた両装置はそういった目的にはふさわしくないと考えられがちであるが、入念な静的精度および運動精度のチ

* 原稿受付 昭和62年9月26日。昭和61年度精密工学会秋季大会学術講演会(昭和61年10月26日)にて発表

** 正会員 岡山理科大学工学部(岡山市理大町1-1)

Table 1 Cutting condition

Work material		Rigid-Polyvinyl chloride
Tool	Material	Tungsten carbide (K10) Diamond
	Rake angle °	-10, 0, 10, 20, 30 3 (Diamond)
	Relief angle °	10
Cutting form		Orthogonal cutting
Cutting speed m/min		1.3 — 270
Width of cut mm		1.8
Depth of cut μm		40 — 500
Cutting fluid		Dry

エックならびにその対策を施したため、今回の目的には十分と考えられるレベルに達している。

被削材はタキロン株式会社製硬質塩化ビニルの押出し材で、分子量 53000、降伏強さ 41.2MPa、引張強さ 73.5MPa である。

切削速度は 1.3~270m/min である。

切込みは 40~500 μm で、主として 90 および 100 μm で実験を実施する。

工具には硬質塩化ビニルの切削において摩耗が少ない超合金 K10¹⁾ およびダイヤモンド工具を用いる。またプラスチック切削では工具すくい角の切削現象への影響が大きい⁴⁾ ので、すくい角 (以下 α と略す) は $\alpha = -10 \sim 30^\circ$ の範囲で 10° おきの 5 種類とする。

切削条件をまとめて表 1 に示す。

後述するように不連続形切りくず生成時の切削力には、不連続現象ゆえに周波数の高い変動が生じる。そこで切削力の測定には高剛性 (主分力方向 1000N/ μm 、背分力方向 300N/ μm) および高感度で、高い固有振動数 (主分力方向 17678kHz、背分力方向 9683kHz) を有する水晶式の圧電形切削動力計を用いる。さらに通常切削速度域での切削現象を精確に観察するために、高速度ビデオ動作解析システム (“エクタブロ 1000” コダック社製) を用いる。この装置では 1 s 当たり 1000 コマの録画が可能である。

3. 実験結果および考察

3.1 臨界切削速度および臨界すくい角

図 1 に切削力*に及ぼす切削速度の影響を示す。 $\alpha = 0^\circ$ の場合切削速度の増大とともに主分力が増加し、4 m/min で最大値を示した後、速度の上昇とともに緩

Fig. 1 Cutting speed effect on cutting force

やかに減少していく。背分力は主分力と同様の傾向を示しているがその変化の程度は主分力より小さい。一方 $\alpha = 30^\circ$ の場合も主分力および背分力の変化は基本的には $\alpha = 0^\circ$ の場合と同様であるが、変化の幅が小さくなり、しかもその割合が大変緩やかで明確なピークを示さない。また背分力に至ってはほとんど変化せず常に負の値となっている。ここに示したのは $\alpha = 0^\circ$ と 30° であるが、 $\alpha = 10^\circ$ および 20° の場合も 0° と 30° の中間の傾向を示した。

この切削力が最大値を示す速度は臨界切削速度となり、 $\alpha = 30^\circ$ の場合以外これを境に切りくずは連続形から特殊せん断形**に移行する。最大値を示したのは切削機構そのものの変化はあるものの本質的には切削速度の上昇に伴うひずみ速度の増大が被削材の変形応力の増加⁵⁾ をもたらし、さらなる速度の増大は切削温度の上昇、ひいては被削材の軟化を生じさせることに起因するものと考えられる。したがって両者の相反する効果のうち応力の増大効果が全体的に見て著しいのが臨界切削速度であると思われる。ちなみに安味ら⁶⁾ の切削温度の測定結果では、切削速度 $V = 16\text{m/min}$ 、切込み $t_1 = 0.29\text{mm}$ 、 $\alpha = 20^\circ$ の工具すくい面の最高温度は 100°C にも達している。臨界切削速度が存在するのは、通常の金属はじめ熱硬化性プラスチックである不飽和ポリエステル等でも認められている⁷⁾ が、硬質塩化ビニルと後者の応力-ひずみ特性とは異なる⁸⁾ ものである。

さらに図中には臨界すくい角をも示した。臨界すくい角は切削速度 5m/min で 12° 、速度の上昇とともに緩やかに低下し約 10° 弱まで減少するが、ほとんど速度の

* 後述する臨界切削速度以上の切削条件では、切りくずは連続形から特殊せん断形になり、切削力は周期的変動を伴う。変動が伴う場合の切削力はその変動の平均の値を採用して以下考察する。

** ここで特殊せん断形と称したのは図 6 に示すように金属切削で見られるせん断形とはクラックの形状や発生機構が異なるためである。

Fig. 2 Machined surface and chip

影響を受けないと判断される。従来の研究結果⁷⁾と今回の実験結果とは切削条件が全く同一でなく、そのため直接的な比較は部分的にしかできないが、これらの値は妥当な結果と判断される。

3.2 加工面性状ならびに切りくず形態

これ以後臨界切削速度以上での切削を対象とする。図2に超硬工具およびダイヤモンド工具 ($\alpha = 3^\circ$) の

加工面と切りくずを示す。切削速度は50m/min, 切込み100 μm である。図からわかるように超硬工具 $\alpha = 0^\circ$ の加工面上には工具逃げ面でパニシされて生成された比較的良好的部分と破断されたような荒れた部分とが90 μm の間隔で周期的に存在しており、その断面形状は複雑であることが認められる。20° の場合も0°と同様にやはり良好な部分と荒れた部分とが、周期的に存在している。ただ比較的良好的加工面の割合が、すくい角の増加とともに減少している。

一方連続形切りくず生成の $\alpha = 30^\circ$ の加工面には他の角度のように周期的段差は認められなく、スムーズに分断したと考えられる比較的良好的面と図では見られない欠けが存在する面となる。すくい角が30° にもなると刃先角が小さくなり、刃先が被削材に鋭く食い込むため被削材に割れが発生し、それが加工面に大きな損傷として残る。このことはすくい角を30° にしても良好な加工面が得られないということを意味する。

各加工面の最大粗さ R_{max} は、触針式の粗さ計による測定結果では $\alpha = 0, 30^\circ$ でそれぞれ $R_{\text{max}} = 4 \sim 5 \mu\text{m}$, $3 \sim 4 \mu\text{m}$ である。 $\alpha = 30^\circ$ の場合、加工面に存在する大きな欠けを取り除いた値であり、中心線平均粗さは $R_a = 2.7 \mu\text{m}$ である。なお触針式粗さ計による測定後の被削材表面には、被削材自身の硬度が高くないために測定圧0.5gfの触針が通過した跡がはっきりと残っており、測定結果の絶対値は100%信頼できるものではない。しかし大方の傾向を示していることは確かであろう。

また切りくずも加工面に対応するかのようにすくい角によって変化が見られた。すなわち周期的段差の顕著な $\alpha = 0^\circ$ の場合その段差の発生に対応して菱形の形状をもつブロック状の切りくずが見られる。この切りくずは、ブロックごと簡単に破断できる特殊せん断形であり、ブロックの生成と加工面上の周期的段差の生成とは対応するものである。また20° の場合も0°と同様の切りくずとなっている。しかし一つ一つのブロックの形状は0°の場合と異なり、菱形から長方形に近くなっている。

一方、30° の場合図からわかるように切りくずは一見金属の流れ形の形状を呈しているように見えるが、実際は金属のようにラメラ構造をとらなくてただの連続形となっており、その厚さも一樣で切削比も1となっている。ここで注目されるのは、従来の研究結果では良好な加工面を得るには臨界すくい角の工具で切削すればよい⁷⁾とされているが、今回の実験結果では得られなかった点である。図1, 2で示したように $\alpha = 20^\circ$ の加工面は背分力が負にもかかわらず良好ではな

Fig. 3 Relationship between depth of cut and period of the surface irregularities

い。なおこれらの場合の臨界すくい角は 10° である。また上記の結果は切りくずを見れば加工面の状態の推定が可能ということを意味する。

硬質塩化ビニル切削においては工具摩耗が他の被削材と異なり刃先先端に集中し、その結果刃先が鈍化しそれが加工面を乱し、周期的段差を生成するという報告¹⁾がある。しかし今回の実験に用いた超硬工具の刃先は、ダイヤモンド砥石#800で充分にいいに研磨仕上し、さらに実験実施には刃先の状態に留意し、常に鋭利な工具で切削したにもかかわらず加工面には周期的段差が生成され、過去の研究結果と異なるものとなった。

さらに工具刃先が超硬工具よりも鋭利なダイヤモンド工具を用いた実験においても図2(d)に示すように超硬の $\alpha=0^\circ$ と同様な加工面と特殊せん断形の切りくずが得られた。ただ加工面については工具刃先が鋭い分だけバニシされた部分が、超硬のそれより良好である。ダイヤモンド工具は超硬工具とは異なる良好な摩擦特性を有するといった点を考慮しても、加工面や切りくずの観察結果では切削現象への本質的な影響があるとは認めがたく、結局工具刃先の状態により周期的段差が生成される、されないということはないものと判断される。

3.3 加工面上の周期的段差の発生条件

図3には切込みと加工面上段差の周期との関係を示す。切込みが $450\ \mu\text{m}$ 以上では二次元切削が成立しにくく、また切削そのものの自体がスムーズにできなかったため測定していない。図からわかるように切込みに比

Fig. 4 Condition for generating the surface irregularities

例して周期が大きくなっており、さらに同じ切込みであればすくい角が小さいほど周期が大きくなる。これは切込みが大きくなれば切削する部分の相似の関係から、またすくい角が大きくなれば切削合力が切削方向に対し上方に向き、摩擦角 β が減少し、その結果せん断角が大きくなることに起因するものである。

次に、加工面上の周期的段差の発生条件を図4に示す。図中のSmoothは周期的段差がないという意味である。 $\alpha=30^\circ$ においては全面的に生じない。このようにすくい角の減少や切込みの増加とともに、周期的段差の発生開始速度が低下している。このことについてはさらに3.4項で述べる。

さて上述の周期的段差の発生条件より考えてその機構に直接的に関与するのはひずみ速度、切削温度および応力場と考えられる。応力場の影響は、境界条件を確定して詳細に調べることは重要と考えられるが、今回はすくい角の影響という形でたやすくかつ顕著な方法で、一応部分的には調べている。そこで切削温度とひずみ速度の影響を調べるために被削材の温度を $-5, 14, 30, 60, 83^\circ\text{C}$ にコントロールし切削速度が 50m/min までの切削実験を実施した。

冷却は、充分にその効果を期すため被削材とそのホルダを包みこむフロートを造り、そこに液化窒素（臨界温度 -147.2°C ）を流して冷却し、接触式熱電対温度計にて測定しながら、上記の温度に設定した。また室温より高い温度はドライヤの熱風にて加熱し、一定の温度にした後実験を行った。

図5は、すくい角 $\alpha=0^\circ$ における周期的段差の発生する被削材の温度ならびに切削速度を示したものである。段差は低温の -5°C においても切削速度が 3m/min

Fig. 5 Work temperature effect on the surface irregularities

以上で発生し、臨界切削速度はガラス転移温度である約 80°C 付近までほとんど変化しない。しかしガラス転移温度以上になればすべての速度で段差が発生しなくなる。この結果は一見ひずみ速度が段差の発生を支配しているように考えられるが、後述の3.4項での考察結果をも考慮すると、被削材の変形に伴う局所的な温度が支配すると思われる。ガラス転移温度以上であれば被削材が軟化し強度が低くなるため、スムーズな切りくず生成となり段差は生成されなくなるが、うねった加工面となる。

3.4 硬質塩化ビニル特有の切削機構

前節まで切削速度による切削機構の変化、それに伴う加工面の劣化、良好な加工面が背分力の働かない切削状態下や連続形切りくずが得られるすくい角 30° の工具の切削でも得られないなどの硬質塩化ビニル切削の特異な点を明らかにした。次に上述の結果および高速度ビデオ動作解析システムによる観察結果より周期的段差の生成する場合の切削機構を考察し、それをモデル化したものを図6に示す。同図(a)は背分力が正である $\alpha=0^{\circ}$ 、同図(b)は背分力が負の $\alpha=10^{\circ}$ および 20° の場合である。

(a) の場合1)で特殊せん断形切りくずの1ブロックが生成された後、工具刃先がせん断すべりを生じた面(図のA B面)に食い込み始める。段階1)~3)では、切りくずと加工面は刃先の押込み、微視的には引張破断によって分離され、刃先には応力が集中的に負荷される。2)に移ると1)よりさらに刃先が食い込む。工具すくい面の一部は硬質塩化ビニルのガラス転移温度より高い 100°C 以上にも達する。その分布は金属の場合と異なり刃先先端から若干すくい面側によったところに最高点が存在し⁹⁾、さらにすくい面上の摩擦応力は刃先部分で急に大きくなる⁹⁾。したがってそこに接す

Fig. 6 Characteristic cutting mechanism

る被削材の部分に軟化が生じ、Bの部分がすくい面に粘着する。粘着したB部分の拘束と切削過程の進行により直線状であったA B部分の中央部分が膨らみ、円弧状になる。すなわちKomanduriら¹⁰⁾やCookら¹¹⁾の呼ぶところの“据込み過程(upsetting process)”が生じる。そうすると段階2)と3)の図のように切りくずとすくい面とが一部接触しない領域ができる。そこは空気に触れ、冷却され温度が低下することになり、そのためその部分の工具摩耗は金属切削のそれより少なくなる。段階1)~3)の加工面はパニシされて生成される比較的良好な部分となる。

4)に至ると切りくずがスムーズに流出しないため刃先前方の切りくずの堆積が大きくなりすき力学的に不安定となり、通常の切削でのせん断面に相当するC D部分で局所的に大きなすべりが生じ、その結果切りくずはブロック状の形状をなし排出される。その反動で被削材本体の方はC D面で切りくず側とは反対に相対的に大きくすべり、工具逃げ面の下方に間隙が発生する。また同時に刃先は被削材に強く擦過される。そして1)に戻る過程を繰り返し、加工面に周期的段差が生成される。刃先が擦過される際や食い込む際、被削材との接触状態が被削材の性質から粘弾性的にならざる

をえなく、上述の過程を繰り返せば刃先が丸味を帯びて鈍化していくことが説明できる。

周期的段差の発生しない低切削速度の場合、工具すくい面の温度は低い。たとえば段差の発生しない速度である0.45 m/minでは約40°Cである。しかし切削速度の増加による切削温度の上昇は工具すくい面と接触する部分に軟化を生じせしめ、そこはすくい面に粘着する。これは切込みの増加およびすくい角の減少によりさらに助長される。切削速度の上昇による変形領域の狭小化に加えて被削材の熱伝導率の低さは切削域全体の一様な温度上昇の可能性を少なくし、臨界切削速度以上で周期的段差を発生させる。

このような切込みが50~400 μmという切削条件の場合、一般的な延性のある金属なら引張強度がせん断強度よりもかなり大きいので、切りくず生成は微小なピッチの連続的なせん断変形によって行われ、その形状は流れ形になる。一方熱可塑性プラスチックでは金属と異なりせん断強度が引張強度と同一程度¹²⁾であるため、切りくず生成は引張破壊で生じやすく、分離された切りくずは排出される時にもしすくい面上に上述のような障害が無ければ $\alpha=30^\circ$ の場合のようにそのまま流出し、連続形切りくずになる。

また図(b)ではほぼ同様な現象が生じている。ただ(a)の場合と異なり背分力が常に負および零であるため工具逃げ面が加工面とほとんど接触しておらず、加工面はバニシ作用を受けなくて刃先での分離作用のみによって生成される加工面の部分が存在する。

以上のモデルによって硬質塩化ビニル切削での特異な周期的段差の生成状況の解明や工具刃先の優先的摩耗の説明の手がかりが得られたものと考えられる。

4. 結 論

硬質塩化ビニル特有の切削機構を明らかにするため二次元切削を行い、切りくず、加工面の観察および切削力の測定を実施した。その結果以下のことが明らかになった。

- (1) 切削力は切削速度の影響を受けすくい角が0~30°の範囲では4~10m/minで最大値をとる。0~20°ではそれらの速度が臨界切削速度となり切削機構が変化する。
- (2) 臨界切削速度以上では、切りくずは連続形から特殊せん断形に変化し、加工面上には周期的段差が生成される。
- (3) 周期的段差は工具逃げ面でバニシされて生成された、もしくは工具刃先での分離作用で生成さ

れた良好な面と局所せん断すべりで生成されたと考えられる面からなり、良好な面の割合はすくい角が大きくなると小さくなる。

- (4) 周期的段差のピッチは、切込みによって変化し、切込み50~400 μmの間で45~360 μmの値をとり、すくい角が大きいほど小さい。
- (5) 工具が臨界すくい角でも臨界切削速度以上であれば良好な加工面は得られない。一方すくい角30°では、おおむね良好な部分に大きな欠けのある加工面になる。
- (6) 提唱した切削機構モデルにより硬質塩化ビニル特有の周期的段差の生成状況が説明でき、またそれは刃先の優先的摩耗解明の有益な手がかりになると思われる。

実験実施に際しては日本ケーブルシステム(株)勤務(当時岡山理科大学院院生)高橋正行君や院生河坂博文君らの労に負うところ大きく、また高速度ビデオ解析装置の使用に当ってはコダック・ナガセ(株)の協力を得ましたので、ここで深く感謝致します。

参 考 文 献

- 1) 安味貞正：合成樹脂の切削における工具摩耗(第2報) - 硬質塩化ビニルの切削における工具摩耗形状と切削機構、日本機械学会論文集(第3部), 39, 320 (1973) 1327.
- 2) 金枝敏明：硬質塩化ビニル切削における特異性について、昭和61年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集(1986) 867.
- 3) 西口隆、榎田正美、松崎永二、堀安俊介：ダイヤモンドの微細成形加工(第2報) - SiO_2 薄膜工具による精密研磨、昭和60年度精機学会春季大会学術講演会講演論文集(1985) 293.
- 4) 例えば、金枝敏明、津和秀夫、井川直哉：プラスチックの切削機構に関する研究(第1報) - 走査電子顕微鏡内加工実験装置による分離作用の観察、昭和56年度精機学会秋季大会学術講演会講演論文集(1981) 858.
- 5) 伊藤公正編：プラスチックハンドブック、工業調査会(1981) 858.
- 6) 安味貞正、益子正己、川部 崇：プラスチックの切削温度分布特性、昭和60年度精機学会秋季大会学術講演会講演論文集(1985) 153.
- 7) 斎藤勝政：プラスチックの削りくずの生成機構、日本機械学会論文集, 31, 224 (1965) 1606.
- 8) 高分子学会編：高分子材料の工学的性質(I), 地人書館(1969) 139.
- 9) 安味貞正、益子正己、白樫高洋、臼井英治：硬質塩化ビニル樹脂切削における工具すくい面の摩擦特性、昭和56年度精機学会秋季大会学術講演会講演論文集(1981) 491.
- 10) R. Komanduri and T. Schroeder : On Shear Instability in Machining a Nickel-Iron Base Superalloy, Trans. ASME, 108, (1986) 93.
- 11) N. H. Cook, I. Finnie and M. C. Shaw : Discontinuous Chip Formation, Trans. ASME, 76, (1954) 153.
- 12) 8) の p. 59.