

# 切削歪の残留挙動について (続報) ……くり返し切削の影響……

山本 耕之\*・隈部 晃\*・北川 亮三\*\*

## A Study on the Behaviour of Strain during Cutting Process —Influence of Repeated Cutting—

Koji YAMAMOTO, Akira KUMABE and Ryozo KITAGAWA

### Abstract

The mechanism of strain analyzed by photoelastic coating method in aluminum has been reported in the previous papers.

On the basis of those experimental results, the authors investigate the influence of repeated cutting on strain distribution in the workpiece.

Here the repeated cutting means to cut the workpiece of hardened aluminum by the process of primary machining in the same direction.

In the primary machining process an annealed aluminum is machined using cutting tool or vurnishing tool.

The present experiment gives the following results.

- (1) Repeated cutting, within the cutting depth of the primary process, shows.
  - (1-1) Shearing angle is particularly larger than primary cutting and the fact is available for machinability.
  - (1-2) Cutting force is apparently larger than primary cutting.
  - (1-3) The difference of strain distribution between repeated cutting and primary one is very small.
- (2) The larger the primary cutting speed is, the smaller the value of the effective depth as above.
- (3) Five different tools used in primary machining resulted in less effective upon repeated cutting.

### 1. 緒 言

焼き鈍したアルミ被削材を用いて、延性材切削の際の被削材内の歪挙動を、光弾性皮膜法を用いて調べ、特に歪残留機構<sup>1)</sup>について、前報<sup>2)</sup>では詳細に報告した。

しかしながら、荒削りを行った後で仕上げ削りを行う場合のように、加工硬化した被削材を切削する時に生ずる切削歪の残留挙動については、まだ明確でないことも多い。

そこで、本報では、同じくアルミ焼鈍材を用いて、無歪材に予め、切削又はバニシ加工を行って、加工硬化させ、これを被削材とし、加工硬化した被削材をくり返して切削する際に、工具のすくい角、切り込み深さ、切削速度が、せん断角、被削材内歪分布、切削抵

\*久留米工業大学 機械工学科

\*\*生産機械工学科

抗に及ぼす影響について調べた。

併せて、初めの無歪材加工時の速度、バニシ工具の先端半径、切削工具すくい角が、くり返し切削に及ぼす影響についても調べた。

これらの実験結果について報告する。

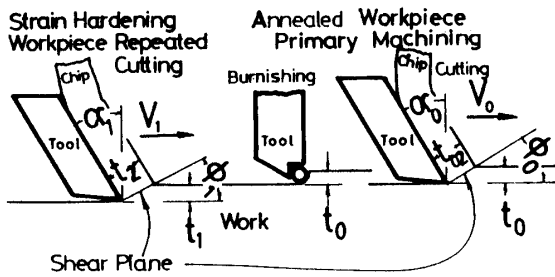
2. くり返し切削，被削材の加工硬化，記号

本報では、有限長の被削材全長に亘って、直線状に二次元切削及び加工する場合を扱う。

前加工によって加工硬化した被削材表面に対して、その前加工と同一方向に再度重複して切削することをくり返し切削と呼ぶことにする。さらにくり返しの回数が必要なきは、くり返しの始まりから順次、2回目切削・3回目切削……という。

2回目切削の前加工は、無歪材を加工する場合に限った。したがってこの加工を、無歪材加工、又は無歪材切削と呼ぶことにする。

Fig. 1には、無歪材加工と2回目切削の関係を示した。また、これらの加工の際の；工具すくい角，せん断角，加工速度，切り込み深さ，切屑厚さを表わす記号をまとめて同図中表に示した。



	NOTATION	
	Primary	Repeated
Rake Angle	$\alpha_0$	$\alpha_1$
Shear Angle	$\phi_0$	$\phi_1$
Cutting Speed	$V_0$	$V_1$
Depth of Cut	$t_0$	$t_1$
Thickness of Chip	$t_{02}$	$t_2$
Lubrication	None	

Fig. 1 Primary & Repeated Cutting, Notation

3. 実験方法

3.1 加工装置及び工具，被削材，加工条件

本実験に用いた加工装置は、前報と同じマシニングセンターで、Fig. 2にその概略を示す。

切削主運動はコラムの水平送りでを行い、切り込み深さの調整運動はヘッドの垂直送りで行った。

Fig. 3には、加工用工具の保持と被削材の保持との関係を示す。主軸先端のチャックにホルダーを介して工具を保持した。

無歪材加工用工具には、切削工具とバニシ工具を用いた。切削工具には；SKH4, 10°の完成バイトから刃先形状が30°・0°・5°・0°・0°・0°・0mmのものと、0°・5°・0°・0°・0°・0°・0mmの2種類を製作した。その成形はワイヤカットにて行い、刃先の丸みを2μ~3μRになるまで研磨した。研磨には、ダイヤモンドホイールから、GC#600及びアルカンス#2000による手研ぎに至るまでを、行った。丸みの確認には、顕微鏡下で、刃先の輝部の幅を測定する方法を取った。バニシ工具には、バイト刃先稜に沿って、すくい面側に、段差を設けてこれに、0.38φ, 0.57φ, 0.97φのニードルを瞬間接着剤で接着したものを用いた。Fig. 4には、バニシ加工用工具ホルダーと、バニシ工具先端の詳細を示す。

被削材には、A1070の0材の3tのアルミ板材から、100×100に切り出したものを用いた。切り出しによる歪除去のために、673Kで4時間、炉中保持の後、炉中

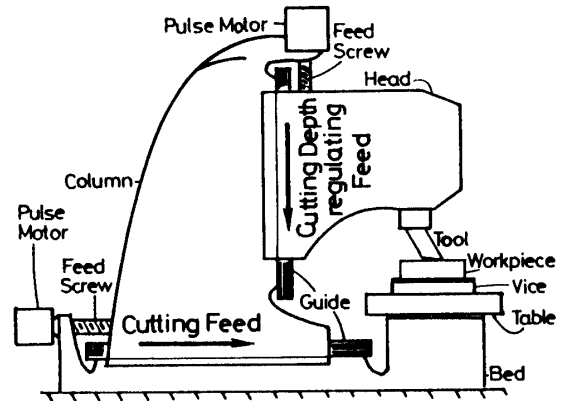


Fig. 2 Experimental Apparatus for Orthogonal Machining

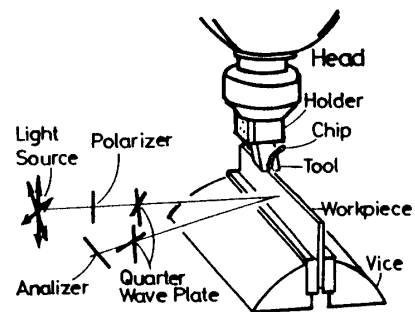


Fig. 3 Details of Tool Holder

冷却を行って、焼き鈍した。切削面は板材の端面とした。

切削速度には； $V_{0.1} = 0.5\text{mm/min}$ ,  $400\text{mm/min}$ ,  $2.5\text{M/min}$ ,  $5\text{M/min}$ ,  $10\text{M/min}$ の値を用いた。

切り込み深さには； $t_{0.1} = 0.005\text{mm}$ から $0.1\text{mm}$ までの値を用いた。

切削実験は室温 $293\text{K}$ で行い、切削温度は放射温度計にて測定した。

乾式二次切削のみ行ったが、すくい面上の油膜介在をアセトンとエタノールにて除去した。

### 3.2 せん断角<sup>3)</sup>, 被削材内歪, 切削抵抗測定法

せん断角 $\phi$ は、本実験速度域では $B \cdot U \cdot E$ の発生がなく<sup>4)</sup>, 流れ型切屑に近い切屑であったので、理想的な二次元切削が行なわれているものとして、Fig. 1の関係から $\phi = \tan^{-1} \{r_c \cos \alpha / (1 - r_c \sin \alpha)\}$ の式により求めた。ここに $r_c = t_1 / t_2$ である。切屑厚さの無次元量としてせん断角を扱う。切屑厚さの測定には、マイクロメーターを用いたが、アンビル・切屑の接触を顕微鏡で観察し、測定圧で切屑が変形することを避けた。

被削材内歪測定には、光弾性皮膜法を用いた。光弾性皮膜及び歪解析法については、前報<sup>2)</sup>に述べた通りである。尚、この際の光弾性縞次数 $N \sim \epsilon$ , 被削材内応力 $\sigma \sim \epsilon$ の関係特性は、被削材から単軸引張試験片を切り出し、これに皮膜を接着してから単軸引張試験を行って、求めた。その装置概要をFig. 5に示す。

Fig. 6には、光弾性皮膜法の手順を示した。Case Aは無歪材切削による光弾性縞を； Case A'はCase A直後、皮膜接着のままで、引き続き2回目切削を行う場合に生ずる光弾性縞を； Case Cは無歪材切削後に初めて皮膜を接着して、2回目切削のみによる光弾性縞をそれぞれ観察する場合を示す。

切削抵抗測定には、Fig. 7に示す工具ホルダーと一体型のストレインゲージ式工具動力計を製作して、用いた。

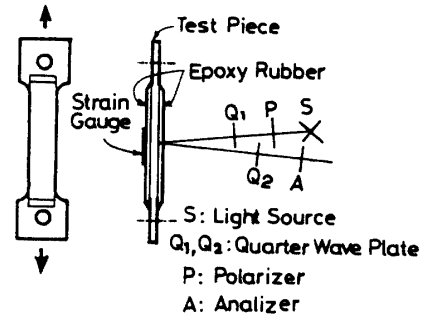


Fig. 5 Characteristic Tension Test for the Relation of  $N \sim \epsilon$ ,  $\sigma \sim \epsilon$

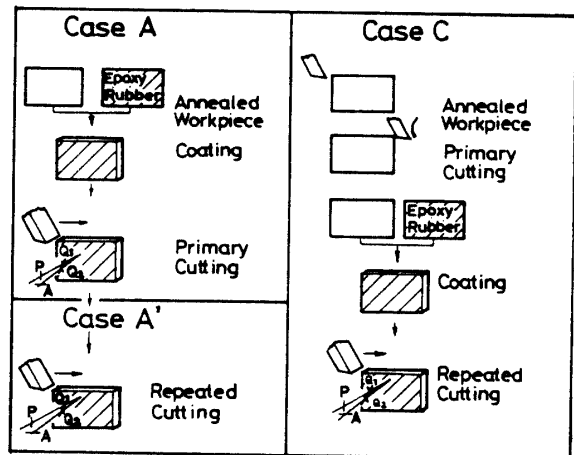


Fig. 6 Flow Chart of Photoelastic Coating Method

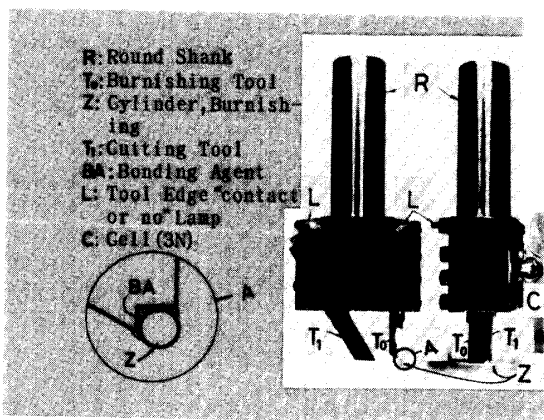


Fig. 4 Burnishing Tool

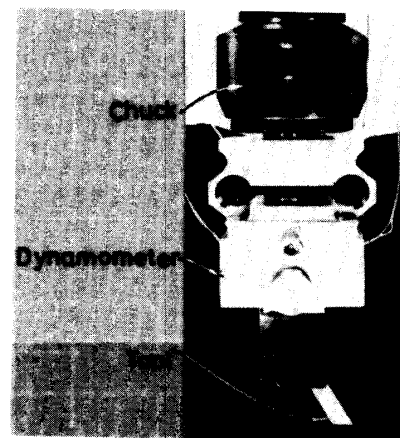


Fig. 7 Tool Post Dynamometer

4. 実験結果及び考察

Fig. 8には、2回目切削の切屑写真の一例を、 $V_0 = 2.5M/min$ ,  $V_1 = 400mm/min$ の場合について示す。縦軸は無歪材切削時の切り込み深さ、横軸が2回目切削の切り込み深さをそれぞれ表わす。無歪材切削の切り込み深さ $t_0 = 0mm$ の欄に、比較の便宜上、無歪材切削の切屑を横方向に、2回目切削の切り込み深さを、無歪材切削時の切り込み深さと見なして、その値の順に従って、配列した。図中の比較的短い切屑は、短冊型で；長い切屑は、規則的形状の連続型であった。

無歪材切削時の切屑より、2回目切削の切屑がいずれも長い。この傾向は、2回目切削切り込み深さがその直前の加工即ち、無歪材切削時の切り込み深さを越えない範囲で、特に著しい。このことは、加工変質層の深さ及びその変質の度合と切り込み深さが強い相関関係にあることを示している。さらに前加工切り込み深さよりも小さな切り込み深さでの切削によって、被削性を良くすることができる。

Fig. 9, 10, 11, 12には2回目切削のせん断角 $\phi_1$ と無歪材切削時の切り込み深さ $t_0$ 及び2回目切削の切り込み深さ $t_1$ との関係を示す。縦軸に $\phi_1$ 、斜軸に $t_0$ 、横軸に $t_1$ を表わした。尚横軸上に、前加工のない被削材、即ち無歪材切削の各切り込み深さ $t_0$ に対する、せん断角 $\phi_0$ についてを、比軸の便宜上、示した。切削速度 $V_0$ ,  $V_1$ 及びすくい角 $\alpha_0$ ,  $\alpha_1$ は図中に示した。

Fig. 9, 10, 11は各々無歪材切削速度が $V_0 = 400mm/min$ ,  $2.5M/min$ ,  $10M/min$ の場合で；2回目切削速度が、いずれも $V_1 = 400mm/min$ の場合である。いずれの図でも無歪材切削時の切り込み深さよりも小さな切り込み深さで2回目切削を行うと、加工硬化の影響により、せん断角は著るしく大きくなっていることが認められた。

更に、無歪材切削時の速度が $V_0 = 400mm/min$ ,  $2.5M/min$ ,  $10M/min$ と増大するに従って、せん断角 $\phi_1$ の極大値は $39^\circ$ ,  $42^\circ$ ,  $51^\circ$ と上昇し、しかも次第に尖鋭な曲線となっている。又せん断角が急に大きくなる点は、 $t_2$ の値の低い方へ移動している。このことから、焼鈍した無歪軟質材切削においても、切削速度上昇に伴って、被削材は硬く作用したと思われる。

Fig. 12には、無歪材の切削時速度 $V_0 = 400mm/min$ で2回目切削速度が $V_1 = 10M/min$ の場合を示す。これは、前の3図とは、切削速度において、逆の場合を示すものであるが、Fig. 9の無歪材の切削時速度が同一の、 $V_0 = 400mm/min$ で、2回目も $V_1 = 400mm/min$ の場合に似たせん断角 $\phi_1$ の挙動を示している。このことから、無歪材切削時の加工変質層が、その後のくり返し切削に支配的な影響を及ぼしていることがわかる。

Fig. 12には、無歪材切削を、すくい角 $\alpha_0 = 0^\circ$ の工具で行った場合の一部を、 $t_0 = 0.03mm$ の場合について、図中破線で示す。すくい角 $\alpha_0 = 0^\circ$ の工具によって無歪材を切削する場合は、 $\alpha_0 = 30^\circ$ によるものより、わずかに2回目切削のせん断角 $\phi_1$ を大きくしている。すくい角は加工硬化に対して、比較的鈍感に作用する。

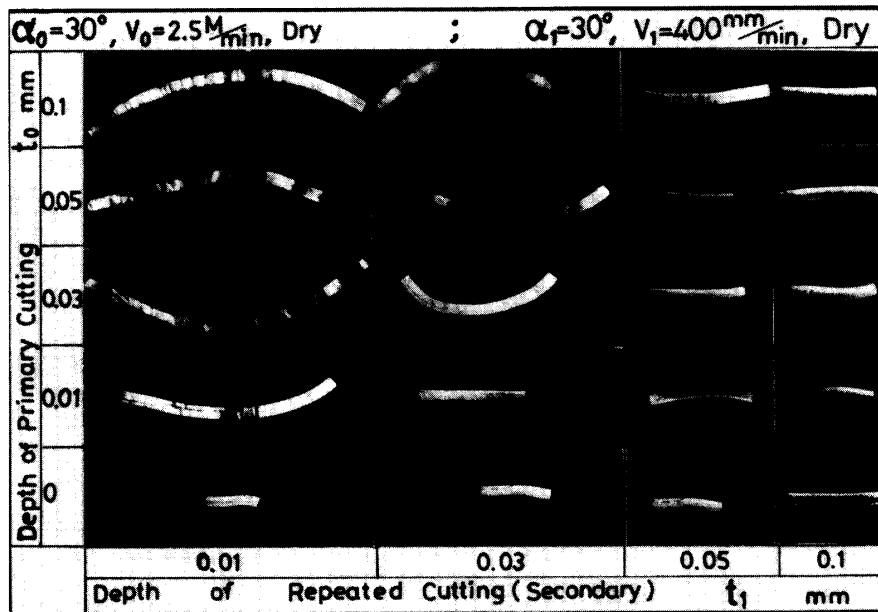


Fig. 8 Chips after Repeated Cutting under each cutting Depth

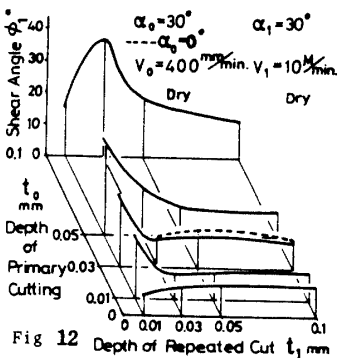
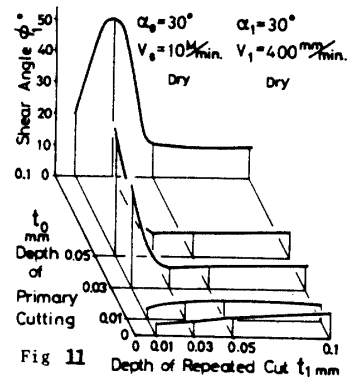
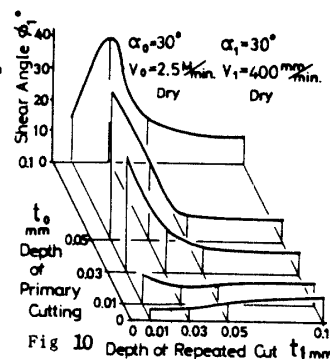
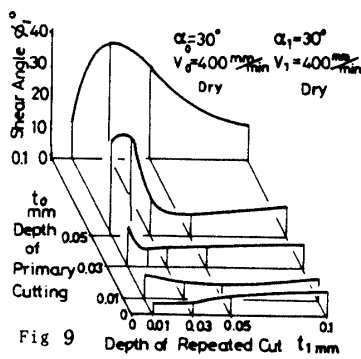


Fig. 9, 10, 11, 12 Relation between Shear Angle of Repeated Cutting and Cutting Depth

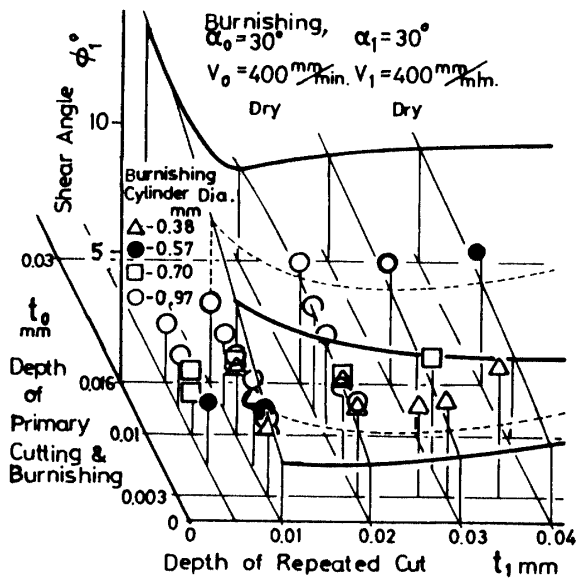


Fig. 13 Relation between Shear Angle of Repeated Cutting and Cutting Depth, when Primary Machining is Vurnishing

Fig. 13には、無垂材をバニシ工具で加工した被削材を、 $\alpha_1 = 30^\circ$ の工具で切削する際のせん断角 $\phi_1$ とバニシ押し込み深さ及び2回目切削切り込み深さとの関係を示した。 $V_0 = 400 \text{ mm/min}$ 、 $V_1 = 400 \text{ mm/min}$ で $\alpha_1 = 30^\circ$ であるので、この条件と一致するFig. 9の一部、切り込

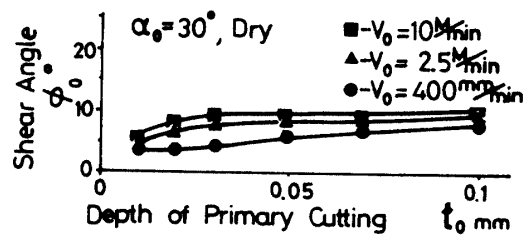


Fig. 14 Relation between Shear Angle of Primary Cutting and Cutting Depth

みの小さな範囲を拡大し、これに重ねて表わした。これからわかるように、バニシ工具先端円筒直径による、せん断角 $\phi_1$ の変化は、本実験の円筒直径範囲で、ない。2回目切削の切り込み深さ $t_1 = 0.02 \text{ mm}$ を境に、これより切り込みが大きい範囲でせん断角 $\phi_1$ は、無垂材を切削加工したときより大きく、 $t_1 = 0.02 \text{ mm}$ より小さい範囲では、逆に小さくなっている。このことは、バニシ加工後の被削材では、その表面よりむしろ内部で、本実験の範囲では深さおよび $0.02 \text{ mm}$ の所で、加工硬化の程度が極大となるためである。

Fig. 14には、無垂材切削時のせん断角 $\phi_0$ と切り込み深さ $t_0$ の関係を、切削速度 $V_0$ をパラメーターとして、示した。これはFig. 9からFig. 12までの横軸 $t_0 = 0 \text{ mm}$ 上の特性のみを、集めて一挙に表わしたものである。切削速度上昇によって、わずかにせん断角の増大が、いず

れの切り込み深さにおいても、起っている。これは、速度上昇によって被削性が良くなることを示す。

Fig. 15には、皮膜法のCase Aによって得られた、無歪材切削後の等色光弾性縞、即ち等色線の一列を、 $V_0=0.5\text{mm/min}$ ,  $t_0=0.1\text{mm}$ ,  $\alpha_0=30^\circ$ の場合について示した。切削後表面の残留縞次数は、喰い付き点から切り上り点に至るまで、 $0 \rightarrow$ 漸増 $\rightarrow$ 定常 $\rightarrow$ 急増 $\rightarrow$ 極大 $\rightarrow$ わずかに減少して終る、という過程を終る。切削条件によっては、切り上り部で急増の後、緩増のまま終ることもあるが、いずれの切削の場合でも、切削後の残留等色線は、このFig. 15と同様なパターンを示す。

前報<sup>2)</sup>で述べた通り、被削材内の一点では；刃先前方で圧縮による歪を生じ、後方では引張による歪を生ずるので、この差に相当する歪が残留歪として観察される。半無限板の切削であれば、Fig. 15の定常部のような平行等色線が無限に残留するべきである。しかしながら、有限長の被削材においては、喰い付き部、切り上り部に、同一回転方向(紙面では右回り)の曲げモーメントを、刃先の通過によって、受ける。したがって、平行縞の両端に曲げモーメントによる縞を加算したとすれば、Fig. 15と同様にパターンの縞が得られるものと推測できる。したがって、喰い付き点に斜めに被削材内から0次の縞が伸び、喰い付き端面を引張歪残留域に、切削面及び切り上り端面を圧縮歪残留域にそれぞれ二分している。

Fig. 16には、各切削速度による、無歪材切削後の定常部の平行残留等色線である。それぞれ、 $V_0=0.5\text{mm/min}$ ,  $400\text{mm/min}$ ,  $2.5\text{M/min}$ ,  $10\text{M/min}$ の場合である。いずれも切り込み深さ $t_0=0.1\text{mm}$ , すくい角 $\alpha_0=30^\circ$ である。速度の上昇に従って、縞分布の深さ及び次数の減少が見られる。加工変質層分布の挙動と同じと見てよい。したがって、速度が大きくなる程、材料のみかけの硬さが増大し、加工変質の作用を受けにくくするものと判断できる。これはせん断角による結果と一致する。

Fig. 17には、被削材表面各部、及び内部深さ方向についての最大せん断歪 $\gamma_{\text{max}}$ の分布を示した。いずれもFig. 15, 16の等色線から歪解析したものである。被削材表面及び切り上り端及び被削材内部では、速度上昇に従って、分布の大きさは減少している。しかしながら；喰い付き端面のみこの傾向とは逆に、速度上昇に従って、分布の大きさ、範囲とも大きくなり、極大点は深くなっている。これは喰い付き端面が速度に伴う衝撃荷重を受けるため発生した現象と思われる。

Fig. 18, 19, 20は、切削中、切削後の等色線写真である。それぞれ、無歪材切削のCase A, 2回目切削の

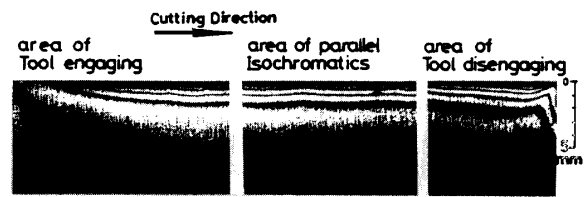


Fig. 15 Residual Isochromatics after Primary Cutting :  $V_0=0.5\text{mm/min}$ ,  $t_0=0.1\text{mm}$ ,  $\alpha_0=30^\circ$ , Dry

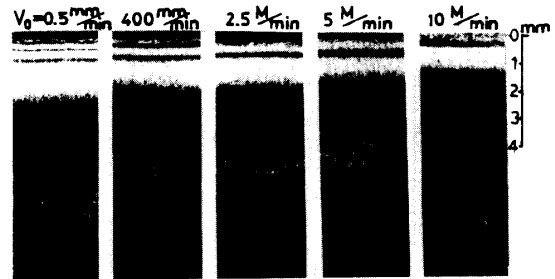


Fig. 16 Residual Parallel Isochromatics after Primary Cutting in each Speed

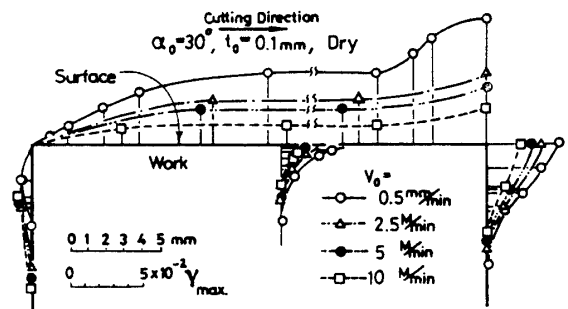


Fig. 17 Residual Strain Distribution in the work-piece after Primary Cutting of annealed workpiece, for a Cutting Speed as parameter

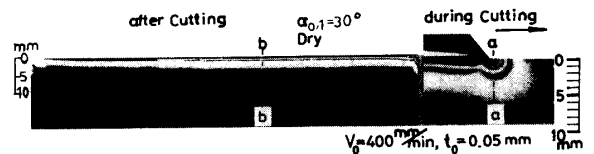


Fig. 18 Isochromatics (Case A)

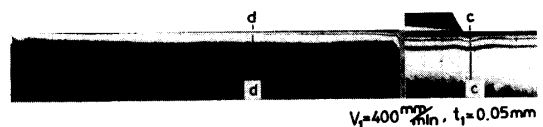


Fig. 19 Isochromatics (Case A')



Fig. 20 Isochromatics (Case C)

Case A', 2回目切削のCase Cの手順によるものを示す。いずれも切削速度 $V_0, V_1=400\text{mm/min}$ で, 切り込み深さ $t_0, t_1=0.05\text{mm}$ の場合である。

Fig. 18の残留等色線に対して, Fig. 19の残留等色線は, 2回目切削にかかわらず, ほとんど変化してない。又2回目切削中のCase A'の等色線は, Case Aの平行残留等色線のある定状部を切削中であるが, 刃先前方でやや膨らみ, 刃先後方で又もとの平行縞に戻り, 縞次数の変化はないように観察される。このことはFig. 20でさらに明確となる。Fig. 20では, 2回切削挙動のみの観察ができる。刃先前後の等色線分布は, 刃先を通る垂線に関してほぼ対称であり, 弾性材切削中の等色線に酷似する。

前報<sup>2)</sup>で述べたように, 被削材内の任意の一点に, 切削後残留する歪の値は, 切削中の刃先前後でその点に生じた。圧縮縞次数と引張縞次数の極大値の差に比例する。このことから, 残留する等色線は, 0次に近いものであることが推量できる。事実, Case Cでの残留等色線の縞次数は, 被削材のいずれの部分でも, 0.5次に満たない, 非常に低い値のものとなっている。

Fig. 21には, 最大せん断歪 $\gamma_{\max}$ の分布を示した。いずれも, Fig. 18, 19, 20の等色線から歪解析したものである。それぞれ, 被削材表面各部についてと, Fig. 18, 19中のa-a, b-b, c-c, d-d断面の深さ方向についての分布である。Fig. 18, 19を比較して明らかなように, 本実験の範囲内では, 無歪材切削によって残留した加工硬化を同一切削条件で2回目切削しても, 加工硬化層の分布範囲, 大きさに大きな影響を与えない。このことは, すでにせん断角の所でも推測した。

Fig. 22には, 切り込み深さ $t_{0,1}$ と切削抵抗の関係を示した。切削のくり返し回数をパラメーターとした。いずれの切り込み深さについても, 2回目以降のくり返し切削の抵抗が高く, くり返し切削相互間の差は小さ

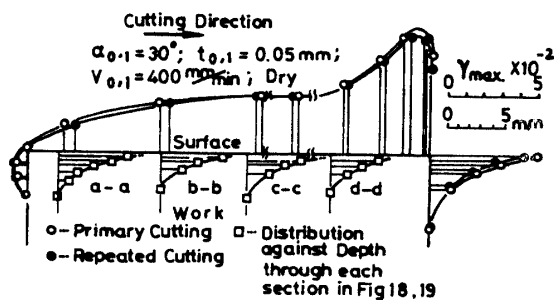


Fig. 21 Maximum Shearing Strain Distribution obtained by the Isochromatics in Fig. 18, 19

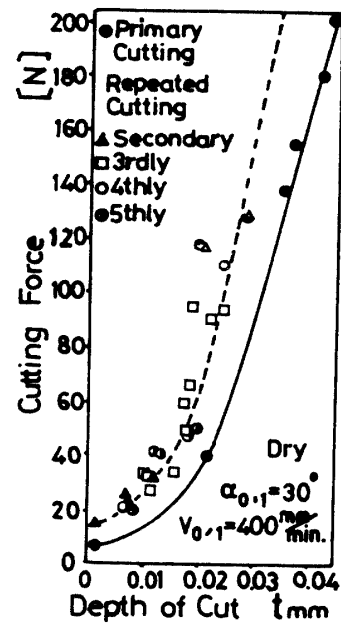


Fig. 22 Relation between Cutting Force and Cutting Depth

い。このことは, 前報<sup>2)</sup>で述べたFig. 23の $N \sim \epsilon, \sigma \sim \epsilon$ 関係特性によって示した, 無歪材切削及びくり返し切削の挙動によって説明できる。

無歪材切削の挙動は, A-B-C-D-Eであり, 残留歪は $\overline{AE}$ である。無歪材切削後に, 皮膜を接着するCase Cの手順は, それ以後の挙動を独立して観察できる。Fig. 23中で $N \sim \epsilon$ 特性の原点を, A点からE点に移したこと

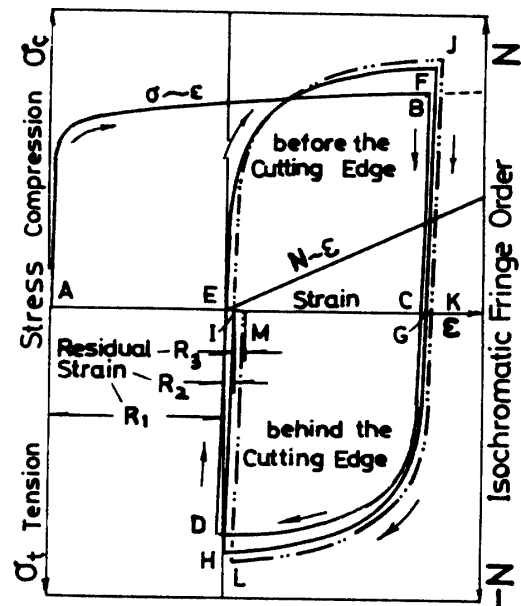


Fig. 23 Behaviour of Cutting Strain in a Strain Hardening Workpiece

になる。これによって、くり返し切削のみの挙動を捉えることができる。繰り返し切削の2回目が、E-F-G-H-I, 3回目がI-J-K-L-Mとなり、それぞれ、残留歪は $\overline{EI}$ ,  $\overline{IM}$ となる。

被削材内の任意の一点が受ける力は、刃先に切削抵抗として表われる。被削材内の任意の一点では、刃先の前後でそれぞれ極大歪値となる。このとき応力もまた極大値となる。無歪材切削時のBよりくり返し切削時のF, Jが又DよりH, Lがそれぞれ高く位置している。さらにFとJ, HとLの差は少い。すなわち、この極大点応力の値の和が切削抵抗と対応する。

## 5. 結 論

これら実験について詳しく検討した結果、つぎの事項が明らかになった。

- (1) 無歪材切削時の切り込み深さ以下の範囲の切り込みでくり返し切削をすると
  - (1.1) 切削中の被削材歪は弾性材切削の挙動に酷似し、加工硬化特性で説明できる。
  - (1.2) 残留歪分布は、くり返し切削によって、

変化しない。

- (1.3) 無歪材切削時に比べて、せん断角は大きくなり、被削性は改善される。
- (2) 無歪材切削時の切削速度が大きくなれば、上述のくり返し効果の認められる範囲は狭くなる。
- (3) 無歪材前加時に、それぞれすくい角の異なる切削工具のいずれを用いても、或いはパニシ工具を用いても；本実験の範囲内では、この工具の相異が、繰り返し切削のせん断角、残留歪分布、及び切削抵抗に及ぼす影響は少い。

## 引 用 文 献

- 1) 隈部・山本；昭和62年度精密工学会春季大会学術講演論文集, No.2
- 2) 隈部・山本・北川；山口大学工学部研究報告, 38-1 (1987) p.9~p.15
- 3) 隈部・山本；日本機械学会講演論文集, No.845-1, (1981)
- 4) 白井英治；切削・研削加工学, 上, 共立出版, (1971) p.10

(昭和62年10月15日受理)