

硬質塩化ビニル切削加工面の 周期的段差生成に及ぼす安定剤の影響

金 枝 敏 明*・光 石 一 太**

*岡山理科大学工学部機械工学科

**岡山県工業技術センター

(1995年9月30日 受理)

1. 緒 言

代表的な硬質塩化ビニル（以後 R-PVC と略す）を通常よく採用される切削条件であるすくい角 $\alpha < 30^\circ$ ，切削速度 $V > 4 \text{ m/min}$ で切削すると，加工面に周期的段差が生成される¹⁾。JIS によれば R-PVC は 3 種類に分類されるが，その性質を左右する添加剤の種類や量については細かく規定されておらず，同じ分類にも関わらず実際は性質の異なる材料が多く存在することになる。性質を左右する添加剤の中でもとりわけ安定剤は重要なものであり，機械的性質を支配する。したがって安定剤が上記の切削加工面上の周期的段差の発生¹⁾やその他の切削特性にも多大な影響を及ぼすと察せられるが，今のところそのような調査はされていない。また周期的段差の生成に大きく関与すると考えられる熱軟化温度も R-PVC の種類によって微妙に変化するが，その影響についても未だ検討されていない。

そこで R-PVC の安定剤が周期的段差の生成を始めとする切削特性に及ぼす影響を調査するため，まず機械的性質を両極端にする鉛系とスズ系の安定剤を含有する 2 種類の R-PVC（JIS 1 種ならびに 3 種相当品）を選択し，切削実験を行った。すなわち前者では延性に富み，他方後者では脆性的な性質を呈する材料となる。また切削加工仕上げを前提とし，かつ切りくず処理を容易にするため炭酸カルシウムを充填剤として含有している材料も選び，同様の調査を実施した。さらに金枝の実験試料¹⁾の代表的な R-PVC も試料とした。あわせて各種材料の熱軟化温度の影響も求めた。

それらに加えて，軽量化や清浄さが要求されている電子部品の製造設備等に比重がより小さく，不純物が少ないといった点で R-PVC より有利で，今後それにとって替わる可能性の高い材料であるポリプロピレン（以後 PP と略す）も被削材に用い，R-PVC と同様な調査を実施した。

2. 実験装置および方法

実験に使用した切削装置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り盤（内田機械製 SUD-3，刃物台

の最大ストローク650mm)である。精密な切削実験には一般に形削り盤は不相応と捉えられがちであるが、入念な静的剛性および運動精度の点検ならびに対策の結果、十分に研究の目的が達せられる域に到達している。

工具には R-PVC の切削において摩耗が少ない超硬合金 K10²⁾を用い、すくい角 α は、周期的段差の生成に対し顕著な差が現われる $\alpha = 0^\circ \sim 30^\circ$ の 10° おきとした。切削速度は 0.5~60m/min の 0.5m/min 毎に設定し、また後述する臨界切削速度を正確に求める際にはより細かな設定を行った。切込みは 50, 100, 200, 300 および 400 μm とした。切削抵抗の測定には高剛性 (主分力方向 1000 N/ μm , 背分力方向 300 N/ μm)、高感度で高い固有振動数 (主分力方向約 18 kHz, 背分力方向 9.7 kHz) を有する水晶製の圧電型動力計 (キスラー社製 9251A) を用いた。

切削条件をまとめて Table 1 に示す。

3. 供試材料

R-PVC の安定剤には金属石鹼, 有機スズ系, 鉛系, アンチモン系, 非金属安定剤等があり, 緒言でも述べたように機械的性質を大きく左右する。その中でも有機スズ系は優れた安定化能を供与し, また鉛系は全安定剤の 60% を占める代表的なものである。そこでまず被削材中の安定剤の種類を X 線分析によって確認した。実験に使用した被削材のスズ系, 鉛系および後者に炭酸カルシウムを充填剤として含有させ, 被削性を向上させた R-PVC を以後それぞれ T, S, ET 種と呼ぶ。ET 種の添加剤の観察とその成分分析は EPMA (X 線マイクロアナライザ) で行った。さらに金枝の実験に用いた R-PVC の代表的な材種である鉛系の E 種¹⁾についても適宜実験を実施した。

Table 1 Cutting conditions

Work material	R-PVC S (Sn) T (Pb) ET (Filler) E (Pb) PP Non-heat treatment Heat treatment
Tool material	Tungsten carbide K10
Rake angle	0, 10, 20, 30
Relief angle	10
Cutting form	Orthogonal cutting
Cutting speeds (m/min)	0.5-60.0 every 0.5 m/min
Width of cut (mm)	3.0
Depth of cut (μm)	50, 100, 200, 300, 400
Cutting fluids	Dry

PP に関してはもともと JIS にその詳細な規格がないが、その分類によれば今回の試料は一般用に相当するものであり、電子部品製造関連の装置で使用される材料なので添加剤はほとんど含んでいない。これは X 線分析結果からも確認された。

Table 2 に 3 種類の R-PVC の X 線分析した結果を、Table 3 に機械的ならびに物理的性質を示す。

4. 切削実験結果ならびに考察

4.1 臨界切削速度

金枝¹⁾によると工具がすくい角 30° 以下であれば、切削抵抗が切削速度によって変化し、ある速度で最大値に達した後、それ以上の切削速度では切りくず形式が連続形から特殊せん断形に移行し、周期的段差が生成するとしている。すなわちその切削速度が臨界切削速度¹⁾である。そこでまず 3 種類の被削材 S, T, ET の切削抵抗を幅広い切削速度下で測定した。切込みは $100\mu\text{m}$ である。Fig. 1 にすくい角 10° の切削抵抗の主だったところを示す。以後本来なら主分力、背分力の両方に着目して値を論じるべきであるが、一般に金属切削の主分力：背分力 = 3 : 2 に比べ、R-PVC の場合 7 : 1 といった具合に背分力が主分力に比べ相当小さく、また切削速度の変化に対しても変化量が小さいので、今後は主分力を中心に考察していく。

Fig. 1 より 3 種類とも主分力が切削速度 $V \leq 15.6\text{m/min}$ で最大値を示していることがわかる。また同じ切込み $100\mu\text{m}$ の他のすくい角 $\alpha = 0^\circ, 20^\circ, 30^\circ$ の場合も同様の調査をした結果、いずれの場合も切削速度 $V \leq 26.0\text{m/min}$ で最大値を示した。Table 4 に臨界切削

Table 2 Chemical composition analysis of R-PVC

	S	T	ET
Plasticizer (wt%)	less than 0.1	0	0.4
IG-Loss (wt%)	less than 1	4	13
Stabilizer	$R_m\text{-Sn-Y}_{4-m}$	PbSO_4	PbSO_4
Filler	none	none	CaCO_3

Table 3 Mechanical and physical properties of R-PVC

	S	T	ET	E
Tensile strength (MPa)	75.0	59.0	46.0	58.0
Elongation at fracture (%)	80	100	85	120
Izot impact value (N-m/m)	3.5	6.0	4.5	7.0
Bending strength (MPa)	120	100	88	97
Young's modulus of elasticity in bending (MPa)	3.8	3.3	4.2	3.2
Softening temperature ($^\circ\text{C}$)	62-63	74-75	73.1	73-74

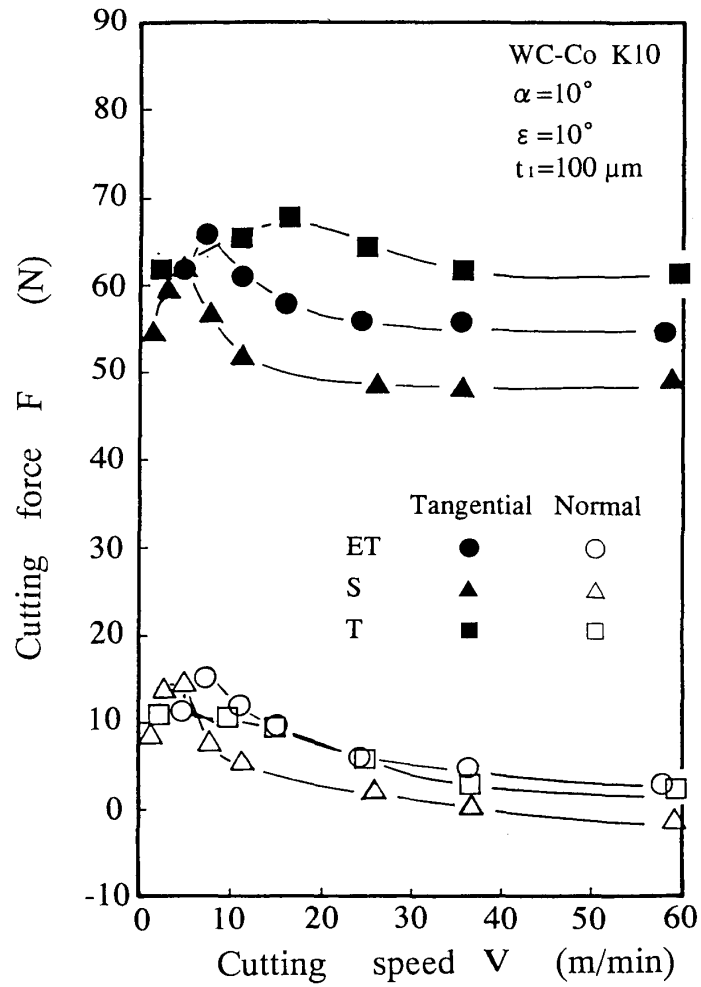


Fig. 1 Cutting speed effects on cutting forces

Table 4 Critical cutting speeds for generating surface irregularities

Material	t_1 (μm)	Critical cutting speed (m/min) (Rake angle α ($^\circ$))				
		0	10	20	30	
R-PVC	S	50	7.6	9.5		
		100	3.1	5.0	11.8	26.0
		200	1.8	2.2	5.0	12.2
	T	50	10.3	50.8		
		100	5.0	15.6	(24.5)	
		200	2.7	5.3	(24.5)	
ET	50	8.9				
	100	5.0	7.3			
	200	2.9	5.0			
E	50					
	100	4.5	12.5	36.9		
	200					
PP	Non treatment	100	3.8	7.0	15.0	(10.7)
	Heat treatment	100	2.0	3.8	11.0	(11.0)

Speeds in the brackets are not critical cutting speed.

速度の値を示す。表中の括弧内の数字は、切削抵抗が最大値を示した速度ではあるが、臨界切削速度とならない、言い換えれば最大値を発生する切削速度以上でも周期的段差が生成されない場合のものである。斜線部は測定範囲内で変化し続け、最大値と認識されるものがない場合、空白は実験をしていない場合である。なお金枝の実験¹⁾の E 種の結果も比較するためあわせて記載した。

Fig. 2 は Table 4 の結果から周期的段差生成領域を示したものである。図中の実線の左側が周期的段差生成領域である。3 種類ともすくい角 $\alpha = 0^\circ$ ならびに 10° では切込みが $100\mu\text{m}$ と $200\mu\text{m}$ とで臨界切削速度が存在し、 $\alpha = 0^\circ$ の切込み $100\mu\text{m}$ では切削速度 $V \geq 3.1\text{m/min}$ で周期的段差が生じる金枝の実験結果¹⁾とほぼ同様となった。

ここで注目されるのはすくい角 30° の場合である。金枝の実験¹⁾によれば、R-PVC を代表する材料 E 種では、切りくずはその厚み方向にせん断変形に対応する凹凸がない、言い換えればラメラ構造³⁾をとらない、単純な連続形になり、加工面はおおむねスムーズな面に部分的に大きな欠けが存在するものになっていた。

しかし今回実験した S 種では切込み $100\mu\text{m}$ ならびに $200\mu\text{m}$ の切削速度 $26.0, 12.2\text{m/min}$ 以

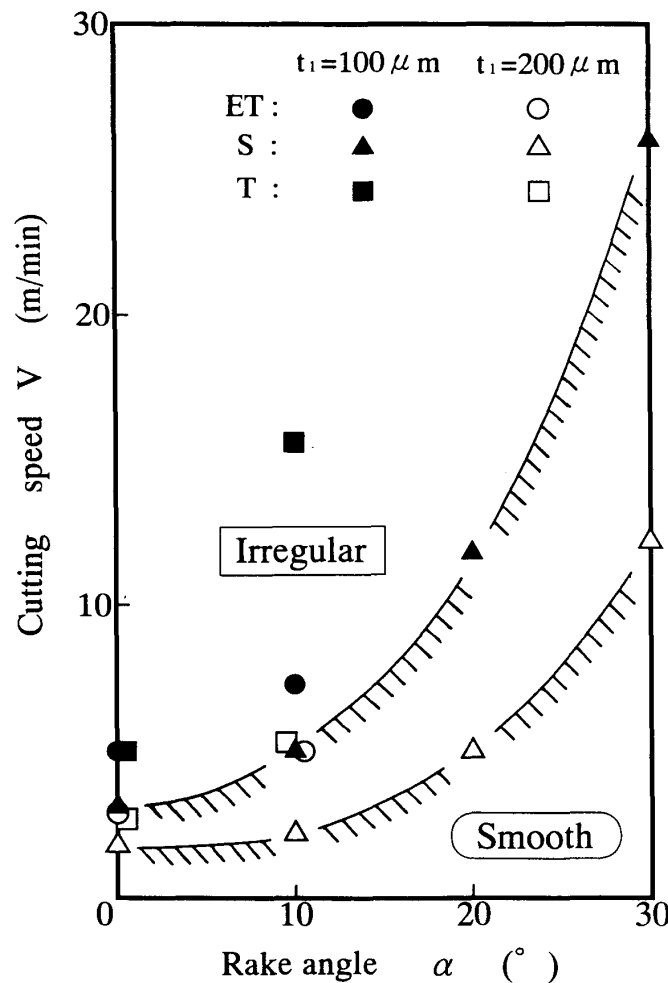


Fig. 2 Cutting speed and rake angle conditions for irregularity generation

上で周期的段差が生成されており、この点が金枝¹⁾の実験材料 E 種と異なる。さらに S 種の場合、上記の切込みの範囲ではすくい角が大きくなるにつれ臨界切削速度は上昇し、その割合は切込みが小さいほど大きくなっている。

4.2 周期的段差ならびに切りくず

Fig. 3 は、3種類の材料の加工面の周期的段差の典型的な代表例の SEM 写真を示す。切削条件はすくい角 0° 、切削速度 50.0m/min 、切込みは $100\mu\text{m}$ である。図からわかるように、どの加工面にも切削方向と直角に周期的段差がほぼ等間隔で生成されていることが認

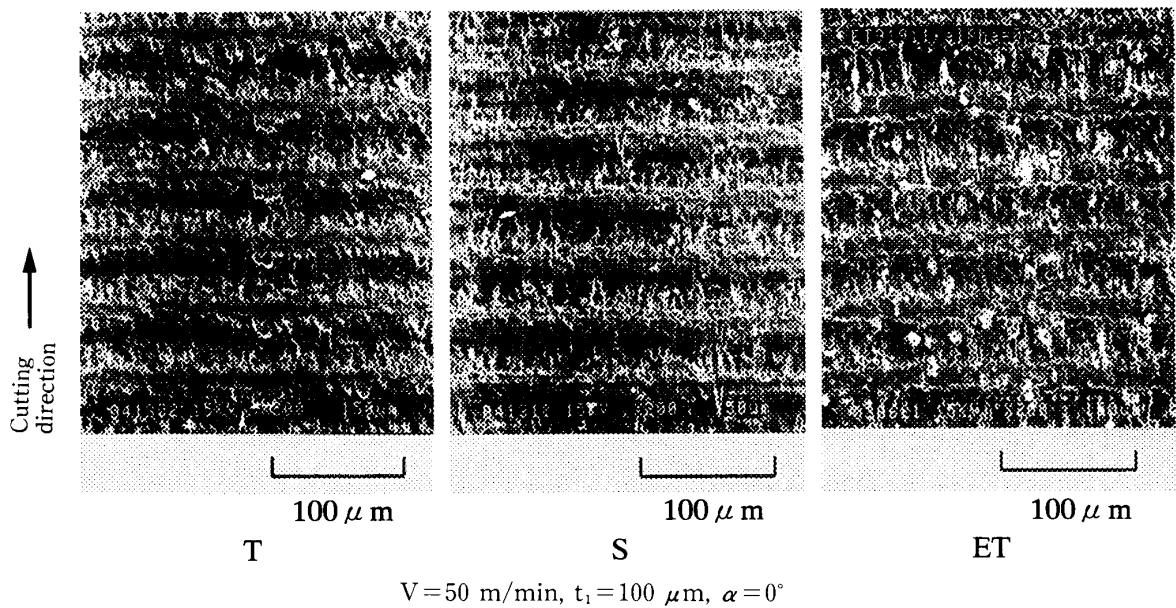
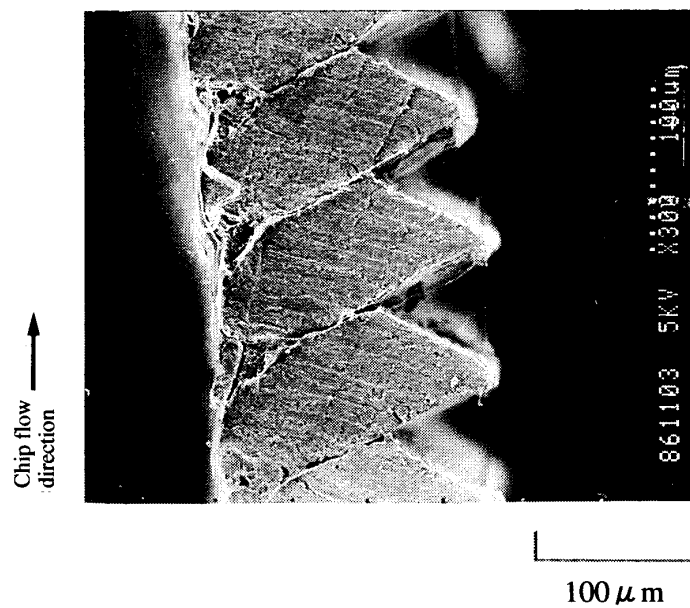


Fig. 3 Periodical irregularities on machined surface



$V = 50\text{ m/min}$, $t_1 = 100\mu\text{m}$, $\alpha = 0^\circ$

Fig. 4 Typical characteristic shear type chip

角は 10° 、切込みは $100\mu\text{m}$ で、切削速度 $50.0\text{m}/\text{min}$ である。周期的段差に対応したブロックが生成されていることが確認できる。

4.3 周期的段差の発生条件ならびに生成機構

すでに報告したように代表的な R-PVC である E 種の周期的段差生成機構¹⁾は、Fig. 5 に示すように基本的にはすくい面の局所的な温度上昇が被削材の軟化と融着を発生させ (Fig. 5 の 2), 3) 参照), それ切りくず排出や流れを妨げ、さらに被削材の粘弾性的性質とが相まって特殊せん断形切りくず生成になり、加工面に周期的段差が生成されるものである。したがって周期的段差の生成には、工具すくい面での高温度が発端となり被削材が融着する条件が達成されなければならない。

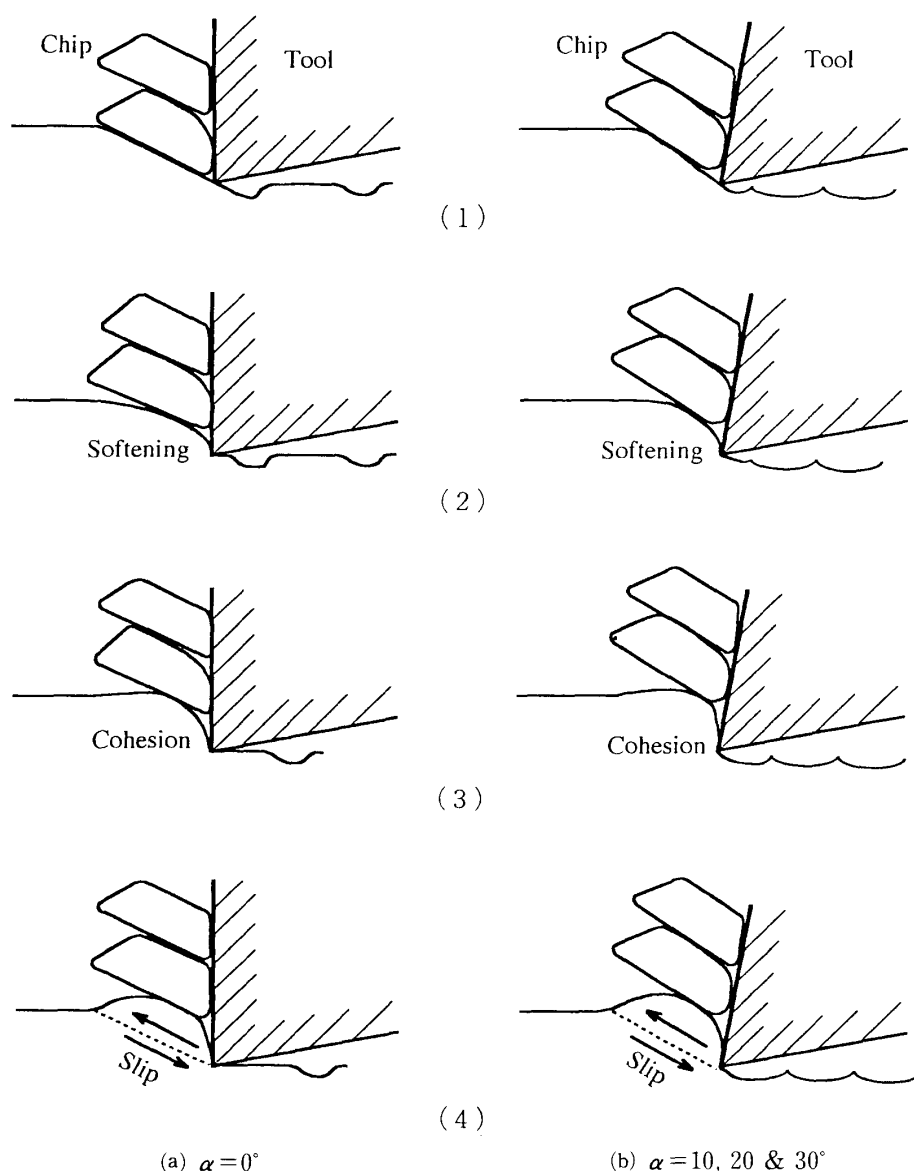


Fig. 5 Generation mechanism of periodical irregularities

が相まって特殊せん断形切りくず生成になり、加工面に周期的段差が生成されるものである。したがって周期的段差の生成には、工具すくい面での高温度が発端となり被削材が融着する条件が達成されなければならない。

安味⁴⁾の R-PVC 切削での工具すくい面温度測定では、今回の切削条件と同一ではないが100°C以上に達する場合があるとしている。さらに被削材を液体窒素で5°Cに冷却した金枝の切削実験⁷⁾でも切削速度が高くなれば周期的段差が生成され、逆に80°C以上の高温下では被削材全体が軟化し、周期的段差が消滅する結果が得られている。またすくい面の最高温度を示す位置は金属切削のそれに比べ刃先に近い部分になっている⁴⁾。

緒言でも述べたように上述の機構は、R-PVCの代表的なE種について求められたものである。しかし今回の実験材料についても切りくず形状ならびに周期的段差の形状や発生条件等から検討した結果、Fig. 5の周期的段差生成機構が成立することが明らかとなった。

次に被削材種による臨界切削速度の有無や高低について考察する。被削性を向上させるため炭酸カルシウムが含有されているET種を除いて検討する。被削材3種類にはTable 3に示すように熱軟化温度に微妙な差があり、これが周期的段差発生条件に大きく関連していると推測される。例えばすくい角30°の場合、すくい面での垂直応力が比較的lowく、そのため切りくず流出が容易であり、基本的には連続形になるべき条件にも関わらず、3種類の中では一番低い熱軟化温度を有するS種にその影響が顕著に現われた結果となっている。すなわち他の2種類では実験を実施したいかなる切削速度下でも周期的段差が生成されず、他方S種では切削速度 $V \geq 26.0 \text{ m/min}$ で特殊せん断形切りくず生成になり、周期的段差が存在する。

さらにすくい角10°の臨界切削速度 V_c は熱軟化温度の低いほうからS, E, T種の順に $V_c = 5.0, 12.5, 15.6 \text{ m/min}$ という具合に高くなり、すくい角 $\alpha = 0^\circ$ でも同様に $V_c = 3.1, 4.5, 5.0 \text{ m/min}$ というように同じ順になる。また $\alpha = 30^\circ$ ではすでに述べたようにS種のみしか周期的段差は現れない。

結局のところ、被削材の熱軟化温度の高低に対応する臨界切削速度の差異やすくい角の大きい工具での周期的段差消滅等の事実は、熱軟化温度が3種類の材料の周期的段差の生成機構を根本的に支配していることを意味する。また添加剤を含有しているET種でもTable 4に示すように、すくい面での切削温度が上昇するすくい角が小さい、もしくは切込みの大きい条件ほど、臨界切削速度が低くなる事実も、R-PVCでは熱軟化温度が支配的因子であるということを指示している結果となっている。

なお最大切削抵抗を示した切削速度以上で特殊せん断形切りくず生成に至らない、例えばT種のすくい角20°、切込み100, 200 μm の切削速度24.5m/min以上の切削機構は以下のように考えられる。元来切削抵抗の最大値は切削速度の増加による変形応力の増大と切削温度上昇による軟化との兼ね合いによって決定されるが、最大値を示す切削速度以上ではT種の軟化が進むもののS種等に比べ熱軟化温度が高いため、工具すくい面の刃先近傍で

の局所的な被削材の融着が十分に生じなく、特殊せん断形切りくず生成に至らないものである。

4.4 PP の周期的段差生成

まず R-PVC 同様に切削抵抗を幅広い切削速度下で求め、臨界切削速度の有無を調査した。PP の板材に関しては JIS にその規定がなく、今回 PP は 1 種類のみしか実験に供せず、したがって熱軟化温度の影響を見ることができない。PP を入手した製造メーカーでは切削加工仕上げを前提とした場合には加工後の変形を防止するため焼鈍を施しているため、主としてその有無による硬化度の影響を調査した。

Fig. 6 に切削抵抗の切削速度による変化を示す。主分力に着目すると焼鈍の有無に関わらず、いずれのすくい角においても切削速度 $V \leq 15.0 \text{ m/min}$ で最大値を示していることが認められる。他方背分力については主分力と異なり、一部を除き低速であるほど値が大きくなっている。加工面については R-PVC の T, E および ET 種と同様にすくい角 30° の場合だけ焼鈍の有無に関わらず周期的段差が発生しないことになった。その他のすくい角では主分力の最大値を発生する速度以上で周期的段差が認められ、結局臨界切削速度は Table 4 のようになった。

ここで注目されるのは焼鈍の臨界切削速度に及ぼす影響である。いずれのすくい角の場合

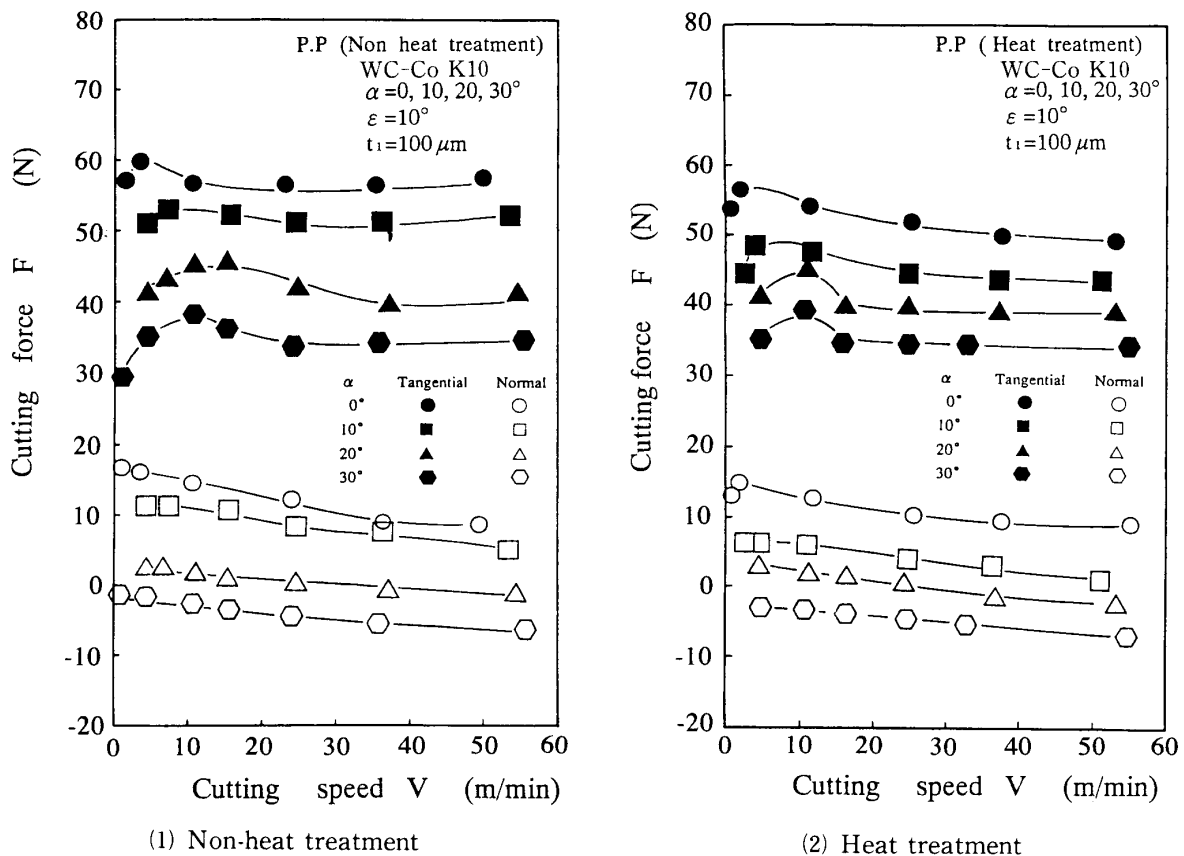


Fig. 6 Cutting speed effects on cutting forces

合でも焼鈍を施した被削材のほうが臨界切削速度が低い。その理由は焼鈍を施すと材料の加工硬化が消滅し、周期的段差生成に大きく影響する硬度が低下すること、つまり延性が増加し、融着しやすくなることが上記の傾向を示したと思われる。これは R-PVC のスズ系 S 種の場合の逆と考えるとよい結果になっており、R-PVC の周期的段差の生成には熱軟化温度が優先する要素であることがわかる。

また切りくずや加工面を観察すると臨界切削速度以上では R-PVC と同様な特殊せん断形切りくずと周期的段差の存在が確認された。このようなことから基本的には R-PVC と同様な機構で周期的段差が生成されると判断される。

5. 結 論

R-PVC 切削加工面の周期的段差生成に及ぼす機械的性質ならびに熱軟化温度の影響を調査するため、それを大きく左右する安定剤の種類を変化させて実験ならびに検討をした。さらに PP についても周期的段差生成の有無を調査した結果以下のことが明らかになった。

1. すくい角 $\alpha \leq 10^\circ$ では、R-PVC のいずれかの安定剤を含んでいる材料でも臨界切削速度以上で周期的段差が生成され、臨界切削速度は添加剤を含有していないものであれば低い熱軟化温度を有する材料ほど低速になる。
2. 安定剤がスズ系の材料では他の材料に比べ、より広い範囲のすくい角 $\alpha \leq 30^\circ$ で臨界切削速度が存在し、他の材料と同様に切込みが増加すれば臨界切削速度は低下し、すくい角も小さいほど低速になる。
3. 周期的段差の生成のしやすさは熱軟化温度によって左右され、またその生成機構はすでに提唱しているものが機械的性質が異なる 3 種類の R-PVC にも適用できる。
4. PP でもすくい角 $\alpha \leq 20^\circ$ では R-PVC と同様に臨界切削速度が存在し、すくい角が小さいほどその値は低下し、またすくい角 $\alpha \geq 30^\circ$ であれば周期的段差は生成されない。
5. PP では焼鈍した材料のほうが臨界切削速度が低く、周期的段差が発生しやすくなっており、その生成機構は R-PVC のそれと同様と考えられる。

参考文献

- 1) 金枝敏明, 精密工学会誌 **54**, 9 (1988) 1679.
- 2) 安味貞正, 日本機械学会論文集(第3部) **39**, 320 (1973) 1327.
- 3) J. T. Black, Trans. ASME, Journal of Engineering for Industry, **94**, 1 (1972) 307.
- 4) 安味貞正, 益子正巳, 白樫高洋, 白井英治, 昭和60年度精機学会秋季大会学術講演論文集 (1985) 491.

Effects of Stabilizer on Periodical Surface Irregularities in R-PVC Cutting

Toshiaki KANEEDA* and Kazuta MITSUISHI**

**Department of Mechanical Engineering,*

Faculty of Engineering,

Okayama University of Science,

Ridai-cho 1-1, Okayama 700, Japan

***Industrial Technology Center of Okayama Prefecture,*

Haga 5301, Okayama 700, Japan

(Received September 30, 1995)

Effects of two kinds of stabilizer in R-PVC have been determined on the surface irregularity generation mechanism. The stabilizers contained in all kinds control mechanical properties of R-PVC. Sn and Pb compounds were chosen as the stabilizer to examine, because their effects on deformation behavior of R-PVC are extremely opposite to each other. In less than 10 degree rake angle tool cutting, every kind of R-PVC tested here including a special kind of R-PVC with filler CaCO_3 generated periodical irregularities on machined surfaces over critical cutting speeds. R-PVC with lower softening temperature had lower critical cutting speeds, independent of kind of stabilizer. Polypropylene cutting offered the same kind of irregularities over critical cutting speeds in less than 20 degree rake angle tool cutting. Cutting of a wide variety of R-PVC and PP tested here appear to have the same irregularity generation mechanism as reported before.