

切削加工応力の光弾性的解析

三木 教*・石田 武*

Photo-visco-elastic Studies on Stresses in Work Pieces and Tools during the Cutting Operations

Satoshi MIKI and Takeshi ISHIDA

Abstract

Dynamical stress distributions of tools and work pieces during the shaping, the turning and the milling were studied with the photoelastic method.

The effect of cutting by the tool having built-up edge was investigated.

Experimental specimens of tools were prepared from epoxy resin and mild steel and work pieces from 2-8 mixed polyester and aluminium plate.

Dynamical isochromatic fringe patterns were photographed with the synchronous method by a strobo apparatus continuously during the cutting operation.

1. 緒 言

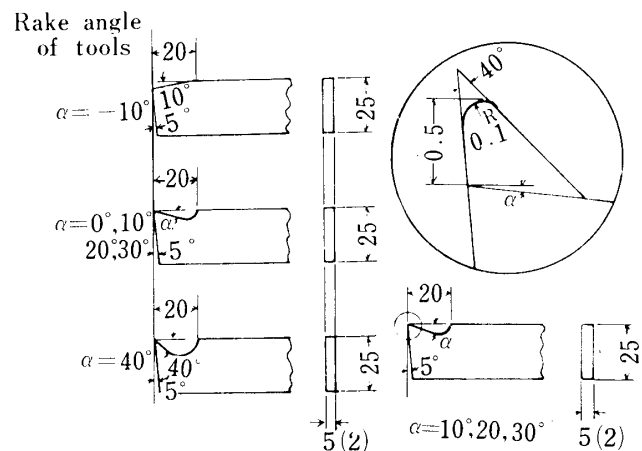
本研究は切削法の代表的なシェーブ切削, 旋盤切削およびフライス切削加工について, 切削中の被削材および工具に生ずる応力状態が工具すくい角の大きさによって受ける影響および構成刃先生成によって受ける影響を光弾性法によって調べ, 被削材および工具の切削加工応力状態を解明したものであって, 実験は平面ひずみ状態で低速切削を行ない, また, 一部平面応力状態で行って, 比較・検討した。

2. 実験材料および測定方法

2・1 実験材料

本実験では被削材に混合ポリエステル(2-8 MPE)およびアルミニウムを用い, 工具材にはエポキシおよび軟鋼を用いた。また, 光弾性皮膜としてはエポキシ・ポリサルファイド共重合体を用いた。

工具の形状・寸法: 切削実験に際しては, 工具はすくい角がそれぞれ -10° , 0° , 10° , 20° , 30° , 40° の6種類で, さらに構成刃先生成による影響を調べるために構成刃先状のものを有する工具を製作し, それを用いて切削した。これら工具の形状・寸法を Fig. 1 に示した。また, 被削材の厚さはすべて工具の厚さと同一にした。なお, 旋盤切削の場合の被削材直径は180mmであった。



Tools without the built-up edge Tools having the built-up edge

Fig. 1 Dimensions of tools
(tool materials ; epoxy resin and mild steel)

2・2 測定方法

本実験では厚さ方向の変形を阻止した平面ひずみ状態と平面応力状態の2つの場合について切削を行い, 両者を比較した。

工具がエポキシ, 被削材がポリエステルの切削の際は光弾性透過法を用い, また, 工具が軟鋼, 被削材がアルミニウムの金属切削の場合は光弾性皮膜法により測定した。

* 生産機械工学科

本実験では切削中に工具および被削材の温度が上昇しないよう特に低速切削を行った。この際、シェーパ切削および旋盤切削の速度 6 mm/min, フライス切削では、上向き削りと下向き削りとも工具周速度 28.3 mm/min (0.33rpm), 送り速度 3.6mm/min (1刃あたり 5.4mm), 工具直径 270mm とした。なお、切込みは、ポリマー切削では 1.0mm, 金属切削では 0.5 mm として切削を行った。

3. 実験結果とその考察

3.1 材料の複屈折特性

本実験に使用したエポキシおよび混合ポリエステル
の応力複屈折関係を調べた結果を Fig. 2 に示した。
また光弾性皮膜接着アルミニウム試片のひずみ複屈折
特性を調べて Fig. 3 に示した。

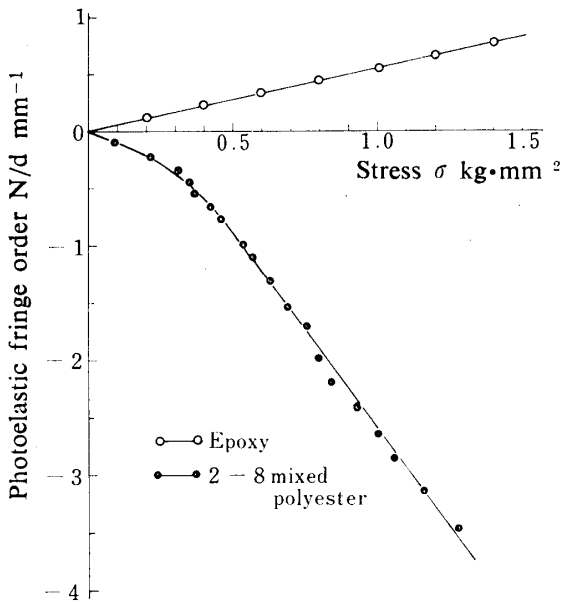


Fig. 2 Relation between the stress and the photoelastic fringe order of epoxy and mixed polyester

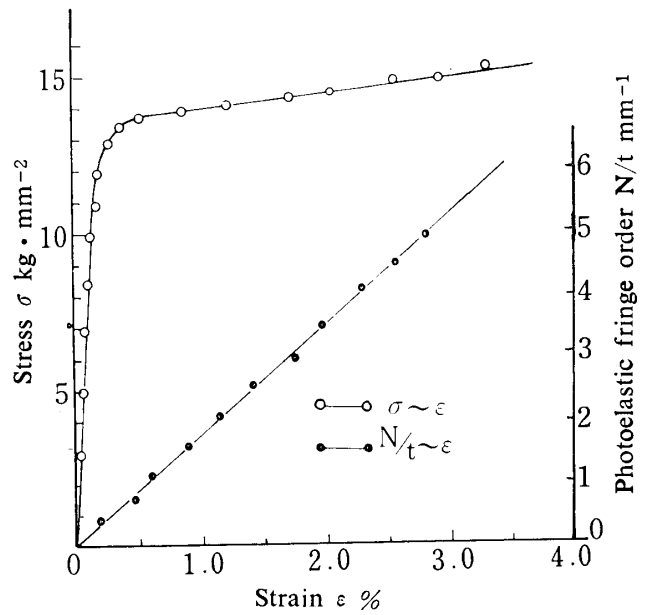


Fig. 3 Relations among the strain, the stress and the photoelastic fringe order of Al specimen coated the photoelastic film

3.2 シェーパ切削

3.2.1 ポリマー工具によるポリマー切削 本実験では、すくい角が $-10^\circ, 0^\circ, 10^\circ, 20^\circ, 30^\circ, 40^\circ$ およびすくい角が $10^\circ, 20^\circ, 30^\circ$ の工具に構成刃先が生成したもの計9種類の工具で、それぞれ切削を行い、切削開始より定常切削状態に到るまでの過程を光弾性法を用いて連続的に測定したが、その一例として Fig. 4 にすくい角 40° のエポキシ工具で混合ポリエステルを平面ひずみ状態においてシェーパ切削した場合の過渡的な切削状態の光弾性写真を示した。

最初(1)で工具が被削材に接触し、このとき工具および被削材にはわずかに応力が生じている。次に、(2)では工具はやや前進しているが、切削には到らずに、工具はくさび状態でその先端に応力が集中している。この直後、被削材が工具切刃先端で切断され、さらに(3)

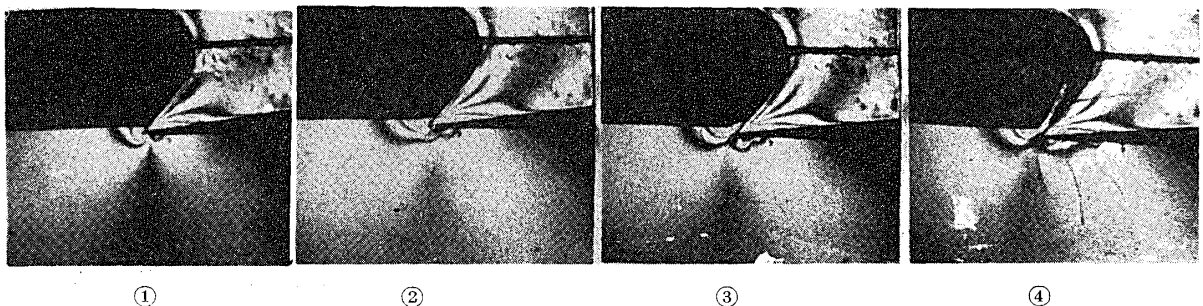


Fig. 4 Isochromatic fringe patterns of the transient state of the shaping

のように工具が前進して切屑は完全に被削材本体から分離し、工具すくい面上にわずかに伸びており、それにつれて工具切刃先端の応力の分布も広がっている。そして、それ以後は(4)のように定常切削状態となった。ここでは、すくい角 40° の工具で切削した場合のみを示したが、このような過渡的な切削状態は他の形状の工具による切削においても同様な傾向を示した。

次に工具切刃近傍の被削材および工具の応力分布とその光弾性写真を Fig. 5 ~ Fig. 9 に示した。

Fig. 5 にはエポキシ工具で混合ポリエステルを平面ひずみ状態でシェーパ切削しているときの光弾性写真の一例を示した。また、Fig. 6 には、平面応力状態でシェーパ切削しているときの光弾性写真の一例を示したが、この場合に限り、試片厚さは 10mm とした。

Fig. 7 には、すくい角 40° のエポキシ工具で混合ポリエステルを平面ひずみ状態において、シェーパ切削中の工具切刃近傍の被削材および工具の応力分布とその光弾性写真を示した。また、Fig. 8 には、同じくすくい角 -10° の工具による場合を示した。

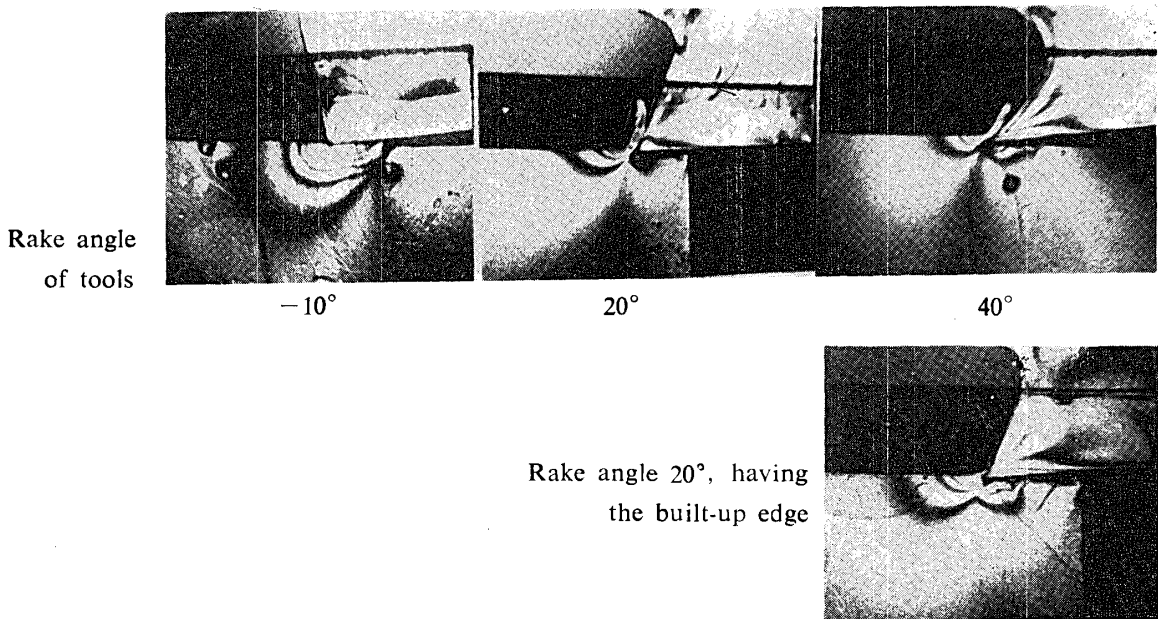


Fig. 5 Isochromatic fringe patterns during the shaping under the plane strain

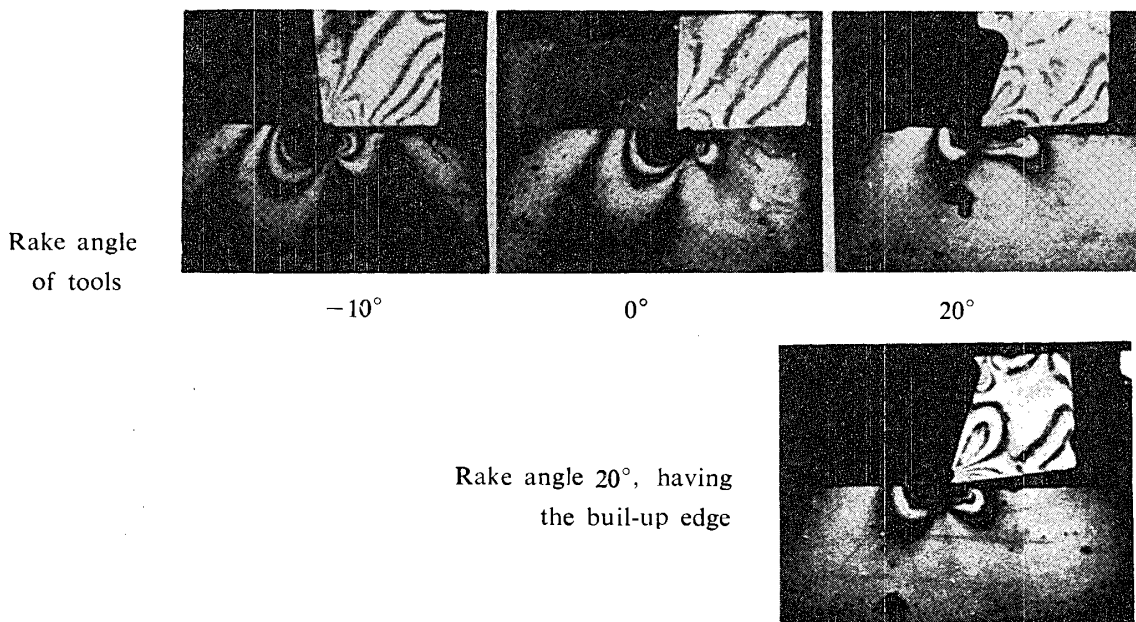


Fig. 6 Isochromatic fringe patterns during the shaping under the plane stress

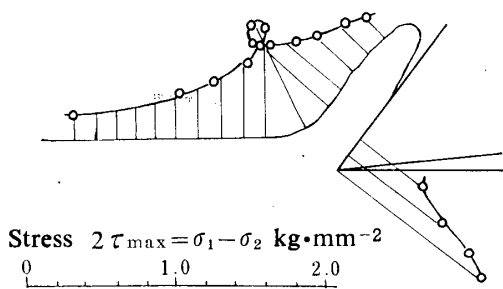
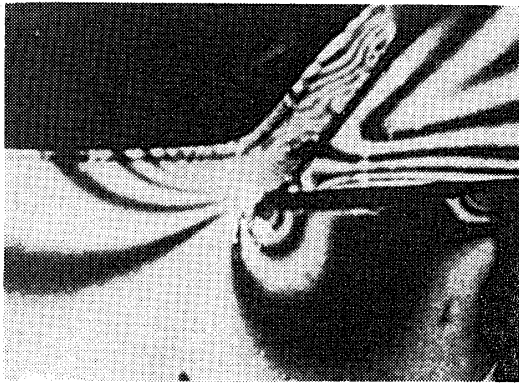


Fig. 7 Stress distributions of the work piece and the cutting tool and its isochromatic fringe pattern during the shaping (rake angle of tool; 40°)

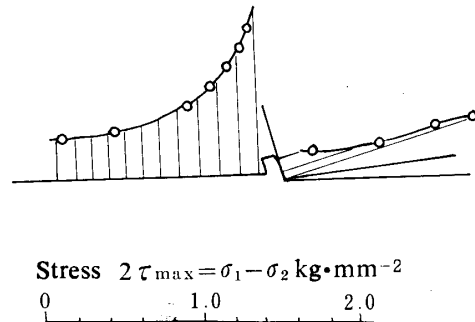
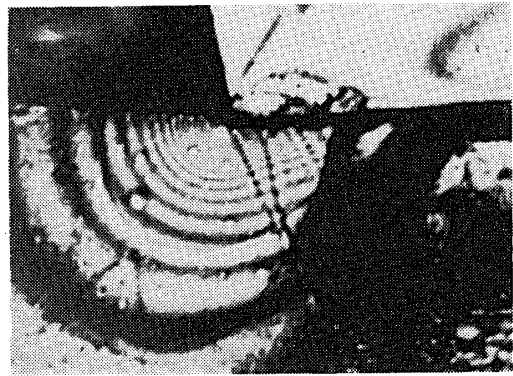


Fig. 8 Stress distributions of the work piece and the cutting tool and its isochromatic fringe pattern during the shaping (rake angle of tool; -10°)

被削材表面の応力状態は工具すくい角が40°および-10°の両者いずれの場合も最大せん断応力面との交点において、最大応力を示し、すくい角40°の場合、圧縮応力約0.9kg·mm⁻²、すくい角-10°の場合、同様約1.1kg·mm⁻²であった。工具切刃先端では、被削材および工具ともに応力最大で約1.4kg·mm⁻²となつて、被削材はその点からせん断されている。Figs. 5, 7, 8の写真からも明らかなように、切削後、被削材に残留する応力は切屑のものに比較して小さい値を示しているが、その層の深さは切屑の厚さに比して、かなり大きくなつてゐる。

エポキシ工具で混合ポリエステルをシェーブ切削中の工具すくい面上の応力を Fig. 9 に示した。工具切刃先端で最大応力となり、それより切屑剝離点までは急激に減少し1/3以下となつてゐるのがわかる。また、工具すくい角が大きいほど工具すくい面上の応力分布はひろがり、すくい角40°の場合は-10°の場合に比して約2倍になつた。

次に、平面応力状態で切削を行うと、Fig. 6 に示したように、工具切刃近傍の被削材は大変形のために黒く見えるが、この部分を塑性変形領域と考えることができる。この領域はすくい角が大きいほど小さいこと

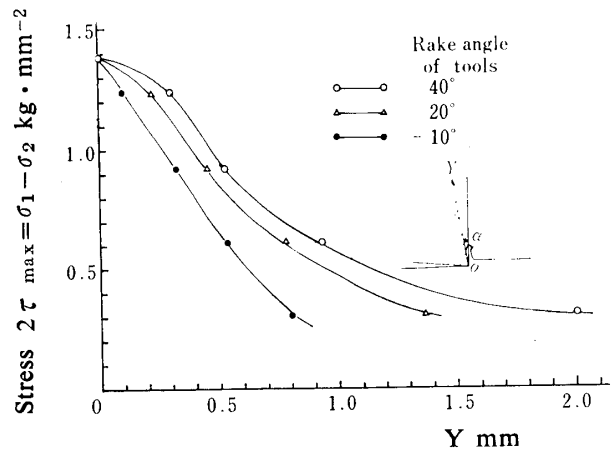


Fig. 9 Stress distributions on the rake face of tools during the shaping

が光弾性写真より明らかである。

次に、平面ひずみ状態においてすくい角の異なる工具で、それぞれシェーブ切削中の工具切刃前方の被削材表面の応力状態を示したのが Fig. 10 である。工具がエポキシ、被削材が混合ポリエステルで切込み1.0 mm の場合である。これより明らかに、工具すくい角が小さいほど被削材に広い範囲に影響をおよぼしており、工具切刃直前で応力が急激に増大している。この

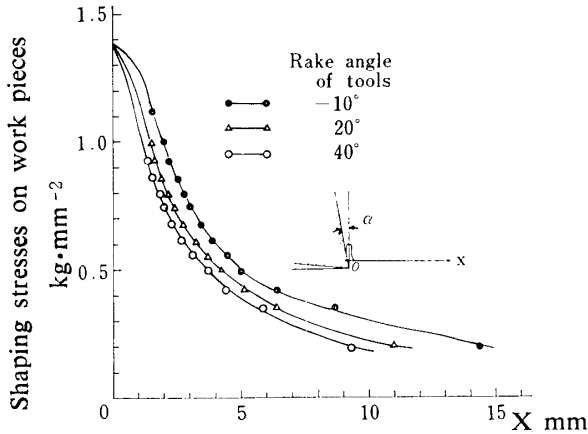


Fig. 10 Stress distributions on work pieces during the shaping

ことは平面応力状態で切削した場合も同様であり、工具すくい角が小さいほど切刃近傍の被削材の黒い部分、即ち塑性変形領域は大きくなっている。

上述のポリマー切削の場合、切込みを1.0mmとしたが、すくい角 -10° の工具では刃先が鈍角のために、ほとんど切込まず、逆にすくい角 40° の工具では工具先端が曲げ作用を受け、所定の切込みよりやや大きくなっていると考えられるが、そういうことが生じなければ、被削材表面の応力分布の差はもっと大きくなると考えられる。

なお、工具切刃下方の被削材におよぼす影響も、Fig. 5, Fig. 6より明らかであるが、工具切刃前方と同様の傾向となっている。

さらに、本実験では、構成刃先生成・脱落による影響を調べるために、実際の構成刃先と同一形状のものをもつ工具を作製し、それをを用いて切削した。構成刃先が生成した場合の切削と脱落した場合の切削における被削材のせん断流線を調べた結果を Fig. 11に示した。この線図より明らかなように、切削中構成刃先が生じると、せん断角は構成刃先が脱落した場合の 23° に比較して 35° と大きくなり、あたかもすくい角の大きな工具で切削したかのごとくなっている。このように、構成刃先が生ずると、工具すくい角が実際の場合よりも大きなすくい角の工具で切削するのと同じ効果を与えることになる。なお、構成刃先は丸くなっているので、その点では切削性は低下すると考えられるが、せん断流線図でわかるように、せん断角が大きくなっているということは、刃先の丸味の効果よりもすくい角が大きくなった効果の方が大きいと解せられる。従って、実際の切削加工においては、この構成刃先は発生、成長、分裂および脱落を1周期に、これを非常に

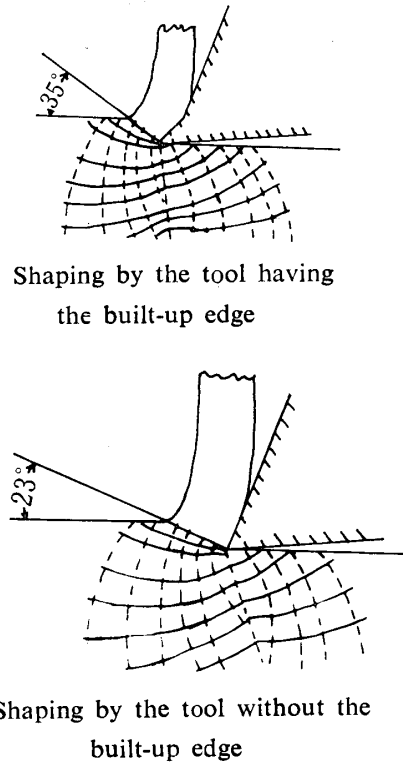


Fig. 11 Principal shearing stress trajectories in work pieces during the shaping

短時間に繰返すので、みかけの工具すくい角が刻々変化することになる。さらに、構成刃先が成長することによって切込みも最初の設定値以上となり、これも短時間に変化しているので、これら両者が相乗じて、切削過程の不安定となり、被削材表面の粗さに影響するので、構成刃先が生じると、構成刃先の生じない切削中の場合よりも仕上精度を悪くするものと考えられる。

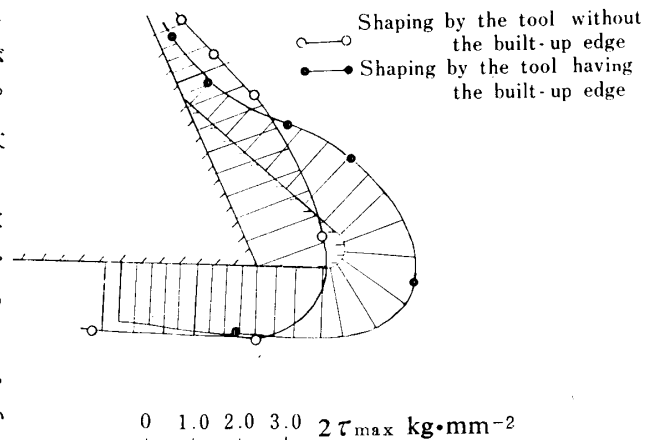


Fig. 12 Stress distributions on the surface of tools having the built-up edge during the shaping

構成刃先が生じた場合に構成刃先に生ずる応力と構成刃先が脱落した場合の工具表面の応力状態を Fig. 12に示したが、これによると構成刃先が生成しても、脱落しても最大応力に変化はなく、切削は同一最大応力で行われていることがわかる。

3・2・2 金属工具による金属切削 軟鋼工具でアルミニウムを切削中の皮膜光弾性写真の一例を Fig. 13に示した。これはすくい角 20° の工具による切削であるが、Fig. 14に被削材に生ずる応力・ひずみ分布を示した。切削は(1)で開始し、(2)、(3)と進行している。この場合、工具切刃の前方約 3.5mm の点から降伏を開始しており、そこより工具側では、ひずみは急激に増大し、応力も緩やかなから増大しており、ポリマー同士の切削とよく一致しているのがわかる。

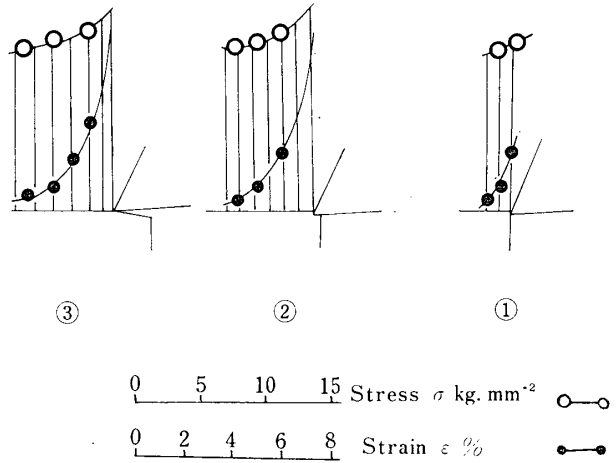


Fig. 14 Stress distributions on the surface of work pieces during the shaping of Al plate specimen

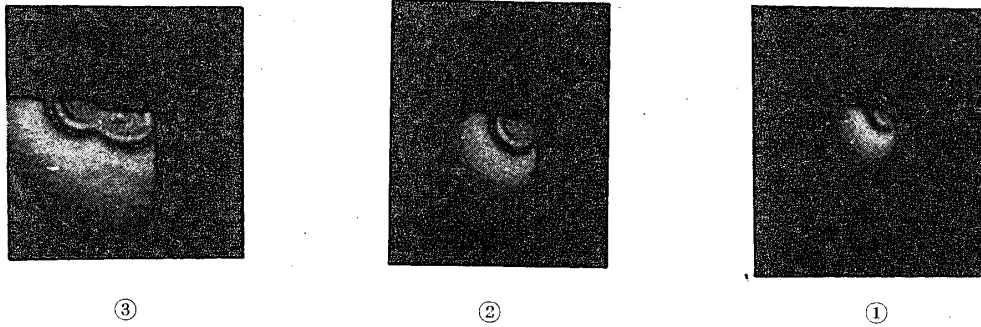


Fig. 13 Isochromatic fringe patterns of coating film during the shaping of Al specimen

3・3 旋盤切削

旋盤切削においても平面ひずみ状態の場合と平面応力状態の場合について切削を行ったが、その場合の定

常切削状態の光弾性写真の一例を Fig. 15、Fig. 16に示した。Fig. 15が平面ひずみ状態での切削の場合であり、Fig. 16が平面応力状態で切削した場合であ

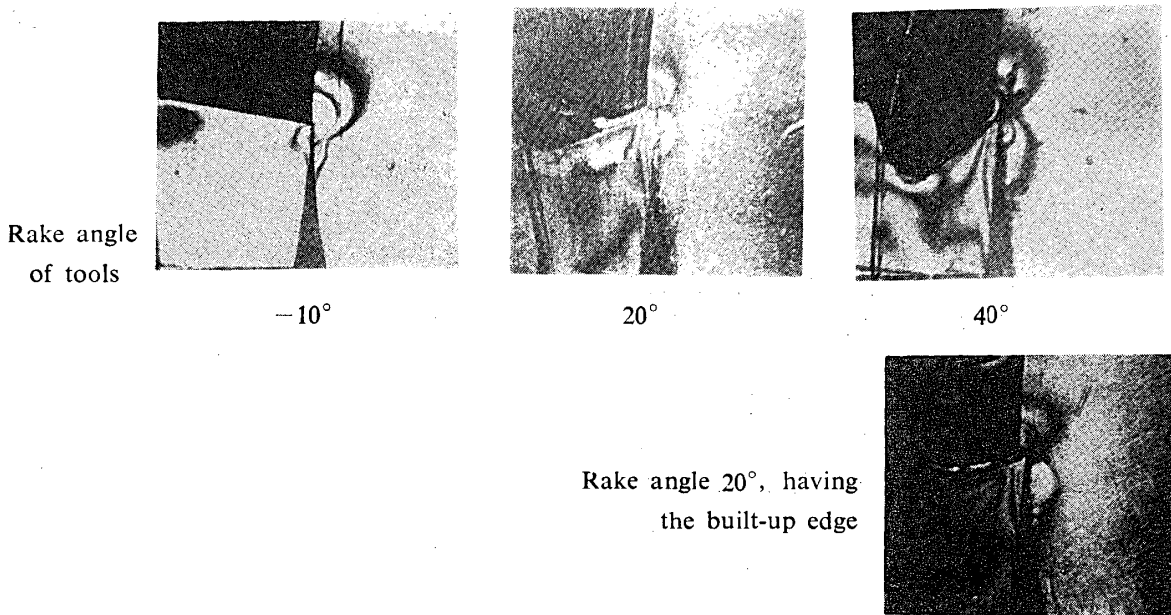


Fig. 15 Isochromatic fringe patterns during the turning under the plane strain

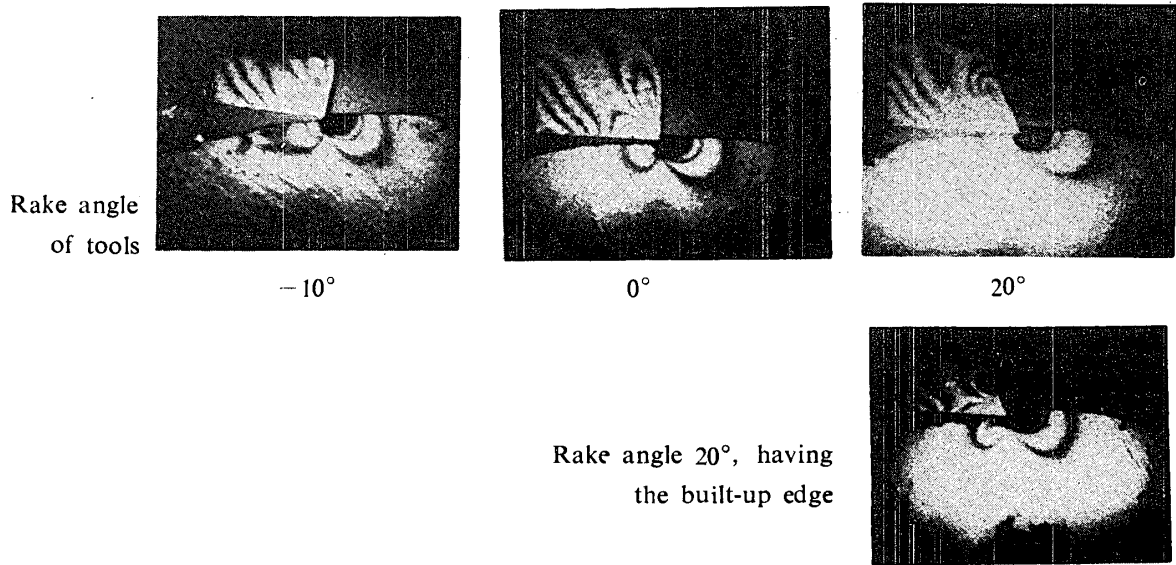


Fig. 16 Isochromatic fringe patterns during the turning under the plane stress

る。旋盤切削もシェーパ切削と同様に、切削開始より定常切削に到るまでを連続的に測定し、すくい角の大きさによる影響、構成刃先生成による影響を調べたが、この場合、ほとんどシェーパ切削と同じ傾向となった。

3・4 フライス切削

3・4・1 ポリマー工具によるポリマー切削 フラ

イス切削実験は、上向き削りと下向き削りの両者を比較・検討した。平面ひずみ状態で切削した場合の被削材および工具の光弾性写真の一例として、Fig. 17にすくい角20°の工具で上向き削りしているものを、また、Fig. 18にすくい角20°の工具で下向き削りしているものを示した。

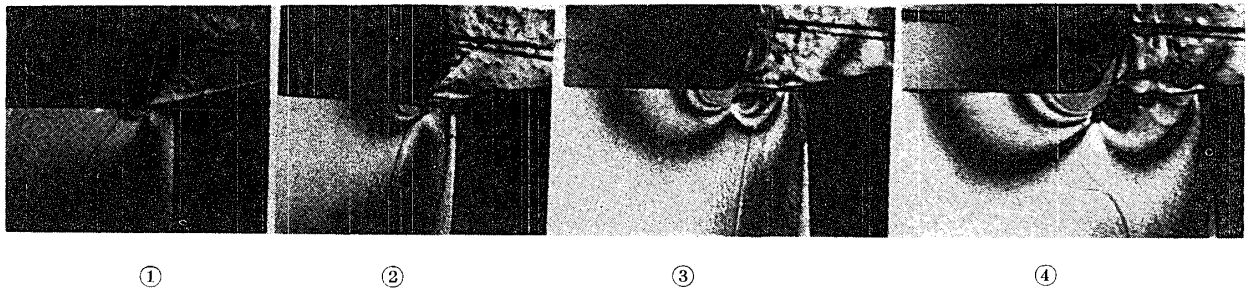


Fig. 17 Isochromatic fringe patterns during the milling at the upper cut under the plane strain (rake angle of tool ; 20°)

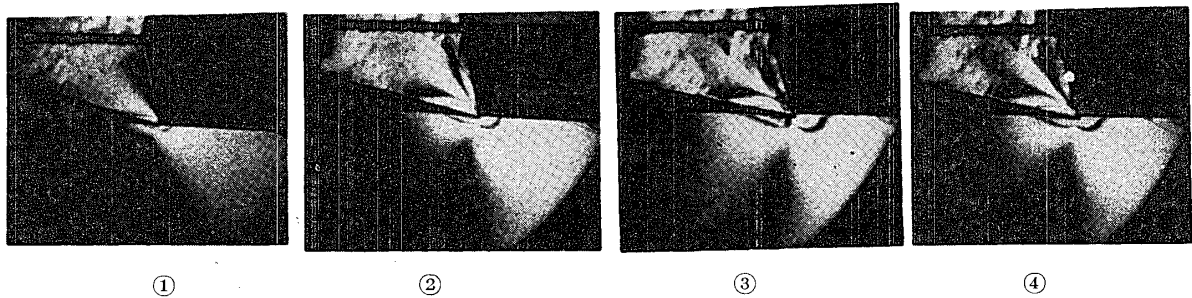


Fig. 18 Isochromatic fringe patterns during milling at the down cut under the plane strain (rake angle of tool ; 20°)

上向き削りの場合、(1)で工具切削先端はわずかに被削材表面に接触し、やや応力が生じ、(3)になって切屑が生成し、工具すくい面に伸びているが、このときのみかけのすくい角は約 10° である。(4)ではみかけのすくい角は約 12° となっているが、工具切削からかなり遠方の被削材にまで影響をおよぼしているのがわかる。なお、切削中の最大応力はシェーパー切削および旋盤切削の場合とほぼ等しい値をとっている。

Fig. 18の下向き削りの場合も(1)、(2)、(3)、(4)の順に切削が進行しているが、みかけのすくい角は、(1)から順に 10° 、 11° 、 12° 、 13° となっている。(1)で工具と被削材が接触しているが、(2)、(3)と切削過程が進行しても、被削材におよぼす影響は上向き削りに比較して

極めて狭い範囲であり、 $0.2\text{kg}\cdot\text{mm}^{-2}$ の応力を与える範囲は上向き削りの方が、5倍以上大きくなっている。また、切込みも下向き削りの方が小さくなっているが、このことはやはり下向き削りの応力分布の狭いことの一因となっている。

3・4・2金属工具による金属切削 軟鋼工具でアルミニウムをフライス切削した場合の皮膜光弾性写真の一例を Fig. 19, Fig. 20に示した。両者とも下向き削りの場合のものであり、Fig. 19はすくい角 20° の工具で構成刃先が生成した場合のものであり、Fig. 20はすくい角 20° の工具で構成刃先が脱落した場合のものである。

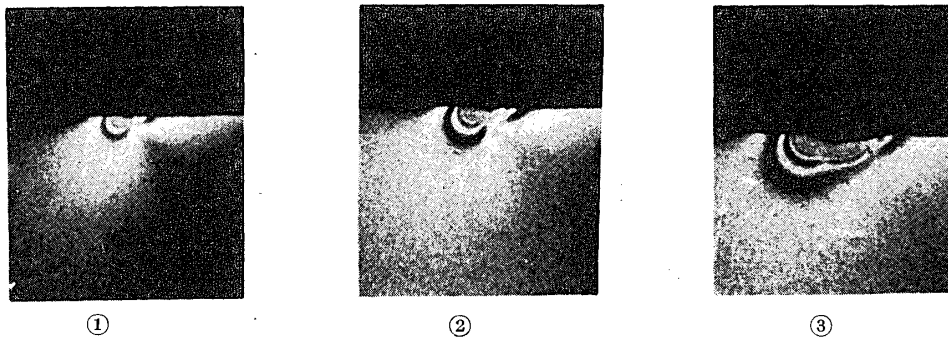


Fig. 19 Isochromatic fringe patterns of coating film during the milling at the down cut of Al plate (tool having the built-up edge)

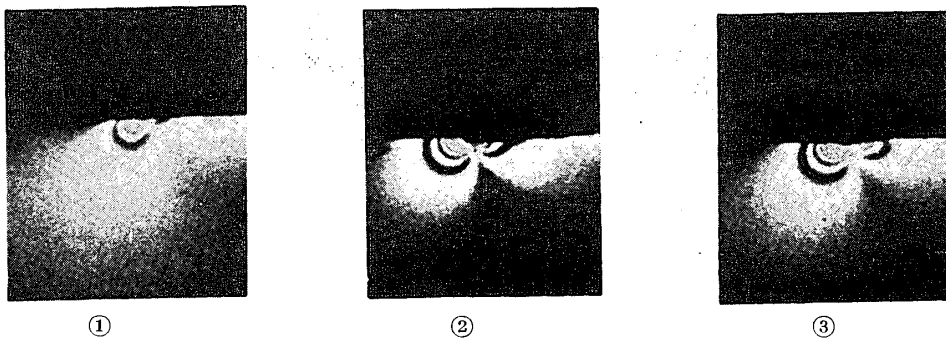


Fig. 20 Isochromatic fringe patterns of coating film during the milling at the down cut of Al plate (tool without the built-up edge)

4. 結 論

被削材および工具ともにポリマーを用いて両者の切削加工応力を光弾性的に解析し、また、金属切削については、その被削材応力を光弾性皮膜法を用いて解析して次のような結論を得た。

(1) 光弾性法により、シェーパー切削、旋盤切削およびフライス切削の3種類の加工法について、その切削開始より定常切削状態に到るまでの工具および被削材の応力状態を連続的に測定・解析することができた。

(2) 被削材の表面応力は、最大せん断応力面との交点で最大となり、この最大せん断応力面でせん断される。

(3) 工具すくい面上の応力分布は、すくい角が大きいほど広い範囲に分布し、被削材の応力分布はこれと逆の状態となる。

(4) 切削中に工具に構成刃先が生じると、最大せん断応力面(せん断角)が変化し、従って構成刃先生成、脱落により切削が不安定となり、切削面の加工精

度を悪くする。

(5) フライス切削においては、下向き削りが上向き削りよりも応力分布の範囲が狭く、加工精度良好となる。

(6) すくい面の大小、構成刃先の有無にかかわらず、最大せん断応力面は一定である。(ただし、同一

被削材について)

(7) 各種切削加工法において、一般に、工具切削先端の最大応力が、工具すくい面上の切屑剥離点付近で1/3以下に減少する。

(昭和47年12月15日受理)