

© 1986 ISIJ

# 過冷オーステナイト状態の軸受鋼切削加工における鋸歯状切りくずの生成とびびり振動

論文

藤岡 康夫\*・大嶋 三郎\*・室 博\*<sup>2</sup>

## Saw-toothed Chip Formation and Chattering Vibration on the Machining of Bearing Steel in Supercooled Austenitic State

Yasuo FUJIOKA, Saburo OSHIMA and Hiroshi MURO

## Synopsis :

A new machining process, called auscutting, has been developed, in which the cutting operation is performed in supercooled austenitic state during quenching. In auscutting, the saw-toothed chip is formed and the chattering vibration occurs under some cutting conditions. In this paper, the relation between the chattering vibration and the periodic chip formation is investigated. The formation mechanism of the saw-toothed chip is considered by observing the micro structure of the surface of chips.

The results obtained are summarized as follows:

(1) The frequency of the chip formation is varied with cutting conditions. It increases with the increase of cutting speed, but decreases with the increase of depth of cut and feed.

(2) The micro slips occur continuously in the case of flow type chips. The cracks generate on the chip surface without the micro slips in the case of saw-toothed chips, when the shear strain exceeds a critical value.

### 1. 緒 言

高炭素クロム軸受鋼を用いて軸受部品を製造する工程には多くの加熱・冷却工程が含まれており多大の熱エネルギーを必要としている。これに対し筆者らは省エネルギー対策の一つとしてオースカuttingと称する新しい加工法を提案した<sup>1)~3)</sup>。それは焼入冷却途中の過冷オーステナイト状態で切削加工を行い、その後空冷によりマルテンサイト変態を起こさせ、焼入硬化を完了させる方法である。本方法によれば加熱・冷却工程が大幅に省略されるばかりでなく、適切な切削条件を選ぶことにより、研削代の低減を図ることができる<sup>2)</sup>。

オースカuttingにおける切削性についてはすでに報告したように、切りくず処理性が良い<sup>3)</sup>ことが特長の一つに挙げられる。切りくず形態は黄銅、チタン合金やステンレス鋼などの切りくずと類似しており、鋸歯状<sup>4)</sup>となつている。また切りくず生成には周期性が認められ、切削条件によつては大きいびびり振動を伴うことがある。びびり振動の発生は、加工面の面粗さを悪くするばかりでなく、セラミック工具に対してチップングや欠損による寿命低下をひき起こす。そこで本研究ではオースカuttingにおける振動の発生状況を分析すること

により、切りくず生成の周期特性と振動発生との関連を明らかにした。また切りくずの断面組織観察及び走査型電子顕微鏡による表面観察を行うことにより、切りくずの生成機構を考察した結果について報告する。

### 2. 被削材及び実験方法

試験片として高炭素クロム軸受鋼 (SUJ3) の軸受素材 (ラジアル玉軸受内輪: 外径 138 mm, 内径 95 mm, 幅 50 mm) を用いた。本試験片はローリング鍛造法により作製し、鍛造後従来どおりの球状化焼なましを施したものであり硬さは HB 190 である。SUJ 3 の化学組成を Table 1 に示す。

切りくず生成の周期特性を調べるために Fig. 1 に示したように切削工具ホルダーの側面に加速度ピックアップを取り付け、外径部を長手方向に切削し、主分力方向に発生する振動を計測した。加速度ピックアップからの信号はチャージ増幅器で増幅後データレコーダに記録し、F.F.T. (Fast Fourier Transformation) アナライザを用いて振動周波数の分析及び振動レベルの解析を行った。

切削条件としては、切削速度、切込み及び送り条件を種々変化させた。工具は黒セラミック工具 ( $Al_2O_3$  に約

昭和 56 年 11 月本会講演大会にて発表 昭和 60 年 6 月 24 日受付 (Received June 24, 1985)

\* エヌ・テー・エヌ東洋ベアリング(株)総合技術研究所 (General Technical Laboratory, NTN Toyo Bearing Co., Ltd., 1380 Higashikaizuka Iwata Shizuoka pref. 438)

\*<sup>2</sup> エヌ・テー・エヌ東洋ベアリング(株)総合技術研究所 工博 (General Technical Laboratory, NTN Toyo Bearing Co., Ltd.)

Table 1. Chemical compositions of SUJ 3 test material.

(wt%)

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo
0.95-1.10	0.40-0.70	0.90-1.15	<0.025	<0.025	0.90-1.20	—

20% の TiC を含有) とし, 実用的見地から丸形スローアウェイチップを用いた. また被削材の熱処理状態の違いが切りくず生成と振動発生状況にどのように影響するか比較検討する目的で①オースカッティングのほかに②焼なまし材切削 (従来から実施している球状化焼なまし材の切削) 及び③焼入鋼切削 (焼入れ・焼もどし材の切削) を同一切削条件下で実施した.

オースカッティングは焼入冷却途中の過冷オーステナイト状態での切削加工であり, 被削材を電気炉中で 850°C×50 min 加熱後, 200°C の油中に急冷した. 油中で約 3.5 min 保持し被削材の温度が約 210°C になった時に取り出し, 過冷オーステナイト状態として切削実験に供した. 一方, 焼入鋼切削としてはオースカッティング用熱処理後空冷によりマルテンサイト変態を起こさせ (硬さ HRC 64.5), その後 180°C×2h の条件で焼もどしたものを (硬さ HRC 61) を用いた.

切削条件を以下にまとめて示す.

切削速度:  $V=50\sim 250$  m/min

切込み:  $t=0.1\sim 1.5$  mm

送り:  $f=0.1\sim 0.5$  mm/rev

工具: 黒セラミック工具 (直径 12.7 mm の丸形チップ, ネガランド  $-25^\circ\times 0.2$  mm)

すくい角  $-8.5^\circ$

切削液: なし

切削状態: ①オースカッティング (被削材硬さ HRC 17.5)

②焼なまし材切削 (被削材硬さ HB 190)

③焼入鋼切削 (被削材硬さ HRC 61)

### 3. 実験結果

#### 3.1 振動周波数

Fig. 2 に F.F.T. アナライザによる振動分析結果の一例を示す. 周波数分析帯域は 0~25 kHz であり, 切削中の振動を 4 回サンプリングし平均化したものである. 縦軸はリアスペクトラムの大きさ (mV) を振動加速度の大きさ ( $m/s^2$ ) に換算した値である. 本図はオースカッティングで切削速度  $V=150$  m/min, 切込み  $t=0.5$  mm, 送り  $f=0.4$  mm/rev の場合であるが, 8.8 kHz に最大のピークがあり次に 6.0 kHz にもピークが認められる. 工具先端を打撃した場合の自由振動を周波

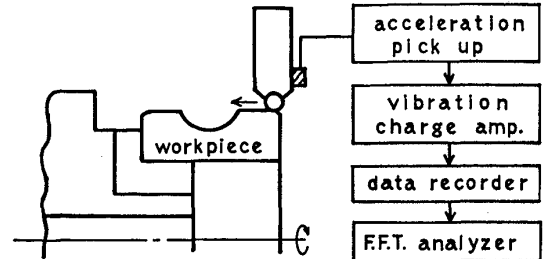
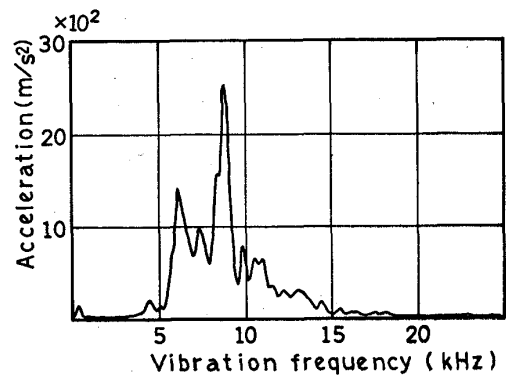


Fig. 1. Measurement procedure of the vibration in cutting operation.



auscutting:  $V=150$  m/min,  $t=0.5$  mm,  $f=0.4$  mm/rev

Fig. 2. An example of vibration frequency by F.F.T. analyzer.

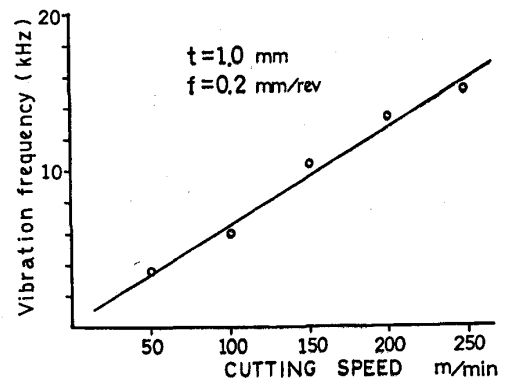


Fig. 3. Variation of vibration frequency with cutting speed in auscutting.

数分析した結果, 工具ホルダーの固有振動数は約 6 kHz であることがわかり, 8.8 kHz を本切削条件におけるピーク振動周波数とした. 他の切削条件についても同様の方法でピーク振動周波数を読み取り切削条件との対応を求めた. 切削条件によつては 6 kHz の成分が一番大きくなる場合もあつたが, その場合はピーク振動周波数と

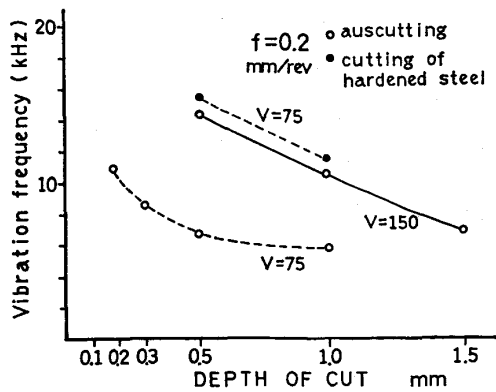


Fig. 4. Variation of vibration frequency with depth of cut in auscutting and cutting of hardened steel.

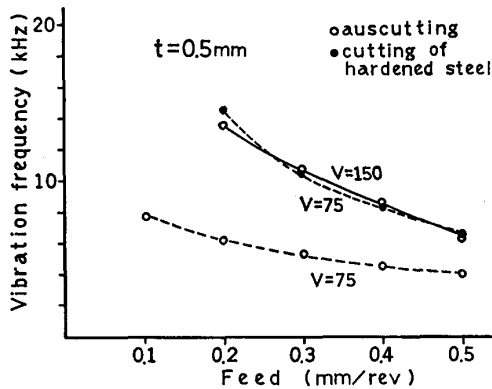


Fig. 5. Variation of vibration frequency with feed in auscutting and cutting of hardened steel.

して2番目に大きい周波数を分析結果とした。

Fig. 3 にオースカッティングにおける切削速度とピーク振動周波数の関係を示す。切削速度の増大に伴いほぼ直線的に振動周波数が高くなっている。

Fig. 4 は切込みの影響を示しており、切込み量の増大に伴い振動周波数は低くなっている。また、Fig. 5 は送りの影響を示しており、送り量の増大に伴い周波数は低くなっている。

以上のような現象は焼なまし材切削においては認められず、オースカッティング及び Fig. 4 と Fig. 5 中に比較のために示した焼入鋼切削の場合だけであつた。すなわちオースカッティング及び焼入鋼切削においては切削条件に対応した周期的な振動が刃先近傍で発生している。なお同一切削条件下ではオースカッティングの方が焼入鋼切削の場合より周波数が低い。

### 3.2 振動の大きさ

Fig. 6 に送り量を変化させた場合の振動レベルの比較を示した。ピーク振動周波数における振幅値を加速度の大ききで表したものである。焼なまし材切削の場合は送り量の変化に伴うピーク振動周波数が明瞭でなく、工

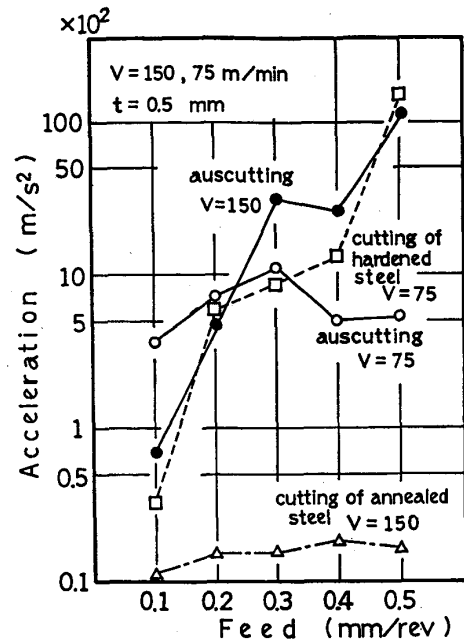


Fig. 6. Comparison of acceleration in various cutting conditions.

具ホルダーの固有振動数 (6 kHz) 近傍での値を読み取った。

オースカッティングにおいては、焼なまし材切削時に比べて振動レベルが10倍以上も大きい。また送り量が増大すると振動レベルも増大する傾向がある。切削速度が  $V=75$  m/min から  $V=150$  m/min と高速になると、送り量が  $f=0.2$  mm/rev 以下の低送り条件下では振動が小さくなり、逆に高送り条件下では振動が大きくなっている。

焼入鋼切削においてもオースカッティングと同様に焼なまし材切削と比べ振動レベルが大きい。 $V=75$  m/min で比較すると  $f=0.3$  mm/rev 以上の高送りではオースカッティングよりもさらに大きい振動が発生し、 $f=0.5$  mm/rev の時には約  $15000$  m/s<sup>2</sup> となる。

焼入鋼切削における  $V=75$  m/min,  $f=0.5$  mm/rev の時、及びオースカッティングにおける  $V=150$  m/min,  $f=0.5$  mm/rev と  $V=75$  m/min,  $f=0.3$  mm/rev の時に振動レベルが非常に大きくなっているのが認められるが、これはいずれもその条件下で切りくずの生成に起因すると考えられる振動周波数が約 6 kHz になり、工具ホルダーの固有振動数に近づいたため共振して大きくなつたと思われる。このように鋸歯状切りくずが生成される切削においては、切りくず生成周波数と工具ホルダーの固有周波数が一致しないような切削条件を選ぶことが重要となる。

### 3.3 切りくずの断面形状

オースカッティング、焼入鋼切削及び焼なまし材切削

において振動の発生状況が異なるのは切りくずの生成機構の違いによるものと推定されるので、切削実験において各切削条件下で生成された切りくずの断面形状を観察した。観察位置を Fig. 7 に示す。本研究で用いたノーズRの大きい工具での切削は切りくず厚さが場所によつて異なる<sup>6)</sup>ので、各切削条件下で同一の観察位置となるよう切りくずの自由側面から約 0.1 mm 内部に入つた P-P 断面とした。切りくずを樹脂中に埋込んだ後、機械研磨及びバフ研磨を施し、ナイトルエッチをして観察した。

送り量を変化させた場合の切りくず断面形状写真を

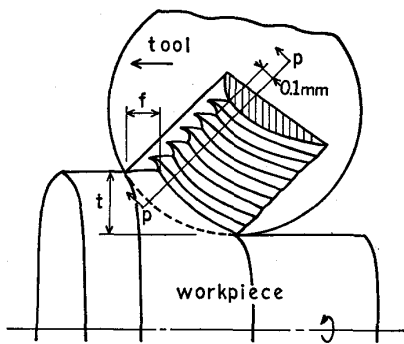


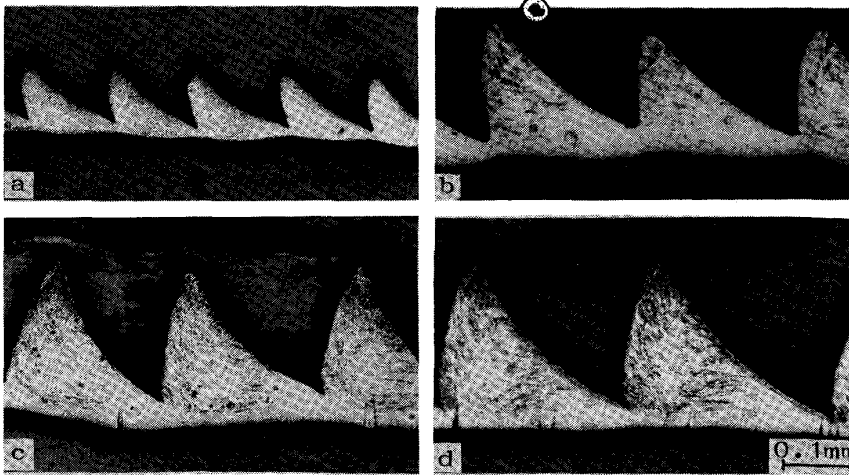
Fig. 7. Saw-toothed chip formation.

Photo. 1, 2 及び 3 に示す。Photo. 1 はオースカッティング, Photo. 2 は焼入鋼切削, Photo. 3 は焼なまし材切削の場合である。切込みはすべて  $t=0.5\text{ mm}$  と一定であり、切削速度はオースカッティングと焼なまし材切削が  $V=150\text{ m/min}$ , 焼入鋼切削が  $V=75\text{ m/min}$  である。

オースカッティングにおいては周期性のある鋸歯状の切りくずとなつている。鋸歯の 1 ピッチは送り量が増大するに伴つて大きくなり、1 つの鋸歯状切りくずが生成される周期が長くなつている。この現象は振動周波数の分析結果と同じ傾向を示しており、振動が切りくず生成の周期性に起因するものであることがわかる。また切りくず厚さも送り量増大に伴い厚くなつている。後に詳述するが、鋸歯の生成角 (Fig. 8 中  $\theta$ ) は送り量が変わしてもほぼ一定であり本写真から約 45 度と読み取れる。

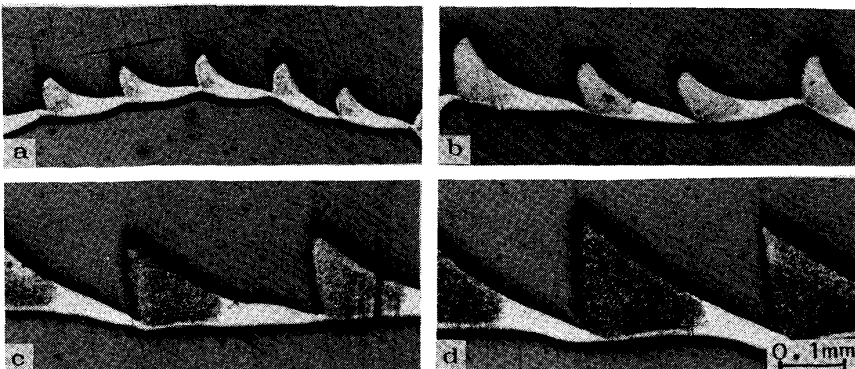
焼入鋼切削においてもオースカッティングと類似した鋸歯状切りくずとなつている。鋸歯の生成角がオースカッティングの場合より小さく、切りくず厚さは薄い。

一方、焼なまし材切削の場合は鋸歯は認められず、滑らかな流れ形の切りくずとなつている。切りくずの厚さが 3 者の中では最も厚く、また断面組織には工具すくい



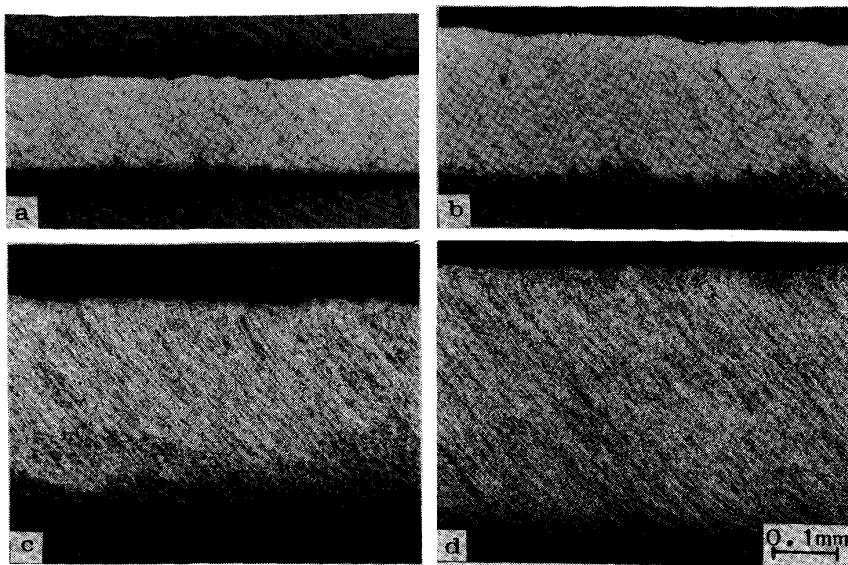
a)  $f=0.2$  b)  $f=0.3$   
c)  $f=0.4$  d)  $f=0.5$   
 $V=150\text{ m/min}$ ,  $t=0.5\text{ mm}$ ,  
 $f=0.2-0.5\text{ mm/rev}$

Photo. 1. Cross sections of chips in auscutting under the conditions.

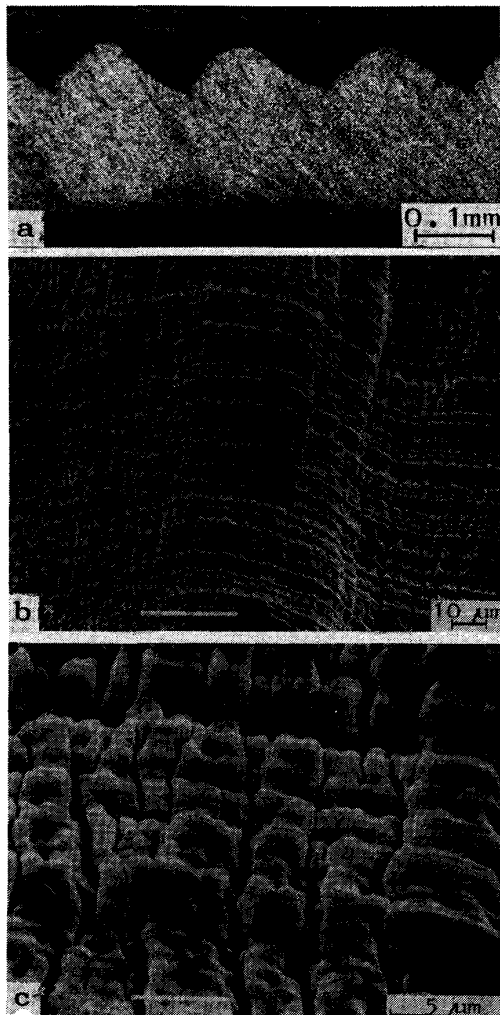


a)  $f=0.2$  b)  $f=0.3$   
c)  $f=0.4$  d)  $f=0.5$   
 $V=75\text{ m/min}$ ,  $t=0.5\text{ mm}$ ,  
 $f=0.2-0.5\text{ mm/rev}$

Photo. 2. Cross sections of chips in cutting of hardened steel under the conditions.



a)  $f=0.2$  b)  $f=0.3$   
 c)  $f=0.4$  d)  $f=0.5$   
 $V=150$  m/min,  $t=0.5$  mm,  
 $f=0.2-0.5$  mm/rev  
 Photo. 3. Cross sections of chips in cutting of annealed steel under the conditions.



a) Cross section of chip  
 b) Free surface of chip  
 c) Magnified central part of Photo. b)  
 $V=200$  m/min,  $t=1.0$  mm,  $f=0.3$  mm/rev

Photo. 4. SEM micrograph showing the surface of chip in cutting of annealed steel under the condition.

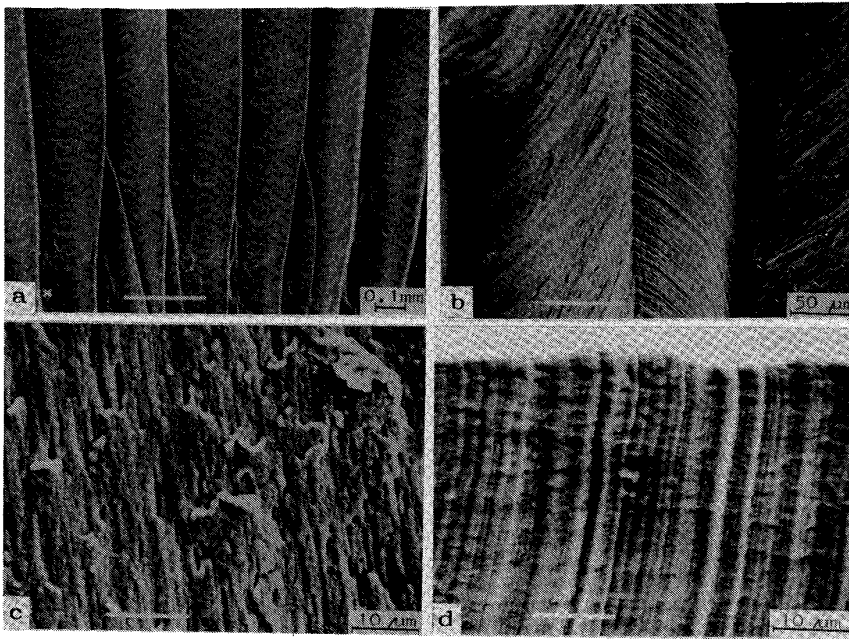
面に対し約  $50^\circ$  の方向に多数の塑性変形流れが認められる。

### 3.4 切りくずの表面状態

被削材の熱処理状態の違いによる切りくずの生成状態の違いを、走査型電子顕微鏡により観察した。

Photo. 4 に焼なまし材切削の場合の観察結果を示す。切削条件は  $V=200$  m/min,  $t=1.0$  mm,  $f=0.3$  mm/rev である。写真 a) は切りくず断面形状を示しており、前述 Photo. 3 で示した形状とは若干異なり自由表面側には鋸歯に類似した山が認められる。この山を上方から拡大して観察したのが写真 b) であり、同じ性状の表面が連続していることがわかる。切削方向（写真中で右→左）には工具の凹凸によつてできたと思われるすじが多く認められ、また切削方向と直角方向には塑性変形による滑りが生じたと思われる溝が多く認められる。すなわち焼なまし材切削においては微小な滑りが連続して発生するために、外観的には材料が滑らかに流れたように見え、流れ形の切りくずになると考えられる。このような微小な滑りは材料のせん断変形によつて起こると考えられ、写真 c) からその 1 ピッチの大きさは  $2\sim 3$   $\mu\text{m}$  である。

オースカッティングの観察結果を Photo. 5 に示す。切削条件は上述の焼なまし材切削の場合と同一である。写真 a) は切りくず自由表面を上方から観察したもので、鋸歯状の山が規則的に連続して生成されている。写真 b) は 1 つの鋸歯の山を拡大したものであり、山の左右で表面の性状が全く異なっていることがわかる。左側の面をさらに拡大したのが写真 c) であり、ディンプルはあまり明瞭ではないがせん断破面と考えられる。一方、右側の面は写真 d) に示したように左側の面とは全



a) Free surface of chip  
 b) Magnified saw-toothed chip  
 c) Left side of photo. b)  
 d) Right side of photo. b)  
 $V=200\text{ m/min}$ ,  $t=1.0\text{ mm}$ ,  
 $f=0.3\text{ mm/rev}$

Photo. 5. SEM micrograph showing the surface of saw-toothed chip in auscutting under the condition.

く性状が異なり、工具の凹凸によつてできたと思われるすじが多く観察され、この面は前回の切削によつてできた被削材の表面であつたと考えられる。また焼なまし材切削の場合に見られた微小なせん断滑りが連続して起こつた様子は認められない。

#### 4. 考 察

##### 4.1 鋸歯状切りくずの生成機構

中山<sup>4)</sup>によると鋸歯状切りくずの生成過程は次のように理解される。1) 自由面上でクラックの発生条件が満たされると、そこから刃先に向かつてせん断型クラックが発生し、クラックの底と刃先を結ぶ面上でも集中滑りが起こる。2) 工具の移動に伴い集中滑りが進行しクラックの深さは増すが、クラックの底と刃先を結ぶ面が形を変えるため、滑りの集中度が減りクラックの成長は停止する。3) その間、自由面上ではひずみが漸増し新たなクラックが発生し、以下同じ過程を繰り返す。

オースカッピングについても、自由面側からクラックが発生したと思われるせん断破面が認められること、切削条件に応じた周期的な鋸歯が生成されていることから、中山の鋸歯状切りくずの生成機構があてはまるものと考えられる。

Fig. 8 は前述 Fig. 7 に示した切りくず断面形状観察位置における切りくずの生成状況を2次元モデルで表したものである。本考察によれば鋸歯状切りくずのA部は被削材の表面に対応しているので、Photo. 1 からA部の長さを読み取り切削速度から切りくずの生成周期を計算すると、Fig. 9 に示す結果となる。本実験のように

ノーズRが切込みや送りよりも大きい切削条件下では切削厚さが場所によつて異なり<sup>6)</sup>、切りくず断面形状を観察した切りくず自由側面側で最大の厚さで、刃先先端へ

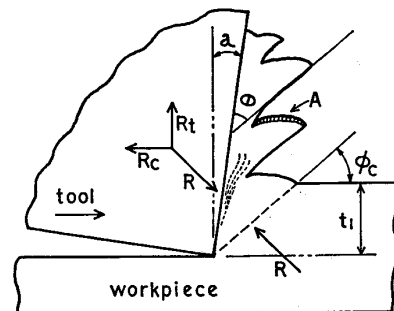


Fig. 8. Formation mechanism of saw-toothed chip in auscutting.

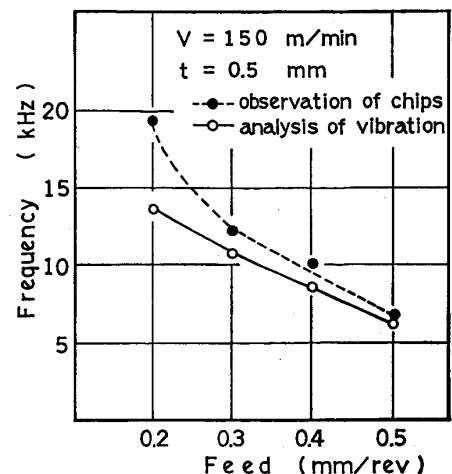


Fig. 9. Comparison of vibration frequency and chip formation frequency in auscutting.

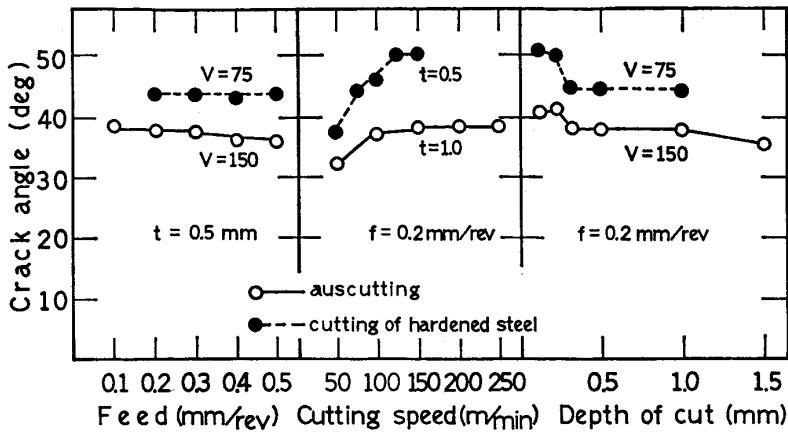


Fig. 10. Effect of cutting conditions on crack angle.

向かうほど薄くなる。従つて切りくずの観察位置によつて切りくず生成周波数も異なつていふと考えられる。しかし Fig. 9 の結果のように  $f=0.3$ ,  $f=0.4$ ,  $f=0.5$  mm/rev では、切りくず断面形状（自由側面から 0.1 mm 中へはいつた位置）から求めたものと切削中の振動から求めた切りくず生成周波数とほぼ一致しており、切りくず自由側面での切りくず生成に起因する振動が切削中には一番大きく現れているものと考えられる。

#### 4.2 き裂傾角に影響を及ぼす要因

鋸歯状切りくずが生成される際のき裂傾角（き裂が切削方向となす角）が切削条件によりどのように変化するかを検討する。Fig. 8 の 2次元モデルにおいてき裂傾角 ( $\phi_c$ ) は鋸歯の生成角 ( $\theta$ ) と工具のすくい角 ( $\alpha$ ) から幾何学的に  $\phi_c=90^\circ-\theta-\alpha$  であるので、各切削条件下で生成された切りくずの断面写真からそれぞれの生成角度を読み取り  $\phi_c$  を求めた。いずれの切りくずもかなり変形しており、読み取り誤差を少なくするように 1 切削条件下について数箇所の切りくず観察を行い、平均化処理をした。

き裂傾角に及ぼす切削条件の影響をまとめて Fig. 10 に示す。送り量の変化に対しては、き裂傾角はあまり影響を受けずほぼ一定値を示し、オースカuttingでは約 38°, 焼入鋼切削では約 43° である。切削速度に対しては 100 m/min よりも高速域ではほぼ一定角度であるのに対し、100 m/min 以下の低速域ではいずれもき裂傾角が減少している。切込み量の変化に対しては、焼入鋼切削における低切込みの場合を除いてほぼ一定値を示している。

以上の実験結果は、き裂傾角 ( $\phi_c$ ) は被削材のもろさだけできまり切削条件は直接には関係しないという中山<sup>4)</sup>の予想と概略一致しているが、き裂の方向と切削抵抗の合力 ( $R$ ) のなす角度が 45° になるという点では一致していない。すなわち、オースカuttingでは切削

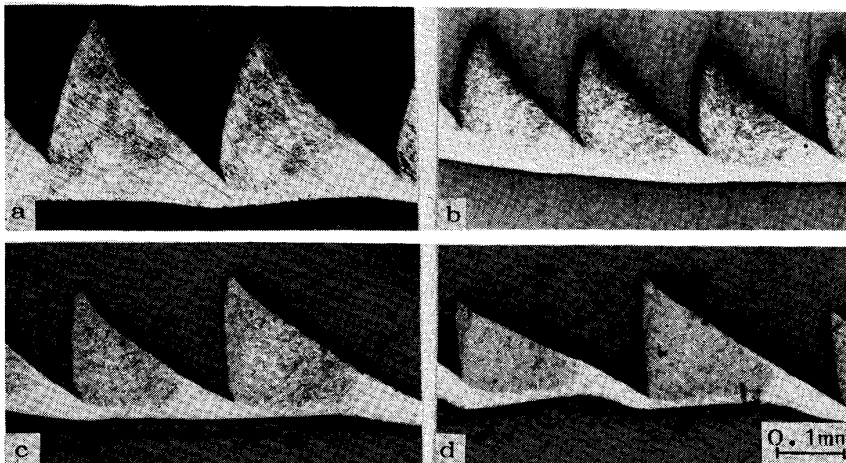
Table 2. Heat treatment conditions and temperature of workpieces.

workpiece No.	heat treatment condition		temperature of workpiece °C
	heating	quenching in oil	
a	850°C × 50 min	200°C × 2 min	250
b	850°C × 50 min	200°C × 3.5 min	210
c	850°C × 50 min	180°C × 3.5 min + air cooling	160
d	850°C × 50 min	180°C × 3.5 min + air cooling	120

抵抗の主分力 ( $R_c$ ) と背分力 ( $R_t$ ) の比 ( $R_c/R_t$ ) が実測値で約 1 になり、き裂は切削抵抗合力の方向から約 83° 傾いている。また焼入鋼切削では  $R_c/R_t$  が約 1/2 であるので、約 106° 傾いており、最大せん断応力の方向に対しては、オースカuttingが約 38°, 焼入鋼切削が約 61° 傾いた方向にき裂が進展していることになる。

一方、き裂傾角に影響を及ぼすその他の要因としてオースカutting時の被削材温度の影響を調べた。熱処理条件を Table 2 に示す。(b) がオースカutting用の標準熱処理条件であり、被削材温度は約 210°C である。その他は冷却時間を変化させることにより被削材温度を (a) 250°C, (c) 160°C, (d) 120°C と変化させた。本熱処理条件下における  $M_s$  点は約 170°C である<sup>2)</sup>ので、160°C の被削材温度ではオースカutting時にすでに一部マルテンサイト変態が開始している。また 120°C 切削時は約 20~30% マルテンサイト変態が起こっている<sup>1)</sup>状態である。

切削速度  $V=100$  m/min, 切込み  $t=0.5$  mm, 送り  $f=0.3$  mm/rev で切削した場合の切りくず断面写真を Photo. 6 に示す。被削材温度が低くなるのに伴い、鋸歯生成角度が小さくなり切りくず厚さが薄くなつていふ。そして 120°C 切削においては切りくず断面形態が焼入



a) 250°C b) 210°C c) 160°C d) 120°C  
 $V=100$  m/min,  $t=0.5$  mm,  
 $f=0.3$  mm/rev

Photo. 6. Effect of the temperature of workpiece in auscutting on the cross sectional configuration of saw-toothed chip.

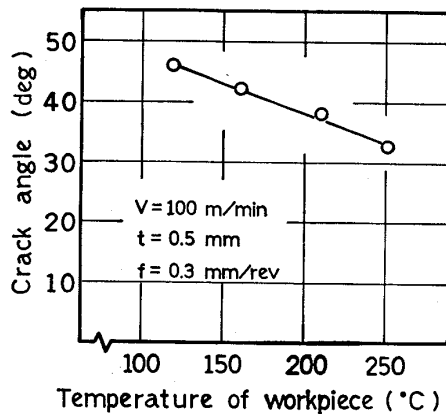


Fig. 1. Effect of the temperature of workpiece on crack angle in auscutting.

鋼切削のそれとよく似ている。本写真からき裂傾角を求めると Fig. 11 に示す結果となる。被削材温度が低くなるのに伴いほぼ直線的にき裂傾角が大きくなっている。このことは被削材温度が低くなるとマルテンサイト変態が起こり硬さが増大することによる影響と思われる。被削材の硬さが増加すればき裂傾角が増加するという中山の実験結果<sup>4)</sup>と定性的に一致している。

## 5. 結 言

焼入冷却途中の過冷オーステナイト状態で切削加工を施すオースカッティングにおいて、切りくず生成の周期特性を工具の振動を測定することにより明らかにした。また切りくずの観察を行うことにより、切りくずの生成機構を考察した。

得られたおもな結果は次のとおりである。

1) オースカッティングでは明瞭な周期性をもつ鋸歯状切りくずが生成される。その生成周波数は切削条件によつて異なり、切削速度の増大に比例して高くなり、逆に切込み及び送りの増大に伴い低くなる。

2) 鋸歯状切りくずの生成に起因する振動が発生するため、流れ形切りくずが生成する焼なまし材切削に比べ10倍以上の振動レベルとなる。特に切りくず生成周波数が工具ホルダーの固有振動数に近づくような切削条件では大きい振動が発生する。

3) オースカッティングの鋸歯状切りくずの生成機構は自由面側でクラックが発生し、クラックの底と刃先を結ぶ面上で集中滑りが起こるといふ中山の生成機構<sup>4)</sup>にあてはまる。

4) オースカッティングにおけるき裂傾角(自由面側に発生するクラックが切削方向となす角度)は切削条件によらずほぼ一定であるが、被削材温度が低下し硬さが増すとともに大きくなる。

## 文 献

- 1) Y. FUJIOKA, H. TANI and H. MURO: Proc. Intern'l Symp. on Influence of Metallurgy on Machinability of Steel (1977), p. 323 [ISIJ. ASM]
- 2) 藤岡康夫, 室 博: 鉄と鋼, 70(1984), p. 404
- 3) 藤岡康夫, 室 博: 鉄と鋼, 71(1985), p. 1147
- 4) 中山一雄: 精密機械, 43(1977), p. 117
- 5) 上田 昇, 松尾哲夫: 精密機械, 48(1982), p. 198
- 6) 白井英治, 広田明彦, 益子正巳: 日本機械学会論文集, 38(1972), p. 3264