

切削歪の残留挙動について ——延性材の切削——

隈部 晃*・山本耕之*・北川亮三**

A Study on the Behaviour of Residual Strain during Cutting Process ——in Machining Ductile Material——

Akira KUMABE, Kouji YAMAMOTO and Ryozo KITAGAWA

Abstract

Detailed studies^{1)~5)} on the deformation of a workpiece during cutting processes have already been carried out. But a few of them have ever dealt with the separation of the component of the instantaneous cutting strain and that of the residual one in the following stage. In order to separate them, it requires to measure the strain quantitatively.

The authors have reported the results^{6)~15)} of the investigation of the cutting strain measured by the photoelastic coating method. In this paper, the behaviour of the strain in the ductile material during the orthogonal cutting process was investigated by the same method. The results obtained through this study are as follows.

1. The comportment of the cutting strain in the ductile material was understood by means of the photoelastic coating method.
2. It was found that the behaviour of the cutting strain in the strain hardening material was similar to that of the elastic material.

1. 緒 言

切削機構については、古くから多くの研究がなされ今日でも格子線解析法¹⁾やSEM直接観察による解析²⁾及びこれらの結果を用いた有限要素法によるシミュレーション^{3),4)}など数多く報告されている。しかし、いまだに切削現象を説明できる完全な切削理論は確立されていない。特に、切削によって生ずる被削材内の歪残留

機構については、明らかではないように思われる。

著者らは皮膜法を用いた切削歪解析法についてすでに報告^{5)~15)}しているが、本研究では光弾性皮膜法を用いて二次元切削実験を行い、切削中のアルミ被削材の歪挙動を直接観察する方法を考案した。そして、この方法を用いて延性材切削中の刃先前方の歪分布と後方で生ずる歪分布および切削後の残留歪成分をそれぞれ分離し、切削時の被削材の歪挙動および歪残留の機構について明らかにした。

更に、切削加工面即ち歪勾配のある硬化面および一

*久留米工業大学 機械工学科

**生産機械工学科

様に歪硬化した被削材についてもそれぞれ実験を行い、その切削歪挙動は延性材無歪加工とは異り、弾性切削状態に近いことを明らかにした。

以上の結果について述べる。

2. 解析方法

被削材を連続体とみなせる加工単位即ち、結晶粒の影響を考慮しなくて良い範囲の切込み深さで二次元切削をする場合の被削材について考える。

この時、被削材に生ずる応力状態は、マクロ的に見れば、まっすぐな自由境界の任意の点に集中力が作用する場合に相当する。被削材が弾性材であれば、その内部に生ずる応力はFlamant¹⁶⁾によって示されたように、単純半径応力分布を示し、半径方向応力 σ_r 、接線方向応力 σ_θ 及び剪断応力 $\tau_{r\theta}$ のそれぞれの応力成分は、 $\sigma_r = -2P/\pi \cdot \cos\theta/r$, $\sigma_\theta = 0$, $\tau_{r\theta} = 0$ であらわされる。

ここでPは切削力、rは被削材内の任意の点の刃先よりの距離、 θ はPの方向より時計回りに計った任意の点の位置の角度とする。

一方、延性材のように塑性変形をする被削材の場合は、直接応力状態を知ることができないが、光弾性皮膜法を用いると、下地金属の塑性域での切削歪を求めることができる。

被削材に光弾性皮膜を接着した後、二次元切削すると、被削材に歪を生ずるが、この歪は接着皮膜の歪と等しい。下地金属が塑性状態であっても接着皮膜は弾性皮膜であるから光弾性装置を用いて皮膜の光弾性稿を観察すれば、下地の被削材の歪状態を知ることができる。

光弾性皮膜材を接着した被削材を切削すると、切削瞬間の歪は放射状分布であることが観察される。この時の接着皮膜の主歪を ε_r , ε_θ , 下地の主歪を ε'_r , ε'_θ , 光弾性稿次数をN, 主歪差感度を β , 皮膜厚さをdとすれば、Nは $N = 2d\beta(\varepsilon_r - \varepsilon_\theta) = 2d\beta(\varepsilon'_r - \varepsilon'_\theta)$ で示される。従ってNを知ることができれば下地金属の主歪差が求まる。最大せん断応力説に従う材料については、主歪差の値とその方向を知ることにより、その材料のせん断応力を説明できる。

また、皮膜の主歪差感度は被削材と同一材料の帯板試験片に皮膜を接着して単軸引張り試験を行い、得られたN \sim ε 関係特性より求めることができる。

3. 実験方法

3.1 切削実験

本実験では光弾性皮膜法を用いて二次元切削中の被削材歪を観察測定した。工作機械には、マシニングセンターを用い、実験の際にはスピンドルの回転を固定しコラムの前後送りで切削した。その概要をFig. 1に示した。また、被削材に接着した皮膜の等色線及び等傾線はFig. 2に示す光弾性実験装置を用いてカメラで記録した。

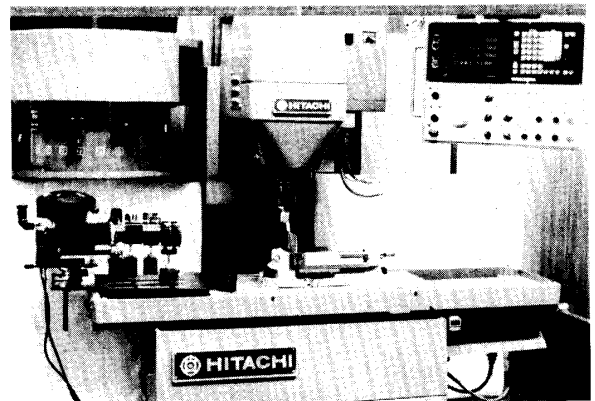


Fig. 1 View of Experimental Apparatus

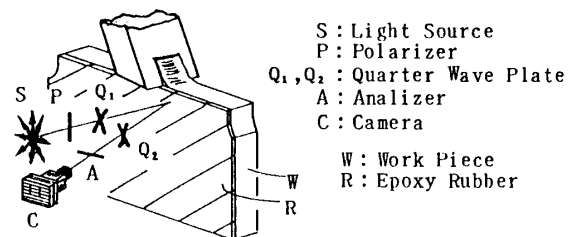


Fig. 2 Photoelastic Coating Method

被削材には、アルミ材JIS 1070, 熱処理Oを用い、厚さ3mmの平板よりFig. 3の寸法形状に切り出し加工したものを用いた。また、無歪材として用いる被削材には、切り出しに伴う加工歪を除去するために、全て加工後に570K, 4時間保持後炉冷の焼きなましを行った。

一樣な加工硬化を受けた被削材の切削実験には、同一材料にあらかじめ単軸引張りを与えたのち、Fig. 4に示したように、引張軸方向に対し0°, 45°, 90°方向の切削面をもつ被削材を切り出して用いた。

工具は、SKH-4の完成バイトを、すくい角30°, にげ角5°, ノーズ半径2 \sim 3 μ に仕上げて用いた。

実験は乾式で行い、切削の都度、工具をエタノールで脱脂し、油膜介在の影響をさけた。切削条件は、切

込量0.1mm, 切削速度0.5mm/minを用い, 室温293K(±0.5K)で実験した. 切削中の被削材温度は, 放射温度計により連続測定し, 切削温度の変化に配慮した.

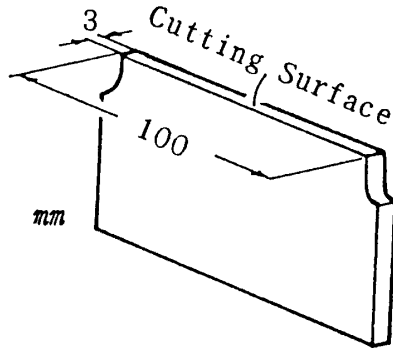


Fig. 3 Schematic Sketch of Workpiece

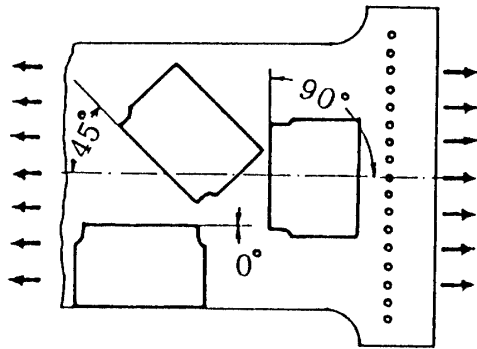


Fig. 4 Cutting Plan of Workpiece hardened by pure Tensile Strain

3.2 歪測定

歪測定に用いた光弾性皮膜材には, エポキシラバー 100, 100, 8 厚さ1mmを使用した.

切削中の被削材にあらわれる刃先前後の等色線には, 刃先前方に生ずる等色線の残留成分と, 刃先直後に生ずる等色線成分が重複しているが, これを分離し, 切削瞬間の刃先前後の等色線を得るために, あらかじめ同一条件で被削材中央部まで切削し途中急停止した被削材に皮膜を接着し, 再度停止位置より切削を開始した直後の記録を取った.

また, 切削により加工硬化した面を重複切削する際の切削歪の状態は, 前加工を行った後に皮膜を接着し, その後重複切削した時の等色線及び等傾線により求めた. これらの被削材の製作手順は, Fig. 5に示した.

被削材に接着した光弾性皮膜材の $N \sim \epsilon$ 特性は, 皮膜を接着したアルミ帯板試験片の単軸引張実験により求めた.

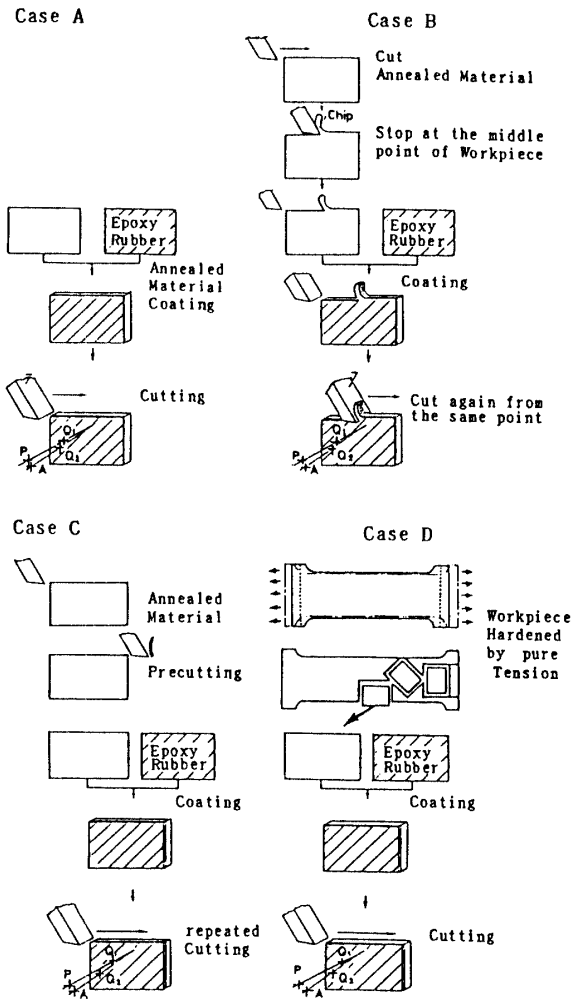


Fig. 5 Flow Chart of Experimental Process

4. 実験結果および考察

無歪材切削中の被削材接着皮膜等色線及び切削後の被削材皮膜に残留する等色線をFig. 6及びFig. 7に示した. 図に於て, 刃先より前方の等色線即ち最大剪断歪は, 刃先点に最も高い次数を有する円弧状の分布を示している. さらに, 刃先直下ではややくびれが生じ, 刃先後方がわずかに脹んだ後徐々に減少している.

加工後の残留等色線は, 切削面に平行な稿となって残留している. しかし, 刃先直後の等色線には, 刃先前方で生じた歪の残留成分と刃先直後の切削歪成分とが重複してあらわれている. そこで刃先直後の切削中の歪成分を知るために, 無歪材の切削を途中で急停止し, その後に皮膜を接着した被削材を用いて停止した位置から切削を再開した直後の皮膜等色線をFig. 8に示した. このとき刃先より後方に生じた等色線は, 刃

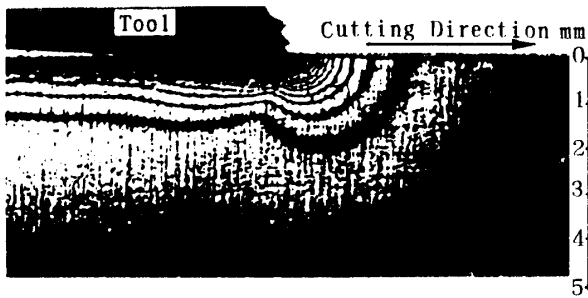


Fig. 6 Isochromatics during a Cutting in case of A

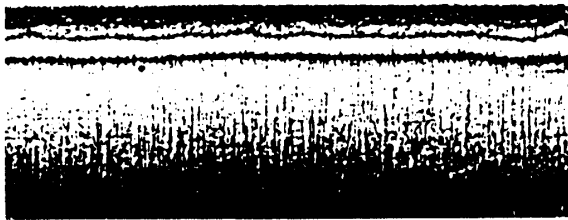


Fig. 7 Isochromatics after a Cutting in case of A

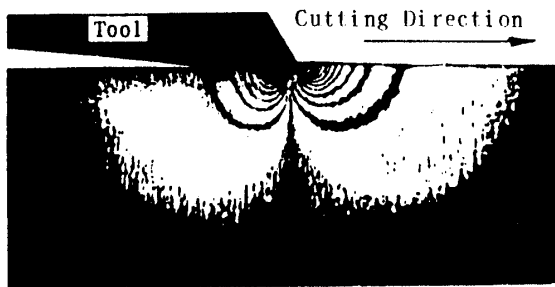


Fig. 8 Instantaneous Isochromatics at the moment of Cutting in case of B

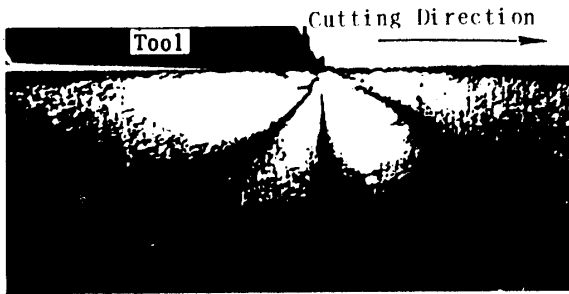


Fig. 9 Instantaneous Isoclinics at the moment of Cutting in case of B ($\theta=30^\circ$)

先前方の等色線の残留成分を含まない切削瞬間の最大剪断歪の分布を示している。

また同時に求めた等傾線の一例を $\theta=30^\circ$ の場合についてFig. 9に示した。中立軸の位置の0次の稿と、 $\theta=30^\circ$ の直交する2本の等傾線が刃先点より放射状に出ているのがわかる。全く同様にして $\theta=0^\circ$ より $\theta=90^\circ$ までの等傾線も求められる。これらの等傾線より切削中の被

削材内の主歪 ϵ_r' あるいは皮膜の主歪 ϵ_r の方向は、刃先を原点とする単純放射状分布であることがわかる。

このようにして求めた切削瞬間の被削材内主歪線図をFig. 10に示した。さらにこの主歪線図より得られた切削中のある瞬間の被削材内最大剪断歪線図即ち剪断流線をFig. 11に示した。

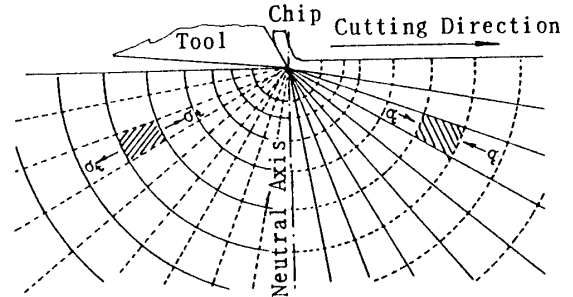


Fig. 10 Principal Strain Trajectory in the moment of Cutting in case of B

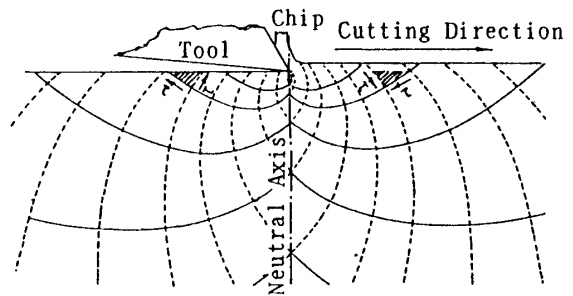


Fig. 11 Maximum Shearing Strain Trajectory in the moment of Cutting in case of B

これらの結果より、切削中のある瞬間の被削材内歪分布は、刃先点を通る中立軸を境に、刃先前方で刃先点方向の単純圧縮、後方で刃先点方向の単純引張りによる歪が生じ、最大剪断歪の方向は刃先の前後で逆転していることがわかる。

即ち、被削材は刃先の移動とともに刃先前方の位置では刃先点方向の単純圧縮を受け、刃先が通り過ぎると逆に刃先点方向の単純引張りを受ける。その結果、刃先の前後における被削材の最大剪断歪による向きは逆転する。

これらの事は、後述の加工硬化材切削の場合の実験結果からも全く同様に示される。

次にFig. 12には中立軸より前方にFig. 6即ち無歪材切削中の刃先より前方の等色線の分布を、後方にはFig. 8即ち刃先より後方の切削瞬間の等色線分布を同時に示した。更にFig. 7に示した切削後の残留等色線を並べて示した。

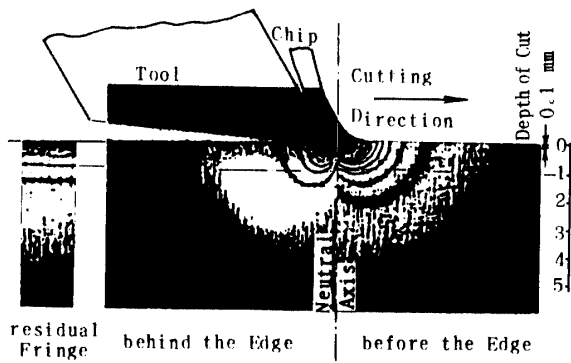


Fig. 12 Composed Instantaneous Isochromatics before and behind the Cutting Edge, and residual One

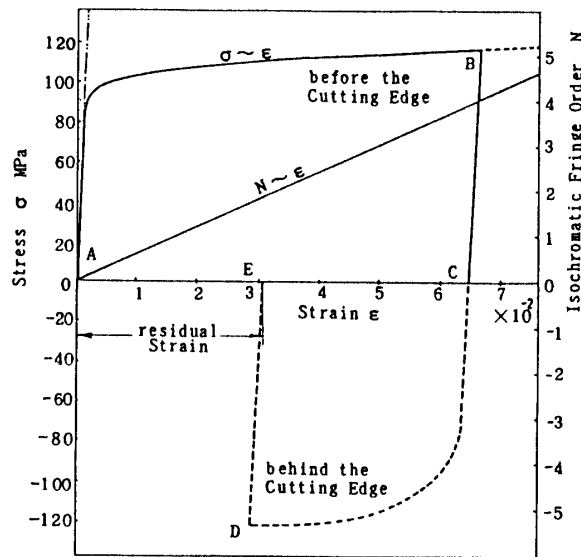


Fig. 13 Behaviour of Cutting Strain in Ductile Material (Relation between N & ϵ , σ & ϵ)

また、Fig. 13には被削材と同一アルミ材に皮膜を接着した帯板試片の単軸引張り実験によって求めたアルミ材 $\sigma \sim \epsilon$ 特性及び接着皮膜 $N \sim \epsilon$ 関係特性を示した。一般に、焼きなましたアルミ等の延性材について、単軸圧縮特性は引張り特性とほぼ等しいとして取扱われるので、ここでは同一に扱った。

Fig. 13では、横軸に主歪差、縦軸に等色線稿次数及び応力をあらわし、横軸より上方に圧縮領域下方に引張り領域を示した。

切削によって生ずる被削材内部の歪挙動をこれらの図を用いて説明すると、被削材内部の或る点たとえばFig. 12, 13に於て被削材表面より深さ1mmの位置の或る点が切削によって受ける歪変化は、刃先が無限遠方にある時は0であるが、刃先の接近とともに刃先点

方向の単純圧縮を受け、これによる歪が増加しFig. 13のAからBへと歪硬化する。

更に刃先点を通る中立軸近傍で急激に除荷の状態Cとなり、刃先が通過した中立軸直後では逆に急激な刃先点方向の単軸引張りを受けて図中の逆方向歪C→Dの変化をたどる。しかし歪硬化のために、刃先より後方で生ずる歪の方が前方で生ずる歪より小さいために刃先が遠のいた切削後には、歪は0とならずにE点に相当する値が残留することになる。

このとき、単純引張りあるいは圧縮の軸方向は刃先の移動にともない変化する。そこで同一材料を用いてこれと同様の軸変化を与えた単軸引張り試験を行い、その結果をFig. 14に示した。これより軸方向の変化が応力～歪特性に及ぼす影響は5%以下である事がわかった。

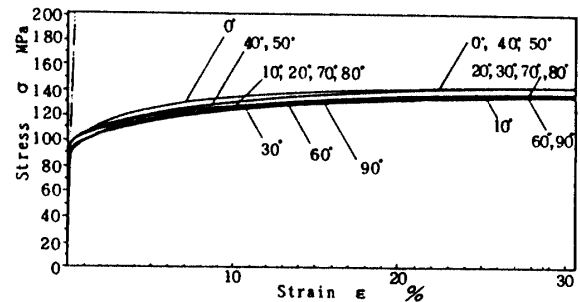


Fig. 14 Relations between σ and ϵ , obtained by Tension Test of Strain Hardening Material, plotted for Strain Oriented Angle as parameter

また、軸方向の変化が $\sigma \sim \epsilon$ 特性に与える影響が大きい場合、切削中に生ずる等色線は円形分布とならずにゆがんだ形状分布になると思われるがFig. 12では、ほぼ円形に近いと認められた。従ってFig. 13に示した特性図では軸方向の変化について考慮していない。

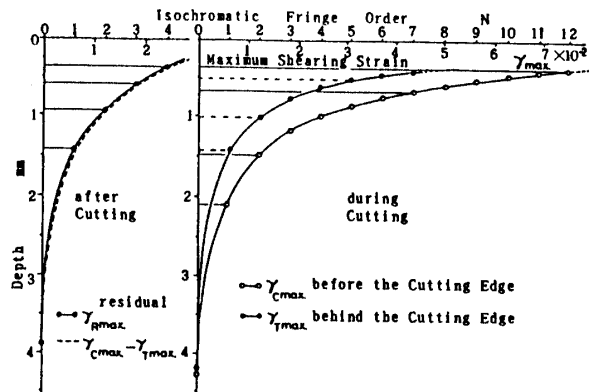


Fig. 15 Maximum Shearing Strain Distribution against the Depth below Cutting Surface, in Ductile Material

Fig. 12, 13より求めた切削中の刃先より前方, 後方及び残留の最大剪断歪の最大値をそれぞれ $\gamma_{C \cdot \max}$, $\gamma_T \cdot \max$, $\gamma_R \cdot \max$ とすると $\gamma_{C \cdot \max}$, $\gamma_T \cdot \max$, $\gamma_R \cdot \max$ 及び $\gamma_{C \cdot \max} - \gamma_T \cdot \max$ の深さ方向分布をFig. 15に示した.

図より明らかなように残留等色線より求めた $\gamma_{C \cdot \max}$ 分布と $\gamma_{C \cdot \max} - \gamma_T \cdot \max$ の分布は良く一致している. 図よりたとえば深さ1mmの位置の点が切削によって受ける歪変化は, 刃先前後で $N_C=4$, $N_T=2.1$ に相当する最大剪断歪が生じ被削材に残留する最大剪断歪は $N_C - N_T=4-2.1=1.9=N_R$ 即ち $\gamma_R=3.1 \times 10^{-2}$ となる. このように残留歪の値は定量的に求めることができる. また残留歪の値は残留等色線から直接求めることができる.

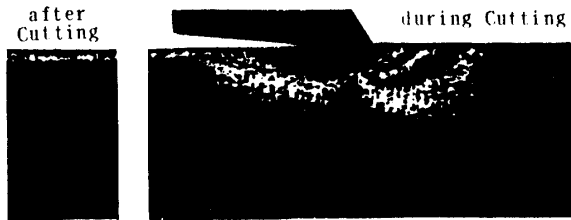


Fig. 16 Isochromatics in case of C



Fig. 17 Isochromatics in case of D, Strain Oriented at 0°

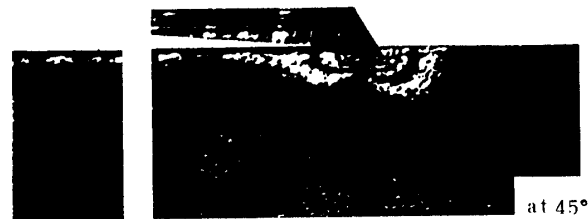


Fig. 18 Isochromatics in case of D, Strain Oriented at 45°

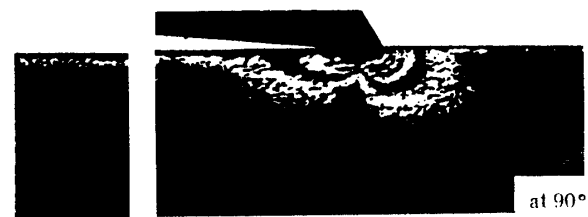


Fig. 19 Isochromatics in case of D, Strain Oriented at 90°

次に, 切削によって加工硬化した材料即ち, 切削面が最大となる勾配を有する歪が残留している被削材を切削した場合の切削中及びその残留の等色線をFig. 16に示した. 前加工によって加工硬化した材料を更に重ねて切削したときの後加工によって生じた歪状態を示している. 一般に, 切削加工は一度の切削で仕上げる場合は少なく, ほとんどの加工では荒削り, 中仕上げ削り, 仕上げ削りなど重複切削される. このような被削材の切削時の歪状態は, Fig. 16に示す通り無歪材の初回切削の場合と異り, むしろ弾性材切削状態に近いことがわかる. ただし, 縞の勾配は弾性材の場合と異なる.

このときの切削後の残留等色線より明らかなように, 重複切削に於て後加工によって残留する歪は無歪材初回切削に比べてごくわずかである.

Fig. 17, 18, 19には, 一様な加工硬化を受けた材料即ち単軸引張り20%の歪硬化材を用いて引張り軸方向に対し0°, 45°, 90°方向にそれぞれ切削したときの切削中及び残留の等色線を示した.

板取り方向によって多少の形状差はあるが, 上述の切削加工硬化材と同様に, 無歪材切削時に比べて弾性的な縞であることがわかる. 特に, 0°方向に切削した場合は重複切削時の縞と良く似ている. 45°方向が最も円形分布に近づいている. しかし, いずれの場合も, 加工硬化を受けて材料に方向性を持つ歪硬化材の場合は無歪材切削時に比べて切削中の等色線縞の形状は,

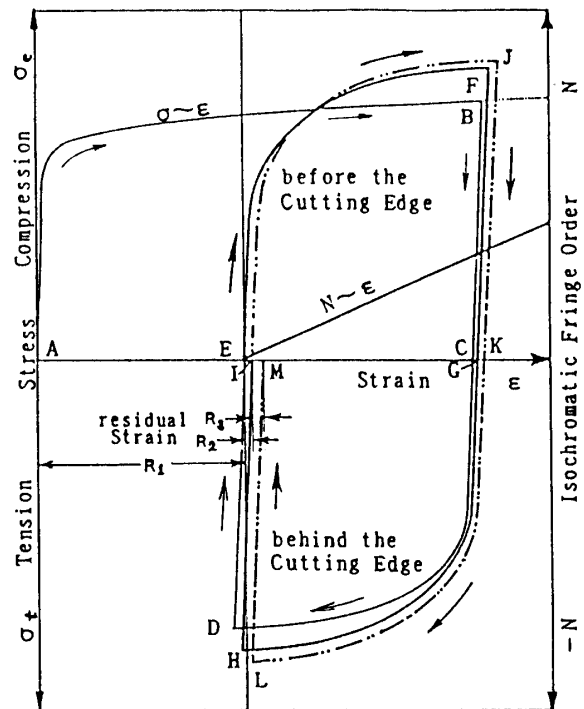


Fig. 20 Behaviour of Cutting Strain in Strain Hardening Material

わずかであるがいびつになっている。従って加工硬化度が大きい材料について切削歪を定量的に求める場合には、材料の方向特性をも考慮に入れる必要があると思われる。

残留等色線については、20%歪硬化材のいずれの方向も残留値はわずかである。

加工硬化材を切削した時の被削材内歪挙動をFig. 20に示す特性図を用いて説明すると、皮膜接着以前にあらかじめAEの歪を持つ材料であるからこの材料に皮膜を接着した後、切削すると切削による歪は、刃先前方の圧縮領域でEFG、後方の引張り領域でGHIの経過をたどり、新たに残留する歪はEIとなり、ごくわずかな歪が増加することになる。これは、前述の等色線による結果と一致する。

また、同一条件で更に重複切削を繰り返す場合の被削材内歪変化は、図中に於て二点鎖線で示したようにIJKLMの歪サイクルを繰り返すことになる。

5. 結 論

皮膜法を用いた二次元切削実験により次の事が明らかとなった。

- (1)延性材切削中の被削材内歪挙動を明らかにし、残留歪の値を定量的に求めることができた。
- (2)加工硬化材切削の場合の被削材内歪挙動を明らかにし、無歪材切削時よりも弾性切削に近い挙動を示すことがわかった。

参 考 文 献

- 1) 白井, 牧野: 精密機械, 33-4 (1967), 245.
- 2) K. Iwata, K. Ueda: Proc. Inter. Conf. on Produc. Eugg., 1 (1974), 516.
- 3) 垣野: 精密機械, 37-7 (1971), 503.
- 4) 白樫, 白井: 精密機械, 42-5 (1976), 340.
- 5) 三木: 光弾性学要論 (1974) pp.79~85, 143~151.
- 6) 三木, 隈部: 昭和56年度精機学会秋季大会学術講演論文集, No. 2.
- 7) 三木, 隈部: 昭和57年度精機学会秋季大会学術講演論文集, No. 3.
- 8) 三木, 隈部: 日本光弾性学会第3回研究発表講演会講演論文集, No. 3 (1981).
- 9) 三木, 隈部: 日本機械学会講演論文集, No. 810-13.
- 10) 三木, 隈部: 日本光弾性学会第4回研究発表講演会講演論文集, No. 4 (1982).
- 11) 三木, 隈部: 日本光弾性学会第5回研究発表講演会講演論文集, No. 5 (1983).
- 12) 三木, 隈部, 山本: 日本光弾性学会第6回研究発表講演会講演論文集, No. 6 (1984).
- 13) 三木, 隈部, 山本: 日本光弾性学会第7回研究発表講演会講演論文集, No. 7 (1985).
- 14) 三木, 隈部, 山本: 日本光弾性学会第8回研究発表講演会講演論文集, No. 8 (1986).
- 15) 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.
- 16) Flamant: Compt. Rend., Vol. 114, p.1465, 1892, Paris.

(昭和62年4月8日受理)